



29-31
МАЯ 2024
 Москва



**XXVII Международная
 научно-техническая конференция
 по фотоэлектронике и приборам
 ночного видения**

**МАТЕРИАЛЫ
 КОНФЕРЕНЦИИ**



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ
 И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
 РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



Российский
 научный
 фонд



**XXVII Международная научно-техническая конференция
по фотоэлектронике и приборам ночного видения
29-31 мая 2024 г. • Москва, Россия**

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

**Государственный научный центр Российской Федерации
Акционерное общество «НПО «Орион»
Москва, 2024**

УДК 621.383
ББК 32.854
М 34

М 34 Материалы XXVII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М.: АО «НПО «Орион», 2024 г. – 485 с. ISBN 978-5-94836-696-8

Государственный научный центр Российской Федерации АО «НПО «Орион» раз в 2 года проводит Международную научно-техническую конференцию по фотоэлектронике и приборам ночного видения. В конференции принимают участие специалисты отечественных и зарубежных организаций, связанных с разработкой и производством изделий фотоэлектроники, приборов ночного видения, тепловизионной техники и смежных отраслей. Данный сборник содержит материалы докладов, представленных на XXVII конференции, состоявшейся 29-31 мая 2024 г.

Для специалистов – инженеров и научных работников, специализирующихся в области разработки и применения изделий фотоэлектроники и оптико-электронных систем, а также для преподавателей, студентов и аспирантов соответствующих специальностей вузов.

Материалы Конференции публикуются в авторской редакции.

УДК 621.383
ББК 32.854

© АО «НПО «Орион»

ISBN 978-5-94836-696-8

СОДЕРЖАНИЕ

Пленарные доклады	24
1. <i>Бурлаков И.Д., Старцев В.В.</i> Современное состояние и направления развития фото- и оптоэлектроники инфракрасного диапазона в ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»	24
2. <i>Пономаренко В.П., Попов В.С., Бурлаков И.Д., Старцев В.В., Попов С.В.</i> Квантовая фотосенсорика и материалы ограниченной размерности	27
3. <i>Якушев М.В., Аксенов М.С., Варавин В.С., Васильев В.В., Журавлев К.С., Макаров Ю.С., Марчишин И.В., Преображенский В.В., Ремесник В.Г., Сабина И.В., Сидоров Г.Ю., Сидоров Ю.Г., Латышев А.В.</i> Развитие технологии охлаждаемых матричных ИК фотоприемников в ИФП СО РАН	30
4. <i>Татаурицков С.С., Вязников А.Н.</i> Состояние и перспективы создания кремниевых фотоприемников, освещаемых с обратной стороны подложки (back-side) в АО «ЦНИИ «Электрон»	33
5. <i>Чурилов С.М., Алдохин П.А., Гладков Р.А., Голицын А.В., Голицын А.А., Кузнецов С.А., Кремис И.И., Лебедев А.О., Новгородов Б.Н., Новоселов А.Р., Паулиш А.Г., Сейфи Н.А., Турбин А.В., Хрящев С.В., Шапор П.И., Шатунов К.П.</i> Перспективные технологии приборов оптического, инфракрасного и миллиметрового диапазона в Филиале ИФП СО РАН «КТИПМ»	37
6. <i>Альков П.С., Балясный Л.М., Грузевич Ю.К., Гордиенко Ю.Н., Чистов О.В., Широков Д.А.</i> Применение оптико-телевизионной лазерной активно-импульсной системы (АИС) технического зрения робототехнических комплексов (РТК) воздушного, наземного и подводного применения	40
7. <i>Яковлев Ю.П., Шутаев В.А., Гребеницкова Е.А., Сидоров В.Г.</i> Генерация тока в фотодиодах Шоттки Pd/InP в атмосфере водорода	44
8. <i>Попов В.С., Пономаренко В.П., Попов С.В.</i> Квантовые точки и новое поколение ИК-фотосенсорика на их основе	47

9. Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Ужаков И.Н., Ремесник В.Г. 49
Низкоразмерные структуры на основе HgCdTe для физических исследований и приборных применений
10. Карпов В.В., Козырев М.Е., Кузнецов С.А., Марущенко А.В., 51
Прошкин Ю.Н., Сусов Е.В., Чижко В.Ф. Опыт АО «МЗ «САПФИР» в разработке охлаждаемых фотоприемных устройств
11. Болтарь К.О., Бурлаков И.Д., Головин С.В., Старцев В.В., 54
Яковлева Н.И. Инфракрасная радиометрия на основе многорядных фотоприемных устройств для дистанционного зондирования Земли
12. Шуклов И.А. Новые прекурсоры халькогенов для получения 56
коллоидных квантовых точек селенидов и теллуридов
13. Холоднов В.А. Возможность фотоэлектрического тока в однородных 58
полупроводниках при отсутствии внешнего электрического поля
- Устные доклады** 61
14. Мирофьянченко А.Е., Мирофьянченко Е.В. Развитие и применение ИК 61
МФПУ на основе антимонидов, работающих при повышенных температурах
15. Ковшов В.С., Яковлева Н.И. Спектральные и фотоэлектрические 63
характеристики МФПУ средневолнового ИК диапазона на основе барьерных структур с поглощающим слоем InAsSb
16. Власов П.В., Болтарь К.О., Лопухин А.А., Ерошенков В.В. 65
Низкочастотные шумы в МФПУ на основе антимонида индия с различной кристаллографической ориентацией
17. Конча М.И. Актуальность и организация проведения 68
реставрационных работ фотоприемных модулей
18. Панин Г.Н., Капитанова О.О. Фотомемристорные сенсоры для 71
автономных систем зрения на основе низкоразмерных материалов

19. *Чельшиков С.Н., Аввакумов Р.А., Егоренков А.А., Татаурициков С.С.* 73
Фотоприемник SWIR излучения на основе коллоидных квантовых точек PbS и линейного фоточувствительного прибора с переносом заряда
20. *Ременный М.А., Климов А.А., Кунков Р.Э., Лухмырина Т.С., Матвеев Б.А., Усикова А.А.* 76
Поверхностно облучаемые фотодиоды для спектральной области $\lambda=2\div 4.5$ мкм на основе ДГС N-InAsSbP/InAs(Sb)/P-InAsSbP
21. *Дудин А.Л., Богословская Л.С., Кацавец Н.И., Куликов В.Б., Маслов Д.В., Чалый В.П.* 78
Контроль плотности дефектов QWIP гетероструктур в АО «Светлана-Рост»
22. *Давлетшин Р.В., Болтарь К.О., Терентьев Д.С.* 82
Исследование спектральных характеристик QWIP фотоприёмников
23. *Ларионов Н.А., Кузнецов П.А., Якимов Ю.А., Кузнецов А.Н.* 84
Перспективные БИС считывания с аналого-цифровым преобразованием на кристалле
24. *Демьяненко М.А., Марчишин И.В., Щеглов Д.В., Старцев В.В.* 86
Микроболометрические приемники постоянного и импульсного терагерцового излучения
25. *Куницына Е.В., Пивоварова А.А., Слипченко С.О., Подоскин А.А., Андреев И.А., Пухтин Н.А., Ильинская Н.Д., Яковлев Ю.П.* 89
Неохлаждаемые быстродействующие фотоприемники мостиковой конструкции для средней ИК области спектра
26. *Соколов К.В., Попов В.К., Москвичев В.Ю., Бетрозов С.Б., Ерастов Д.А., Солодков А.А., Худаяров З.Ф., Шилейко Н.А., Марасин О.Д., Виноградов А.Ю., Гердт А.Д.* 92
Отработка отечественной технологии формирования термочувствительных пленок на основе VOx для обеспечения серийного производства матричных микроболометрических приемников

27. Семенов А.Н., Нечаев Д.В., Алексеев П.А., Буренина Д.С., Смирнова И.П., Задиранов Ю.М., Кулагина М.М., Трошков С.И., Шмидт Н.М., Лихачёв А.И., Калиновский В.С., Контрош Е.В., Прудченко К.К., Нагорный А.В., Вайнилович А.Г., Луценко Е.В., Жмерик В.Н. Солнечно-слепые фотодиоды Шоттки на основе AlGaIn, выращенные методом ПА-МПЭ 95
28. Винецкий Ю.Р., Кривоклякин Г.Д. Насколько полно ИК-система реализует режим VLIP: простой и робастный метод измерения числа электронов в зарядовом пакете пикселя 98
29. Винецкий Ю.Р., Титов А.Г., Юрочкин Г.А. Всеракурсные индикатрисы силы излучения воздушного объекта: методика измерений и научная визуализация 100
30. Агринский М.В., Клишкин Н.А., Серов В.В., Шаров А.А. Анализ возможностей регистрации изображений в дальней инфракрасной области спектра. 102
31. Бобков А.А., Гаранин С.Г., Жуков И.В., Зыков Л.И., Климов А.Н., Лебедев В.А., Копалкин А.В., Rogozin A.A., Смышляев С.П., Сундюков А.Ю. Исследования по применению камеры спектрального диапазона 3-5 мкм для визуализации космических объектов в тени земли 104
32. Аввакумов Р.А., Егоренков А.А., Пашук А.В., Чельшиков С.Н. Гибридный телевизионный прибор с GaAs фотокатодом 106
33. Шалдырван И.В., Комаров В.В., Фокин М.Ю. Многофункциональная система ночного и дневного видения 109
34. Куролес А.С., Юдовская А.Д., Хамидуллин К.А., Попов В.С., Пономаренко В.П. Модульная конструкция прибора ночного видения на основе матричного фотоприемного устройства из коллоидных квантовых точек 111
35. Терещенко О.Е., Шугаров А.С., Шайблер Г.Э., Бакин В.В., Сичевский С.Г., Шмагин В.Е., Русецкий В.С., Голяшов В.А., Рожков С.А., Хорошилов В.С., Альперович В.Л., Дёмин А.Ю. УФ электронно-оптические преобразователи для астрофизических исследований 113

36. *Русецкий В.С., Исхакзай Р.М.Х, Коптилов А.В., Кислых Н.В., Мараховка И.И., Демин А.Ю.* Современные электронно-оптические преобразователи с мультищелочным фотокатодом 115
37. *Кулов С.К., Самканашвили Д.Г., Бекузаров Т.В.* Перспективы освоения микроканальных пластин нового поколения для техники ночного видения 117
38. *Альков П.С., Балясный Л.М., Бриллиантов В.Д., Грузевич Ю.К., Филиппов Н.А.* Микроканальная пластина с повышенной долговечностью для ЭОП III поколения 119
39. *Альков П.С., Балясный Л.М., Бриллиантов В.Д., Грузевич Ю.К., Корначева Н.Л., Юрасова Е.В., Кулов С.К., Алкацева Т.Д., Самканашвили Д.Г.* Дефекты микроканальных пластин, влияющие на чистоту поля зрения электронно-оптических преобразователей III поколения 122
40. *Альков П.С., Балясный Л.М., Бриллиантов В.Д., Грузевич Ю.К., Филиппов Н.А., Пестов А.Е., Михайленко М.С.* Увеличение эффективной площади каналов МКП ионным травлением 125
41. *Альков П.С., Балясный Л.М., Грузевич Ю.К., Мартыненко И.А., Чистов О.В., Широков Д.А., Егоренков А.А., Пашук А.В.* Двухспектральное оптико-электронное устройство для обнаружения пятна лазерного дальномера (ЛЦД) на удаленном объекте 128
42. *Миронов А.И., Кулебякин С.Д., Навасардян Е.С., Нисан А.В., Филимонов А.С., Алекперов Э.С.* Создание квазипористых структур на основе минимальных поверхностей для микроканальных теплообменных аппаратов и поверхностей, рассеивающих теплоту 131
43. *Архипов С.С., Козырев М.Е., Чиж К.В.* Методика измерения теплофизических параметров криостатов охлаждаемых ФПУ 135
44. *Бурлаков В.И., Гапонов О.В., Морковников Н.И., Власова О.И., Хрущев А.О.* Исследование теплофизических характеристик инфракрасных фотоприёмных устройств с цифровыми и аналоговыми фотомодулями 137

45. *Скрипачева Л.В., Хафизов Р.З.* Измерение функции передачи модуляции инфракрасных объективов с использованием микроболометрических матричных детекторов 140
46. *Солодков А.А., Попов В.К., Москвичев В.Ю., Бетрозов С.Б., Ерастов Д.А., Соколов К.В., Худаяров З.Ф., Шилейко Н.А.* Методический подход к оценке термоупругих свойств микроболометрических приемников мембранного типа 145
47. *Петров С.И., Алексеев А.Н.* Разработка эпитаксиального и планарного оборудования для материалов A^3B^5 - переход от R&D к производственно-ориентированному уровню 148
48. *Семенча А.В., Вибе Д.В., Мелконян П.С., Клинков В.А.* Трёхкоординатный робот для монтажа оптических элементов 150
49. *Якушенков П.О.* Самофокусировка излучения, как коллапс волнового вектора 153
50. *Яковлев В.О., Сапцова О.А., Короннов А.А., Попов В.С.* Исследование фотосенсорных характеристик фотоприемников средневолнового ИК-диапазона на основе ККТ 156
51. *Просвириков В.М., Шамаев А.М., Дунаев А.Ю.* Результаты определения терморadiационных характеристик на рефлектометрах «РС-К» и «РИ-К» материалов космических аппаратов 158
52. *Седегова Т.Ю., Клинков В.А., Арчелков В.Б.* Оптические свойства стёкол $Al_2O_3-Na_2O-La_2O_3-P_2O_5-CeO_2$ 161
53. *Дунаев А.Ю., Пугачёв В.С., Павлович М.Н.* Метрологическое обеспечение измерений энергетической освещенности в широком диапазоне длин волн 164
54. *Дёмин А.В.* Использование меры качества квантового состояния для оценки источников фотонов в протоколах защищенных каналов связи, основанных на поляризационно-запутанных фотонных парах 166
55. *Мингалев А.В., Габдуллин И.М., Буркин Д.Ю., Савин Д.Е., Батавин М.Н., Шушарин С.Н.* Стенд измерения параметров многоэлементных фотоприемных устройств 168

56. Колосовский Д.А., Бекреева Д.В., Залялов Т.М., Пономарев С.А., 171
Шухов Ю.Г., Морозов А.А., Старинский С.В. Напыление
сверхтонких пленок золота методом импульсной лазерной абляции
на подложки кремния и кварца
57. Ступак М.Ф., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Макаров С.Н., 173
Елесин А.Г. Локальные измерения слабых напряжений на
поверхности структур (013) HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs с помощью
генерации второй гармоники
58. Краснова И.А., Закиров Е.Р., Сидоров Г.Ю. Изучение 176
электрофизических характеристик границы раздела HfO₂/HgCdTe с
различной обработкой поверхности методом PE-ALD
59. Иродов Н.А., Болтарь К.О., Лопухин А.А., Акимов В.М. 178
Исследование гибридизации матричных фотоприемных устройств
на установке с автоколлиматором
60. Мирофьянченко Е.В., Ким А.С., Тальвеже В.В., Попов М.А., 182
Еремкин Н.В., Мирофьянченко А.Е., Ильинов Д.В., Попов В.С.,
Пономаренко В.П. Процессы фотолитографии для изготовления
матричных фоточувствительных структур из коллоидных квантовых
точек на основе сульфида свинца
61. Шишигин С.Е., Лопухин А.А., Пермикина Е.В., Мирофьянченко Е.В., 184
Мирофьянченко А.Е., Таубес Е.В. Структурный массив фотодиодов с
изменяемой площадью для определения качества пассивации в
МФПУ на основе InSb
62. Некрасов Г.И., Шаров А.А., Болтарь К.О., Кортаев Е.Д., 187
Дектерева Е.Д., Кулеш А.В., Гурьев Д.И. Моделирование,
исследование и оптимизация параметров микрокриогенных систем
Стирлинга
63. Банников М.В., Шаров А.А., Терентьев Д.С., Некрасов Г.И. 189
Технологические решения для серийного производства газовых
микрокриогенных машин Стирлинга
64. Чехович В.А. Численный эксперимент для оценки оптимальной 192
вольтметрической схемы криогенной газовой машины Стирлинга с
пульсационной трубой

65. Трофимов А.А., Козлов Р.Ю., Кривобок В.С., Улькаров В.А., 197
Молодцова Е.В., Павлов П.В., Павлова О.С., Косякова А.М.,
Комаровский Н.Ю., Нестюркин М.С., Клековкин А.В., Минаев И.И.,
Ерошенков В.В., Атрашков А.С., Ковин Я.А. Базовая технология
полирования пластин InSb для эпитаксиального роста
фоточувствительных материалов методом МЛЭ
66. Трофимов А.А., Денисов И.А., Андрусев Ю.Б., Гришечкин М.Б., 201
Царегородцев Д.О., Косякова А.М., Антонова В.Е., Гладышева К.А.
Подложки CdZnTe для эпитаксиального выращивания твердых
растворов A^2B^6 методом МЛЭ
67. Козлов Р.Ю., Трофимов А.А., Молодцова Е.В., Павлов П.В., 204
Павлова О.С., Нестюркин М.С., Щеников Н.В. Разработка
промышленно-ориентированной технологии изготовления
полированных пластин InSb диаметром до 100 мм
68. Комаровский Н.Ю., Молодцова Е.В., Журавлев Е.О., Козлов Р.Ю., 207
Князев С.Н. К вопросу о канальной неоднородности в
монокристаллах InSb(Te), выращенных в различных
кристаллографических направлениях
69. Сатункин Г.А., Наумов А.В. Некоторые тенденции развития 210
технологий выращивания объемных кристаллов фотоники
70. Малыгин В.А., Косякова А.М., Гончаров А.Е., Гладышева К.А., 212
Кулаковская Т.В., Топиков Д.В., Трофимов А.А. Исследование 100 мм
пластин Ge, предназначенных для эпитаксиальных процессов
71. Кривобок В.С., Ерошенко Г.Н., Минаев И.И., Клековкин А.В., 216
Савин К.А., Гончаров А.Е., Муратов А.В., Дубовая А.Р.,
Николаев С.Н. Структурные и оптические свойства InAs/GaSb
сверхрешеток полученных методом молекулярно-лучевой
эпитаксии
72. Николаев С.Н., Екимов Е.А., Усманов И.И., Кондрин М.В., 219
Чернопицкий М.А., Кривобок В.С. Спектроскопия сульфидов олова
и европия, синтезированных при высоком давлении

73. Григорович А.П., Кулаковская Т.В., Шиманский А.Ф., Каплунов И.А., Васильева М.Н. Исследование влияния постростового отжига на дислокационную структуру кристаллов германия 222
74. Гришаков К.С., Васильевский И.С. Моделирование и оптимизация электрооптического эффекта в модуляторе Маха-Цендера на технологической платформе InP 224
75. Хакимов К.Т., Королева Т.В., Миленкович Т., Сапцова О.А., Яковлев В.О., Шуклов И.А., Попов В.С. Исследование влияния различных бром-содержащих компонентов при получении чернил ККТ HgSe на свойства фотосенсоров на их основе 226
76. Герт А.В., Бельтюков Я.М. Моделирование методом Монте-Карло прыжковой проводимости в массиве квантовых точек 228
77. Арчелков В.Б., Клинков В.А., Седегова Т.Ю. Влияние γ -облучения на оптический композит с нанокристаллами CsPbBr₃ 229
78. Кештов М.Л., Годовский Д.Ю., Шикин Д.Ю., Калинин Д.П., С. Карак, Г.Д. Шарма Высокоэффективные тройные полимерные солнечные фотоэлементы на основе двух нефуллереновых акцепторов с комплементарными спектрами поглощения от ближней до средней ИК области 232
79. Тарасов А.Б., Белич Н.А. Перовскитные солнечные элементы – история становления и потенциал применения в качестве фотодетекторов ближнего ИК диапазона 234
80. Марков В.Ф., Маскаева Л.Н., Стук В.И., Скорняков Л.Г. Гидрохимический синтез фоточувствительных пленок для диапазона 0,4-8,0 мкм с разработкой на их основе линейки быстродействующих ИК-детекторов 236
81. Кулов С.К., Кулова Н.С., Рыжков А.А., Самканашивили Д.Г. Микроканальные электронные усилители: основные параметры и сферы применения 238

82. *Мурадова А.Г., Хакимов К.Т., Степанова У.А.* Тонкоплёночные полимерные нанокомпозиты, содержащие полупроводниковые квантовые точки со структурой ядро/оболочка CdSe и CdSe@CdS@ZnS 241
83. *Миленкович Т., Шуклов И.А., Попов В.С.* Свойства морфологии тонких пленок, созданных на основе коллоидных квантовых точек халькогенидов ртути в зависимости от вариации параметров нанесения 243
- Стендовые доклады** 246
84. *Пермикина Е.В., Лопухин А.А., Болтарь К.О., Барышева К.В., Гришина А.Н.* Характеристики быстродействующих малоформатных матричных фотоприемников на основе InSb 246
85. *Лопухин А.А., Пермикина Е.В., Барышева К.В.* Тестовые структуры для исследования МФПУ на основе InSb с высокой разрешающей способностью и полем зрения при обнаружении тепловых объектов 249
86. *Демьяненко М.А.* Широкополосный микроболометрический приемник инфракрасного, терагерцового и миллиметрового излучения 253
87. *Демидович С.А., Соловьев Я.А., Колос В.В., Ковальчук Н.С.* Получение многослойных подвесных структур чувствительных элементов микроболометров с низкой остаточной деформацией 255
88. *Халугарова К., Стивак Ю.М., Мараева Е.В., Мошников В.А.* Фотоприемные и излучающие наноструктуры на основе халькогенидов свинца: контроль технологии и повышение быстродействия 258
89. *Вишняков А.В., Васильев В.В., Сабина И.В., Сидоров Г.Ю., Стучинский В.А.* Влияние размера диодов на пространственное разрешение линейных фотоприёмников СВИК-диапазона на основе материала КРТ 262

90. Гусаров А.В., **Филатов А.В.**, Сусов Е.В., Карнов В.В. Фоторезисторы 265
из ГЭС КРТ МЛЭ состава $X=0,2$ и $X=0,3$ с $n-p^+$ переходом,
работающие в неравновесном режиме эксклюзии неосновных
носителей заряда
91. Василькова Е.И., Пирогов Е.В., Баранцев О.В., Воропаев К.О., 267
Васильев А.А., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Соболев М.С.
Разработка $In_{0,83}Ga_{0,17}As/InP$ pin-фотодиодов для ближнего ИК
диапазона 2,2-2,6 мкм на основе метаморфных гетероструктур
92. Дунаев А.А., Евстропьев С.К., Жулев А.М., Дукельский К.В., 270
Подрухин Ю.Ф., Полищук Г.С. Примесные дефекты в оптической
керамике из фтористого магния (MgF_2)
93. Кочергина О.В., Матковская Т.А. Площадь эффективной засветки 273
кремниевых фотоэлектронных умножителей
94. Якушев М.В., Швец В.А. Кузнецова Л.С., Вдовин В.И., Федина Л.И. 276
Анализ поверхностных дефектов на последовательных стадиях
выращивания $ZnTe/CdTe/HgCdTe$ на подложках Si с ориентацией
(013)
95. Закиров Е.Р., Краснова И.А., Сидоров Г.Ю., Кеслер В.Г. 279
Формирование границы раздела $HfO_2-CdHgTe$ методом
низкотемпературного плазменно-стимулированного атомно-
слоевого осаждения
96. Краснова И.А., Закиров Е.Р., Сидоров Г.Ю. Обработки поверхности 282
 $CdHgTe$ после жидкостного травления в $Br:HBr$
97. Акимов В.М., Иродов Н.А., Лопухин А.А. Контроль качества 285
групповой стыковки кристаллов
98. Болтарь К.О., Седнев М.В., Кожаринова Е.А., Головин С.В., 287
Кузнецова А.Д., Атрашков А.С., Трухачев А.В., Лопухин А.А.,
Пермикина Е.Н. Дифракция в фотолитографических процессах, как
причина неоднородности чувствительности элементов
фотоприемных матриц

99. Болтарь К.О., Вильдяева М.Н., Иродов Н.А., Климанов Е.А., 290
Ляликов А.В., Малыгин А.В., Молчанов Д.С., Макарова Э.А.
Образование дефектов диэлектрических слоев в процессах
диффузии в кремнии
100. Трухачев А.В., Седнев М.В., Болтарь К.О., Мансветов Н.Г. 293
Исследование краевой металлизации оптически прозрачных окон,
формируемого методом магнетронного напыления
101. Занько А.И., Соловьев Я.А., Колос В.В., Ковальчук Н.С. Импульсное 296
реактивное магнетронное распыление как метод нанесения
термочувствительных пленок оксида ванадия для микроболометров
102. Гусев В.И. p-n-переход на коллоидных квантовых точках 299
103. Королева Т.В., Мурадова А.Г., Степанова У.А. 301
Фотолюминесцентные свойства перовскитных НК $Cs_xPb_yBr_z$ в
зависимости от условий синтеза
104. Бельцева А.В., Сальникова У.Н., Макарук К.С., Ельцов О.С. Влияние 303
комбинации добавок $K_2Cr_2O_7$ ($KMnO_4$) и NH_4I на
фоточувствительные свойства пленок PbS
105. Герасимова А.К., Алиев В.Ш., Калмыков Д.А., Воронковский В.А. 305
Оптические свойства нестехиометрических оксидов титана
106. Зотов А.В., Панин Г.Н., Тулина Н.А., Борисенко Д.Н., 307
Колесников Н.Н. Фотомемристивные переключения в кристаллах
селенида висмута
107. Кривобок В.С., Пашкеев Д.А., Клековкин А.В., Минаев И.И., 309
Савин К.А., Ерошенко Г.Н., Гончаров А.Е., Николаев С.Н.
Структурные и оптические свойства твердых растворов $InAs_{1-x}Sb_x$
для средневолновых и длинноволновых инфракрасных
фотодетекторов
108. Кривобок В.С., Усманов И.И., Ченцов С.И., Клоков А.Ю., 311
Шарков С.И., Фролов Н.Ю. Использование in-situ измерений
низкотемпературной микрофотолюминесценции для наблюдения
перестройки примесно-дефектной системы кубических
полупроводников под воздействием лазерного гиперзвука

109. Савин К.А., Минаев И.И., Клековкин А.В., Ерошенко Г.Н., Николаев С.Н., Гончаров А.Е. Оптические и электрофизические свойства барьерно-диодной гетероструктуры на основе InSb 314
110. Минаев И.И., Казанцев Д.В., Клековкин А.В., Кривобок В.С., Николаев С.Н. Ближнепольная оптическая микроскопия квантовых точек InSb/GaSb полученных методом МЛЭ 316
111. Жуков Н.Д. Нанокристаллы узкозонных полупроводников для однофотонной болометрии 319
112. Жаворонков Н.В., Капкин Д.В., Чегнов В.П., Трофимов А.А., Гончаров А.Е. Получение монокристаллов и подложек твёрдого раствора $Cd_{(1-x)}Zn_xTe$ для МЛЭ КРТ по методу Давыдова – Маркова 322
113. Войцеховский А.В., Дзядух С.М., Горн Д.И., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Сидоров Г.Ю., Якушев М.В. Характеристики МДП-систем на основе HgCdTe со сверхрешеткой в барьерной области 326
114. Войцеховский А.В., Дзядух С.М., Горн Д.И., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Сидоров Г.Ю., Якушев М.В. Механизмы формирования тока в nВп-структурах на основе HgCdTe со сверхрешеткой в барьерной области 329
115. Коханенко А.П., Диб Х., Лозовой К.А., Коротаев А.Г. Расчет характеристик лавинных фотодиодов Ge/Si для атмосферного канала связи 332
116. Коротаев А.Г., Войцеховский А.В., Дворецкий С.А., Варавин В.С., Якушев М.В. Электрофизические характеристики МЛЭ пленок КРТ после имплантации ионов As 334
117. Стучинский В.А., Вишняков А.В., Васильев В.В. Влияние длины оптического поглощения света в абсорбере на частотно-контрастную характеристику КРТ-матриц 336
118. Средин В.Г., Войцеховский А.В., Степанченко А.В., Мелехов А.П., Рамакоти Р.Ш. Дефектообразование в структурах узкозонный полупроводник – поверхностный окисел мягким рентгеновским излучением 339

119. *Средин В.Г., Федоров Д.Л.* Спектроскопические исследования 342
однородности состава монокристаллов твердых растворов
 $Cd_xHg_{1-x}Te$
120. *Челясов А.В., Моисеев А.Н., Евстигнеев В.С., Костюнин М.В.,* 345
Трофимов А.А., Денисов И.А. Выращивание гетероструктур
 $CdHgTe/CdZnTe$ МOCVD-методом
121. *Евстигнеев В.С., Моисеев А.Н., Челясов А.В., Костюнин М.В.* 347
Влияние условий осаждения из паров диметилкадмия и
метилаллилтеллура на морфологию поверхности, кристаллическое
совершенство и концентрацию ростовых дефектов в
эпитаксиальных слоях $CdTe$
122. *Алдохин П.А., Новоселов А.Р., Михайлов Н.Н., Меницков Р.В.,* 349
Маточкин А.Е. Оптимальное время охлаждения $GaAs$ приборных
пластин после технологического отжига
123. *Гаврушко В.В., Кадриев О.Р., Ласткин В.А., Телина И.С.,* 352
Петров А.В. О возможности использования поликремниевых слоев
в качестве оптических фильтров
124. *Селянина А.Д., Дёмина Д.А., Маскаева Л.Н., Марков В.Ф.* Сенсорные 354
свойства полупроводниковых плёнок $Cd_xPb_{1-x}S$, химически
осаждённых с использованием ацетата кадмия
125. *Будкина В.А., Бельцева А.В., Маскаева Л.Н.* Влияние йодида 357
аммония на фоточувствительные свойства химически осажденных
пленок $PbSe(I)$
126. *Поздин А.В., Rogozina Е.С., Вармаховская Е.С., Маскаева Л.Н.* 359
Фотоэлектрические свойства пленок $PbS(I)$, $PbS(I, Co)$ и $PbS(I, Ni)$
127. *Мирошников Б.Н., Макарук К.С., Маскаева Л.Н., Мирошникова И.Н.* 362
Модификация метода гидрохимического осаждения сульфида
свинца
128. *Серегина Е.В., Степович М.А., Филиппов М.Н.* О моделировании 364
диффузии неравновесных неосновных носителей заряда,
генерированных электронным зондом в полупроводнике

129. *Яковлева Н.И.* Исследование дизайна и характеристик 366
фоточувствительных элементов на основе твердых растворов
CdHgTe
130. *Яковлева Н.И., Ковишов В.С.* Исследования отношения сигнал/шум и 369
темновых токов гетероструктур на основе соединений сурьмы
131. *Никонов А.В., Яковлева Н.И., Болтарь К.О.* Исследование 372
зависимости эмпирических значений ширины запрещенной зоны
CdHgTe от метода эпитаксиального роста
132. *Левчук Д.С., Колос В.В., Соловьёв Я.А.* Моделирование оптических 374
характеристик микроболометрического пикселя в САПР «COMSOL
Multiphysics»
133. *Левчук Д.С., Колос В.В. Соловьёв Я.А.* Моделирование деформаций 376
микроболометрического пикселя в САПР «COMSOL Multiphysics»
134. *Лукин В.П., Коняев П.А., Больбасова Л.А., Борзилов А.Г., 378
Колобов Д.Ю., Ковадло П.Г., Шиховцев А.Ю.* Переход от
мноконтурных систем адаптивной оптики для солнечных
телескопов к мультисопряженным
135. *Ильинский Р.Е.* Расчет исходных данных для контроля 380
центрирования компонентов оптико-электронных систем с
использованием макроса программы ZEMAX
136. *Самигуллин М.Э., Михайлов М.Д., Бельх А.В., Ременный М.А.* 382
Изготовление микролинз и пленок методом горячего прессования из
халькогенидного стекла ИКС25
137. *Агринский М.В., Откупман Д.Г., Попов В.К.* Создание и применение 384
полимерного оптического материала на основе эпоксидной смолы
138. *Маннатхоко Н., Семенча А.В., Кононов Н.А.* Разработка 386
иммерсионного материала из стекол по разрезу As₂Se₃-SSe₂ для
изучения включений в алмазах
139. *Сафонов В.В., Свибович И.В.* Низкоуровневые камеры и их 389
применения в приборах наблюдения

140. *Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А.* 392
Двухканальный монокуляр с призмой Пехана
141. *Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А.* Дневно-ночной 395
бинокль с зеркально-линзовым объективом
142. *Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А.* Дневно-ночной 398
бинокль
143. *Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А.* Дневно-ночной 401
бинокль-дальномер
144. *Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А.* 404
Комбинированный бинокль
145. *Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А.* 407
Многоспектральный импульсный лазерный осветитель
146. *Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А.* 410
Многофункциональный бинокль дневного и ночного видения
147. *Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А.* 413
Многофункциональный ночной бинокль
148. *Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А.* Прибор 416
наблюдения-дальномер
149. *Козлов А.И., Латорцева Л.А.* Исследование конгруэнтности базовых 419
элементов фотоприемников сверхвысокой размерности и
микротепловизоров для широкого спектрального диапазона. Обзор.
150. *Гапонов О.В., Бурлаков В.И., Савцов В.В., Соловьев Д.Г.,* 422
Романов Е.К. Способ деселекции элементных цепочек, максимально
снижающих отношение сигнал/шум каналов инфракрасного
фоточувствительного модуля с режимом временной задержки и
накопления
151. *Абилов В.В., Громилини Г.И., Косых В.П., Стрельцов В.А.,* 425
Яковенко Н.С. Аппроксимация формы отклика многорядного
фотоприёмника от малоразмерного объекта

152. *Попова И.В., Афонин А.В., Шулекин С.Ф.* Метод измерения 428
расстояния оптическим дальномером
153. *Комаров В.В., Шалдырван И.В.* Модернизация систем ночного 430
видения в обсерватории САО РАН
154. *Кунцевич Б.Ф.* Влияние размеров объекта на пространственно- 432
энергетический профиль зоны видимости активно-импульсных
телевизионных измерительных систем
155. *Кунцевич Б.Ф.* Обеспечение навигации транспорта в сложных 434
метеоусловиях с помощью активно-импульсных телевизионных
измерительных видеосистем
156. *Назаренко П.Н.* Границы диапазона измерения метеорологической 436
оптической дальности трансмиссометрами в условиях естественного
загрязнения
157. *Назаренко П.Н.* Автокоррекция амплитудных профилей обратного 438
рассеяния зондирующего излучения в ближней зоне атмосферной
трассы
158. *Пассет Р.С., Бутвина Л.Н., Вакуленко А.Ф., Гаврилов Г.А., 441
Капралов А.А., Молоков А.Ю., Сотникова Г.Ю.* Способ и устройство
для контроля температуры мелких кристаллов в рентгеновской
дифрактометрической системе SUPERNOVA
159. *Фролов Н.Ю., Клоков А.Ю., Шарков А.И., Николаев С.Н., 445
Ченцов С.И., Чернопицкий М.А., Пугачев М.В., Дулебо А.И.,
Шуплецов А.В., Кривобок В.С., Кунцевич А.Ю.* Гиперзвуковая
микроскопия Ван-дер-Ваальсовых слоистых гетероструктур на
основе тонких слоев WSe₂
160. *Кузнецов С.А., Федоринин В.Н., Гельфанд А.В.* Эллипсомер 448
2-мм диапазона длин волн для диагностики оптически непрозрачных
диэлектрических покрытий и материалов
161. *Шавель С.С., Горобец В.А., Бушук С.Б.* Четырехволновой ТЕА лазер, 451
генерирующий в двух спектральных диапазонах

162. *Маричев А.Е., Эполетов В.С., Пушкин Б.В.* Перспективы передачи энергии при помощи мощного лазерного излучения 454
163. *Кобзев Е.И., Рабинович И.О., Боричок В.В., Савчук А.А., Чельный А.А.* Оптимизация подсветки гиперспектральных камер SWIR диапазона с помощью светодиодов 456
164. *Голицын А.В., Сейфи Н.А., Голицын А.А.* Метод подбора стекол для исправления хроматизма положения на пяти длинах волн для трехлинзового широкоспектрального объектива 458
165. *Алиева Т.Д., Абдинова Г.Д., Ахундова Н.М., Абдинов Д.Ш.* Термоэлементы на основе твердого раствора $Pb_{0,75}Sn_{0,25}Te$ на уровень температуры $\sim 300K$ 460
166. *Юсифов В.В., Аллахвердиев Э.А.* Рассеяние фононов в твердых растворах системы $PbTe - MnTe$ 436
167. *Латифова С.С., Салимова Вафа Вали, Назаров А.М.* Определение второго и третьего уровней примеси серебра в бинарных твердых растворах 466
168. *Курбанов М.М., Салимова Вафа Вали, Назаров А.М., Мамедов Ф.А.* Тепловое расширение, изотермическая сжимаемость и параметр Грюнайзена полупроводникового соединения $TlGaSe_2$ 469
169. *Алекперов Э.Ш., Ибрагимов Г.Б., Назаров А.М.* Образование пленок твердого раствора $TlIn_{1-x}Sn_xSe_2$ со сверхрешетками 472
170. *Нуриев И.Р., Назаров А.М., Садыгов М.С., Фарзалиев С.С., Садыгов Р.М.* Структурные и оптические свойства тонких пленок твердых растворов $Pb_{1-x}Eu_xTe$ 475
- Правила опубликования статей в журнале «Успехи прикладной физики» 478
- Правила опубликования статей в журнале «Прикладная физика» 482

XXVII Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения организована:

Государственным научным центром Российской Федерации Акционерным обществом «НПО «Орион»

и проводится при поддержке:

Минпромторга России,

Минобрнауки России,

Государственной корпорации «Ростех»,

Холдинга АО «Швабе»,

Российского научного фонда,

Русского оптического общества.

Тематика конференции:

- Фотосенсорика
- Техника тепловидения и ночного видения
- Материалы фотосенсорики и новые технологии
- Микроэлектроника для фотосенсорики
- Метрология приема оптического излучения
- Микроригенная техника

Формат конференции:

- приглашенные, устные и стендовые доклады о современных тенденциях и направлениях по тематике конференции.
- выставка научно-технических достижений организаций-участников конференции

Программный комитет

Председатель – Старцев В.В.,
ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», Россия

Заместители председателя:

Бурлаков И.Д., ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», Москва
Пономаренко В.П., ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», Москва

Ученый секретарь – Егоров А.В.,
ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», Москва

Члены программного комитета:

Балоев В.А. – АО «Швабе», Москва
Батурин А.С. – МФТИ (НИУ), Москва
Белюсов Ю.И. – филиал АО «Корпорация «Комета» -
«НПЦ ОЭЖН», Санкт-Петербург
Бугаев А.С. – МФТИ (НИУ), Москва
Быков В.А. – ФГУП «НИИФП им. Ф.В. Лукина», Зеленоград
Войцеховский А.В. – ТГУ (НИУ), г. Томск
Гапоненко С.В. – Институт физики им. Б.И. Степанова,
НАН Беларуси, Минск
Гуляев Ю.В. – ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва
Иванов В.В. – МФТИ (НИУ), Москва
Иванов В.П. – АО «НПО ГИПО», г. Казань
Иванов С.В. – ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Калюгин В.С. – АО «Швабе», Москва
Кузнецов Е.В. – АО «НИИ «Полнос» им. М.Ф. Стельмаха», Москва
Кузнецов С.А. – АО «МЗ «Сапфир», Москва
Латышев А.В. – ИФП СО РАН им. А.В. Ржанова, Новосибирск
Захаров А.А. – АО «Корпорация «Комета», Москва
Мирошникова И.Н. – МЭИ (НИУ), Москва
Никитов С.А. – ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва
Плясунов Ю.В. – Минпромторг России, Москва
Попов С.В. – АО «Швабе», Москва
Сигов А.С. – РТУ МИРЭА, Москва
Солдатенков В.А. – АО «НПО Геофизика-НВ», Москва
Средин В.Г. – Академия РВСН им. Петра Великого, Балашиха
Татаурщиков С.С. – АО «ЦНИИ «Электрон», Санкт-Петербург
Форш П.А. – МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
Яковлев Ю.П. – ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Якушев М.В. – ИФП СО РАН, Новосибирск

Организационный комитет

Председатель – Старцев В.В.,
ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»

Заместители председателя:

Полесский А.В., ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Яковлев А.Ю., ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»

Ответственный секретарь – Кузьминова О.М.,
ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»

Члены организационного комитета:

Бучинская Н.В. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Васильева М.В. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Голынский М.А. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Егоров А.В. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Еникеев О.И. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Лаврентьева И.С. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Михайличенко С.А. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Муравьева С.Д. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Осипова Д.В. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Смирнов А.А. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Тренина Е.О. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Трофимов А.А. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Федоров А.Г. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Шафоростова М.В. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
Яковлева Н.И. – ГНЦ РФ АО «НПО «Орион»
по согласованию – Минпромторг России
по согласованию – АО «Швабе»
по согласованию – АО «МЗ «Сапфир»
по согласованию – ИФП СО РАН

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

Современное состояние и направления развития фото- и оптоэлектроники инфракрасного диапазона в ГНЦ РФ

АО «НПО «Орион»

Бурлаков Игорь Дмитриевич^{1,2}, Старцев В.В.¹

¹ *ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», Москва, Россия*

² *Российский технологический университет – МИРЭА, Москва, Россия*

Contemporary Situation and Development Directions of Infrared Photo- and Optoelectronics in State Scientific Center «Orion RD&P Association»

I.D. Burlakov^{1,2}, V.V. Startsev¹

¹ *State Scientific Center «Orion RD&P Association» JSC, Moscow, Russia*

² *Russian Technological University – MIREA, Moscow, Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-24

АО «НПО «Орион» успешно преодолел порог 30-летия со дня присвоения статуса Государственного научного центра Российской Федерации Постановлением Правительства Российской Федерации от 5 июня 1994 г. № 649, полностью оправдав идею создания научных организаций нового типа для сохранения ведущих научных центров мирового уровня, быстрого развития научного потенциала страны в области фундаментальных и прикладных исследований и подготовки высококвалифицированных научных кадров, воплотившуюся в Указе Президента Российской Федерации от 22 июня 1993 г. № 939.

Рассмотрены основные тенденции развития современных технологий фотоэлектроники и полупроводниковых фоточувствительных материалов для инфракрасных областей спектра, а также современное состояние и основные направления развития фото- и оптоэлектроники в ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Одними из основных глобальных тенденций инфракрасной фотосенсорики продолжает оставаться разработка и совершенствование:

– одно- и многоспектральных охлаждаемых матричных фотоприемных устройств (МФПУ), в том числе третьего поколения и мегапиксельных форматов, повышающих вероятность обнаружения и распознавания объектов и другие тактико-технические характеристики систем;

– фоточувствительных гетероэпитаксиальных полупроводниковых структур различной архитектуры с разными функциональными слоями (xVn, T2SL и др.), позволяющих создавать МФПУ с повышенными основными

фотоэлектрическими и эксплуатационными характеристиками, в том числе с повышенной относительно «азотной» рабочей температурой охлаждения, обеспечивающей снижение весо-габаритных параметров и потребляемой мощности;

– твердотельной фотоэлектроники коротковолнового ИК-диапазона для области спектра 1–3 мкм как на основе традиционных структур с активными слоями InGaAs и КРТ, так и с активными слоями из коллоидных квантовых точек;

– сверхпротяженных фотоприемных устройств на основе стыкуемых ВЗН-модулей с количеством каналов более 10 тысяч и числом стадий ВЗН-накопления 8–10 и крупноформатных матриц (до 6к×6к элементов) коротковолнового, средне- и длинноволнового ИК-диапазонов для космических применений.

Среди наиболее важных достижений последнего времени следует отметить создание в ГНЦ РФ АО «НПО «Орион» научно-технических и конструктивных решений при создании и освоении инновационных промышленных технологий:

– МФПУ на основе фотодиодов из антимонида индия на средневолновую область ИК-спектра 3-5 мкм формата 640×512 элементов (шаг 15 мкм) с формирователем сигналов изображения. Ведется крупносерийный выпуск этих изделий в обеспечение оптико-электронной аппаратуры бронетанковой техники;

– малогабаритных ИК-камер коротковолнового спектрального диапазона на основе матричных фотосенсоров из InGaAs для оборонных и гражданских применений в промышленности, медицине, искусствоведении, на транспорте и др.;

– оптико-электронных модулей (ОЭМ) средневолнового ИК-диапазона спектра на основе отечественного МФПУ формата 640×512 элементов, в том числе с вариообъективом и электронным блоком обработки, формирующим видеосигнал тепловизионного изображения. ОЭМ могут использоваться для решения различных задач, таких как охрана особо важных объектов и акваторий, контроль утечек тепла, вождение транспортных объектов в условиях плохой видимости и т.п.

– многорядных ИК ФПУ на основе КРТ, обеспечивающих работу в режиме ВЗН и внедрённых в оптико-электронную аппаратуру космического базирования для решения специальных и гражданских задач. Информация о поверхности и происходящих процессах в атмосфере, получаемая аппаратурой в виде изображений полусферы Земли в различных диапазонах ИК-области спектра, обладает новым, ранее недостижимым качеством. Это позволило впервые в России создать группировку космических аппаратов непрерывного наблюдения для решения задач гидрометеорологии, а также информационного обеспечения экологии, хозяйственной и транспортной деятельности

арктического региона. Аналогичная аппаратура используется для обнаружения лесных пожаров, оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций. Следует также отметить разработку научно-технических и конструктивных решений при создании инновационного многорядного крупноформатного ИК ФПУ с числом элементов более 200 тысяч на основе стыкуемых ВЗН-фотомодулей формата 1024×10 элементов из КРТ для широкопольных сканирующих систем.

В сложившейся сложной геополитической обстановке для достижения необходимого уровня национальной безопасности и обороны страны значительно возросла роль инфракрасной фото- и оптоэлектроники, обеспечивающей возможности и тактико-технические характеристики практически всех видов ВВСТ. Фото- и оптоэлектроника также широко используется в науке, промышленности, космической и других отраслях.

К настоящему времени в ГНЦ РФ АО «НПО «Орион» получены впечатляющие результаты в развитии критических технологий приоритетного научного направления федерального уровня «Информационно-телекоммуникационные системы», включая фотонику, фото- и оптоэлектронику, микро- и наноэлектронику. Научно-технические и технологические разработки ученых и специалистов ГНЦ способствуют укреплению обороноспособности и технологического суверенитета нашей страны.

Квантовая фотосенсорика и материалы ограниченной размерности

Пономаренко Владимир Павлович^{1,2}, Попов В.С.^{1,2}, Бурлаков И.Д.^{1,4},
Старцев В.В.¹, Попов С.В.³

¹ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия. orion@orion-ir.ru

²Московский физико-технический институт. Долгопрудный. МО. Россия

³АО «Швабе». Москва. Россия

⁴МИРЭА - Российский технологический университет. Москва. Россия

Quantum Photosensors and Low-Dimensional Materials

Ponomarenko Vladimir P.^{1,2}, Popov V.S.^{1,2}, Burlakov I.D.¹, Startsev V.V.¹,
Popov S.V.³

¹Orion R&P Association Inc., Moscow, Russia, orion@orion-ir.ru

²MIPT, Dolgoprudny, Russia

³Shvabe JSC, Moscow, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-27

In this review, we have discussed recent advances and perspectives of infrared photodetectors fabricated by low-dimensional nanostructured materials. Review summaries the future trends in infrared photodetection. Device architectures based on OD-, 1D- and 2D-nanostructured materials (quantum dots, nanowires, two-dimensional nanolayers) have discussed.

Фотосенсорика на основе материалов и структур ограниченной размерности в последнее десятилетие стала одним из наиболее динамично развивающихся направлений исследований по созданию устройств для регистрации электромагнитного излучения инфракрасного диапазона.

Изобретение в 2004 году способа превращения трехмерного графита в двумерные кристаллы графена толщиной всего в один атомный слой с необычными электрофизическими, механическими, тепловыми и оптическими свойствами привело к лавинообразному росту числа исследований, направленных на разработку различных электронных устройств на основе 2D-материалов и структур. К настоящему времени различными технологическими методами удалось синтезировать двумерные моноатомные 2D-кристаллы на основе элементов IV группы таблицы Д.И. Менделеева, такие как германен (Ge), силицен (Si), борофен (B), станен (Sn), фосфорен (P) и др. В ряде работ проанализирована, или уже экспериментально показана, возможность получения 2D-кристаллов на основе карбидов, оксидов, хлоридов, нитридов, моно- и ди- и трихалькогенидов переходных металлов, бинарных и даже тройных соединений. К настоящему времени исследования некоторых из них

вышли на уровень разработок промышленной технологии производства [1]. В то же время, для использования в микроэлектронике, и особенно в фотосенсорике, решающим фактором является совместимость технологии синтеза материалов ограниченной размерности с микро- и фотоэлектронными технологиями. Например, учетом развития микроэлектроники на основе органических соединений и биосенсорике температура синтеза 2D-материалов должна оставаться в пределах $\sim 100^{\circ}\text{C}$. Несмотря на обнаруженные многообещающие и даже парадоксальные свойства многих двумерных материалов, их широкое внедрение в нано- и фотоэлектронику по-прежнему требует поиска 2D-наноструктур, оптимальных с точки зрения оптических, фотоэлектрических, структурных и др. свойств. Однако, использование 2D-наноструктур в качестве функциональных слоев или рабочих элементов при разработках приборов на основе традиционных 3D-материалов уже сейчас стало вполне достижимой реальностью. Использование графена, как материала с чрезвычайно высокой подвижностью, одновременно со сверхтонким 2D-изолятором в качестве подзатворного диэлектрика полевого транзистора, обеспечило реализацию пороговой частоты на уровне 430 ГГц, что близко по значениям, достигнутым в радиофотонике с использованием НЕМТ- и mНЕМТ-транзисторов на основе InP и GaAs [2].

Многообещающим направлением исследований остаются попытки использовать различные 1D- и 2D-структуры и их комбинации для создания новых микро- и нано-фотоэлектронных устройств, в том числе на гибких подложках.

Вместе с тем, эти результаты по большей мере пока доказывают физическую возможность использования исследованных 1D- и 2D-материалов в технологиях электроники, но никак не свидетельствуют о создании способов их промышленного применения. В частности, это связано с отсутствием надежных и недорогих технологий получения рассматриваемых 2D-материалов (за исключением, может быть, графена) на подложках с размерами, сравнимыми с кремнием, арсенидом галлия, фосфидом индия и др. при сохранении их уникальных электрофизических свойств.

Наибольший прогресс к настоящему времени достигнут в разработках технологий для создания фотосенсорике коротковолнового диапазона на основе квазиульмерных коллоидных квантовых точек (ККТ). Зависимость спектрально-люминесцентных свойств ультрадисперсных полупроводников от размера впервые была продемонстрирована в 1981 году на примере наночастиц CuCl, выращенных в многокомпонентных силикатных стеклах в процессе термически инициированного диффузионного фазового распада пересыщенного твердого раствора. В 1993 году был разработан простой в исполнении и чрезвычайно эффективный химический метод синтеза квантовых точек, который получил название высокотемпературного коллоидного синтеза (ВТКС), благодаря которому не только открылись новые возможности для

исследования ККТ, но стали более понятны и реальные перспективы для их практического использования. Первые попытки использования нанокристаллов в виде квантовых точек для регистрации электромагнитного излучения в диапазоне длин волн 0.975÷1.3 мкм были предприняты в 2004 году. В 2020 году на мировом рынке было представлено семейство неохлаждаемых инфракрасных камер, работающих в диапазоне спектра от 0.4 мкм до 2.0 мкм на основе матричных барьерных структур из ККТ, включая мегапиксельные форматы 1920×1080 и 1280×1024, изготовленные с шагом 15 мкм. По количеству фоточувствительных элементов эти фотосенсоры уже сравнялись с матричными приборами на основе эпитаксиальных 3D-слоев InGaAs, отличаясь от них существенно более простой технологией и низкой стоимостью [3]. Поиск новой элементной базы для матриц на основе структур с ограниченной размерностью интенсивно проводится и в последние годы.

В настоящем обзоре представлен обзор архитектур, методов получения и основных свойств фотонных сенсоров на основе структур ограниченной размерности из соединений элементов II, IV и VI групп Периодической таблицы Д.И. Менделеева и сформулированы научно-технические проблемы, решение которых должно существенно ускорить развитие инфракрасной фотосенсорики.

Литература

1. В.П. Пономаренко, В.С. Попов, С.В. Попов, Е.Л. Чепурнов // *Успехи прикладной физики*, том 7, № 1, 10-48 (2019)
2. В.П. Пономаренко, В.С. Попов, С.В. Попов // *Успехи прикладной физики*, том 8, № 1, 33-66 (2020)
3. V.P. Ponomarenko, V.S. Popov, I.A. Shuklov, V.V. Ivanov, V.F. Razumov. *Russian Chemical Reviews*, 2024, 93, RCR5113

Развитие технологии охлаждаемых матричных ИК фотоприемников в ИФП СО РАН

Якушев Максим Витальевич, Аксенов М.С., Варавин В.С., Васильев В.В.,
Журавлев К.С., Макаров Ю.С., Марчишин И.В., Преображенский В.В.,
Ремесник В.Г., Сабина И.В., Сидоров Г.Ю., Сидоров Ю.Г., Латышев А.В.

ИФП СО РАН. Новосибирск. Россия. yakushev@isp.nsc.ru

Progress in the technology of cooled matrix IR photodetectors at the ISP SB RAS.

Yakushev Maxim Vitalievich, Aksenov M.S., Varavin V.S., Vasiliev V.V.,
Zhuravlev K.S., Makarov Yu.S., Marchishin I.V., Preobrazhensky V.V.,
Remesnik V.G., Sabinina I.V., Sidorov G.Yu., Sidorov Yu.G., Latsyshev A.V.
ISP SB RAS. 13 Lavrentiev aven., Novosibirsk, 630090, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-30

We present our latest results on cooled matrix IR photodetectors obtained at the ISP SB RAS. The technology for medium-wave photodetectors with a pixel size of 15 microns, based on HgCdTe/Si heterostructures, has developed, with parameters comparable to world analogues. The research on all components of the technological process of creating IR photodetectors based on type-II superlattices is carried out.

Оптико-электронные системы (ОЭС) все более широко внедряются как в изделия военной техники, так и в гражданские технологии. Уровень современных ОЭС определяется развитием технологий матричных фотоприемных устройств (МФПУ) новых поколений на все спектральные диапазоны оптического излучения, в первую очередь, инфракрасного.

Новые поколения МФПУ, особенно инфракрасных систем 3-го поколения, усиленно разрабатываются в последние годы многими фирмами США, Франции, Англии, Китая и ряда других стран. Ведущие в научно-техническом отношении страны постоянно увеличивают расходы на исследования в этой области.

В настоящее время, подавляющее большинство охлаждаемых ИК фотоприемников изготавливаются на основе двух типов полупроводниковых структур. Это структуры HgCdTe (КРТ) выращиваемые на согласованных или на альтернативных подложках и сложные полупроводниковые структуры на основе элементов 3-ей и 5-ой группы таблицы Менделеева.

В ИФП СО РАН разработано и изготовлено уникальное российское оборудование для выращивания КРТ методом МЛЭ. В последние десятилетия

в ИФП СО РАН на основе собственного фоточувствительного материала шло последовательное формирование пакета технологий, который на данный момент позволяет реализовать полный цикл разработки и изготовления охлаждаемых фотоприемных устройств (ФПУ) на основе КРТ для всех диапазонов ИК-спектра.

Ключевым моментом в разработанной ИФП СО РАН технологии является решение проблемы выращивания фоточувствительных слоев КРТ на кремниевой подложке, что снимается ограничения на формат ИК ФП и его стойкость при циклическом охлаждении до температуры жидкого азота.

В настоящее время все наши матричные ИК ФП разрабатываются и изготавливаются на основе гетероструктур HgCdTe/Si.

Наибольший прогресс достигнут в области фотоприемников для спектрального диапазона 3 – 5 мкм. В ИФП СО РАН освоена технология средневолновых фотоприемников с размером пикселя 15 мкм, не уступающих по своим параметрам зарубежным аналогам. Наши фотоприемники имеют чувствительность 15 – 20 мК, дефектность менее 0,5% и возможность работать при температурах 110 К и выше.

Для диапазона 8 – 10 мкм освоена технология средневолновых фотоприемников с размером пикселя 30 мкм. Наши длинноволновые фотоприемники имеют чувствительность 30 – 35 мК, дефектность 1 – 2 % и работают при температурах 80 К.

Гистограммы темновых токов длинноволновых матриц ($x=0,22$) показывают наличие довольно большого количества фотодиодов, у которых темновой ток превышает диффузионный ток для номинальных параметров пленки КРТ и не может быть объяснен неоднородностью параметров пленки КРТ. Разброс темновых токов приводит к геометрическому шуму и снижению основной характеристики матричных фотоприемников – температурного разрешения и дефектность. Можно заключить, что основными избыточными токами утечки в n^+/p переходах узкозонного МЛЭ КРТ являются туннельные токи, причем величина этих токов не однородна по площади матричного фотоприемника.

Еще одним направлением развития ИК ФПУ длинноволнового диапазона является разработка детекторов, на основе напряженных короткопериодных сверхрешеток InAs/GaSb и InAs/InAsSb.

Важнейшим отличием материала сверхрешеток GaSb/InAs и InAs/InAsSb от КРТ является большие эффективные массы электронов и дырок, значительно подавляющие туннельные токи и Оже рекомбинацию, что обуславливает перспективность сверхрешеток для изготовления ИК ФПУ при повышенных рабочих температурах.

Для формирования данных ФПУ с высокой плотностью пикселей (малым расстоянием между пикселями), низкими темновыми токами и высокой фоточувствительностью (квантовой эффективностью $\geq 50\%$) технологам

необходимо решить 3 основные задачи:

1) Разработать технологию роста качественных МЛЭ-структур с толщиной активной области 5 мкм и более.

2) Разработать технологию плазмохимического (или комбинированного) травления меза-структур с близкими к вертикальным, стенками.

3) Разработать технологию пассивации стенок меза-структура с целью уменьшения темновых токов утечки.

В настоящее время в ИФП СО РАН ведутся исследования по всем ключевым направлениям технологического процесса создания ИК ФПУ на основе напряженных короткопериодных сверхрешеток.

**Состояние и перспективы создания кремниевых фотоприемников,
освещаемых с обратной стороны подложки (back-side) в АО
«ЦНИИ «Электрон»**

Татаурщиков Сергей Сергеевич, Вязников А.Н.

АО «ЦНИИ «Электрон». Санкт-Петербург. Россия. info@niielectron.ru

**The state and prospects for the creation of silicon photodetectors, illuminated
from the back side of the substrate at JSC «NRI «ELECTRON»**

*Tataurshchikov Sergey Sergeevich, Viaznikov A.N.
JSC «NRI «Electron», St. Petersburg, Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-33

JSC «NRI «Electron» has developed a technology for manufacturing CCD arrays, illuminated from the back side of the substrate, which can be successfully extended for production of CMOS photodetectors.

Современные оптико-электронные системы, использующие кремниевые фотоприемники, требуют улучшения точностных характеристик, связанных с увеличением формата фотоприемников и повышением их квантовой чувствительности в широком спектральном диапазоне, и особенно в УФ области спектра.

Предыдущее поколение кремниевых фотоприемников базировалось на фронтальном освещении фоточувствительной поверхности матрицы ПЗС или КМОП, что имело определенные ограничения по возможности достижения предельных значений квантовой чувствительности фотоприемника в широком спектральном диапазоне.

Эти ограничения связаны с топологическими возможностями получения филл-фактора в пикселе матрицы КМОП более 30-40 %, из-за необходимости располагать в нем помимо фотодиода транзисторы коммутации и преобразования заряда в электрический сигнал, а для ПЗС матриц дополнительное снижение этого параметра, из-за маскирующего эффекта полупрозрачных поликремниевых электродов управления, покрывающих всю площадь фоточувствительного элемента.

Радикальным решением проблемы является освещение фотоприемника с обратной стороны подложки. При этом, за счет отсутствия поликремниевых электродов на пути распространения света, может быть достигнута максимальная квантовая эффективность (не менее 80% в максимуме спектральной чувствительности) и наиболее широкий спектральный диапазон

(200-1000 нм).

В АО ЦНИИ «Электрон» проведена разработка технологии изготовления ПЗС матриц, освещаемых с обратной стороны подложки, которая может быть успешно распространена и на КМОП фотоприемники.

В мировой практике наиболее распространены две основные конструктивно-технологические схемы изготовления кристаллов, освещаемых с обратной стороны.

По первой схеме утонению подвергается только фоточувствительная зона кристалла, а периферийная зона остается имеющей первоначальную толщину. Поперечное сечение кристалла, изготовленного по такой схеме, представлено на рис. 1.

Эта схема обладает определенными преимуществами в смысле простоты технологии, но имеет и значительные недостатки. Первый недостаток связан с тем, что отсутствует групповая технология обработки (каждый кристалл ФППЗ обрабатывается отдельно), что увеличивает трудозатраты и стоимость прибора. Второй недостаток имеет более принципиальный характер и заключается в том, что размер кристаллов, которые можно изготовить таким способом, ограничен величиной порядка 20 мм, из-за недостаточной механической прочности.



Рис. 1. Поперечное сечение кристаллов ФППЗ, утоненных только в фоточувствительной зоне.

Второй вариант основан на сращивании (бондинге) приборной пластины (пластины с кристаллами ФППЗ) с пластиной-носителем, с последующим утонением приборной пластины и вскрытием окон к контактным площадкам кристалла сквозь эпитаксиальный слой приборной пластины.

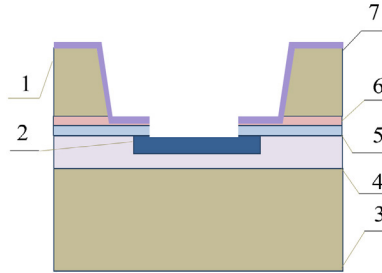


Рис. 2. Вид структуры после вскрытия контактных окон к алюминиевым контактным площадкам.

1 – эпитаксиальный слой приборной пластины, 2 – алюминиевая контактная площадка, 3 – пластина-носитель, 4 – защитный окисл на приборной пластине, 5 – подзатворный нитрид кремния, 6 – подзатворный нитрид кремния, 7 – просветляющее покрытие HgO_2

Очевидным преимуществом данного метода технологии back-side является высокая производительность процесса, т.к. применяется групповая технология, а также принципиальная возможность изготовления фотоприемников крупного формата (более 20×20 мм), имеющих требуемую механическую прочность.

На предприятии разработана технология создания матричных ПЗС с обратной засветкой первого типа с ограниченным размером формата матрицы (до 20×20 мм).

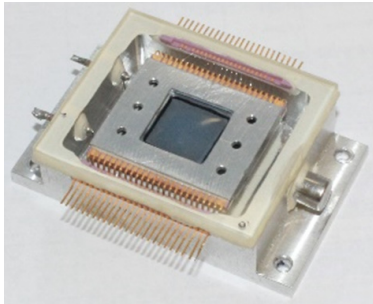


Рис. 3а. Матричный ФППЗ «Квадро-Т», освещаемый с обратной стороны

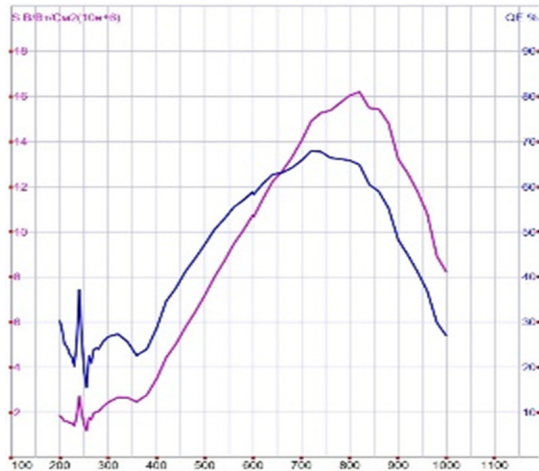


Рис. 3б. Спектральная характеристика ФППЗ «Квадро-Т»

На рис. 3а. представлена фотография конструкции прибора «Квадро-Т», в таблице 1 его основные параметры, а спектральная характеристика на рис. 3б.

Таблица 1 - Основные параметры "Квадро-Т", освещаемый с обратной стороны.

Число пикселей, (Г×В)	1536×1536
Размер фоточувствительной области, мм	16,898×16,898
Размер пикселя, мкм	11×11
Диапазон спектральной чувствительности, нм	200 ÷ 1000
Монохроматическая чувствительность на $\lambda=670$ нм, В/мкДж/см ²	5
Среднее значение темнового сигнала, мВ/с	30
Шум, $\bar{\epsilon}$	≤ 20
Динамический диапазон, отн. ед.	8000

Прибор имеет спектральную чувствительность в широком диапазоне от 200 нм до 1000 нм, а также квантовую чувствительность до 80% на максимуме спектральной чувствительности 750 нм, что вдвое превышает это значение на таком же приборе с освещением с лицевой стороны.

Известные современные конструкции фотоприемников с обратной засветкой построены преимущественно по второму варианту, т.е. методом бондинга приборной пластины, как наиболее прогрессивной технологией групповой обработки кристаллов.

При этом в основе построения таких фотоприемников лежит технология КМОП, которая полностью совместима с описанным выше процессом бондинга.

Благодаря высокой квантовой чувствительности в УФ области и квантовой эффективности в максимуме до 94%, такие сенсоры идеально подходят для биомедицинских применений, естественных наук, астрономии, криминалистики.

С учетом вышеизложенного на предприятии планируется организация производства КМОП фотоприемников с обратной засветкой в содружестве с АО «Микрон». Этот проект предполагает изготовление на АО «Микрон» планарных КМОП структур фотоприемников на лицевой поверхности кремниевых пластин диаметром 200 мм по технологической норме 180 нм, а затем на технологической базе АО ЦНИИ «Электрон» осуществляется проведение технологических операций методом бондинга приборной пластины с целью получения кристаллов, освещаемых с обратной стороны.

Такой проект обеспечивает синергетический эффект за счет применения разработанной в АО ЦНИИ «Электрон» технологии бондинга приборной пластины и технологии КМОП фотоприемников в АО «Микрон» на единственной в России технологической базе 180 нм для создания современных отечественных фотоприемников, освещаемых с обратной стороны подложки.

Перспективные технологии приборов оптического, инфракрасного и миллиметрового диапазона в Филиале ИФП СО РАН «КТИПМ»

Чурилов Сергей Михайлович¹, Алдохин П.А.¹, Гладков Р.А.¹, Голицын А.В.¹,
Голицын А.А.^{1,2}, Кузнецов С.А.^{1,3}, Кремис И.И.¹, Лебедев А.О.¹,
Новгородов Б.Н.¹, Новоселов А.Р.¹, Паулиш А.Г.^{1,2,3}, Сейфи Н.А.¹,
Турбин А.В.¹, Хрящёв С.В.¹, Шапор П.И.¹, Шатунов К.П.¹

¹ *Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ». Новосибирск. Россия. ktipm@oesd.ru*

² *Новосибирский государственный технический университет. Новосибирск.
Россия*

³ *Новосибирский государственный университет. Новосибирск. Россия*

Perspective technologies of optical, infrared and millimeter range devices in the Branch of ISP SB RAS "TDIAM"

Churilov S.M.¹, Aldokhin P.A.¹, Gladkov R.A.¹, Golitsyn A.A.^{1,2}, Golitsyn A.V.¹,
Kuznetsov S.A.^{1,3}, Kremis I.I.¹, Khryashev C.V.¹, Lebedev A.O.¹,
Novgorodov B.N.¹, Novoselov A.R.¹, Paulish A.G.^{1,2,3}, Seify N.A.¹, Turbin A.V.¹,
Shapor P.I.¹, Shatunov K.P.¹

¹ *Novosibirsk Branch of Rzhavov Institute of Semiconductor Physics SB RAS
"TDIAM",*

Novosibirsk, Russia, ktipm@oesd.ru

² *Novosibirsk state technical university, Novosibirsk, Russia*

³ *Novosibirsk state university, Novosibirsk, Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-37

An extension to 3-D space of the M. Hertzberger method has been developed, providing an extensive set of triplet lenses corrected at 5 wavelengths over an extremely wide visible and near-infrared spectral range. Studies have shown that weakly dissipative mesoscale dielectric spherical particles can effectively drive the magnetic and electrical components of an electromagnetic wave simultaneously. Studies have been carried out to optimize the design of a cooled screen in the cryostat of a matrix photodetector in order to reduce the parasitic illumination level on the photodetector matrix surface. For the first time in the RF a prototype of an ellipsometer for 0.14 THz radiation was developed, manufactured and tested. A device for operational calibration of the thermal imaging device in a wide range of ambient temperatures has been developed.

Доклад посвящён разработкам новых элементов и систем фотоники и оптико-электронных систем и приборов, работающих в различных диапазонах электромагнитного излучения от видимого до СВЧ диапазона.

Ширина рабочего спектрального диапазона и качество изображения объектива определяется степенью исправления хроматических аберраций. Современные объективы – суперахроматы исправлены по хроматизму положения на 4-х длинах волн. Такое качество было достаточным для работы в видимом диапазоне спектра. В настоящее время, недостаточная ширина спектрального диапазона оптики ограничивает возможности, предоставляемые кремниевыми матричными фотоприемниками и фотокатодами электронно-оптических преобразователей видимого и ближнего инфракрасного диапазона. В данной работе найден метод расчета твердотельного широкоспектрального пятицветного апохромата, основанный в трехмерном расширении двухмерной диаграммы частных дисперсий каталога стекол Герцбергера и автоматическом поиске стекол, лежащих на линии соединяющей выбранную пару стекол с заданной точностью.

История классической оптики связана с диэлектрическими линзами с размерным параметром Mi , $q = 2\pi R/\lambda$ (где R – радиус сферы, а λ – длина волны излучения) порядка $q > 100$, где справедливо приближение геометрической оптики. Оптические резонансные диэлектрические наноструктуры с высоким показателем преломления имеют размерный параметр $q \sim 1$. А вот диэлектрические частицы с $q \sim 10$, находящиеся в области между волновой и геометрической оптикой, оказались "черным пятном" на карте диэлектрической фотоники. Однако исследования оптики диэлектрических сфер мезомасштабных размеров, проведенные за последние двадцать лет, открыли ряд необычных явлений, включая оптические вихри, одиночные и двойные фотонные наноструи и фотонные крюки, резонансы Фано высокого порядка, а также возбуждение гигантских магнитных полей. Наличие целого ряда интересных приложений указывает на новое перспективное направление в фотонике, называемое мезотроникой.

Основой охлаждаемых тепловизоров, чувствительных в спектральном диапазоне 8–12 мкм, является гибридная сборка (ГС), состоящая из фотоприёмника на основе узкозонного полупроводникового материала и кремниевого мультиплексора, установленная в охлаждаемом криостате на пьедестал. Кроме сцены наблюдения на ГС попадает паразитное излучение (ПИ), вызванное нагревом частей тепловизора. Экранирование гибридной сборки охлаждаемым экраном (ОЭ), имеющим входное отверстие (апертурную диафрагму) для прохождения ИК излучения от сцены наблюдения, позволяет снизить уровень ПИ. В данной работе численным моделированием была определена наиболее оптимальная форма и конструкция охлаждаемого экрана, обеспечивающая минимальный уровень облучения ГС паразитным излучением.

Эллипсометрия зарекомендовала себя как эффективный неразрушающий инструмент, который обеспечивает с высокой точностью измерение оптических постоянных и структурных параметров исследуемой поверхности,

изучение физико-химических процессов, протекающих на поверхности в реальном масштабе времени. Вместе с тем, по причине сильного рассеяния излучения на микрочастицах среды оптические длины волн не позволяют исследовать поверхности микродисперсных материалов и микрогетерогенных дисперсионных систем. К таким системам относятся композиционные материалы, где объемным сочетанием компонент, различающихся по химическим и механическим характеристикам, формируется структура с заданными механическими и электромагнитными свойствами. Исследование композиционных материалов оказывается эффективным при многократном увеличении длины волны зондирующего излучения, в частности, при переходе из видимого диапазона в миллиметровую область спектра, соответствующую субтерагерцовым (субТГц) частотам. Это позволяет значительно увеличить глубину проникновения излучения в среду в сочетании с приемлемым (~ неск. мм) латеральным пространственным разрешением изучаемого объекта. В настоящей работе апробирован разработанный ранее субТГц-эллипсомер в задачах поверхностной инженерии при изучении микрогетерогенных дисперсионных систем, в частности, в бесконтактной диагностике авиационных углепластиков и жаропрочных керамических покрытий для газовых турбин.

В рамках работ по улучшению дальности действия тепловизионного прибора с использованием мехатронных систем начаты разработки объектива с двумя фиксированными полями зрения, включающем узлы мехатроники для позиционирования оптических компонентов. Специально созданная оптическая схема позволила провести исследование работы главных механических узлов оптического тракта с учётом изменения температуры и требований к временным интервалам при смещении оптических компонентов. В исследовании представлены такие элементы оптического тракта как узел автоматической калибровки фотоприёмного устройства (ФПУ) и система позиционирования оптических элементов с использованием трансфокатора – узла для плавного изменения фокусного расстояния.

Применение оптико-телевизионной лазерной активно-импульсной системы (АИС) технического зрения робототехнических комплексов (РТК) воздушного, наземного и подводного применения

Альков П.С., Балясный Л.М., Грузевич Юрий Кириллович, Гордиенко Ю.Н.,
Чистов О.В., Широков Д.А.

АО «НПО Геофизика-НВ». Москва. Россия. geo-nv@geo-nv.com

Application of an optical-television laser active-pulse vision systems (APS) for robotic complexes (RC) of air, land and underwater applications.

Alkov P.S., Balyasny L.M., Gruzевич Yu.K., Gordienko Yu.N., Chistov O.V.,
Shirokov D.A.

NPO Geophysics-NV JSC, Moscow, Russia, geo-nv@geo-nv.com

APS allows you to observe remote objects in difficult meteorological conditions – in bright light, fog, drizzling rain and snow, as well as in highly absorbing and scattering media, for example, under water.

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-40

АО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ» занимается разработкой и производством электронно-оптических преобразователей (ЭОП) III поколения и приборов ночного видения (ПНВ) на их основе. Основными преимуществами ЭОП III поколения по сравнению с приборами предыдущих поколений являются:

- высокая чувствительность (более чем в 4-5 раз) в ИК области спектра на длинах волн излучения твердотельных и полупроводниковых импульсных лазеров;

- высокая проводимость фотокатода, которая позволяет работать при сверхкоротких временах импульсов стробирования (до долей наносекунды).

В последние годы широкое распространение получили приборы и системы на основе ЭОП с активно-импульсной подсветкой (АИС).

АИС позволяет наблюдать удаленные объекты в сложных метеорологических условиях – при ярких засветках, тумане, в морозящий дождь и снег, а также в сильно поглощающих и рассеивающих средах, например, в воде.

Такие системы требуют использования высококачественных импульсных лазерных осветителей, разработки сложных высоковольтных импульсных блоков питания и управления ЭОП, а также приемной и передающей оптических систем высокого качества и светосилы.

Атмосфера создает обратное рассеяние излучения подсвета, которое накладывается на полезное изображение объекта. Его контраст резко снижается, что зачастую приводит к полной потере видимости, в особенности при пониженной прозрачности атмосферы (дымка, туман, дождь, снегопад и т.п.)

Метод активно-импульсного видения позволяет отсеять излучение обратного рассеяния и резко повысить контраст в изображении объекта. Дополнительно, метод позволяет еще больше повысить контраст за счет отсека изображения фона.

При этом яркость фона становится ниже пропорционально скважности импульсов стробирования затворным промежутком ЭОП.

Визуальную информацию о таких объектах необходимо исключить из процесса формирования изображения.

Для этого приемник закрывается на период времени, когда возвращается световой импульс, отраженный от всех нежелательных для наблюдения объектов (с T_0 до T_8). А открывается только тогда, когда возвращается световой импульс, отраженный только от объектов наблюдения (T_8). Затем приемник опять закрывается, и цикл повторяется.

Таким образом, на приемник поступает визуальная информация только об истинных объектах наблюдения. При этом все мешающие наблюдению факторы, в первую очередь, фары встречных автомобилей, исключаются.

Иллюстрация принципа АИС, таким образом, заключается в отключении ЭОП на время прохождения лазерного импульса от излучателя до объекта и обратно, то есть приемник (ЭОП) не видит, например, тонированное стекло автомобиля (рис. 1) или пургу перед ним (рис.2).



Рис. 1 Наблюдение через тонированное стекло автомобиля

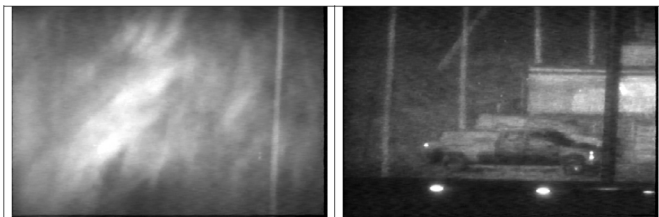


Рис.2 Слева: наблюдение стоянки автомобилей через пургу в пассивном режиме и справа: в активно-импульсном режиме с лазерной подсветкой

В АИС, предназначенных для наблюдения за удаленными объектами, прибор оснащается светосильным длиннофокусным объективом и двумя полупроводниковыми лазерными излучателями.

Были получены дальности обнаружения и распознавания объектов (человек, препятствия, автомобиль и т.п.) на расстояниях до 3 км.

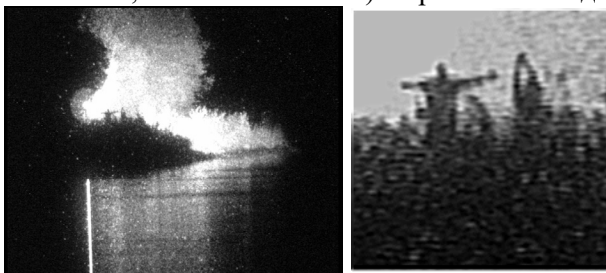


Рис.3. Слева изображение человека на фоне леса и фрагмент этого изображения, полученный обработкой изображения видеопроцессором в реальном масштабе времени

Система позволяет осуществлять неоднородное освещение по глубине сцены и оценку дальности до объектов.

В связи с тем, что в **подводных системах видения** каждый метр дальности видимости из-за сильного поглощения излучения как естественного, так и лазерного в воде, достигается с огромным трудом, а кроме того, существует значительное рассеяние излучения на взвеси и планктоне, использование АИС приобретает огромный смысл.

Рассеяние в воде приводит к сильному поглощению излучения, поэтому в подводных АИС нами используются мощные твердотельные АИГ: Ег лазеры с диодной накачкой, работающие на второй гармонике излучения лазера на длине волны 527 нм с длительностью импульса 10 нс. Длительность стробирующих импульсов также значительно короче, чем для АИС, работающих на воздухе и составляет не более 20 нс.

На рис. 4 показан пример изображения, полученного в акватории Баренцева моря, где дальность видимости по белому диску Z_6 составляет 12 м.

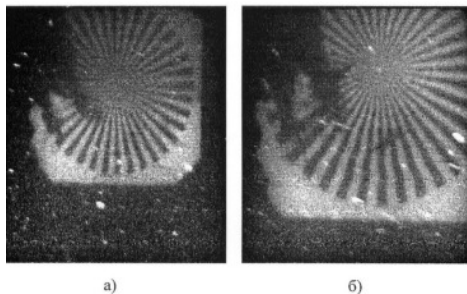


Рис. 4. Наблюдение при разных углах обзора на расстоянии 8 м:
а) 12%; б) 7%1/

Применение АИС в условиях полета.

При полетах на предельно низких высотах в ночное время очень остро встает вопрос о заблаговременном обнаружении проводов и других препятствий, которые могут оказаться на пути.

На рисунке 5 приведен пример объектов, которые зачастую являются причинами крушения вертолетов при полетах на сверхнизких высотах.

На рисунке 6 приведено изображение легкого БПЛА самолетного типа (размах крыльев около 2 метров) на фоне ночного неба полученный с помощью АИС.

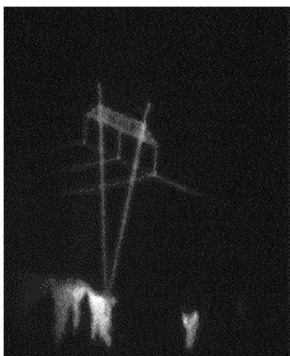


Рис. 5. Изображение ЛЭП полученное с помощью АИС установленной на вертолете.

Вышка не имела огней осветителей.



Рис. 6. БПЛА на фоне ночного неба.

Литература

1. Бузовера Владимир Васильевич, Булкин Юрий Николаевич, Великанов Сергей Дмитриевич и др. Патент РФ) № 2 397 510(13) С2 от 07.07.2008

Сайт фирмы «Талос». www.ta

Генерация тока в фотодиодах Шоттки Pd/InP в атмосфере водорода

Яковлев Юрий Павлович¹, Шутаев В.А.¹, Гребенщикова Е.А.¹, Сидоров В.Г.²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН. Санкт-Петербург.
Россия. vadimshutaev@mail.ru

² ООО «АИБИ». Санкт-Петербург. Россия

Current generation in Pd/InP Schottky photodiodes in hydrogen medium

Yakovlev Yury¹, Shutaev V.A.¹, Grebenschikova E.A.¹, Sidorov V.G.²

¹Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

²LLC “Independent Business & Scientific Group”, St. Petersburg, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-44

A previously unknown effect has been found – in a short-circuited Pd/InP diode structures placed in a gaseous medium containing hydrogen a current generation is observed. It is proposed that the current generation in the Pd/InP structures is due to hydrogen atoms ionization under its interconnection with palladium layer to form protons and electrons which are separated by the Schottky barrier. Based on the Pd/InP structure a new type of current generator can be created.

Обнаружено новое явление – генерация тока в структурах Pd/InP, помещенных в водородную среду. Обнаружение этого явления связано с исследованиями сенсоров водорода на основе диодов Шоттки [1-4]. В этих упомянутых работах изучались I-V характеристики структур Pd/InP и влияние водорода на их свойства при приложении внешнего напряжения. В данной работе мы также использовали диод Шоттки на основе структуры Pd/InP с очень тонким палладиевым слоем толщиной 25 нм. Технология изготовления исследуемых структур Pd/InP (рис. 1) подробно изложена в работах [1, 2].

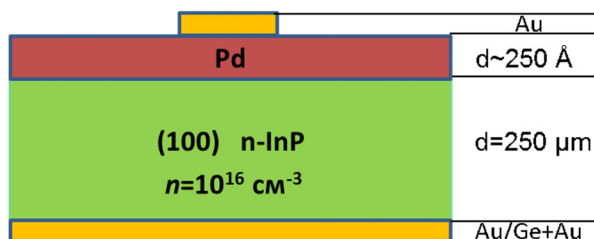


Рис. 1 Схема структуры Pd/InP

Исследование созданных структур проводилось в условиях короткого замыкания, т.е. без приложения внешнего напряжения. Были изучены

электрические свойства структур Pd/InP (рис.1) при 300 К в вакууме, в воздушной атмосфере и в атмосфере водорода. Структуры Pd/InP помещались в кювету, которая откачивалась до давления 10^{-3} mm Hg, а затем наполнялась газовой смесью водорода с азотом с содержанием водорода 10-100 объёмных %. Измерялись токи короткого замыкания при 300 К в воздушной атмосфере, в вакууме и в среде с водородом без освещения и при освещении излучением светодиода с длиной волны в максимуме спектра $0,9 \mu\text{m}$, что соответствует краю поглощения в InP.

На рис. 2 представлено изменение тока в типичной структуре Pd/InP в водородной среде в темноте и при различных интенсивностях освещения структуры излучением светодиода. В водородной среде в темноте появляется ток величиной $4 \mu\text{A}$, т.е. через электрическую цепь каждую секунду проходит порядка $3 \cdot 10^{13}$ электронов. Этот ток возникает только в атмосфере водорода без приложения внешнего напряжения (в режиме короткого замыкания). В дальнейшем этот возникший ток будем называть «водородным током».

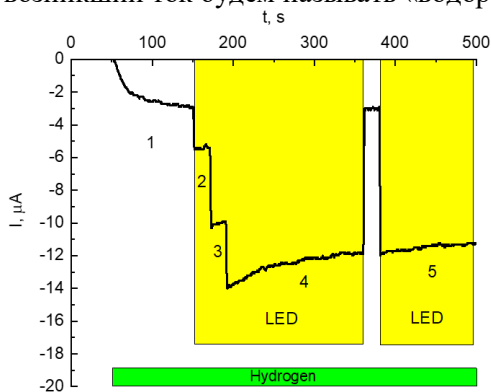


Рис.2. Кинетика генерации тока в структуре Pd/InP при 300К в газовой смеси с 10 об. % водорода при различных интенсивностях освещения структуры излучением светодиода с длиной волны $0,9 \mu\text{m}$;

1 – «водородный ток»; 2, 3, 4 и 5 – сумма «водородного тока» и фототока; поле «LED» на рисунке указывает на то, что светодиод в этот период времени освещает структуру (ток через светодиод, mA: 1 – 0; 2 – 10; 3 – 30; 4 и 5 – 50)

Как полагают авторы, при взаимодействии с тонким палладиевым слоем происходит ионизация атомов водорода с образованием протонов и электронов, которые разделяются на барьере Шоттки. При подаче водорода в кювету вначале появляется «водородный ток» (рис. 2, кривая 1). При дополнительном освещении структуры Pd/InP, находящейся в атмосфере водорода, излучением светодиода с $\lambda = 0,9 \mu\text{m}$ возникает суммарный ток. При этом «водородный ток» и фототок складываются, т.к. имеют одно направление. Отсюда следует, что электроны «водородного тока» генерируются в Pd и переходят в InP, преодолевая потенциальный барьер на границе.

Литература

1. *В.А. Шутаев, Е.А. Гребеницкова, В.Г. Сидоров, Ю.П. Яковлев // ФТП. 55 (12). 1236 (2021). DOI: 10.21883/FTP.2021.12.51712.9725*
2. *В.А. Шутаев, В.Г. Сидоров, Е.А. Гребеницкова, Л.К. Власов, А.А. Пивоварова, Ю.П. Яковлев // ФТП. 53 (10). 1427 (2019). DOI: 10.21883/FTP.2019.10.48302.9152*
3. *Yen-I Chou, Chia-Ming Chen, Wen-Chau Liu, Huey-Ing Chen // IEEE Electron Device Lett., 26 (2), 62–65 (2005). DOI: 10.1109/LED.2004.840736*
4. *A. Ashok Kumar, V. Janardhanam, V. Rajagopal Reddy // Journal of Martial Science: Material Electronics. 2011. Vol. 22. No. 7. pp. 854-861. doi:10.1007/s10854-010-0225-5*

Квантовые точки и новое поколение ИК-фотосенсорики на их основе

Попов Виктор Сергеевич^{1,2}, Пономаренко В.П.^{1,2}, Попов С.В.³

¹ ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия. orion@orion-ir.ru

² Московский физико-технический институт. Долгопрудный. МО. Россия

³ АО «Швабе». Москва. Россия

Quantum Dots and New Generation of IR-photosensors

Popov Victor S.^{1,2}, Ponomarenko V.P.^{1,2}, Popov S.V.³

¹ Orion R&P Association Inc., Moscow, Russia, orion@orion-ir.ru

² MIPT, Dolgoprudny, Russia

³ Shvabe JSC, Moscow, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-47

The state of work on photosensors based on colloidal quantum dots is reviewed. Key results are discussed, as well as directions for further development.

Отличительной чертой последних десятилетий является стремительный рост исследований, направленных на создание фотосенсоров с применением материалов и структур ограниченной размерности. Таковыми могут быть структуры на основе графена, графеноподобных и родственных 2D наноматериалов, “неграфеновых” 2D материалов из элементов IV, V, VI, IIIa, VIa групп таблицы Д.И. Менделеева, наноразмерных слоев топологических изоляторов типа теллурида висмута, квантовые нити и др.

Фотосенсорика на основе коллоидных квантовых точек (ККТ) является одним из наиболее динамично развивающихся направлений фотоэлектроники инфракрасного диапазона. Использование коллоидных квантовых точек существенно упрощает изготовление, снижает ограничения на шаг фоточувствительных элементов матриц и удешевляет технологию производства, что способствует широкому внедрению таких ИК-матриц в различные технические системы.

Одним из достоинств ККТ является простота управления областью

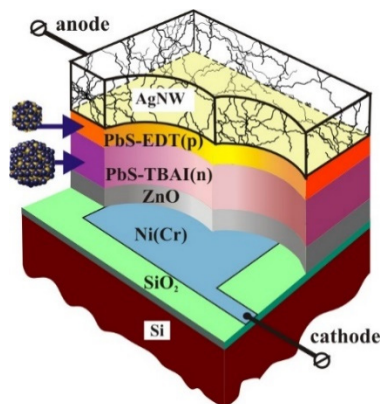


Рис.1. Архитектура фоточувствительного элемента на основе ККТ PbS [1]

спектральной чувствительности путем изменения их размеров, что в свою очередь обеспечивается путем варьирования режимов синтеза ККТ. В последнее время при разработках и изготовлении матричных фотоприемных устройств на основе коллоидных квантовых точек наибольшее распространение получили две архитектуры – с использованием энергетического барьера гетероперехода на контакте слой ККТ PbS/фуллерен C60 или энергетического барьера на контакте двух слоев ККТ PbS с электронным и дырочным типами проводимости. В обоих случаях стыковка fotocувствительной области с кремниевой СБИС считывания и предварительной обработки фотосигналов может осуществляться без использования индиевых микроконтактов. Это обеспечивает простоту технологии изготовления и ограничивает шаг fotocувствительных элементов только шагом входных устройств кремниевой СБИС. В последнее время на основе указанных архитектур созданы и описаны неохлаждаемые матричные фотоприемные устройства с широкой областью спектральной чувствительности от 0.4 до 2.0 мкм и обнаружительной способностью не менее $1.0 \cdot 10^{12} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ (20°C , $\lambda = 1.4 \text{ мкм}$), которая при охлаждении сенсора до температуры -20°C увеличивается до значения $4.0 \cdot 10^{12} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ с форматами 640×512 , 1024×1280 и 1920×1080 при шаге fotocувствительных элементов 15 мкм.

В ходе проведенных работ коллективом из АО «НПО «Орион» и МФТИ предложена и исследована усовершенствованная архитектура матричного fotocувствительного элемента на основе ККТ PbS, показанная на рисунке 1. В качестве верхнего контакта впервые использован слой квантовых нитей из серебра, прозрачный для излучения в области длин волн 0.4 – 2.0 мкм [2].

Проведен полный обзор архитектур, методов получения и основных свойств фотонных сенсоров на основе коллоидных квантовых точек соединений элементов II, IV и VI групп Периодической таблицы Д.И. Менделеева. Описаны особенности синтеза, роль лигандов и морфологии ККТ при создании фотосенсоров. Рассмотрены структурные схемы фоторезистивных, фотодиодных и фототранзисторных элементов на основе коллоидных квантовых точек из HgTe, HgSe, PbS, PbSe, обладающих fotocувствительностью в различных спектральных диапазонах. Приведены основные параметры лучших образцов оптоэлектронных приборов на основе структур из коллоидных квантовых точек. Проанализированы ключевые тенденции развития данного направления.

Литература

1. V.S. Popov, V.P. Ponomarenko, D.V. Dymkin, I.A. Shuklov, A.V. Gadomska, S.B. Brichkin, N.A. Lavrentiev, V.U. Gak, A.E. Mirofyanchenko, E.V. Mirofyanchenko, A.V. Katsaba, P.V. Arsenov, V.V. Ivanov & V.F. Razumov. *Doklady Physics*, 2023, Vol. 68, No. 7, pp. 233–23
2. V.P. Ponomarenko, V.S. Popov, I.A. Shuklov, V.V. Ivanov, V.F. Razumov. *Russian Chemical Reviews*, 2024, 93, RCR5113

Низкоразмерные структуры на основе HgCdTe для физических исследований и приборных применений

Михайлов Николай Николаевич^{1,2}, Дворецкий С.А.¹, Узаков И.Н.¹,
Ремесник В.Г.¹

¹*ИФП СО РАН. Новосибирск. Россия. mikhailov@isp.nsc.ru*

²*Томский государственный университет. Томск. Россия*

Low-dimensional HgCdTe-based structures for physical research and instrument applications

Mikhailov Nikolai N.^{1,2}, Dvoretzky S.A.¹, Uzakov I.N.¹, Remesnik V.G.¹
¹*ISP SB RAS. 13 Lavrentiev aven., Novosibirsk, 630090, Russia, mikhailov@isp.nsc.ru*
²*Tomsk State University. Tomsk. Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-49

The MBE growth processes and physical parameters of the different low-dimensional structures based on Hg_{1-x}Cd_xTe/Hg_{1-y}Cd_yTe quantum wells (QWs) alone and built into complex heterostructures such as multiple QW, laser and nBn structures were studied. All low-dimensional structures were used for developing IR and THz laser and detector devices.

Проведено исследование процессов роста низкоразмерных структур с Hg_{1-x}Cd_xTe/Hg_{1-y}Cd_yTe квантовыми ямами (КЯ) встроенными в сложные гетероструктуры методом МЛЭ на уникальной научной установке «Объ-М» (УНУ 353512) с высокоточным контролем состава X и Y (~ 0.0005 мол.дол.) и толщины (~ 0.5 нм) in-situ с использованием высокоскоростного лазерного эллипсометра и анализом распределения состава по толщине с использованием метода «эффективной подложки».

Фундаментальные физико-химические исследования процессов роста, легирования и механизмов образования дефектов позволили создать альтернативную подложку CdTe/ZnTe/GaAs, нелегированные, и легированные слои твердого раствора HgCdTe высокого качества [1].

Рассмотрены особенности роста структур с одиночными, двойными и множественными Hg_{1-x}Cd_xTe/Hg_{1-y}Cd_yTe КЯ. Толщина варьировалась от 4 нм до 1000 нм и состав изменялся от чистого HgTe до Y ~ 0,18. Проведены расчеты и выполнены эксперименты для определения зонной структуры и энергетического положения уровней размерного квантования из измерений спектров поглощения и фотопроводимости в температурном интервале 77-298 К, которые хорошо согласуются. Данные результаты показали возможность создания детекторов ИК излучения в интервале 2-18 мкм. Длинноволновые ($\lambda_{1/2} = 14$ мкм) фотоспротивления на структурах с

множественными КЯ, изготовленные по заводской технологии, имеют фотоэлектрические параметры, сравнимые с аналогичными на основе сплава [2].

На выращенных структурах проведено большое количество исследований электрофизических свойства без магнитного поля и в магнитном поле разных структур прямым и с инвертированным зонными спектрами. Получены данные параметров 2D и 3D топологических изоляторов (ТИ), дираковских материалов, плазмонных структур и т.д. [3].

Проведено изучение процессов роста сложных лазерных структур, различного дизайна, включающими волноводные слои HgCdTe и активную зону на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{Hg}_{1-y}\text{Cd}_y\text{Te}$ КЯ. Установлена связь длины волны стимулированного излучения от толщины и состава Y. Наблюдалось стимулированное ИК и ТГц излучение с длиной волны 3-5 мкм при температурах вблизи комнатной и до 31 мкм при 20 К, соответственно [4,5].

Проведено изучение процессов роста новых nВn структур для детекторов спектрального диапазона 3-5 мкм и 8-12 мкм. Измерения темнового тока изготовленных детекторов по меза технологии лимитируется диффузионным механизмом в диапазоне температур от 180 до 300 К, что обеспечивает детектирование при повышенных температурах. Температурная зависимость темнового тока хорошо соответствует эмпирической модели «Rule 07» для классических p-n переходов с предельными характеристиками [6].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-62-10021, <https://rscf.ru/project/23-62-10021/>

Литература

1. Dvoretzky S.A., Mikhailov N.N. et al. The Growth of CdTe Layer on GaAs Substrate by MBE, 978-1-78985-860-0 Print ISBN: 978-1-78985-566-1, InTech, DOI: 10.5772/intechopen.73994 (2020).
2. Mikhailov N.N., Dvoretzky S.A. et al. Interband Electron Transitions Energy in Multiple HgCdTe Quantum Wells at Room Temperature, PHOTONICS, V. 10, №4, P 430 (2023)
3. Квон З.Д., и др. Топологические изоляторы на основе HgTe, Успехи физических наук, 2020, т. 190, №9, стр. 673-692
4. Razova A.A., Fadeev M.A et al. Whispering gallery mode HgCdTe laser operating near 4 μm under Peltier cooling, APPL PHYS LETT, V. 123, №16, P. 161105 (2023)
5. Rumyantsev V. V., et al., Stimulated emission in 24–31 μm range and «Reststrahlen» waveguide in HgCdTe structures grown on GaAs, Applied Physics Letters, V.121, №18, P. 182103 (2022)
6. Войцеховский А.А. и др. Униполярные барьерные структуры на основе n-HgCdTe со сверхрешётками в качестве барьера. Оптический журнал. Т.91. № 2. С. 6–22 (2024).

Опыт АО «МЗ «САПФИР» в разработке охлаждаемых фотоприемных устройств

Карпов Владимир Владимирович, Козырев М.Е., Кузнецов С.А.,
Марущенко А.В., Прошкин Ю.Н., Сусов Е.В., Чишко В.Ф.

АО «Московский завод «САПФИР». Москва. Россия. ko-ckb@mail.ru

Experience of joint-stock company «MF «SAPPHIRE» in working out of cooled photodetector devices

Karpov V.V., Kozyrev M.Ye., Kuznetsov S.A., Marushchenko A.V.,
Proshkin Ju.N., Susov E.V., Chishko V.F.

Joint-stock company «Moscow factory «SAPPHIRE». Moscow. ko-ckb@mail.ru

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-51

In the report results of working out of cooled photodetectors, photodetector devices, intended for registration infra-red radiations of an average and distant range of a spectrum, and also cryostats and cooling devices to them are presented.

В докладе приводятся результаты разработки охлаждаемых фотоприемников (ФП), фотоприемных устройств (ФПУ), предназначенных для регистрации инфракрасного (ИК) излучения среднего и дальнего диапазона спектра, а также систем криостатирования (СК) (криостатов и охлаждающих устройств) к ним.

Работы велись по следующим направлениям:

- создание многоэлементных и матричных ФПУ на основе вакуумных (ВК) или газонаполненных (ГНК) криостатов и газовых криогенных машин (ГКМ), предназначенных для тепловизионной аппаратуры различного назначения (ФУК148М, ФУК149М, ФУК151М, ФУК152М, ФУК154М, ФУР137-01, ФУР147Л, ФУР162Л, ФУР165, ФУЛ132-04, ФУЛ132-05);

- создание радиационно охлаждаемых ФП для многозональных сканирующих устройств малого разрешения (МСУ-МР) космических комплексов (КК) «Метеор» и «Метеор-М» (ФР223М, ФР224М, ФД365М; ФР230М, ФР231М, ФД377М);

- разработка экспериментальных образцов ФП для МСУ-МР КК «Метеор-МП» (мультиспектральные - ФР233М, ФР234М, ФР235М, ФД379М, узкоспектральный - ФД381М);

- разработка опытных образцов ФП для Фурье-спектрометра ИКФС-3 КК «Метеор-МП» (ДФП-ИКФС-3, ДФП-ИКФС-3-01);

- производство серийных быстродействующих ФП и ФПУ, а также

дроссельных микрохолодильников (МКХ) к ним (ФРО-139, ФД121-01, ФД277, ФУЛ131, ФД347М, ФД347М-01, ФУР164С, ФУР145С);

- разработка и производство ФП с термоэлектрическим охлаждением (ТЭО) для аппаратуры различного назначения (ФУР160, ФУР139, ФР227, ФР228);

- разработка СК для матричных ФПУ (ФПУ «ТПВК-А» - ВК ЖИАЮ.432235.204 и ГКМ «МКС-ШФС» ЖИАЮ.702411.005, ФПУ «Союз-4» - ВК ЖИАЮ.433451.080 и ВК ЖИАЮ.433451.080-01);

- разработка СК для крупноформатных ФПУ аппаратуры космического базирования для дистанционного зондирования Земли («УФИК» - ВК ЖИАЮ.433451.057, ФПУ «Байкал» - ВК ЖИАЮ.432235.150);

- исследование технологических возможностей создания СК для аппаратуры космического базирования с использованием одной или нескольких ГКМ разнесенного или моноблочного типа, а также ГКМ с пульсационной трубой;

- работы по совершенствованию СК для быстродействующих ФП и ФПУ;

- разработка моноблочных ГКМ в рамках программы импортозамещения для СК («Сапфир-МКС» ЖИАЮ.702411.001 и «МКС-ШФС» ЖИАЮ.702411.005);

- поиск и исследование новых конструкционных материалов, предназначенных для изготовления СК ФПУ различного назначения.

Литература

1. В.В.Карпов, М.Е.Козырев, Н.С.Кузнецов, В.И.Петренко, В.И.Семенов, К.В.Чиж, В.Ф.Чишко. Разработка матричных и субматричных фотоприемных модулей второго поколения. «Контенант», №3, 2015.

2. В.В.Карпов, М.Е.Козырев, Н.С.Кузнецов. Фотоприемные устройства для дистанционного зондирования Земли. Труды форума «OPTICS-EXPO-2015». М., 2015.

3. А.В.Филатов, Н.С.Кузнецов, П.Д.Гиндин, В.В. Карпов, М.Е.Козырев, В.И.Петренко. Приемник излучения с термоэлектрическим охлаждением. Патент на полезную модель РФ №153455, 2015.

4. Н.С.Кузнецов Н.С., П.Д.Гиндин, В.И.Шаевич, В.В.Карпов, М.Е.Козырев, А.В.Марущенко, А.Н.Беженцев. Газовая криогенная машина. Патент на полезную модель РФ № 155514, 2015.

5. В.В.Карпов, М.Е.Козырев, Н.С.Кузнецов, А.В.Марущенко. Разработка криостата для ФПУ ИК радиометра с фоновым экраном и минимизированным теплопритоком. «Космонавтика и ракетостроение», №7 (92), 2016.

6. П.Д.Гиндин, В.В.Карпов, Н.С.Кузнецов, М.Е.Козырев. Комбинированный регенеративный теплообменник газовой криогенной

машины. Патент на полезную модель РФ №176892, 2017.

7. В.В.Карпов, М.Е.Козырев, Н.С.Кузнецов, В.И.Петренко, А.С.Ильин, А.В.Марущенко. Система криостатирования крупноформатных матричных ФПУ. Труды Российской конференции и школы молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «Фотоника-2017». Новосибирск, 2017.

8. П.Д. Гиндин, В.В.Карпов, М.Е.Козырев, Н.С.Кузнецов. Криостат для приемников излучения. Патент на полезную модель РФ №183130, 2018.

9. В.В.Карпов, М.Е.Козырев, Н.С.Кузнецов, А.С.Ильин, А.В.Марущенко. Системы криостатирования для фотоприемных устройств. Труды XXV Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. - М.: АО «НПО «Орион», 2018 г.

10. С.А.Кузнецов, В.В.Карпов, А.В.Филатов, Е.В.Сусов, М.Е.Козырев, А.В.Марущенко, Ю.Н.Прошкин. Радиационно охлаждаемые фотоприемники для дистанционного зондирования Земли. Вестник «Русского оптического общества», №7, 2022.

11. В.В. Карпов, С.А. Кузнецов. Фотоприёмники и фотоприёмные устройства ИК-диапазона для оптико-электронных систем космического базирования. Труды Российской конференции и школы молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «Фотоника-2023». Новосибирск, 2023.

Инфракрасная радиометрия на основе многорядных инфракрасных фотоприемных устройств для дистанционного зондирования Земли

Болтарь Константин Олегович^{1,2}, Бурлаков И.Д.^{1,3}, Гектин Ю.М.⁴,
Головин С.В.¹, Старцев В.В.¹, Яковлева Н.И.¹

¹*ГНЦ РФ ОАО «НПО «Орион». Москва. Россия. orion@orion-ir.ru*

²*Московский физико-технический институт. Долгопрудный. МО. Россия*

³*МИРЭА - Российский технологический университет. Москва. Россия*

⁴*АО «Российские космические системы». Москва. Россия*

Infrared radiometry based on multi-row infrared photodetectors for remote sensing of the Earth

Boltar K.O.^{1,2}, Burlakov I.D.^{1,3}, Gektin Y.M.⁴, Golovin S.V.¹, Startsev V.V.¹,
Iakovleva N.I.¹

¹*Orion R&P Association Inc. Moscow. Russia. orion@orion-ir.ru*

²*Moscow Institute of Physics and Technology. Dolgoprudny. Moscow Region. Russia*

³*State Technical University MIREA. Moscow. Russia*

⁴*Russian Space Systems. Moscow. Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-54

Infrared methods of remote sensing of the Earth from spacecraft are widely used in science and national economy. Orion R&P Association developed multi-row FPAs based on CdHgTe, including multispectral modules of 4x288 elements (7 spectral bands) for remote sensing of the Earth's surface and atmosphere from space to provide hydrometeorological equipment for spacecraft of the Electro-L, Arktika-M series, and monitoring emergency situations on the Canopus-V-IR spacecraft.

Инфракрасные методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с борта космических аппаратов находят широкое применение в науке и народном хозяйстве. Для обеспечения дистанционного зондирования Земли в последнее время активно разрабатываются космические средства, предназначенные для решения задач метеорологии, прогноза погоды и климата, изучения природных ресурсов Земли и контроля состояния окружающей среды [1, 2]. В АО «НПО «Орион» на основе ФПУ из КРТ изготовлены многорядные МФПУ, в том числе многоспектральные комплекты МФПУ формата 4×288 (7 диапазонов) для дистанционного зондирования поверхности Земли и атмосферы из космоса в обеспечение гидрометеорологической аппаратуры на КА серий «Электро-Л», «Арктика-М» и мониторинга чрезвычайных ситуаций

на КА «Канопус-В-ИК».

В основу принципа действия инфракрасных радиометров положено преобразование ИК-излучения от объектов наблюдения в электрические сигналы, на основе которых формируется видимое изображение или задается механизм обработки параметров наблюдаемых объектов при различных фоновых потоках. Для работы в заданных диапазонах ИК области спектра радиометры включают в состав специальные высокочувствительные фотоприемные устройства (ФПУ), использующие матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) с обработкой фотоэлектрических сигналов в БИС считывания. Среди различных полупроводниковых материалов, чувствительных в ИК области спектра, тройные растворы HgCdTe являются лучшим полупроводниковым соединением с точки зрения достижения максимальных фотоэлектрических параметров в заданных ИК диапазонах спектра, что связано с выбором архитектуры фоточувствительных элементов с уменьшенным влиянием тепловых процессов при детектировании излучения.

Комплект из семи охлаждаемых многорядных ИК ФПУ формата 4×288 элементов на основе КРТ с радиационной системой охлаждения до 80 К обладающий чувствительностью в различных диапазонах инфракрасной области длин волн от 3,5 мкм до 12,5 мкм составляет основу аппаратуры геостационарного многоспектрального гидрометеорологического комплекса МСУ-ГС, применяемого в космических аппаратах (КА) серии «Электро-Л» и «Арктика-М». Комплекс МСУ-ГС в одном сеансе формирует семь изображений всего диска Земли в ИК диапазонах с разрешением 4 км.

Комплект из двух охлаждаемых многорядных ИК ФПУ формата 4×288 элементов на основе КРТ на спектральные диапазоны 3-5 мкм и 8-12 мкм, оснащенный работающей по циклу Стирлинга микрокриогенной системой охлаждения, является ключевым компонентом аппаратуры космического комплекса оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций МСУ-ИК-СРМ, входящего в состав исследовательской аппаратуры космического аппарата «Канопус-В-ИК».

Проведен анализ технических решений по улучшению характеристик многорядных ИК ФПУ на основе КРТ для применения в составе космических систем ДЗЗ.

Литература

1. N.I. Iakovleva, K.O. Boltar, A.V. Nikonov and A.V. Egorov, Multi-Row Photodetectors for the Short Wavelength IR Region Based on HgCdTe Heteroepitaxial Structures // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2018. - Vol. 63. - No. 9. - p. 1132.
2. К.О. Болтарь, Н.И. Яковлева, Фотоприемные устройства коротковолнового ИК диапазона спектра, предназначенные для космического мониторинга // Успехи прикладной физики. - 2023. - Т. 11. - № 2. - С. 128–138.

Новые прекурсоры халькогенов для получения коллоидных квантовых точек селенидов и теллуридов

Шуклов Иван Алексеевич

*Московский физико-технический институт. Долгопрудный. МО. Россия.
shuklov.ia@mipt.ru*

New precursors of chalcogens for the synthesis of selenide and telluride colloidal quantum dots

Shuklov I.A.

Moscow Institute of Physics and Technology. Moscow. Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-56

Colloidal quantum dots of lead and mercury chalcogenides are promising nanomaterials for the photodetection applications in the near-IR and mid-IR ranges. New precursors of chalcogens namely selenium and tellurium were developed and applied for the preparation of colloidal nanoparticles (HgTe, HgSe, PbTe). The developed new chemical procedures have improved reproducibility and low requirements to the equipment.

Селениды и теллуриды свинца и ртути (HgTe, HgSe, PbSe, PbTe) обладают шириной запрещенной зоны от 0 эВ для HgTe до 0.32 эВ для PbTe объемных материалов при 300 К. Эти свойства дают тонким пленкам на основе коллоидных квантовых точек халькогенидов потенциал для использования в фотодетекторах для диапазона от ближнего до среднего ИК для HgSe/PbSe и даже дальнего ИК для HgTe. [1] Уникальное сочетание широкополосного поглощения с большим радиусом экситона Бора привлекает к ним пристальное внимание научного сообщества и индустрии, как перспективными материалами для создания фотодетекторов и электролюминесцентных устройств [2].

Для практического применения коллоидных квантовых точек требуются методы получения ККТ данных селенидов и теллуридов для разных диапазонов спектра с хорошей коллоидной стабильностью и узким распределением по размерам. Это необходимо для их успешных применений в создании фоточувствительных слоев. Кроме того, в текущей обстановке возникла необходимость в создании реагентов на основе химического сырья, производимого российской промышленностью.

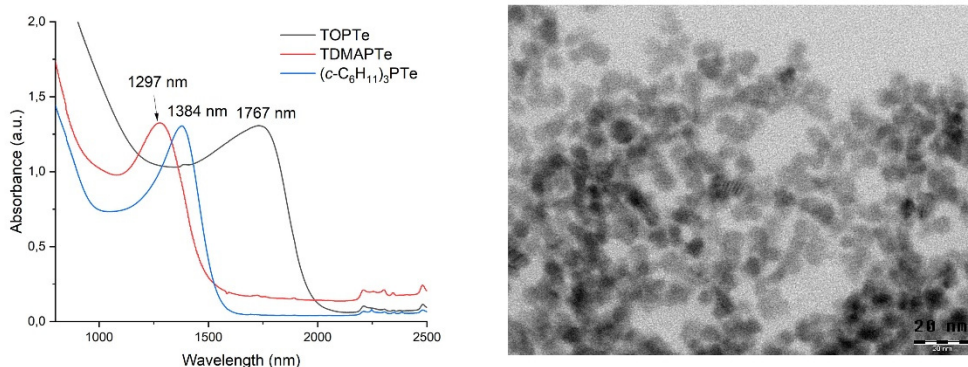


Рис. 1. Спектр поглощения и микрофотография ПЭМ ККТ HgTe

Как правило, коллоидные квантовые точки селенидов и теллуридов получают с использованием прекурсоров теллура и селена на основе триоктилфосфина (ТОФ) [3]. В течении последних лет в нашей лаборатории был разработан ряд альтернатив - прекурсоров этих халькогенов.

Для синтеза ККТ HgTe был разработан прекурсор теллура – раствор трициклогексилфосфин теллурида. Он более удобен в использовании и дает более воспроизводимые результаты в синтеза наночастиц чем ТОФ (Рис. 1). [4]. С его помощью получены образцы ККТ HgTe с максимум экситонного пика от 1380 нм до 2800 нм. Синтез ККТ PbTe с морфологией нанокубов также возможен с его помощью.

Синтез ККТ селенидов свинца и ртути возможен с использованием реагента на основе селена и децена-1. [5] Этот реагент стабилен к окислению на воздухе.

Работа поддержана фондом РФФ (Проект № 23-23-00300).

Литература

1. Пономаренко В.П., Попов В.П., Шуклов И.А., Иванов В.В., Разумов В.Ф. // Успехи химии, 2024, Vol. 93, RCR5113.
2. García de Arquer F. P., Talapin D. V., Klimov V. I., Arakawa Y., Bayer M., Sargent E. H. // Science. 2021. V. 373, eaaz8541.
3. Ganeev R. A., Shuklov I. A., Zvyagin A. I., Dyomkin D. V., Smirnov M. S., Ovchinnikov O. V., Lizunova A. A., Perepukhov A. M., Popov V. S., Razumov V. F. // Optics Express. 2021. Vol. 29, № 11. P. 16710-16726.
3. Shuklov I. A., Mardini A. A., Skabitsky I. V., Dubrovina N. V., Perepukhov A. M., Lizunova A. A., Razumov V. F. // Nano-Structures & Nano-Objects. 2023. V. 35. P. 101020.
5. Shuklov I. A., T. Milenkovich T., Majorova A.V., Seraya O. et al // Прикладная физика. 2024. № 1. P. 43-50.

Возможность фотоэлектрического тока в однородных полупроводниках при отсутствии внешнего электрического поля

Холоднов Вячеслав Александрович^{1,2}

¹*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.
Москва. Россия*

²*ГНЦ РФ ОАО «НПО «Орион». Москва. Россия. vkhododnov@mail.ru*

Possibility of photoelectric current in homogeneous semiconductors in the absence of external electric field

Vyacheslav A. Kholodnov

¹*Kotelnikov Institute of Radiotechnics and Electronics RAS. Moscow. Russia*

²*Orion R&P Association. Moscow. Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-58

In the quasi-neutrality approximation, a theoretical study was carried out on the conversion of the rate of interband photogeneration of carriers by weak optical radiation in a homogeneous semiconductor into electric current in the absence of an external electric field. Impurity recombination of photocarriers was assumed. An analytical relationship has been derived for the photoelectric conversion coefficient of a semiconductor with contacts blocking the electron current. The possibility of a photocurrent occurring despite the absence of an external electric field has been demonstrated.

Принято считать, что фототок плотностью I_{ph} в однородном полупроводнике можно создать только за счет внешнего электрического поля напряженностью E_0 [1-3]. По умолчанию предполагается, что $I_{ph} = 0$ при любом типе контактов. В докладе в приближении квазинейтральности (ПКН), проведен теоретический анализ справедливости этого представления. Рассматриваются блокирующие электронный ток контакты (БЭТК). Показана возможность $I_{ph} \neq 0$ даже когда $E_0 = 0$. Другая причина постановки задачи состоит в возможности существенного увеличения фоточувствительности за счет специального профилирования плотности скорости фотогенерации носителей $g(x)$ вдоль направления I_{ph} (рис. 1а) [4, 5]. Эффект можно обнаружить только при решении вне ПКН [4, 5]. Он вызван фотовозбужденным объемным зарядом. Поперечное направлению I_{ph} излучение за счет пространственного профилирования его потока в принципе дает возможность создавать различные профили $g(x)$. В дальнейшем планируется провести решение задачи вне ПКН. Однако интересно сравнить результаты неквазинейтрального и квазинейтрального и решений. Последнее обычно и используется [1-3].

В данной работе постановка задачи, кроме ПКН и $E_0 = 0$, аналогична работам [4, 5]. Однородный невырожденный полупроводник, междузонная фотогенерации носителей. Поток фотонов направлен поперек направления I_{ph} , размер образца вдоль I_{ph} равен W (рис.1а).

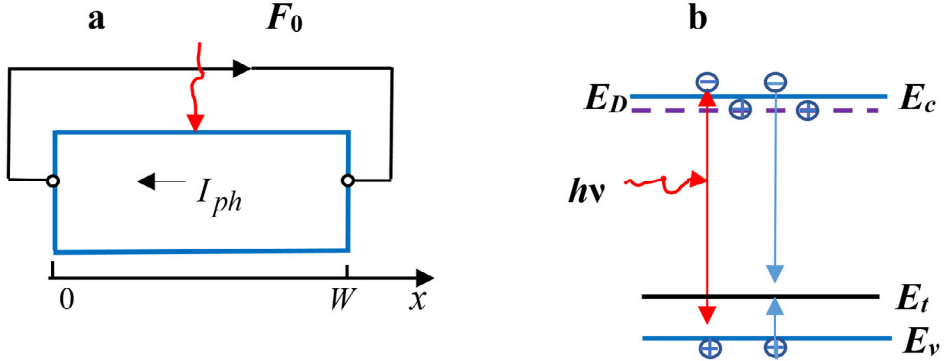


Рис.1(а). Направления I_{ph} и потока фотонов \vec{F}_0 . (б) Схема генерации-рекомбинации носителей; $h\nu$ - энергия фотона, E_c , E_v , E_D и E_A - энергии дна зоны проводимости, потолка валентной зоны, уровня мелкой донорной и рекомбинационной примесей.

На облучаемую поверхность нанесен просветляющий слой, на теневую поверхность - отражающий. Размер образца вдоль направления излучения (ось y) ограничен его длиной поглощения. Все это позволяет избежать увеличения отношения темнового тока к фототоку, когда $E_0 \neq 0$, и обеспечить квантовую эффективность 0.8646. Кроме того, зависимость $g(y)$ с точностью, не меньшей 35% однородна. Поэтому можно ограничиться одномерной задачей вдоль оси x . Образец легирован мелкими, полностью ионизованными донорами. Рекомбинация фотоносителей происходит через атомы акцепторной примеси, находящиеся в отрицательном и нейтральном состояниях. Распределение концентраций фотодырок $\Delta p(x)$ и фотоэлектронов $\Delta n(x)$ в ПКН определяется уравнением амбиполярной диффузии [1,3-7]. Кроме того, [7]

$$I_{ph} = (q/W) \cdot [D_n - D_p \cdot (\tau_p/\tau_n)] \cdot [\Delta n(W) - n\Delta(0)], \quad (1)$$

где D_n , D_p , τ_n , τ_p , - коэффициенты диффузии электронов и дырок и времена жизни фотоэлектронов и фотодырок [6-9]; q - абсолютное значение заряда электрона. При БЭТК граничные условия уравнения амбиполярной диффузии имеют вид

$$\begin{aligned} (\partial \Delta n / \partial x) \Big|_{x=0} &= (\partial \Delta n / \partial x) \Big|_{x=W}, \\ (\partial \Delta n / \partial x) \Big|_{x=0} &= -I_{ph} / [qD_p \cdot (\tau_p/\tau_n + p_e/n_e)] \end{aligned} \quad (2)$$

Решая это уравнение, можно вывести аналитическое выражение для

коэффициента фотоэлектрического преобразования (рис. 2) $G = I_{ph}/qg_{tot}$, где g_{tot} - полная скорость фотогенерации носителей в образце на единицу площади его поперечного сечения.

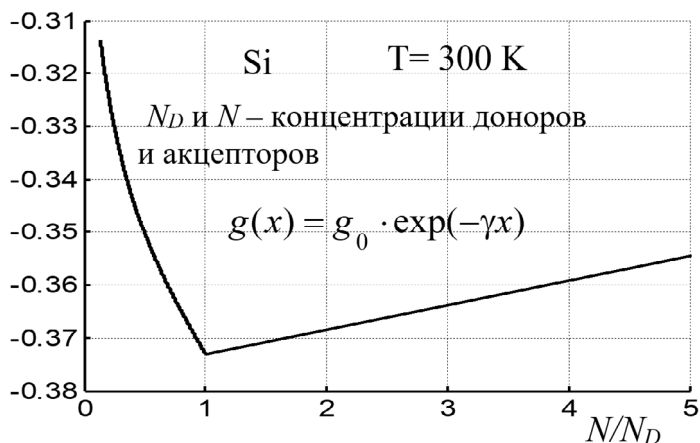


Рис. 2. Принято: вероятности захвата электронов и дырок $w_n = 10^{-8} \text{ см}^3/\text{с}$ и $w_p = 100w_n$, $n_i/n_t = 10^4$, где n_i и n_t - концентрации электронов собственная и равновесная при совпадении уровня Ферми с Et [2, 5-8]; $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $W = 10 \text{ мкм}$, $\gamma = 10^4 \text{ см}^{-1}$.

Из рис.2 видно, что $|G|$ отлично от нуля, хотя и небольшое (≈ 0.35). Интересно, $|G|_{\max}$ достигается вблизи максимальных экстремумов функций $\tau_n(N)$, и $\tau_p(N)$ [9]. В будущем, для выяснения больших возможностей планируется рассмотреть различные типы контактов, а главное, провести решение задачи вне ПКН.

Литература

- [1] R. H. Bube, Photoelectric Properties of Semiconductors (Cambridge: University Press, 1992).
- [2] S. M. Sze, K. Ng. Kwok, Physics of semiconductor devices (3-rd ed., Wiley Interscience, 2007).
- [3] А. М. Филачев, И. И. Таубкин, М. А. Трищенко Твердотельная фотоэлектроника: фоторезисторы и фотодетекторы М.: Физматкнига, 2012.
- [5] V. A. Kholodnov // Global Journal of Astronomy and Applied Physics (USA). 2020. V. 2. №1. P.1.
- [6] V.A. Kholodnov //J. of Communications Technology and Electronics. 2022. V. 67, №3, P. 340 - 343.
- [7] V. A. Kholodnov, M. S. Nikitin //In the book Optoelectronics: Materials and Devices. 2015. Ed. Sergei Pyshkin and John Ballato. InTech: (www.intechopen.com) chapter. 12, P. 301-348.
- [8] А. Милнс Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках.- М.: Мир, 1977

УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ

Развитие и применение ИК МФПУ на основе антимонидов, работающих при повышенных температурах

Мирофянченко Андрей Евгеньевич, Мирофянченко Е.В.

ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия. a.mirofyanchenko@yandex.ru

Advancements in antimony-based HOT IR FPA

Mirofyanchenko A.E., Mirofyanchenko E.V.

Orion R&P Association. Moscow. Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-61

In this report the latest advancements in the development and application antimony-based HOT MWIR and LWIR IR FPA were discussed.

В докладе рассмотрены последние достижения в области разработки и применения матричных инфракрасных фотоприемных устройств на основе антимонидов, работающих в средневолновом (MWIR) и длинноволновом (LWIR) ИК-диапазонах спектра при повышенных рабочих температурах. Основное внимание уделяется преимуществам их использования и предстоящими технологическими вызовами на пути к серийному выпуску изделий на основе данных материалов.

В последние годы наблюдается значительный прогресс в развитии матричных инфракрасных фотоприемных устройств (ИК МФПУ) на основе антимонидов, работающих в средневолновом и длинноволновом ИК-диапазонах спектра при повышенных рабочих температурах. Системы на их основе играют критическую роль в усилении возможностей наблюдения в условиях слабой или нулевой освещенности для военных и гражданских применений, при этом использование приемников, работающих при повышенных температурах снижает зависимость от внешних систем охлаждения, что приводит к снижению массогабаритных характеристик, энергопотребления и стоимости конечного устройства, а также повышению надежности при наработке на отказ.

Материалы на основе элементов A^3B^5 , содержащие сурьму по своей природе обладают прочными ковалентными связями, что обеспечивает ИК МФПУ на их основе лучшие характеристики по однородности, стабильности, масштабируемости, воспроизводимости. Они значительно более устойчивы к

привносимым в процессе производства дефектам, что делает их предпочтительным выбором, когда речь идет о крупносерийных и коммерчески выгодных производствах. Существенным недостатком данной группы материалов является наличие центров рекомбинации Шокли-Рида-Холла в области пространственного заряда, что приводит к повышенным темновым токам и необходимости охлаждения до криогенных температур. Одним из способов решения данной проблемы является использование архитектур с униполярными барьерами.

Технологическими вызовами при производстве таких устройств являются снижение шага элементов и увеличение формата матриц, разработка надежных методов формирования фоточувствительных элементов с последующей пассивацией и внедрение цифровых БИС-считывания.

Литература

1. P.C. Klipstein. Perspective on III–V barrier detectors. Appl. Phys. Lett. 120 060502-1-10 (2022)
2. D. Kwan, M. Kesaria, E. A. Anyebe, D. Huffaker. Recent trends in 8–14 μm type-II superlattice infrared detectors. Infrared Physics and Technology. 116. 103756 (2021)
3. P.C. Klipstein, Y Benny, Y Cohen, N Fraenkel, S Glikzman, A Glozman, I Hirsh, L Langof, I Lukomsky, I Marderfeld, B Milgrom, M Nitzani, D Rakhmilevich, L Shkedy, N Snapi, I Shtrichman, E Weiss, N Yaron. Performance limits of III–V barrier detectors. Journal of Electronic Materials. 49. 6893–6899. (2020)
4. A. Rogalski, M. Kopytko, P. Martyniuk. Antimonide-based infrared detectors: a new perspective. SPIE-The International Society for Optics and Photonics (2018)

Спектральные и фотоэлектрические характеристики МФПУ средневолнового ИК диапазона на основе барьерных структур с поглощающим слоем InAsSb

Ковшов Владимир Сергеевич^{1,2}, Яковлева Н.И.¹

¹ ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва, Россия. kovshov@phystech.edu

² Московский физико-технический институт. Долгопрудный. МО. Россия

Performance and spectral characteristics of MWIR FPA based on barrier structures

with an absorbing layer InAsSb

Kovshov Vladimir S.^{1,2}, Iakovleva N.I.¹

Orion R&P Association Inc. Moscow, Russia¹

Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia²

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-63

The realization of high operating temperature (HOT) MWIR detectors would mitigate the requirements for cooling system, which would lead to a significant reduction in the size, weight and power of the optoelectronic system. One of the most attractive structures is the unipolar barrier structure based on InAsSb. The results of theoretical studies of the MWIR nBn detector performance have been considered in this work. Unipolar barrier structures with an absorbing layer InAs_{0.91}Sb_{0.09} and InAs_{0.81}Sb_{0.19}, providing high performance at operating temperatures up to 150 K have been presented.

Одной из тенденций в современной фотоэлектронике является разработка и изготовление инфракрасных матричных фотоприемных устройств в SWaP-концепции с повышенными рабочими характеристиками. Данная концепция ставит перед разработчиками задачи уменьшения массогабаритных характеристик и энергопотребления. Реализация данной концепции в конечном итоге приведет к созданию компактных портативных тепловизионных систем, снижению нагрузки на оптико-электронную систему, повышению ее надежности и автономности, а также к снижению ее стоимости [1, 2].

На мировом уровне попытки разработать технологию в SWaP-концепции привели к появлению высокотемпературных ФПУ на основе барьерных структур. Израильская компания Semiconductor Devices (SCD) является безусловным мировым лидером в разработке таких ФПУ. В 2021 г. на рынке появилась крупноформатное МФПУ «Crane» в SWaP-концепции с шагом 5 мкм и рабочей температурой 150 К [3]. Необходимо, однако, отметить, что

приборная реализация фотоприемников с барьерной структурой, ставшей уже классической, как правило, осуществляется с использованием материала активного слоя с длинноволновой границей чувствительности около 4 мкм, тогда как для более эффективного использования окна прозрачности атмосферы 3-5 мкм требуется более длинноволновый фотодетектор.

В данной работе представлены результаты теоретических исследований спектральных и фотоэлектрических характеристик ИК МФПУ на основе барьерной nVn -структуры с поглощающим слоем $InAs_{0.91}Sb_{0.09}$ с длинноволновой границей чувствительности $\lambda_{0.5} \sim 4$ мкм. По задаче расширения спектрального диапазона до 5 мкм предложено техническое решение в виде nVn -структуры на основе $InAs_{0.81}Sb_{0.19}$, обеспечивающей повышенные фотоэлектрические характеристики при рабочих температурах до 150 К.

1. Martyniuk P.M., Rogalski A.W. HOT infrared photodetectors //Opto-Electronics Review. – 2013. – Vol. 21. – №. 2. – pp. 239-257.

2. Rogalski A.W., Kopytko M.E., Martyniuk P.M. Antimonide-based infrared detectors: a new perspective. – SPIE-The International Society for Optics and Photonics, 2018.

3. Shkedy L. et al. HOT MWIR detector with 5 μ m pitch //Infrared Technology and Applications XLVII. – SPIE, 2021. – Vol. 11741. – pp. 146-157.

Низкочастотные шумы в МФПУ на основе антимонида индия с различной кристаллографической ориентацией

Власов Павел Валентинович¹, Болтарь К.О.^{1,2}, Лопухин А.А.¹,
Ерошенков В.В.¹

¹ ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия. padreumberto@yandex.ru

² Московский физико-технический институт. Долгопрудный. МО. Россия

Low-frequency noise in focal plane array 640×512 InSb detectors with different crystallography

Vlasov P.V., Boltar K.O., Lopukhin A.A., Eroshenkov V.V.
Orion R&P Association, Inc. Moscow. Russia. padreumberto@yandex.ru

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-65

Low-frequency noise in InSb 640x512 elements FPA, accompanying with spontaneous and sharp reduction of a target signal are investigated. Properties and characteristics of the found out low-frequency noise are resulted. Correlation between impurity density in bulk InSb on the basis of which were made FPA is found out. A comparison of FPA with two types of crystallography is carries out. The advantages of orientation [111] in terms of flickering and drifting pixels are shown.

В АО «НПО «Орион» производятся МФПУ средневолнового инфракрасного спектрального диапазона на основе объемного антимонида индия (InSb) формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм с охладителем типа интегральный Стирлинг и электроникой обработки тепловизионного изображения [1]. Фотодиодные матрицы на основе InSb отличаются высокой чувствительностью, хорошей однородностью свойств по площади и высокой долговременной стабильностью [2].

Для стабилизации фотоэлектрических характеристик, надежности работы и уменьшения шумов МФПУ на поверхности меза-структуры со стороны p-n перехода МФЧЭ формируется диэлектрическое покрытие. Изгиб зон позволяет фотогенерируемым носителям заряда вблизи границы раздела InSb-диэлектрик стекать из зоны проводимости полупроводника и захватываться на мелкие и глубокие уровни в анодном окисле, что является одной из причин возникновения взрывного шума.

В серийных МФПУ с кристаллографической ориентацией InSb [100] наблюдается низкочастотный шум, проявляющийся через определенное время после включения МФПУ в виде одиночных пикселей с пониженным уровнем сигнала. Уменьшение выходного сигнала происходит спонтанно и резко – если после двухточечной коррекции неоднородности МФПУ «смотрит» на однородный фон, данные пиксели выглядят как «темные точки» [3]. Даже при

снятии данных на высокой кадровой частоте 2,5 кГц появление «темной точки» происходит в пределах продолжительности одного кадра (400 мкс).

Уменьшение уровня выходного сигнала в шумящем пикселе составляет от 12 до 60 ед. АЦП (при среднем значении шума по матрице 4 ед. АЦП находится в пределах: от 3 до 15 шумов для 90% элементов). Одновременно с уменьшением сигнала шумящего элемента, зачастую происходит увеличение уровня сигнала в соседних (в том числе диагональных) пикселях.

Низкочастотные шумы не имеют строгой пространственной локализации и не обусловлены характеристиками определенных элементов матрицы. При многократном включении МФПУ расположение «темных точек» по площади матрицы изменяется от включения к включению и соответствует различным пикселям изображения.

Низкочастотные шумы не выявлены для матриц с большим шагом между элементами. На фотоэлектрических изображениях матриц с шагом 30 и 40 мкм «темные точки» не наблюдались. Обнаружена корреляция между концентрацией примеси в пластинах InSb, на основе которых изготавливались МФЧЭ, и проявлением низкочастотных шумов.

Проведены исследования МФПУ формата 640×512 элементов на основе антимолибдита индия с кристаллографической ориентацией [111] с точки зрения наличия «темных точек», а также количества мерцающих, дрейфующих и взрывных пикселей после двухточечной коррекции неоднородности, обладающих шумовыми характеристиками, типичными для избыточного низкочастотного шума [4].

Для этого было выполнено три автоматических алгоритма определения дефектных пикселей. Алгоритм 1 определяет «грубые» дефекты с заданными критериями дефектовки по величине сигнала и среднеквадратичного шума. Алгоритм 2 позволяет после вычитания постоянной составляющей сигнала и коррекции неоднородности чувствительности МФПУ определить пиксели с нелинейностью выходного сигнала. Алгоритм 3 позволяет определить пиксели с низкочастотным шумом, которые на тепловизионном изображении проявляются в виде выделяющихся по яркости пикселей.

Таблица 1

Номер	Количество дефектов по Алгоритму 1	Количество дефектов по Алгоритму 2	Количество дефектов по Алгоритму 3	Общее количество дефектов
№ 01 ориентация [111]	790	233	47	882
№ 02 ориентация [111]	709	207	22	795
№ 03 ориентация [111]	772	316	46	907
Среднее для ориентации [100]	1064	482	382	1588

В таблице 1 представлены данные по количеству дефектных пикселей для трёх МФПУ с кристаллографической ориентацией [111] в сравнении со средними значениями дефектов для кристаллографической ориентации [100].

Полученные данные показывают, что с точки зрения пикселей с избыточным низкочастотным шумом МФПУ формата 640x512 элементов на основе антимонида индия с кристаллографической ориентацией [111] значительно превосходят МФПУ с ориентацией [100]. Также в данных МФПУ не обнаружен эффект «темных точек».

[1] Балиев Д.Л., Болтарь К.О., Власов П.В., Киселева Л.В., Ложников В.Е., Лопухин А.А., Мансветов Н.Г., Полунеев, Рудневский В.С., Савостин А.В. Матричное фотоприемное устройство на основе антимонида индия формата 640x512 с шагом 15 мкм // Прикладная физика, 2014, №2, с. 41 – 44.

[2] <http://orion-ir.ru> АО «НПО «Орион» ГНЦ РФ, Россия.

[3] Болтарь К.О., Власов П.В., Лопухин А.А., Пермикина Е.В. Низкочастотные шумы в МФПУ формата 640x512 элементов с шагом 15 мкм на основе антимонида индия // Прикладная физика, 2023, №5. с. 68 – 74.

[4] W. Gross, Th. Hierl, M. Schulz, J. Haigh Correctability of the spatial nonuniformity in various infrared focal plane arrays // 1998

Актуальность и организация проведения реставрационных работ фотоприемных модулей

Конча Максим Игоревич

*ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России. Москва. Россия.
46cnii_1@mil.ru*

Relevance and organization of restoration work of photodetector modules

Koncha Maksim I.

FSBI «46CRI» Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-68

This article discusses the issues of relevance, technical feasibility and organization of restoration, which is in demand today for a group of military electronic component base: photodetector modules. The restoration of photodetector modules is proposed as a measure to ensure the operation and repair of optoelectronic system of weapons, military and special equipment.

В настоящее время при ремонте образцов вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ), стала актуальной проблема замены неисправных фотоприемных модулей, входящих в состав оптико-электронных систем (ОЭС). ОЭС являются неотъемлемой частью высокоточного оружия, предназначены для разведки, наведения и целеуказания при ведении огня. Техническое состояние ОЭС непосредственно влияет на эффективность применения как самих ОЭС, так и на эффективность применения образцов вооружения, в состав которых они входят. В ряде случаев отечественные образцы ОЭС укомплектованы ФПМ иностранного производства, которые в условиях санкций закупить невозможно.

Для оперативного восстановления работоспособного состояния ОЭС предлагается производить ремонт ФПМ.

При этом следует учитывать, что ФПМ относятся к электронной компонентной базе, к которой в соответствии с комплексом государственных военных стандартов (КГВС) «Климат» требования по ремонтпригодности не предъявляются. Соответственно ФПМ являются невосстанавливаемыми и неремонтируемыми изделиями. Однако существует практика восстановления параметров и ремонта электровакуумных приборов сверхвысоких частот (ЭВП СВЧ) (магнетроны, клистроны и др.), для чего проводится реставрация указанных приборов, связанная с их разборкой и заменой узлов [1]. Предлагается данный подход распространить на ФПМ.

Опыт проведения реставрации различных типов ЭВП СВЧ отечественного и иностранного производства показал техническую состоятельность и экономическую целесообразность проведения таких работ. [2]

Реставрация ФПМ позволит решить задачу по оперативному восстановлению ОЭС. Реставрационные работы могут проводиться на ФПМ отечественного и иностранного производства, возвращенных из сферы эксплуатации, в случае технико-экономической целесообразности проведения таких работ. Реставрация также может проводиться с целью модернизации, учитывая научно-технические достижения, появившиеся к моменту реставрации.

Под реставрацией ФПМ предлагается понимать работы по ремонту ФПМ, связанные с разборкой прибора, дефектацией и заменой его узлов.

Решение о технической целесообразности реставрации должно приниматься индивидуально по каждому ФПМ на основе результатов диагностики его технического состояния. Диагностика технического состояния приборов и узлов должна обеспечивать объективную оценку объема планируемых реставрационных работ [3].

Самым простым способом привести ФПМ в исправное состояние является замена неисправного узла на исправный узел. Выполнение мероприятий по реставрации предусматривает полное восстановление исправного состояния, соответствия прибора требованиям ТУ, предъявляемым к приборам текущего производства, за исключением его ресурса.

Основой обеспечения качества реставрируемых ФПМ является контроль важнейших операций технологического процесса реставрации изделий, сплошной (100%) выходной контроль электрических параметров в соответствии с требованиями ТУ, сокращенный относительно требований ТУ объем неразрушающих испытаний на безотказность и устойчивость к внешним воздействующим факторам с контролем диагностических параметров, который устанавливается для конкретных типов изделий с учетом их конструктивных и функциональных особенностей.

Обязательным условием для проведения реставрационных работ ФПМ должно являться наличие на предприятии КД и ТД на производство и реставрацию конкретных типов приборов, собственного производства однородной продукции, необходимого технологического оборудования и квалифицированного персонала. При реставрации изделий на предприятии, не являющимся производителем ФПМ, перед проведением реставрационных работ необходимо выполнение ОКР по разработке КД и ТД на реставрацию [4].

Для решения вопроса своевременного и качественного обеспечения эксплуатации и ремонта радиоэлектронной аппаратуры мероприятия по реставрации ФПМ, включающие порядок и обязательные условия для проведения реставрационных работ, технические требования по реставрации

приборов и узлов, методы технической диагностики состояния приборов, обеспечению и контролю качества целесообразно регламентировать в общих технических условиях на ФПМ, разработка которых планируется в рамках реализации организационно-технических мероприятий по внедрению КГВС «Климат-8». Альтернативным решением этому может стать разработка отдельного государственного стандарта по реставрации ФПМ.

1. РД В 22.12.200-2002. Приборы электровакуумные СВЧ. Реставрация (регенерация) приборов и узлов. Диагностика состояния, обеспечение и контроль качества. Технические требования.

2. Бакуменко А.В. Научно-технические и производственно-экономические основы реставрации мощных СВЧ приборов // А.В.Бакуменко; авторефер. дис. д-ра техн. наук – М.:2002.

3. А.Бакуменко, А.Киселев, А.Соколов. Проблемы реставрации ЭВП в современной России // Электроника: Наука, Технология, Бизнес 5/2001.

4. Конча М.И., Ерохина Е.С., Лопаткин К.С. Реставрация (регенерация) электровакуумных приборов СВЧ, проблемы организации реставрационных работ и пути их решения // Материалы юбилейной научно-технической конференции АО «НПП «Алмаз», 2022.

Фотомемристорные сенсоры для автономных систем зрения на основе низкоразмерных материалов

Панин Геннадий Николаевич¹, Капитанова О.О.^{2,3}

¹*ИПТМ РАН. Черноголовка. МО. Россия. panin@iptm.ru*

²*Московский государственный университет. Москва. Россия*

³*МФТИ. Центр фотоники и 2D материалов. Долгопрудный. Россия*

Photomemristor sensors for autonomous vision systems based on low- dimensional materials

Panin Gennady N.¹, Kapitanova O.O.^{2,3}

¹*IMT RAS, Chernogolovka. Moscow region. Russia*

²*MSU. Department of Chemistry. Moscow. Russia*

³*MIPT. Center for Photonics and 2D Materials. Dolgoprudny. Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-71

Low-dimensional (LD) materials, such as graphene and its derivatives [1, 2], have recently been actively studied for use in photomemristor structures [3] for energy-efficient processing of visual information and pattern recognition in real time [4]. Photomemristive states, controlled by polarization [3], redox processes [5], and photoinduced structural transitions [6], exhibit dynamic behavior necessary to implement in-detector computation for fast detection [7,8], preprocessing, and storage of visual information [9]. In this work, photomemristors based on 2D materials such as graphene, graphene oxide, transition metal disulfides, and layered quantum dots are considered. It has been shown that LD materials can be used for intelligent imaging in a wide UV-IR range with preliminary information processing in the detector itself. Smart detectors with embedded retinal-like neural networks can be made from flexible, biocompatible materials and used in a wide variety of applications. The use of LD photomemristive materials is a promising approach to creating energy-efficient intelligent autonomous pattern recognition systems.

Низкоразмерные (НР) материалы, такие как графен и его производные [1, 2], в последнее время активно изучаются для использования в фотомемристорных структурах [3] для энергоэффективной обработки визуальной информации и распознавания образов в реальном времени [4]. Фотомемристивные состояния, контролируемые поляризацией [3], окислительно-восстановительными процессами [5] и фотоиндуцированными структурными переходами [6], демонстрируют динамическое поведение, необходимое для реализации вычислений внутри детектора для быстрого

обнаружения [7, 8], предварительной обработки и хранения визуальной информации [9]. В данной работе рассмотрены фотомемристоры на основе двумерных материалов, таких как графен, оксид графена, дисульфиды переходных металлов, и слоев квантовых точек. Показано, что НР материалы можно использовать для интеллектуальной визуализации в широком УФ-ИК диапазоне с предварительной обработкой информации в самом детекторе. Умные детекторы со встроенными нейронными сетями, подобными сетчатке, могут быть изготовлены из гибких биосовместимых НР материалов и использоваться в самых разных приложениях. Использование фотомемристивных НР материалов является перспективным подходом к созданию энергоэффективных интеллектуальных автономных систем распознавания образов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-49-00159).

1. X. Fu et al. // *Nanoscale*. 2017. V.9, N.5, P.1820.
2. N. N. Kovaleva et al. // *2D Mater.* 2019. V.6, 045021.
3. W. Wang et al. // *Sci. Rep.* 2016. V.6, 31224.
4. G. N. Panin // *Electronics* 2022. V.11, P.619.
5. O. O. Kapitanova et al. // *J. Mater. Sci. Technol.* 2020. V.38, P.237.
6. X. Fu et al. // *Small* 2019. 1903809.
7. G. N. Panin // *Chaos, Solitons and Fractals* 2021. V.142, P.110523.
8. X. Fu et al. // *Mater. Horiz.* 2022. V.9, P.3095.
9. X. Fu et al. // *Light Sci. Appl.* 2023. V.12, P.39.

Фотоприемник SWIR излучения на основе коллоидных квантовых точек PbS и линейного фоточувствительного прибора с переносом заряда

Чельшков Сергей Николаевич^{1,2}, Аввакумов Р.А.^{1,2}, Егоренков А.А.^{1,2},
Татаурщиков С.С.¹

¹*АО «ЦНИИ «Электрон. Санкт-Петербург. Россия.
s.chelyshkov@nielectron.ru*

²*СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Санкт-Петербург. Россия*

SWIR radiation photodetector based on colloidal PbS quantum dots and charge transfer linear photodetector

Chelyshkov Sergey N.^{1,2}, Avvakumov R.A.^{1,2}, Egorenkov A.A.^{1,2},
Tataurshchikov S.S.¹

¹*JSC «NRI Electron», Saint Petersburg, Russia*

²*SPbSETU «LETI», Saint Petersburg, Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-73

The possibility of integrating colloidal PbS quantum dots (CQDs) with a charge transfer linear photosensitive device (CTLPD) developed at JSC «NRI «Electron» is considered. Two methods of coupling CQDs with CTLPD are proposed, and the main charge transfer mechanisms are elucidated. The potential for creating a new SWIR radiation photodetector based on coupled CQDs and CTLPD is noted at JSC «NRI «Electron».

В связи с высокой стоимостью и технологической сложностью основных методов синтеза фотоприемников ближнего инфракрасного диапазона (SWIR) на основе гетероструктур InGaAs/GaAs, в последнее время повышенный интерес научного сообщества направлен на расширение спектрального диапазона существующих приемников излучения на основе Si в инфракрасную (ИК) область. Одним из методов получения фотоприемников ИК диапазона, интегрированных с кремниевой технологией считывания заряда, являются коллоидные квантовые точки (ККТ) [1]. Благодаря эффектам размерного квантования носителей заряда использование таких структур, по сравнению с объемными фотоприемниками, обладает рядом преимуществ: уменьшение рассеяния фононов и увеличение времени жизни носителей, снижение темнового тока, возможность управлять шириной энергетического зазора, изменяя геометрические размеры ККТ. На данный момент основным материалом ККТ в SWIR фотоприемниках являются квантовые точки на основе PbS. Связано это с высокой устойчивостью к окислению и оптимальным

диапазоном перестройки края собственного поглощения (до длины волны 2,6 мкм).

Перспективным направлением в области фотодетекторов на основе ККТ является их сочленение с фоточувствительным прибором с переносом заряда (ФППЗ), имеющим в своей конструкции фоточувствительные элементы, содержащие фотодиоды. Это могут быть матричные фотоприемники, построенные по методу межстрочного переноса, а также линейные фотоприемники с разделением областей переноса и накопления заряда [2]. В нашем случае предложена конструкция линейных фоточувствительных приборов с переносом заряда (ЛФППЗ), состоящих из 1000-12000 фотодиодов [3], схемы накопления и считывания заряда. Под действием падающего излучения в кремниевых фотодиодах генерируются электрон-дырочные пары, которые затем разделяются на р-n переходе с переносом неосновных носителей заряда в секции накопления, где для них индуцируются потенциальные ямы. Затем неосновные носители заряда собираются на выходном устройстве с помощью схемы считывания заряда.

Нанося ККТ PbS на поверхность фотодиодов простыми методами, например, центрифугированием или послойным нанесением, можно обеспечить чувствительность ЛФППЗ за счет механизма резонансной передачи энергии (RET) экситонов [4]. Другим способом интеграции коллоидных точек PbS на ЛФППЗ является замена в кремниевом фотодиоде области генерации электронно-дырочных пар, например, области р-типа, на р-тип ККТ PbS с помощью совместных процессов травления Si и нанесения коллоидных точек. В данном случае экситоны, генерируемые при воздействии излучения в слое ККТ, диссоциируют вблизи поверхности границы раздела ККТ PbS/Si с пространственным разделением носителей заряда. [5]

АО «ЦНИИ «Электрон» обладает богатым опытом и имеют обширную техническую основу в разработке приборов с переносом заряда, в том числе и ЛФППЗ для таких применений, как системы координатных, угловых и спектральных измерений; ориентации космических аппаратов по солнцу типа ГЛОНАСС [2,6]. Данные приборы обеспечивают высокую эффективность переноса заряда и интегральную чувствительность, низкий темновой сигнал, большой срок службы. Большая компонентная база позволяет АО «ЦНИИ «Электрон» разрабатывать принципиально новые фотоприемники SWIR излучения на архитектуре ЛФППЗ.

Литература:

1. Xu K., Xiao X., Zhou W., Jiang X., Wei Q., Chen H., Deng Z., Huang J., Chen B., Ning Z. Inverted Si:PbS Colloidal Quantum Dots Heterojunction Based Infrared Photodetector. ACS Applied Materials & Interfaces. 2020. Vol. 12, № 13. P.15414–15421. doi: 10.1021/acsami.0c01744.

2. Пат. SU1803944 (RU). Линейный фоточувствительный прибор с переносом зарядов / В.А. Арутюнов, Н.Г. Богатыренко, А.С. Грибов, О.В. Сорокин. Заявл. 05.12.89; опубл. 23.03.93. Бюл. №11.

3. Алымов, О.В. ЛФПЗС для телевизионных систем автоматики / О.В. Алымов, В.А. Арутюнов, Г.В. Левко, А.Е. Прокофьев // 20 Международная научно-техническая конференция «Современные телевидение и радиоэлектроника». Москва, 2012. С. 111-114.

4. Andreakou P., Brossard M., Bernechea M., Konstantatos G., Lagoudakis P., Freundlich A., Guillemoles J. F. Resonance energy transfer from PbS colloidal quantum dots to bulk silicon: the road to hybrid photovoltaics. *Physics, Simulation, and Photonic Engineering of Photovoltaic Devices*. 2012. Vol. 8256. doi: 10.1117/12.908357.

5. Huang C.Y., Wang D.Y., Wang C.H., Wang Y.T., Jiang Y.T., Yang Y.J., Chen C.C., Chen Y.F. Efficient light harvesting and carrier transport in PbS quantum dots-silicon nanotips heterojunctions. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2011. Vol. 44, № 8. P. 085103. doi: 10.1088/0022-3727/44/8/085103.

6. Пат. SU1805513 (RU). Фоточувствительный прибор с зарядовой связью / В.А. Арутюнов, О.В. Сорокин. Заявл. 07.05.90; опубл. 30.03.93. Бюл. №12.

Поверхностно облучаемые фотодиоды для спектральной области $\lambda=2\div 4.5$ мкм на основе ДГС N-InAsSbP/InAs(Sb)/P-InAsSbP

Ременный Максим Анатольевич, Климов А.А., Кунков Р.Э., Лухмырина Т.С.,
Матвеев Б.А., Усикова А.А.

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН. Санкт-Петербург.
Россия. Mremennyu@mail.ioffe.ru*

InAsSbP/InAs surface eliminated photodiodes ($\lambda=2\div 4.5$ μm)

M.A. Remennyi, A.A. Klimov, R.E. Kunkov, T.S. Lukhmyrina,
B.A. Matveev, A.A. Usikova

*Ioffe Institute, 26 Politekhnicheskaya, St Petersburg 194021, Russian
Federation*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-76

Double heterostructure InAsSbP/InAs(Sb) surface illuminated photodiodes for 2-4.5 μm spectral range have been fabricated, studied and characterized in the 200-500 K temperature range.

Фотоприемники, работающие в средневолновой ИК области спектра (3-5 мкм), являются ключевыми элементами для многих приборов и систем, в частности: систем дистанционного зондирования Земли и тепловизионных приборов.

Среди различных подходов к созданию фотоприемников для средней ИК области спектра, использование р-п гетероструктур на основе твердых растворов арсенида индия (InAsSb, InAsSbP) является одним из наиболее перспективных направлений, что связано с металлургической стабильностью материалов АЗВ5, доступностью подложек для их роста, и их относительно невысокой стоимостью. Существующий уровень технологии обеспечил создание коммерчески доступных фотодиодов на основе эпитаксиальных слоев InAs, характеризующихся параметрами токовой чувствительности и обнаружительной способности при комнатной температуре (25 °C): $S_i = 1$ А/Вт, $D^* = (3\div 4.5)\times 10^9$ см·Гц^{1/2}/Вт [1], $S_i = (0.95\div 1.08)$ А/Вт, $D^* = 1\times 10^{10}$ см·Гц^{1/2}/Вт [2], $S_i = (0.7\div 0.9)$ А/Вт, $D^* = (5\div 7)\times 10^9$ см·Гц^{1/2}/Вт [3]. В ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, на протяжении многих лет проводилась разработка и исследование фотодиодов на основе одиночных гетероструктур P-InAsSbP/InAs [4,5], соответствующих мировому уровню с параметрами $S_i = 1$ А/Вт, $D^* = 8\times 10^9$ см·Гц^{1/2}/Вт [6], на которых впервые были проведены исследования низкочастотных шумов в широком интервале температур и внешних смещений

[7, 8]. Создание и внедрение оптоэлектронной компонентной базы (свето- и фотодиодов) для диапазона длин волн 3-5 мкм на основе вышеуказанных р-п гетероструктур, обеспечили появление таких изделий, как: алкотестеры, капнографы прямого и бокового потоков, газоанализаторы для детектирования углекислого и угарного газов, производимых отечественной промышленностью. Тем не менее, достигнутый уровень проработки технологии все еще не является предельно возможным, в связи с чем растет количество опубликованных работ, имеющих целью создание фотоприемников, обладающих улучшенными по сравнению с существующими параметрами.

Данная работа посвящена разработке и исследованию поверхностно облучаемых фотоприемников с вводом излучения через тонкий слой P-InAsSbP на основе ДГС N-InAsSbP/InAs(Sb)/P-InAsSbP, выращенных на подложках n^+ -InAs (100) методом ЖФЭ, фоточувствительных в спектральной области $\lambda=2\div 4.5$ мкм и работающих в интервале температур 200-500 К. Показано, что предложенные решения по конструкции эпитаксиальной структуры N-InAsSbP/InAs(Sb)/P-InAsSbP и чипа фотоприемника на ее основе обеспечили достижение значений токовой чувствительности и обнаружительной способности на длине волны 3.3 мкм $S_i = (1.6\div 1.75) A/Вт$, $D^* = 1.5 \times 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2}/Вт$ (22 °С), соответственно.

Литература

1. www.hamamatsu.com; InAs photovoltaic detectors, Part number: P10090-01
2. www.lasercomponents.com; InAs Photodiodes, Part number: IA35-Series
3. <https://vigophotonics.com>; InAs and InAsSb IR detectors; Part number: PVA-3-1x1-TO39-NW-90
4. Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Н.М. Латникова, А.А. Лавров, Б.А. Матвеев, А.С. Петров, М.А. Ременный, Е.Н. Севостьянов, Н.М. Стусь; «Охлаждаемые фотодиоды на основе одиночной гетероструктуры II типа р-InAsSbP/n-InAs», Письма в ЖТФ, 2013, том 39, вып. 18, стр.45-52
5. С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, В.И. Ратушный, М.А. Ременный, А.Ю. Рыбалченко, Н.М. Стусь, “Вольт-амперные характеристики и сбор фототока в радиально симметричных поверхностно облучаемых фотодиодах на основе InAsSb(P)”, ЖТФ, 2014, том 84, вып. 11, стр. 52–57
6. P.N. Brunkov, N.D. Il'inskaya, S.A. Karandashev, N.M. Latnikova, A.A. Lavrov, B.A. Matveev, A.S. Petrov, M.A. Remennyi, E.N. Sevostyanov, N.M. Stus, “p-InAsSbP/n⁰-InAs/n⁺-InAs photodiodes for operation at moderate cooling (150–220K)”, ФТП, 2014, том 48, вып. 10, стр. 1394-1397
7. N Dyakonova, S A Karandashev, M E Levinshtein, B A Matveev, M A Remennyi, «Low frequency noise in p-InAsSbP/n-InAs infrared photodiodes», Semicond. Sci. Technol. 33 (2018) 065016, pp. 1-5
8. N Dyakonova, S A Karandashev, M E Levinshtein, B A Matveev, M A Remennyi, «Low frequency noise in reverse biased P-InAsSbP/n-InAs infrared photodiodes», Semicond. Sci. Technol. 34 (2019) 015013, pp. 1-5

Контроль плотности дефектов QWIP гетероструктур в АО «Светлана-Рост»

Дудин Анатолий Леонидович¹, Богословская Л.С.¹, Кацавец Н.И.¹,
Куликов В.Б.², Маслов Д.В.², Чалый В.П.¹

¹АО «Светлана-Рост». Санкт-Петербург. Россия. iana.stoliarowa@yandex.ru

²АО «ЦНИИ «Циклон». Москва. Россия

Control of the defect density on QWIP heterostructures at JSC "Svetlana-Rost"

Dudin Anatoliy L.¹, Bogoslovskaya L.S.¹, Katsavets N.I.¹, Kulikov V.B.²,
Maslov D.V.², Chaly V.P.¹

¹JSC "Svetlana-Rost", Saint Petersburg, Russia

²JSC "Central Research Institute "Cyclone", Moscow, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-78

This presentation gives information about control of the surface defect density on QWIP heterostructures in the manufacturing process of large-format matrices of the 8-10 micrometer IR range. Authors present a comparison between surface defect wafer density and broken pixel density of IR matrices. Improvement of QWIP heterostructure quality and constant control over the level of defects allows JSC "Svetlana-Rost" to produce matrices with operability of 99.9%.

Инфракрасные широкоформатные матрицы с массивом квантовых ям (QWIP) на основе соединений GaAs/AlGaAs, находят широкое применение для различных приложений в тепловизионной технике длинноволнового ИК-диапазона (8-12 мкм) [1]. Несмотря на то, что традиционные HgCdTe фотодетекторы достигают более высоких значений фоточувствительности и квантового выхода, широкоформатные QWIP матрицы, обладающие высокой однородностью, меньшей плотностью ростовых дефектов, изготавливаемые по отработанной технологии, представляют собой достойную альтернативу на отечественном и мировом рынке.

В QWIP гетероструктуре, содержащей около пятидесяти квантовых ям толщиной менее 50 Å, необходимо обеспечить резкие интерфейсные переходы GaAs/AlGaAs и AlGaAs/GaAs. Для реализации этого нами используется метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ).

Один из недостатков МЛЭ как способа выращивания гетероструктур – увеличенная (по сравнению с МОС-гидридной эпитаксией) плотность ростовых дефектов, которые могут приводить к выходу из строя фоточувствительных элементов (пикселей) QWIP матрицы. Поэтому

первостепенной задачей при выращивании QWIP гетероструктур является снижение плотности ростовых дефектов.

Основные типы ростовых дефектов на поверхности AlGaAs/GaAs гетероструктур – так называемые «овальные» дефекты. Причину формирования «овальных» дефектов на поверхности связывают с несколькими факторами, наиболее вероятными из которых являются появление адсорбированного Ga на поверхности структуры во время роста [2] или образование кластеров Ga₂O [3]. Кроме этого, на поверхности гетероструктур присутствуют так называемые «нерегулярные» дефекты, обусловленные проблемами в подготовке оборудования и процедуре загрузки подложек.

В АО «Светлана-Рост» QWIP гетероструктуры выращиваются на отечественных установках МЛЭ, разработанных и изготовленных компанией АО «НТО» (Россия, г. С. Петербург). Это установки серии STE35, позволяющие проводить ростовые процессы на подложках диаметром до 100 мм.

Для уменьшения плотности «овальных» дефектов, выращенных QWIP гетероструктур в установках серии STE35 используются источники галлия с дополнительным разогревом области апертуры – двузонные источники либо источники «hot lip». Для снижения уровня «нерегулярных» дефектов в технологическом процессе выращивания QWIP гетероструктур предпринимается ряд специальных организационных и технологических мер.

При этом плотность дефектов на поверхности выращенных пластин контролируется с помощью оборудования и программного обеспечения фирмы NSpec. Данное оборудование представляет собой высокоразрешающий оптический микроскоп с автоматизированными подвижками держателя пластины, что позволяет сканировать пластину по двум координатам. При этом программное обеспечение NSpec позволяет считать и сортировать дефекты, обрабатывать результаты и составлять карту поверхности контролируемой пластины. На рисунке 1 представлена типичная карта распределения плотности дефектов на поверхности пластины QWIP гетероструктуры, на которой цветом выделены участки поля зрения микроскопа (площадь поля зрения микроскопа порядка одного квадратного миллиметра) с различным содержанием дефектов (минимальный размер контролируемых дефектов около 0,5 мкм).

Из рисунка 1 видно, что плотность дефектов равномерно распределена по поверхности пластины и не превышает 500 см⁻² (при усреднении по всей площади пластины).

Sample ID: E404 Scan ID: 1

Object Count Report

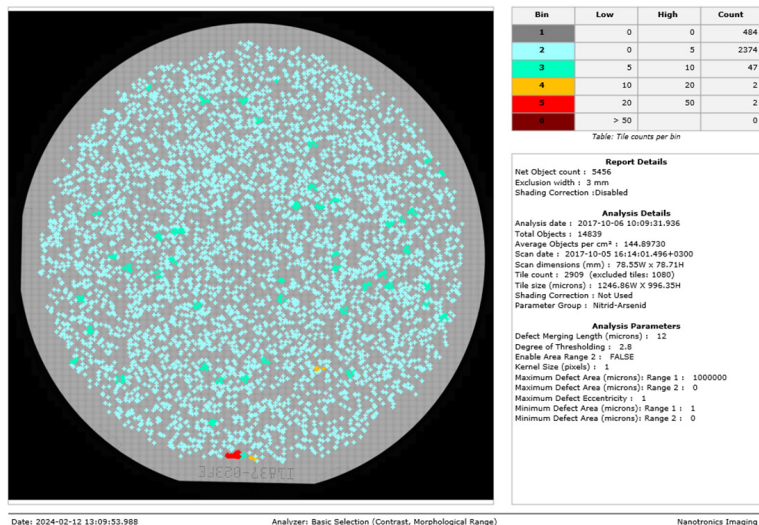


Рис. 1. Типичная карта плотности дефектов на поверхности пластины QWIP гетероструктуры

На рисунке 2 представлена усредненная плотность дефектов на поверхности выращенных QWIP гетероструктур в различных ростовых сериях. Красной чертой обозначено предельно допустимое в технологическом процессе АО «Светлана-Рост» значение плотности дефектов. Из рисунка можно сделать вывод, что в большинстве ростовых серий плотность дефектов не превышает предельно допустимой величины.

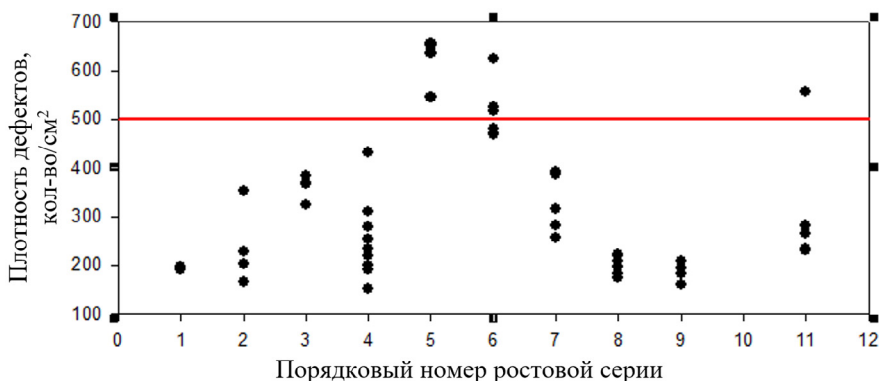


Рис. 2. Плотность дефектов на поверхности выращенных QWIP гетероструктур в различных ростовых сериях

Из выращенных QWIP гетероструктур изготавливаются широкоформатные матрицы длинноволнового ИК диапазона, фоточувствительные в спектральной области 8-10 микрон.

На рис. 3 представлено изображение с фрагмента охлажденной QWIP матрицы, смонтированной на мультиплексор. Светлые точки – локально закороченные пиксели матрицы, темные – отсутствие контакта. По-видимому, причина закороченных пикселей – дефекты гетероструктуры, а отсутствие контакта обусловлено отсутствием или браком In контакта. Подсчет общей плотности дефектных пикселей дает величину не более 100 см^2 или менее 0,1% всех пикселей матрицы.

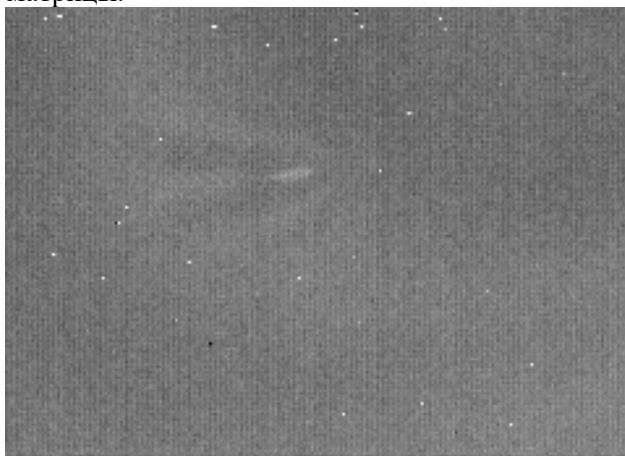


Рис. 3. Увеличенное изображение с фрагмента QWIP матрицы, смонтированной на мультиплексор (площадь фрагмента матрицы $3,4 \times 2,5 \text{ мм}^2$, температура сборки 77 К)

Из сравнения плотности ростовых дефектов и плотности дефектных пикселей можно сделать вывод, что не все ростовые дефекты приводят к закорачиванию пикселей. Вид и природа ростовых дефектов, приводящих к закорачиванию пикселей ИК-матрицы, требуют дальнейшего изучения, что позволит уменьшить коэффициент запуска гетероструктур для последующих постростовых операций и, следовательно, снизить себестоимость ИК-матриц.

Таким образом, предельное значение плотности дефектов на поверхности QWIP гетероструктур, допустимое в технологическом процессе роста QWIP гетероструктур в АО «Светлана-Рост», позволяет изготавливать ИК-матрицы с процентом годных пикселей не менее 99,9%, что соответствует лучшим ИК-матрицам зарубежных производителей.

1. Gunapala S. D. et al. Quantum well infrared photodetector technology and applications //IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2014. – Т. 20. – №. 6. – С. 154-165.

2. Fujiwara K. et al. Classification and origins of GaAs oval defects grown by molecular beam epitaxy //Journal of crystal growth. – 1987. – Т. 80. – №. 1. – С. 104-112.

3. Akimoto K. et al. Origin of oval defects in GaAs layers grown by molecular beam epitaxy //Journal of crystal growth. – 1985. – Т. 73. – №. 1. – С. 117-122.

Исследование спектральных характеристик QWIP фотоприёмников

Давлетшин Ренат Валиевич¹, Болтарь К.О.^{1,2}, Терентьев Д.С.¹

¹ ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва, Россия. orion@orion-ir.ru

²Московский физико-технический институт. Долгопрудный. МО. Россия

Spectral response peculiarities of AlGaAs/GaAs heterostructure-based array photodetectors

R.V. Davletshin¹, K.O. Boltar^{1,2}, D.S. Terentiev¹

¹ Orion R&P Association Inc., Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology. Dolgoprudny. Moscow Region. Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-82

Spectral response peculiarities of multiple quantum-well array photodetectors are reported. Detectors aimed to work in LWIR spectral range, with preferred maximum of spectral sensitivity in 8.5 microns. Measures were held using FTIR spectrometer.

Спектральные характеристики чувствительности матричных фотоприёмных устройств широко используются для оценки качества и оптимизации QWIP-структур. Для достижения максимальных фотоэлектрических параметров максимум спектральной характеристики фоточувствительности должен соответствовать значению $\leq 8,5$ мкм. QWIP-структуры на основе полупроводников III и V групп из арсенида галлия/арсенида алюминия-галлия выращиваются методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), который позволяет выращивать структуры с задаваемыми в процессе роста свойствами слоев, хорошей морфологией и плоскостностью поверхности, максимально пригодной для дальнейших технологических операций. В АО «НПО «Орион» освоена технология выращивания таких структур для изготовления на их основе МФПУ длинноволнового ИК диапазона спектра [1, 2].

В работе представлены результаты комплексного измерения спектральных характеристики МФПУ формата 384×288 с шагом фоточувствительных элементов 25 мкм и периодом дифракционной решётки на каждом ФЧЭ 2,8 мкм на основе гетероэпитаксиальных структур AlGaAs/GaAs, выращенных в АО «НПО «Орион» на подложках GaAs.

Измерения спектров фоточувствительности МФПУ проводились на Фурье-спектрометре с аналоговым входом для подключения внешних фотоприёмных устройств. МФПУ подключалось к блоку электронной

обработки, в конструкцию которого встраивался цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), позволяющий сопрячь цифровой сигнальный выход исследуемых МФПУ с аналоговым входом Фурье-спектрометра.

При подключении блока электронной обработки к компьютеру, с помощью специального программного обеспечения можно выбрать измеряемый элемент, сигнал которого будет анализироваться. В большинстве случаев проводятся измерения центрального элемента (позиция элемента $x:192, y:144$), а также двух элементов в противоположных углах ($x:40, y:40$) и ($x:320, y:220$) МФЧЭ.

Интерес представляет длина волны максимума спектральной фоточувствительности, а также граничные длины волн, характеризующие рабочий спектральный диапазон данного прибора. Спектральная характеристика элемента МФПУ имеет основной пик шириной 0,5-1,5 мкм соответствующий максимальному значению фоточувствительности и области падения чувствительности, изрезанные из-за интерференции при прохождении через толщину QWIP структуры с утоньшённой до 20-60 мкм толщиной.

Исследуется также распределение спектральных характеристик фоточувствительным элементам матрицы, по матрицам на одной пластине и по различным пластинам QWIP структур.

Литература

1. Бурлаков И.Д., Кузнецов С.А., Яковлев А.Ю., Современные тенденции развития фотоэлектроники (Обзор материалов XXVI Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения) // Успехи прикладной физики. 2022. Т. 10. №4. С.351.

2. А.В. Никонов, В.С. Ковшов, Н.Б. Залетаев, Р.В. Давлетшин Модель расчёта коэффициента пропускания эпитаксиальных соединений A_3B_5 // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7, №6. С. 571.

Перспективные БИС считывания с аналого-цифровым преобразованием на кристалле

Ларионов Никита Александрович, Кузнецов П.А., Якимов Ю.А.,
Кузнецов А.Н.

ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва, Россия. nikitalarionov16@yandex.ru

Prospective ROIC with analog-to-digital conversion on a chip
Larionov N.A., Kuznetsov P.A., Yakimov Y.A., Kuznetsov A.N.
Orion R&P Association, JSC, Moscow, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-84

This paper contains of all kind of type ROIC with ADC conversion development in Orion R&P Association for the last few years. Importance of question confirmed a large number of publication and growth of produces goods.

В данной работе показан весь спектр фотоприемных устройств и их прототипов, разработанных в АО «НПО «Орион» за последние несколько лет. Актуальность вопроса не подвергается сомнению и подтверждается как большим количеством публикаций в иностранных научных журналах, так и ростом выпускаемой продукции с аналого-цифровым накоплением на кристалле.

На данный момент существует три способа реализации аналого-цифрового преобразование на кристалле: в ячейки считывания, в столбце, на выходе. Первые два способа предпочтительнее, так как позволяют существенно уменьшить шумы аналоговых блоков, но сложнее в реализации. Третий способ хоть и не уменьшает внутренние шумы БИС, но исключает их во время передачи сигнала до блока обработки и исключает внешние усилители и АЦП.

В данный момент в АО «НПО «Орион» реализованы матрицы линейного типа с аналого-цифровым преобразованием в ячейке и цифровым ВЗН [1] и в столбце с помощью $\Delta\Sigma$ -АЦП. А также прототип цифровых ячеек считывания для матричных фотоприемных устройств.

Из выявленных недостатков сразу можно отметить, что АЦП в ячейки приводит к росту энергопотребления и требует значительной площади для своего размещения (ячейки с шагом от 45 мкм). Что определяет спектр используемых устройств для каждого способа аналого-цифрового преобразования на кристалле.

Аналого-цифровое преобразование в ячейке.

На данный момент представлено в виде прототипа, который состоит из

8 ячеек различной архитектура [2]. Тем не менее, это позволило получить некоторые параметры и позволить убедиться в целесообразности применения в серийных устройствах.

В результате моделирования и эксперимента было установлено, что при увеличении тока в 16 раз в случае классического автосброса значения цифрового кода вырастает в 12 раз, а в гибридной ячейке увеличение тока в 16 раз увеличивает значение цифрового кода в те же 16 раз, что говорит о высокой линейности.

Разработанные ячейки считывания лучше всего подходят для ФЧЭ, которые генерируют относительно высокие токи – десятки нано ампер. Потенциальная область применения малоформатные матрицы с большим шагом порядка 40 мкм, в которых требуется высокая помехозащищенность.

Аналого-цифровое преобразование в столбце

В этом направлении разработана два вида устройств, оба форматом 1024×10: с АЦП в ячейки и цифровым ВЗН и аналого-цифровым преобразованием в столбце посредством $\Delta\Sigma$ -АЦП [3].

Неоспоримым преимуществом способа с $\Delta\Sigma$ -АЦП является то, что минимальное количество тактов M для достижения 15-битной точности определяется по выражению $n_{bit} = \log_2 M(M+1) - 1$, то есть $M \approx 2^{\frac{n_{bit}+1}{2}}$. Таким образом, количество тактов сокращается до 256. Это позволяет значительно снизить рабочую частоту модулятора и достичь минимальной потребляемой мощности. Также благодаря свойствам мультисэмплинга и перемещения шума в область высоких частот с последующей фильтрацией, снижается влияние широкополосного шума входного тракта и цепей питания примерно в \sqrt{M} раз.

Вывод

Проведенные разработки и исследования подтверждают актуальность и преимущества внедрения аналого-цифрового преобразования на кристалле. А имеющиеся наработки открывают путь к серийному производству таких устройств.

Литература

1. *Н.А. Ларионов, И. С. Моцев.* Реализация цифрового режима ВЗН на кристалле интегральной схемы считывания для сканирующих ФПУ // Прикладная физика. 2018. № 4. С. 111.
2. *П. А. Кузнецов, А. Н. Кузнецов, Ю. А. Якимов.* Накопительная ячейка с аналогово-цифровым преобразованием для матричных ФПУ длинноволнового ИК-диапазона // Успехи прикладной физики. 2022. Т. 10. № 6. С. 577.
3. *Ю. А. Якимов, И. С. Моцев.* Малопотребляющий 15-битный дельта-сигма АЦП в столбце для ИК ФПУ // Тезисы докладов IX научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, 2020. С.73.

Микроболометрические приемники постоянного и импульсного терагерцового излучения

Демьяненко Михаил Алексеевич¹, Марчишин И.В.¹, Щеглов Д.В.¹,
Старцев В.В.²

¹*ИФП СО РАН. Новосибирск. Россия. demyanenko@isp.nsc.ru*
²*ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия*

Microbolometric detectors for continuous-wave and pulse terahertz radiation

Dem'yanenko Michael A.¹, Sheglov D.V.¹, Marchishin I.V.¹, Startsev V.V.²

¹*ISP SB RAS. Novosibirsk. Russia*
²*Orion R&P Association Inc. Moscow. Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-86

The features of microbolometric detectors of traditional and inverted types, as well as bolometers with direct coupled antennas are considered in relation to the registration of *continuous-wave* and pulsed terahertz radiation. The inverted type bolometer in terahertz region has twice the absorption of radiation and is broadband. The studied receivers at a wavelength of 100 μm have a minimum detectable radiation power of $1.4 \cdot 10^{-9}$ W and a minimum detectable radiation pulse energy of $2.5 \cdot 10^{-11}$ J.

Рассматриваются особенности микроболометрических приемников традиционного (Рис. 1*a*) и инвертированного (Рис. 1*b*) типа, а также болометров антенного типа с резистивной связью (Рис. 2) применительно к регистрации постоянного и импульсного терагерцового (ТГц) излучения. Применение в болометрах традиционного типа дополнительного резонатора (*g*), расположенного между поглотителем (*a*), нанесенным на мембрану болометра (*d*), и кремниевым окном (*w*), снабженным просветляющим покрытием (*AR*) значительно повышает коэффициент поглощения ТГц излучения и делает приемник селективным. Болометры инвертированного типа являются широкополосным и в ТГц области обладают коэффициентом поглощения излучения более 50%. Болометры антенного типа с резистивной связью вследствие повышенной теплопроводности обладают пониженной чувствительностью к постоянному излучению, однако имеют высокую чувствительность к импульсному излучению и высокое быстродействие.

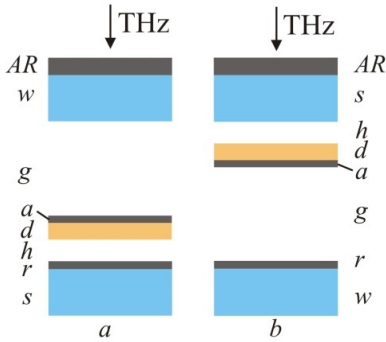


Рис.1. Болومترические приемники традиционного (а) и инвертированного (b) типа. s и w - пластины высокоомного кремния, r - отражатель, h - зазор между мембраной болометра d и подложкой s.

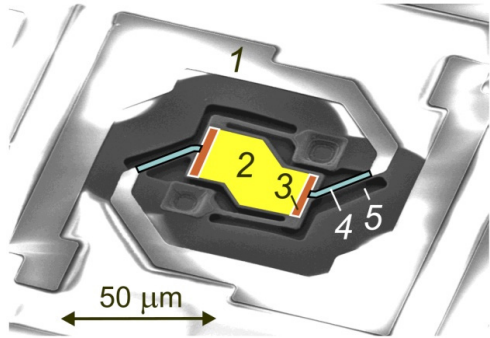


Рис.2. Болометры антенного типа.

- 1 - антенна,
- 2 - нагрузка, 3 - контакт к нагрузке, 4 - шина резистивной связи антенны с нагрузкой,
- 5 - область вытравленного жертвенного слоя.

Сигнал микроболометра при воздействии на него импульсного терагерцового излучения слабо зависит от теплопроводности болометра, если длительность импульсов излучения меньше времени тепловой релаксации болометра (Рис. 3). Это позволяет изготавливать высокочувствительные приемники импульсного излучения, работающие с кадровой частотой в несколько сотен герц. Исследованные приемники на длине волны $100 \mu\text{m}$ обладают минимальной обнаружимой мощностью излучения $1,4 \cdot 10^{-9} \text{ W}$ и минимальной обнаружимой энергией импульса излучения $2,5 \cdot 10^{-11} \text{ J}$ (Рис.4).

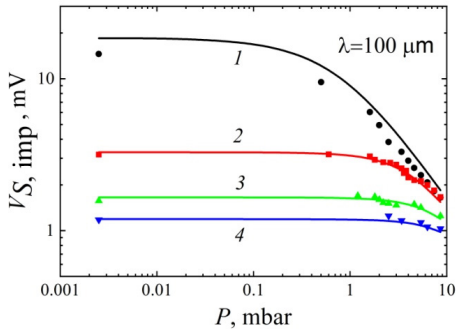


Рис.3. Зависимости сигнала микроболومترического приемника $V_{S, \text{imp}}$ от давления газа P в вакуумном корпусе, измеренные при различных значениях частоты следования импульсов ТГц излучения:
1-7, 2-40, 3-140, 4-195 Hz.

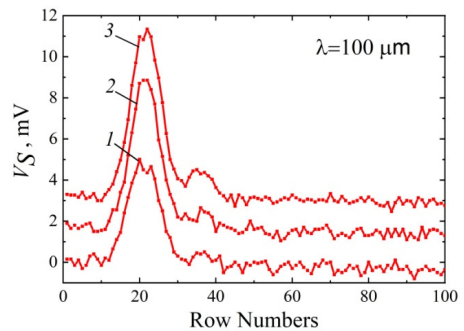


Рис.4. Распределение величины отклика V_S матричного микроболومترического приемника на короткий импульс ТГц излучения по элементам столбца микроболометров. Длительность импульса излучения:
1-2, 2-3, 3-3,8 ms.

Литература

1. Демьяненко М.А. Эффективные широкополосные приемники терагерцового излучения на основе болометров с тонким металлическим поглотителем // Журнал технической физики. 2018. Т. 88. Вып. 1. С. 121–126.
2. Демьяненко М.А., Старцев В.В. Применение неохлаждаемых микроболометров для регистрации импульсного терагерцового и инфракрасного излучения // Журнал технической физики. 2022. Т. 92. Вып. 3. С. 443–452.

Неохлаждаемые быстродействующие фотоприемники мостиковой конструкции для средней ИК области спектра

Куницына Екатерина Валдимовна, Пивоварова А.А., Слипченко С.О.,
Подоскин А.А., Андреев И.А., Пихтин Н.А., Ильинская Н.Д., Яковлев Ю.П.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Санкт-Петербург. Россия. kunits@iropt9.ioffe.ru

Uncooled High-speed Air-Bridge Photodetectors for the Mid-IR Spectral Range

Kunitsyna E.V., Pivovarova A.A., Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Andreev I.A.,
Pikhtin N.A., Il'inskaya N.D., Yakovlev Yu.P.
Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-89

High-speed air-bridge IR photodetectors based on InAs/InAsSbP heterostructures are presented. The capacitance of the best devices is $C = 3.4-3.6$ pF at $U = 0$ V. The speed of the response studied by an InGaAsP/InP laser with emission wavelength of 1550 nm is 200 ps. The photodetectors can be used in detection systems for short laser pulses in the spectral range of 1.1-3.8 μm .

Быстрое развитие современных лазеров [1] приводит к необходимости разработки быстродействующих фотоприемников, способных регистрировать лазерные импульсы в средней ИК области спектра. В данной работе представлены первые отечественные быстродействующие InAs/InAsSbP фотоприемники мостиковой конструкции (air-bridge), работающие при комнатной температуре в диапазоне длин волн 1.1-3.8 мкм. Особенностью данной конструкции является формирование лицевого контакта в форме воздушного мостика, соединяющего фоточувствительную и опорную мезы. Ранее данный подход был предложен нами для фотодиодов на основе GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb гетероструктур [2].

Фотоприемники мостиковой конструкции (рис.1) были изготовлены на основе гетероструктур InAs/InAsSbP с помощью методов стандартной оптической литографии.

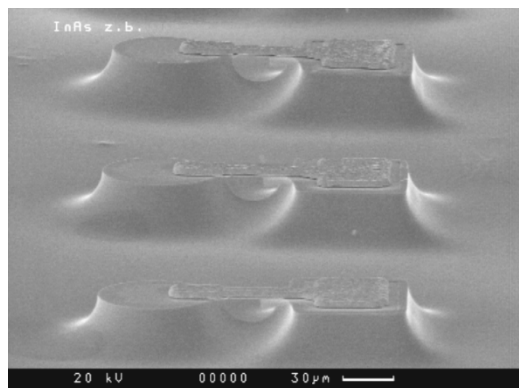


Рис. 1. СЭМ-изображение InAs/InAsSbP фотоприемников мостиковой конструкции

Для изоляции контактной площадки от опорной мезы создавалась диэлектрическая подкладка $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ методом магнетронного распыления. Вывод мостикового омического контакта на опорную мезу формировался методом термического испарения системы Cr-Au. Полученный воздушный мостик утолщался с помощью селективного гальванического осаждения золота до толщины 2–3 мкм. За счет краевого эффекта, возникающего при электрохимическом осаждении, формировался «швеллер», т.е. воздушный мостик имеет ребра жесткости, что увеличивает его механическую прочность.

Разработанные фотоприемники демонстрируют максимальную спектральную чувствительность в диапазоне 2.8–3.1 мкм. Величина темнового тока составляет 2–3 мкА при малых обратных смещениях $U < 0.02$ В, дифференциальное сопротивление в нуле смещения – $R_0 = 1.0\text{--}5.6$ кОм, емкость лучших приборов – $C = 3.4\text{--}3.6$ пФ при $U_{rev} = 0$ В.

Проведено исследование быстродействия мостиковых фотоприемников с помощью InGaAsP/InP лазера. Фотоприемники в корпусе ТО-18 монтировались на высокочастотную линию с SMA-выходом, которая обеспечивала подачу обратного смещения на фотоприемник в диапазоне $U = 0.0\text{--}0.3$ В и служила согласованной (50 Ом) нагрузкой. Изучение динамики фотоответа проводилось в два этапа. Сначала измерялись характеристики импульсного источника лазерного излучения на основе одномодового лазерного диода мезополосковой конструкции с шириной излучающей апертуры 5 мкм, длиной волны излучения 1550 нм. Длительность оптического импульса используемого полупроводникового лазера на уровне FWHM имела значение 60 пс, а пиковая мощность составляла 100 мВт и не зависела от частоты. На втором этапе проводилось исследование фотоответа при засветке импульсным лазерным излучением различных участков чувствительной мезы фотоприемника и при различных напряжениях обратного смещения. Измерения показали, что быстродействие фотоприемника составляет 200 пс.

Созданные мостиковые InAs/InAsSbP фотоприемники могут использоваться для регистрации лазерных импульсов в диапазоне длин волн 1.5–3.8 мкм.

1. L. J. Mawst, D. Botez. IEEE Photonics Journal, 14, № 1 (2022) 1508025–24

2. И.А. Андреев, О.Ю. Серебренникова, Г.С. Соколовский, В.В. Дюделев, Н.Д. Ильинская, Г.Г. Коновалов, Е.В. Куницына, Ю.П. Яковлев, Быстродействующие фотодиоды для средней инфракрасной области спектра 1.2–2.4 мкм на основе гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с полосой пропускания 2–5 ГГц, ФТП, 47, 1009-1115, 2013.

**Отработка отечественной технологии формирования
термочувствительных пленок на основе VOx для обеспечения
серийного производства матричных микроболومترических
приемников**

Соколов Константин Владимирович¹, Попов В.К.¹, Москвичев В.Ю.¹,
Бетрозов С.Б.¹, Ерастов Д.А.¹, Солодков А.А.¹, Худаяров З.Ф.¹,
Шилейко Н.А.¹, Марасин О.Д.², Виноградов А.Ю.², Гердт А.Д.²

¹АО «ОКБ «АСТРОН». Лыткарино. МО. Россия. skv@astrohn.ru,
info@astrohn.ru

²АО «НТО». Санкт-Петербург. Россия. sales@semiteq.ru

**Development of domestic technology for the formation of thermosensitive films
based on VOx to ensure mass production of matrix microbolometer receivers**

Sokolov Konstantin Vladimirovich¹, Popov V.K.¹, Moskvichev V.Yu.¹,
Betrozov S.B.¹, Erastov D.A.¹, Solodkov A.A.¹, Hydayarov Z.F.¹, Shileyko N.A.¹
*JSC «OKB «Astron», Lytcarino, Russia, info@astrohn.ru
SemiTEq JSC, Saint-Petersburg, Russia, sales@semiteq.ru*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-92

The results of development of domestic technology for the formation of thermosensitive films based on VOx to ensure mass production of matrix microbolometer receivers are presented.

Отработка технологий формирования термочувствительных пленок на основе VOx (далее - ТЧП VOx) для обеспечения серийного производства отечественных матричных микроболومترических приемников (ММБП) начата в РФ около 10 лет назад. Результаты некоторых работ в указанном направлении приведены в [1]. В последние годы определилась потребность в продолжении таких работ в связи с необходимостью развития конструкций ММБП в части увеличения формата матричного массива (более 10⁶ элементов) и уменьшения шага элементов в массиве (до 12...8 мкм). Важным ожидаемым результатом таких работ должно быть создание (или применение из существующего и доступного) оборудования и технологических режимов, позволяющих сформировать ТЧП VOx с высокой однородностью параметров (в части поверхностного сопротивления и др.) на подложках больших размеров.

Отработка технологии формирования ТЧП VOx была выполнена на базе метода реактивного магнетронного распыления ванадиевой мишени. Работы технологического характера выполнялись с использованием как зарубежного,

так и отечественного оборудования в АО «НТО» (г. Санкт-Петербург). Измерения параметров ТЧП VOx выполнялось в АО «ОКБ «Астрон» (г. Лыткарино) и ООО «Маппер» (г. Москва).

На первом этапе выполнялся поиск оптимальных режимов работы оборудования для достижения требуемых значений параметров ТЧП VOx (поверхностного сопротивления R_{\square} и температурного коэффициента сопротивления – ТКС), обеспечивающих эффективное согласование с коммутаторами-мультиплексорами сигналов. Результаты, характеризующие отдельные образцы ТЧП VOx, представлены на рисунках 1 и 2.

На втором этапе многократно выполнялся повторяющийся по параметрам процесс формирования ТЧП VOx и оценивалась стабильность воспроизводства свойств образцов как в пределах площади каждой пластины, так и в пределах партии пластин.

Стабильность оценивалась по разбросу поверхностного сопротивления R_{\square} при измерениях в 5-ти точках каждой пластины (вдоль центральной линии) и по разбросу толщины ТЧП VOx при измерениях в 3-х точках каждой пластины (поперек центральной линии).

Результаты, характеризующие отдельные образцы пластин (3 шт.) по показателям разброса R_{\square} и толщины ТЧП VOx, представлены на рисунках 3 и 4.

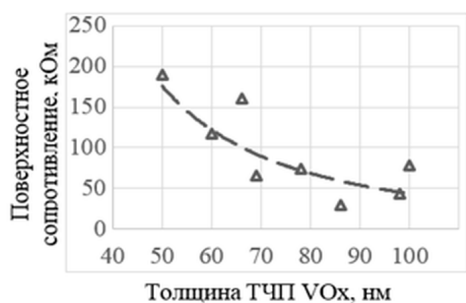


Рисунок 1 – Зависимость поверхностного сопротивления от толщины ТЧП VOx

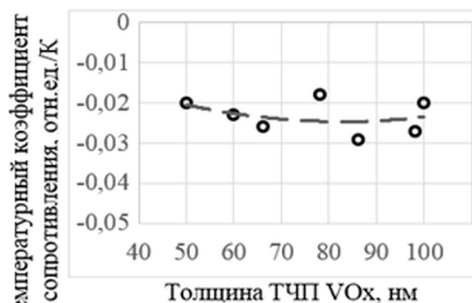


Рисунок 2 – Зависимость ТКС от толщины ТЧП VOx

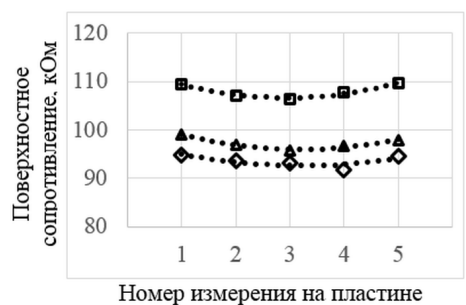


Рисунок 3 – Распределение поверхностного сопротивления ТЧП VOx по пластине

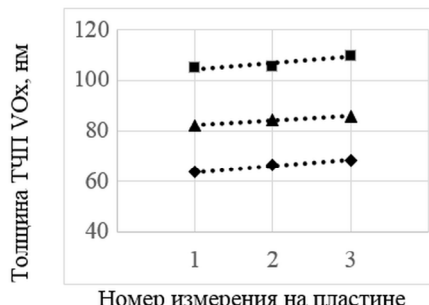


Рисунок 4 – Распределение толщины ТЧП VOx по пластине

Полученные результаты подтвердили, как возможность достижения требуемых значений функциональных параметров ТЧП VOx, так и приемлемую стабильность воспроизводства свойств образцов в пределах площади пластин. Повторяемость параметров ТЧП VOx в пределах партии пластин также может быть предварительно оценена как приемлемая.

Литература

1. Ерастов Д.А., Жукова С.А., Демин С.А., Турков В.Е., Ульянов С.А., Трошин Б.В. Напыление оксида ванадия с высоким температурным коэффициентом сопротивления// Научно-технический журнал «Наноиндустрия». Алушта, 2017. С. 543.

Солнечно-слепые фотодиоды Шоттки на основе AlGa_{0.3}N, выращенные методом ПА-МПЭ

Семенов Алексей Николаевич¹, Нечаев Д.В.¹, Алексеев П.А.¹, Буренина Д.С.¹,
Смирнова И.П.¹, Задиранов Ю.М.¹, Кулагина М.М.¹, Трошков С.И.¹,
Шмидт Н.М.¹, Лихачёв А.И.¹, Калиновский В.С.¹,
Контрош Е.В.¹, Прудченко К.К.¹, Нагорный А.В.², Вайнилович А.Г.²,
Луценко Е.В.², Жмерик В.Н.¹

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Санкт-Петербург. Россия. semenov@beam.ioffe.ru

² Институт физики имени Б.И. Степанова. Минск. Беларусь

Solar-blind Schottky photodiodes based on AlGa_{0.3}N grown by PA-MPE

Semenov Alexey Nikolaevich¹, D.V. Nechaev¹, P.A. Alexeev¹, D.S. Burenina¹,
I.P. Smirnova¹, U.M. Zadiranov¹, M.M. Kulagina¹, S.I. Troshkov¹, N.M. Shmidt¹,
A.I. Lihachev¹, V.S. Kalinovskii¹, E.V. Kontrosh¹, K.K. Prudchenko¹,
A.V. Nahorny², A.G. Vainilovich², E.V. Lutsenko², V.N. Jmerik¹

¹ Ioffe Institute, Saint-Petersburg, Politechnicheskay 26, Russia

² Stepanov Institute of General Physics, Minsk, 220072 Belarus

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-95

This work examines the possibilities of optimizing the design of Schottky photodiodes based on n-AlGa_{0.3}N/AlN heterostructures grown by plasma assisted molecular beam epitaxy (PA MBE) on sapphire substrates with various buffer layers grown both by metal organic chemical vapor deposition (MOCVD) and molecular beam epitaxy (MBE). The influence of different buffer layers with different dislocation densities on leakage currents and spectral characteristics of Schottky diodes has been studied. The work demonstrates the possibility of creating solar-blind Schottky photodiodes with high spectral sensitivity (51 mA/W) based on the Al_{0.7}Ga_{0.3}N/Al_{0.55}Ga_{0.35}N heterostructure.

Солнечно-слепые УФ фотоприемники с чувствительностью в диапазоне длин волн ниже 290 нм находят множество применений [1]. Для создания солнечно-слепых фотоприемников используются гетероструктуры на основе широкозонных слоев AlGa_{0.3}N с высоким содержанием алюминия > 40 мол%, что затрудняет получение *p*-типа проводимости в этих слоях. Поэтому фотодиоды с барьером Шоттки на основе Si-легированных AlGa_{0.3}N слоев с проводимостью *n*-типа, которая легко достигается вплоть до содержания Al 80 мол%, являются одним из наиболее перспективных типов солнечно-слепых фотоприемников. Выходные характеристики фотоприемников существенно зависят от паразитных токов утечки, которые в AlGa_{0.3}N гетероструктурах могут достигать больших значений вследствие высокой плотности прорастающих дислокаций

($>10^9$ - 10^{10} см⁻²) при росте приборов на сильно рассогласованных подложках *c*-сапфира или кремния (111) [2].

В данной работе исследуются возможности оптимизации конструкции фотодиодов Шоттки на основе *n*-AlGaN/AlN/*c*-Al₂O₃ гетероструктур, выращенных методом плазменно-активированной молекулярно-пучковой эпитаксии (ПА МПЭ) на подложках *c*-сапфира с различными буферными слоями, выращенными как методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений (ГФЭ МО), так и ПА МПЭ. Исследуется влияние типа буферных слоев и его структурного качества на характеристики токов утечки и спектральных чувствительностей фотодиодов Шоттки.

Приборные меза-структуры с толщиной активной области (*n*-Al_{0.55}Ga_{0.45}N:Si) — 200 нм формировались с помощью реактивного ионно-плазменного травления в хлорсодержащей среде. Для изготовления омических *n*-контактов использовалось электронно-лучевое осаждение последовательности слоев Ti/Al/Ti/Au, которые отжигались при температуре 900°C в течение 1 минуты. Диаметры контактов Шоттки варьировались от 30 до 400 мкм и представляли собой слои Ni/Au, осажденные с помощью магнетронного напыления без вжигания.

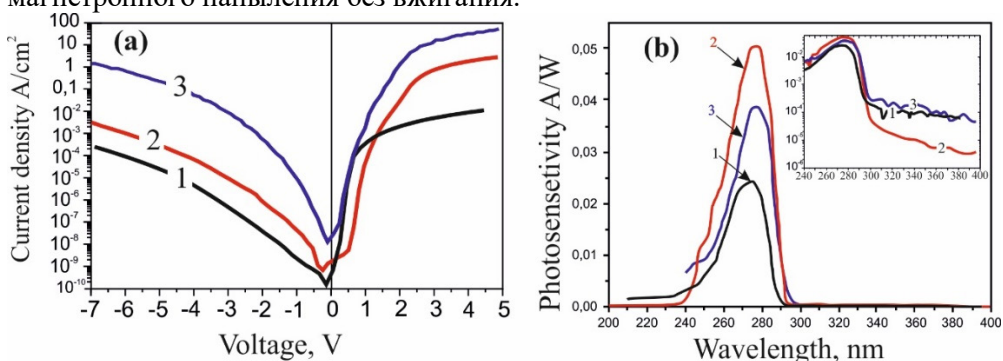


Рис.1. ВАХ исследуемых фотодиодов Шоттки (а) и их спектральные чувствительности (б):

1 – структура А, выращенная на ПА МПЭ буфере, толщиной 1 мкм (чувствительность 24 мА/Вт),

2 – структура В, выращенная на ПА МПЭ буфере, толщиной 2 мкм (чувствительность 51 мА/Вт),

3 – структура С, выращенная на ГФЭ МО буфере, толщиной 2 мкм (чувствительность 40 мА/Вт),

на вставке показана зависимость спектральной чувствительности в логарифмическом масштабе.

Выращенные структуры исследовались методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Пространственное распределение токов утечки по поверхности приборных структур анализировались с применением атомно

силового микроскопа. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) фотодиодов Шоттки измерялись при комнатной температуре с использованием характериографа Keysight B2901A. Спектральная фоточувствительность фотодиодов определялась с помощью их засветки со стороны подложки перестраиваемым источником излучения с ксеноновой лампой.

В результате были продемонстрированы солнечно-слепые фотодиоды Шоттки на основе гетероперехода $n^*\text{-Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{N}/n\text{-Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$ с фоточувствительностью в диапазоне длин волн < 290 нм и спектральной чувствительностью до 51 mA/W. ВАХ и спектральные чувствительности этих фотодиодов показаны на рис. 1а и б соответственно.

[1] Wannian Fang, Qiang Li, Jiaying Li, Yuxuan Li, Qifan Zhang, Ransheng Chen, Mingdi Wang, Feng Yun, Tao Wang. Crystals, 13(6), 915 (2023) DOI: 10.3390/cryst13060915

[2] Lakshay Gautam, Junhee Lee, Gail Brown, Manijeh Razeghi. IEEE Journal of Quantum Electronics 58(3), 4000205 (2022). DOI: 10.1109/JQE.2022.3154475

Насколько полно ИК-система реализует режим VLIP: простой и робастный метод измерения числа электронов в зарядовом пакете пикселя

Винецкий Ю.Р., Кривоклякин Григорий Дмитриевич

*АО «ПО «УОМЗ -филиал «Урал-Геофизика». Москва. Россия.
grigori.2000@mail.ru*

What is the BLIP-fullness of the IR-system: a simple and robust method of determining quantity of electrons in the pixel's charge packet
Vinetski Yu.R., Krivoklyakin Grigory Dmitrievich
Branch JSC «РА «UOMP«Ural-Geofizika», Moscow, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-98

A new and novel measuring/computation procedure is presented of measuring the quantity of the electrons in charge packets of FPA pixels and, by this, allowing one to estimate the perfection degree of the IR system under consideration

При разработке высокочувствительных ИК оптико-электронных систем (ОЭС) тепловидения/теплопеленгации естественным является стремление к реализации предельно возможного уровня пороговой чувствительности ОЭС – уровня, ограниченного флуктуациями равновесного теплового фона сцены (т.н. режим VLIP – Background Limited Photodetecting [1]). В системах на базе современных охлаждаемых ИК матриц последних поколений совокупный коэффициент передачи "фотон→электрон" (пропускание оптической системы + квантовая эффективность приёмника) близок к единице, и при необходимости может быть уточнен хорошо известными методами. В этой ситуации главным показателем совершенства ОЭС в смысле близости к VLIP становится только отношение реализованного в ней де-факто уровня шума к таковому в режиме VLIP; последний в единицах количества носителей N , собираемых пикселем, выражается как \sqrt{N} [2]. Поэтому, обладая возможностью пересчитывать сигнал и шум на выходе ОЭС, из традиционных инженерных единиц (для определенности, Вольт– V и σV), к соответствующему размеру зарядового пакета в количестве носителей– N и σN , немедленно получили бы искомую оценку показателя качества ОЭС как $\sigma N/\sqrt{N}$. Физический смысл требуемого пересчетного коэффициента " $V \rightarrow N$ " – эффективная электрическая емкость C_{eff} (с точностью до заряда электрона) разработка надежного и достаточно точного метода измерения этого параметра (к сожалению, редко сообщаемого разработчиками матриц) была целью работы.

В докладе представлен простой в реализации, робастный – устойчивый к вариациям условий измерений и некоторых параметров, в отношении которых

допустима неопределенность, новый метод измерения C_{eff} . Метод основан на углубленном анализе температурных зависимостей $V(T)$ отклика пикселя (пикселей) ИК матрицы на излучение предъявляемого черного тела (ЧТ), а именно – на вычленении конгруэнтных свойств кривых, представляющих такие зависимости. Для этого вначале экспериментальные данные подвергаются линеаризации, а затем методом наименьших квадратов (МНК) находятся параметры прямых; одним из таких параметров и является искомое значение C_{eff} . Такой подход обеспечивает единственность решения уравнений МНК, что позволяет полностью автоматизировать процедуру, и резко сокращает время обработки. Достоинством метода является относительная независимость рассчитываемых значений C_{eff} от положения границ спектрального интервала чувствительности, формируемого полосовым фильтром (как правило, наличествующим в составе ОЭС); более того, метод позволяет уточнять положение границ рабочего спектрального интервала. Точность и устойчивость алгоритма детально исследована путем эмуляции случайных ошибок измерений в многочисленных «виртуальных экспериментах» (метод Монте-Карло). Показано, что при весьма умеренных требованиях к точности поддержания температуры ЧТ ($0,05^\circ\text{C}$) и измерений сигнала V (3 дискрета 14-разрядного АЦП) относительная ошибка определения C_{eff} не превышает 5%, что подтверждается отличной воспроизводимостью экспериментальных результатов, полученных на нескольких образцах ИК матриц («Mars-MW» 320x256, «Scorpio-MW» 640x512) диапазона 3-5 мкм.

1. Хадсон Р. Инфракрасные системы / Под ред. Н.В. Васильченко М.: Мир, 1972. 534 с.
2. Букингем М. Шумы в электронных приборах и системах: М.: Пер. с англ. Мир, 1986.399 с.

Всеракурсные индикатрисы силы излучения воздушного объекта: методика измерений и научная визуализация

Винецкий Юрий Рудольфович, Титов А.Г., Юрочкин Г.А.

*АО «ПО «УОМЗ -филиал «Урал-Геофизика». Москва. Россия.
jvingoo@gmail.com*

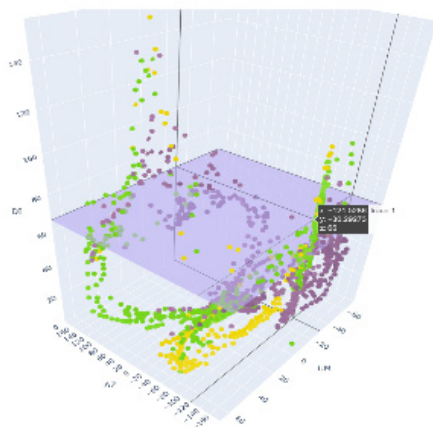
All-angle indicatrices of radiation intensity emitted by aerial object: measuring technique and scientific visualization

*Vinetski Yuri R., Titov A.G., Yurochkin G.A.
Branch JSC «PA «UOMP «Ural-Geofizika», Moscow, Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-100

Reported are the results of extensive field experiments on measuring angle-dependent thermal signatures of an aerial object under the conditions of its real flight and engine operation. Particular attention is paid to the issues of selection of the object's own part of radiation on the underlying scene background, as well as for 3D interactive scientific visualization of the extensive output data.

Сообщается о серии масштабных натурных экспериментов, в ходе которых были выполнены сбор и обработка данных с целью получения всеракурсных индикатрис силы излучения воздушного объекта (ВО) в средневолновом ИК диапазоне (MWIR) в реальных условиях и режимах полета ВО. Насколько известно авторам, данные такого рода получены впервые: до настоящего времени отсутствовали результаты натурных измерений, выполняемых на систематической основе с использованием современных средств регистрации ИК излучений надлежащего метрологического класса; взамен их в исследованиях и разработках пассивных систем тепловидения/теплопеленгации использовались либо теоретические оценки, либо экстраполируемые данные, надежность которых оставляла желать лучшего. Это в значительной степени снижало надежность прогнозов уровня функциональных параметров проектируемых систем и осложняло их реализацию.



В докладе освещается специально разработанная методика натуральных экспериментов, описываются средства измерений, основой которых служили ИК камеры метрологического класса ф. FLIR (США); излагаются примененные способы автоматизированной обработки «сырых» видеоданных, позволившие осуществлять селекцию собственного теплового излучения объекта на фоне сцены в многокадровой последовательности, ассоциируя каждый из кадров с актуальными значениями ракурсных углов ВО – азимута и угла места. Ввиду значительного числа отсчетов значений индикатрисы особое внимание было уделено рациональному способу представления итоговых данных в обозримом, удобном для качественного анализа вида («научная визуализация»): в докладе представлены результаты разработки компактного, нетребовательно к операционной среде ПО интерактивной 3D-визуализации всеракурсных индикатрис и приводятся их примеры. Обсуждаются некоторые типовые особенности индикатрис, возможности их дальнейшего использования и углубленной интерпретации.

Анализ возможностей регистрации изображений в дальней инфракрасной области спектра

Агринский Михаил Владимирович^{1,4}, Климкин Н.А.⁴, Серов В.В.¹,
Шаров А.А.^{2,3}

¹ АО «ОКБ «АСТРОН». МО. Лыткарино. Россия. *magr829@yandex.ru*

² ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия. *sasadot66@gmail.cjm*

³ Московский государственный университет геодезии и картографии
(МИИГАиК).

Москва. Россия. *odvk@ya.ru*

⁴ АО «Завод «Юпитер». Валдай. Россия. *neem4@mail.ru*

Analysis of the capabilities of image registration in the far infrared region of the spectrum.

Agrinsky M.V.^{1,4}, Klimkin N.A.⁴, Serov V.V.¹, Sharov A.A.^{2,3}

¹ *Experimental Design Bureau "ASTROHN", JSC, Lytkarino, Moscow
region, Russia*

² *State Scientific Center of the Russian Federation JSC NPO Orion, Russia,
Moscow*

³ *Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Moscow,
Russia*

⁴ *JSC "Plant "Jupiter", Russia, Valdai*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-102

An evaluation analysis of the efficiency of image registration in the far-infrared (FIR) spectral range was carried out. The possibilities of creating transparent composite polymers in the spectral range of 8-26 microns for use in lenses and modernizing digital image receivers are considered.

Дальним инфракрасным диапазоном спектра (far-infrared – FIR) принято называть инфракрасное излучение с длиной волны от 16 мкм вплоть до 1 мм. FIR-диапазон нашёл применение в астрономических исследованиях для изучения объектов с температурой в диапазоне 5-340 К [1], а также в медицине для терапевтических целей [2].

В тепловизионных приборах наблюдения окружающей обстановки на основе неохлаждаемых микроболометрических матриц, как правило, задействована область спектральной чувствительности в интервале длин волн 8-14 мкм. Это диктуется, в частности, температурой наблюдаемых объектов, которая находится вблизи 300 К. Соответственно, максимум излучения чёрного тела с такой температурой расположен вблизи длины волны 10 мкм [3].

Исходя из задачи повышения порога чувствительности таких приборов перспективным представляется расширение диапазона их работы в область 16-26 мкм, учитывая, что, согласно закону Планка $3/4$ энергии излучения чёрного тела лежит в области спектра, расположенной справа от максимума кривой излучения [3]. Это может обеспечить существенный выигрыш по чувствительности, в особенности, при наблюдении на ближних дистанциях, когда поглощение излучения атмосферой не играет существенной роли.

Перспективным является создание композиционных оптических материалов для применения в спектральном диапазоне 8-26 мкм. Обычные связи С - С, С - Н, например, полиэтилена прозрачны в дальней ИК области до 36 микрон [4]. Одновалентный бромид меди прозрачен до 30 мкм, фторид бария прозрачен до 12 мкм, сера до 32 мкм, сульфид цинка - больше 25 мкм. Обратим внимание на поглощение связи С - Н у циклических алканов. Валентные колебания С - Н имеют поглощение в области 3,5 мкм, деформационные колебания С - Н в области 7,5 мкм, а колебание скелета около 10 мкм [5].

В качестве практического воплощения фотоприемного устройства можно предложить доработку имеющихся микроболометрических детекторов типа АСТРОН-64017, АСТРОН-64517. Для этого необходимо рассмотреть проблему вакуумного корпусирования или капсуляции МЭМС, а также решить задачу поглощающего слоя, т.к. отработанные покрытия на основе нестехиометрического оксида ванадия, аморфного кремния или оксида титана предполагают максимум поглощения в длинноволновой (LWIR) области ИК спектра.

Важной задачей, которую необходимо решить при создании такого приёмника является выбор оптимальной рабочей температуры матрицы для снижения уровня шума. Температурная стабилизация матрицы может быть обеспечена, например, с применением термоэлектрических охладителей.

1. <http://www.ipac.caltech.edu/outreach/Edu/Regions/irregions.htm>
2. Vatansever F., Hamblin M.R. Far infrared radiation (FIR): its biological effects and medical applications / *Photonics & Lasers in Medicine*. (2012) 1 (4): p. 255-266.
3. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. – М.: Сов. Радио, 1978. – 400 с.
4. Воронкова Е.М., Гречушников Б.Н., Дистлер Г.И., Петров И.П. Оптические материалы для инфракрасной техники. Справочное издание. – М.: издательство «Наука», 1965. – 295 с.
5. Кросс А. Введение в практическую инфракрасную спектроскопию: пер. с англ. - М. : Изд-во иностр. лит., 1961. - 111 с. ил.

Исследования по применению камеры спектрального диапазона 3-5 мкм для визуализации космических объектов в тени Земли

Бобков А.А., Гаранин С.Г., Жуков И.В., Зыков Л.И., Климов А.Н.,
Лебедев В.А., Копалкин А.В., Рогозин А.А., Смышляев С.П.,
Сюндюков Алексей Юрьевич

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». Саров. Россия. Ayusyundyukov@vniief.ru

Research on the use of 3-5 μm spectral range camera for imaging space objects in the shadow of the earth

Bobkov A.A., Garanin S.G., Zhukov I.V., Zykov L.I., Klimov A.N., Lebedev V.A.,
Kopalkin A.V., Rogozin A.A., Smyshlyayev S.P., Syundyukov A.Yu.
*FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov, Nizhnii Novgorod region, Russia,
Ayusyundyukov@vniief.ru*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-104

Observation of low-orbit space objects in the shadow of the Earth (not illuminated by the Sun) expands the time range of observation of space objects and, thus, increases the capabilities of the space control system [1]. Registration of space objects in the shadow of the Earth is carried out by their thermal radiation. The review work [2] describes the results of registration of space objects in the shadow of the Earth both by domestic and foreign researchers. The space objects were registered by relatively large astronomical telescopes with a receiving aperture up to 0,8 m in diameter, located in observatories with a good astroclimate, and the cooled thermal imaging cameras of the spectral range of 3-5 microns and 8-12 microns were used as receivers.

Наблюдение низкоорбитальных космических объектов (КО), находящихся в тени Земли (т.е. не подсвеченных Солнцем), расширяет временной диапазон наблюдения за КО и, таким образом, повышает возможности системы контроля космического пространства [1]. Регистрация КО, находящихся в тени Земли, осуществляется по их собственному тепловому излучению. В обзорной работе [2] описаны результаты регистрации КО в тени Земли, как отечественными, так и зарубежными исследователями. Для их регистрации применялись относительно крупные астрономические телескопы с приемной апертурой диаметром до 0,8 м, расположенные в обсерваториях с хорошим астроклиматом, в качестве приемников использовались охлаждаемые тепловизионные камеры спектрального диапазона 3-5 мкм и 8-12 мкм.

Представленные наблюдения КО проводились с равниной местности. Для визуализации КО находящихся в тени Земли, применялась отечественная

тепловизионная камера АВ-MW-640-InSb-I (производитель АО «НПО «Орион») со спектральной чувствительностью от 3 до 5 мкм (см. рис.1). В тепловизионную камеру встроен вычислительный модуль разработки ВНИИЭФ [3], который осуществляет математическую обработку видеоизображений в реальном времени. За счет такой обработки изображения шумы регистрации были уменьшены в 30 раз. Это позволило на зеркальном телескопе диаметром 300 мм при времени накопления сигнала 0,2 секунды обнаруживать КО с температурой ~ минус 40°C в тени Земли (см. рис. 2). На рисунке 3 приведена зависимость сигнала от КО во время его сопровождения в тени Земли. Среднее значение отношения сигнал/шум составляло 16.

Вычислительный
модуль ВНИИЭФ

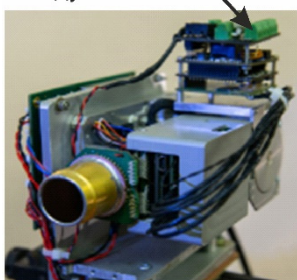


Рис. 1 Внешний вид тепловизионной камеры с вычислительным модулем ВНИИЭФ



Рис. 2 Типичный снимок регистрации КО, находящегося в тени Земли

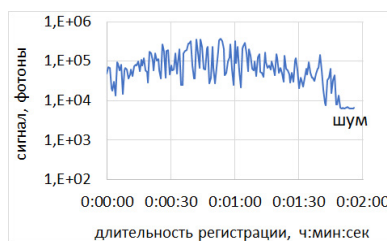


Рис. 3 Сигнал от КО в тени Земли

Литература

1. Л.В. Еленин, И.Е. Молотов, Г.К. Боровин. Эффективное планирование наблюдений космических объектов на орбитах различных типов // Препринт ИПМ Им. М.В. Келдыша, 2018, №72.
2. Е.А. Гришин, В.Л. Миловидов, В.Д. Шаргородский. Современное состояние инфракрасных систем наблюдения за космическими объектами с Земли (обзор) // Приборы и техника эксперимента, 1999, №1, с.3-17.
3. И.В. Жуков, М.Р. Мочалов и др. Интеллектуальный визуальный датчик событий // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2010. Вып. 15. С. 506-513.

Гибридный телевизионный прибор с GaAs фотокатодом

Аввакумов Роман Андреевич^{1,2}, Егоренков А.А.^{1,2}, Пашук А.В.¹,
Чельшков С.Н.^{1,2}

¹АО «ЦНИИ «Электрон». Санкт-Петербург. Россия.
r.avvakumov@niielectron.ru

²СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Санкт-Петербург. Россия

Hybrid TV device with GaAs photocathode

Avvakumov Roman A.^{1,2}, Egorenkov A.A.^{1,2}, Pashuk A.V.¹, Chelyshkov S.N.^{1,2}

¹JSC «NRI Electron», Saint Petersburg, Russia, *r.avvakumov@niielectron.ru*

²SPbSETU «LETI», Saint Petersburg, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-106

A new experimental sample of a hybrid TV device, developed at the JSC «NRI «Electron», with a GaAs photocathode is reported. The spectral dependences of the quantum yield and sensitivity of the finished hybrid TV device are demonstrated. The amplification of EB CCD at various accelerating voltages is presented on the experimental dates measured on the device. The sensitivity of a hybrid TV device with a modern GaAs photocathode sample is calculated.

АО «ЦНИИ «Электрон» производит два типа гибридных телевизионных прибора (ГТП) в универсальной конструкции корпуса: с CsTe фотокатодом для УФ области спектра и с фотокатодом с приложением внешнего поля для ближнего ИК диапазона 0,98-1,7 мкм [1-3]. Данная работа имела пробный характер и была проведена на образце инверсной структуры GaAs/AlGaAs, выращенной методом жидкофазной эпитаксии в ВНИИМЭТ г. Калуга в 1988 году. Термокомпрессионное сочленение структуры с стеклянным диском и стравливание подложки-носителя осуществлено в АО «ЦНИИ «Электрон». Предельные давления в камерах активации фотокатода и герметизации прибора были на уровне 10^{-9} Па. Экспериментальный образец ГТП с GaAs фотокатодом изображён на рисунке 1.

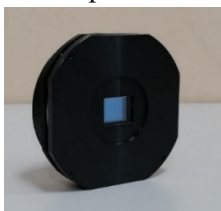


Рис. 1. Образец ГТП с GaAs фотокатодом.

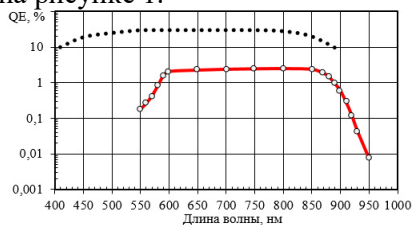


Рис. 2. Спектральные характеристики GaAs фотокатода в ГТП и современного GaAs фотокатода Hamamatsu Photonics [4] (пунктир)

На рисунке 2 показана спектральная зависимость квантового выхода QE фотокатода ГТП по сравнению с GaAs фотокатодом Hamamatsu Photonics (Япония) [4].

Результаты измерения чувствительности фотоприемного устройства (ФПУ) с данным образцом ГТП при разных ускоряющих напряжениях $U_{фк}$ показаны на рисунке 3. Исходя из того, что чувствительность ФПУ прямо пропорциональна чувствительности (квантовому выходу) фотокатода и усилению матрицы, из отношения чувствительностей фотокатодов рассчитана чувствительность, которая будет в ФПУ с фотокатодом с $QE_{max}=30\%$ и электронно-чувствительной ППЗ (ЭЧ ППЗ) матрицей с усилением $G=200$. Также показана чувствительность ФПУ с твердотельным фоточувствительным ППЗ (ФППЗ).

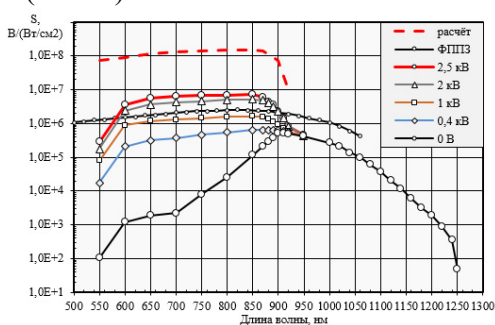


Рис. 3. Спектральные характеристики чувствительности: ФПУ с ГТП с GaAs фотокатодом – эксперимент; ФПУ с ГТП с современным GaAs фотокатодом – расчёт; ФПУ с ФППЗ – эксперимент.

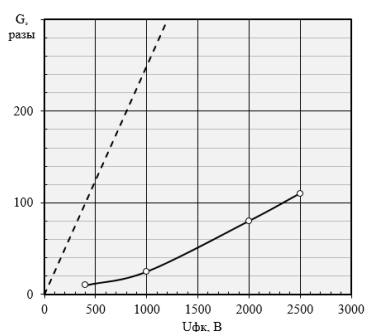


Рис. 4. Зависимость усиления ЭЧ ППЗ в образце ГТП с GaAs фотокатодом от напряжения $U_{фк}$ на фотокатоде; теоретический предел – пунктир.

На рисунке 4 приведена зависимость усиления ЭЧ ППЗ от напряжения на фотокатоде измеренная на данном образце ГТП. Отношение усиления образца ЭЧ ППЗ к теоретически максимальному, изображённому пунктиром, достигает 17% при 2500 В. На более эффективных образцах ЭЧ ППЗ, оно может при этом напряжении достигать 40% при $G=250$. Камерой ФПУ получены изображения телевизионной таблицы при освещённости $1 \cdot 10^{-3}$ лк, исходя из того, что ФПУ с ГТП с GaAs фотокатодом с $QE=30\%$ и $G=200$ будет иметь в 20 раз большую чувствительность, по сравнению с ФПУ с экспериментальным образцом (рис. 3), можно предположить, что аналогичное изображение будет получено при в 20 раз меньшей освещённости, т.е. при $5 \cdot 10^{-5}$ лк. В докладе обсуждаются преимущества и недостатки ГТП по сравнению с ФППЗ и сочленёнными ЭОП с ФППЗ.

Результаты данной работы, несмотря на невысокий квантовый выход фотокатода, по нашему мнению, интересны, так как позволяют оценить основные параметры ГТП, которые могут быть получены в перспективе.

Литература

1. Айнбунд М.Р., Гарбуз А.В., Дементьев А.А. и др. Гибридные высокочувствительные цифровые телевизионные приборы для УФ и ИК спектральных диапазонов // *Успехи прикладной физики*, 2018. – Т. 6, № 6. – С. 514-517.
2. Айнбунд М.Р., Васильев И.С., Гомин И.Н. и др. Фотокатод с тянущим электрическим полем для области спектра 900-1700 нм // *Сборник «XX Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения», Тезисы докладов*, М.: ФГУП «НПО «Орион», 2008г. – с.218.
3. Егоренков А.А., Зубков В.И., Пашук А.В. Гибридные матричные сенсоры для ближнего ИК и УФ спектральных диапазонов // *Тезисы докладов XXVI Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения*, М.: АО «НПО «Орион», 2022. – с. 475.
4. Hamamatsu. Image Intensifiers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/II_TII0007E.pdf

Многофункциональная система ночного и дневного видения

Шалдырван Игорь Викторович, Комаров В.В., Фокин М.Ю.

*Специальная астрофизическая обсерватория РАН. пос. Нижний Архыз.
Россия. Blackflamberg6@yandex.ru*

Multifunctional night and day vision system

Shaldyrvan Igor V., Komarov V.V., Fokin M.Yu.

*Special Astrophysical Observatory of Russian Academy of Sciences (SAO RAS),
Nizhnij Arkhyz, Karachaevo-Cherkesia, Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-109

The article presents the development of a new multifunctional night and day vision system for observing the sky and the environment near SAO RAS optical telescopes. This system is based on an IP camera with a dedicated CMOS image sensor.

Проблеме получения высокочувствительных видеоизображений от научных камер до охранных систем в Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН) уже не один десяток лет. 20 лет назад был разработан и внедрен в эксплуатацию на Верхней научной площадке (ВНП) цифровой телевизионный комплекс [1] для Большого телескопа азимутального (БТА) – крупнейшего российского оптического телескопа с диаметром главного зеркала 6 метров и вспомогательного оптического телескопа Цейсс-1000 с диаметром главного зеркала 1 метр [2].

Для этого комплекса мы подбираем высокочувствительные фотоприемники массового производства [3], позволяющие создавать десятки камер для подсмотров научной аппаратуры, гидов телескопов, обзоров ночного неба, подкупольных камер, для которых нельзя использовать инфракрасную подсветку.

В данной работе представлена разработка новой многофункциональной системы ночного и дневного видения, установленной возле оптических телескопов САО РАН. Камера изготовлена на базе IP-фотоприемника с CMOS матрицей изображений [4]. Современные IP-камеры на основе CMOS имеют особенности в программном обеспечении (ПО) контроллера управления камеры, по причинам которых требуется применять различные методы обработки получаемых данными камерами изображений [5].

Новая система обзора для ВНП САО РАН на основе IP-видеонаблюдения с CMOS фотоприемником разрабатывается для:

- дистанционного мониторинга ночного неба: облачность, звезды, Луна,

планеты;

- дистанционного мониторинга дневного (в цветном режиме) неба: дневная облачность;

- мониторинг пятен на Солнце с использованием солнцезащитного фильтра;

- возможность автоматизированного ведения некоторых объектов по заданному ПО;

- панорамирование окрестностей вблизи телескопов;

- возможность сканирования на 360 град. по азимуту и 90 град. по углу места;

- переменное поле зрения в пределах от 5 до 87 град., позволяет получать изображения как крупных созвездий при 87 град. угле поля зрения, так и достаточно детальные изображения Луны и Солнца при 5 град. угле поля зрения;

Координаты азимута и угла места посредством ПО ImageMagick будут выводиться на получаемые изображения. Камера будет установлена на крыше телескопа Цейсс-1000, и вместе с системой управления поворотным механизмом (посредством управляющей платы WT32-ETH01 внутри корпуса камеры) и обработки изображений (удаленный сервер) обеспечат дистанционный круглосуточный контроль астроклиматической обстановки в окрестности БТА с любого компьютера в локальной сети САО.

Литература

1 V. V. Komarov, V. V. Vitkovskij, V. V. Vlasyuk, et al., A digital TV complex of the 6m optical telescope BTA for identification of astronomical objects and guiding. // Bull. Spec. Astrophys. Obs., 2002, T. 53, C.134-143.

2 V. V. Komarov, A. S. Moskvitin, V. D. Bychkov, et al., Zeiss-1000 SAO RAS: Instruments and Methods of Observation. // Astrophysical Bulletin, 2020, Vol.75 (4), pp.486-500.

3 Комаров В.В., Семенко Е.А. Исследование современных полупрофессиональных ПЗС-камер для работы на оптических телескопах среднего класса // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018, т.7 с.32-46.

4 Шалдырван И.В., Комаров В.В., Фокин М.Ю. Создание высокочувствительных IP камер на основе CMOS матриц для on-line мониторинга ночного неба. // Системный синтез и прикладная синергетика. Сборник научных работ XI Всероссийской научной конференции. 2022, Ростов-на-Дону – Таганрог. с. 77-81.

5 Шалдырван И.В., Комаров В.В., Фокин М.Ю. Методы и расчеты, применяемые к изображениям новых подсмотровых систем САО РАН. // Известия Крымской астрофизической обсерватории. 2023, т.119, №2, с.12–18.

Модульная конструкция прибора ночного видения на основе матричного фотоприемного устройства из коллоидных квантовых точек

Куролес Андрей Сергеевич¹, Юдовская А.Д.¹, Хамидуллин К.А.¹,
Попов В.С.^{1,2}, Пономаренко В.П.^{1,2}

¹ ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия. orion@orion-ir.ru
² Московский физико-технический институт. Долгопрудный. МО. Россия

Modular design of digital night vision devices, based on colloidal quantum dots matrix photodetector

Kuroles A.S., Yudovskaya A.D., Khamidullin K.A., Popov V.S.,
Ponomarenko V.P.

Orion R&P Association. JSC. Moscow. Russia. orion@orion-ir.ru

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-111

This paper presents advanced digital night vision devices modular design, block diagram, 3D model and sketch of the device.

Key words: night vision device, modular design, CQD.

В работе представлены модульная конструкция прибора ночного видения на основе матричного фотоприемного устройства (МФПУ) из коллоидных квантовых точек, структурная схема, 3D-модель и эскиз прибора.

Ключевые слова: ПНВ, модульная конструкция, ККТ.

Оптико-электронные приборы ночного видения (ПНВ) переживают эпоху бурного развития.

На смену традиционным ПНВ на базе электронно-оптических преобразователей (ЭОП) постепенно приходят цифровые приборы, в состав которых включается ПЗС или КМОП матрица с дисплеем. Такое изображение может быть автоматически улучшено или дополнено при аппаратной обработке сигнала с МФПУ на системной плате управления.

Подобная модернизация позволяет существенно снизить массогабаритные характеристики приборов, улучшить качество изображения за счет повышения контраста и разрешения, расширить функционал прибора с помощью дополнительной обработки цифрового сигнала.

В настоящее время широко используются несколько типов ПНВ на основе ЭОП: монокуляры, бинокли, очки, прицельные насадки, прицелы.

Пользователь выбирает тот тип ПНВ, который необходим для решения

конкретной задачи.

Спектр функциональных возможностей применения одного ПНВ можно расширить за счет реализации принципа модульности его конструкции, т.е. возможности быстрой трансформации прибора - смены объектива, окулярной системы, типа крепежного кронштейна пользователем, в зависимости от его целей при работе с прибором.

В работе описан вариант конструкции прибора, который может использоваться как монокуляр или псевдобинокуляр ночного видения в зависимости от выбранной пользователем насадки. В зависимости от типа насадки, в ней помимо окулярной системы расположены один или два LED-дисплея, на которые выводится изображения с ФПУ.

В случае псевдобинокулярного варианта значительно облегчается конструкция (по сравнению с классическим вариантом разделения изображения оптическими элементами).

Таким образом, один модульный ПНВ может заменить несколько приборов и использоваться для решения широкого спектра задач.

Литература

1. Сайт <https://controlengrussia.com/bezopasnost/pribory-nochnogo-videniya/> (дата обращения 04.04.2024).
2. Волков В.Г., Гиндин П.Д. Техническое зрение. Инновации. – М.: Техносфера, 2014. – 840 с.

УФ электронно-оптические преобразователи для астрофизических исследований

Терещенко Олег Евгеньевич¹, Шугаров А.С.², Шайблер Г.Э.¹, Бакин В.В.¹,
Сичевский С.Г.², Шмагин В.Е.², Русецкий В.С.^{1,3}, Голяшов В.А.¹,
Рожков С.А.¹, Хорошилов В.С.¹, Альперович В.Л.¹, Дёмин А.Ю.³

¹*Институт физики полупроводников СО РАН. Новосибирск. Россия.*
teresh@isp.ncs.ru

²*Институт астрономии РАН. Москва. Россия*

³*ЗАО «ЭКРАН-ФЭП». Новосибирск. Россия*

Ultraviolet image intensifier for astrophysical research

Oleg E. Tereshchenko¹, A.S. Shugarov², H.E. Scheibler¹, V.V. Bakin¹,
S.G. Sichevsky², V.E. Shmagin², V.S. Rusetsky^{1,3}, V.A. Golyashov¹,
S.A. Rozhkov¹, V.S. Khoroshilov¹, V.L. Alperovich¹, A.Yu. Demin³

¹*A.V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, 630090, Novosibirsk,*
teresh@isp.ncs.ru

²*Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, Moscow*

⁴*CJSC EKРАН-FEP, Zelenaya Gorka str. 1, Novosibirsk, Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-113

The concept of image intensifiers of the UV range for astrophysical research based on GaN and CsI photocathodes has been developed. The photoemission properties of the fabricated devices were studied.

Ультрафиолетовый диапазон длин волн несет большое количество информации об астрофизических объектах. В последнее десятилетие увеличился интерес к астрофизическим космическим УФ-миссиям, что связано с существенным прогрессом в области УФ детекторов и УФ оптики. Для астрофизических применений важно иметь солнечно-слепой УФ-приемник. К сожалению, распространенные и хорошо отработанные ПЗС и КМОП детекторы не обладают солнечной слепотой, а применение фильтров совместно с ПЗС и КМОП неизбежно снижает чувствительность системы в УФ. Поэтому в последнее время особый интерес проявляется к солнечно-слепым ЭОП на основе МКП ближнего УФ диапазона (200-300 нм) с фотокатодом GaN и вакуумного УФ диапазона (115-176 нм) с фотокатодом CsI. В УФ-астрономии как правило применяются МКП детекторы в режиме счета фотонов, т.к. это гарантирует максимальную чувствительность и стабильность абсолютной фотометрии. Одно из узких мест МКП – динамический диапазон, а также ресурс ЭОП, которые во многом определяются системой считывания. В

настоящее время наблюдается стремительный прогресс в области создания очень скоростных КМОП датчиков с кадровой частотой от 100 к/с до нескольких тысяч к/с, при этом шумы считывания у данных КМОП уменьшились до величин не более нескольких электрон. Применение таких КМОП позволяет увеличить динамический диапазон.

В рамках космического проекта «Спектр-УФ» для Блока Камер Поля (БКП) ведутся работы по разработке отечественных солнечно-слепых ЭОП космического исполнения с фотокатодами GaN и CsI, с разрешением не менее 2000 эквивалентных пикселей, работающих в режиме счета фотонов. К настоящему времени разработана концепция электронно-оптических преобразователей УФ диапазона для астрофизических исследований на основе фотокатодов GaN и CsI. Исследованы фотоэмиссионные свойства изготовленных приборов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-12-20024.

Современные электронно-оптические преобразователи с мультищелочным фотокатодом

Русецкий Вадим Сергеевич, Исхакзай Р.М.Х., Копотилов А.В., Кислых Н.В.,
Мараховка И.И., Демин А.Ю.

ЗАО «Экран ФЭП». Новосибирск. Россия. crdo@ekranfep.ru

Modern multialkali photocathode based image intensifiers

Rusetsky Vadim Sergeevich¹, Iskhakzay R.M.Kh.¹, Kopotilov A.V.¹,
Kislykh N.V.¹, Marakhovka I.I.¹, Demin A.Yu.¹

¹*ZAO «Ekran FEP», Novosibirsk, Russia.*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-115

The conventional image intensifier tubes (IIT) are usually divided into generations according to type of the photocathode: Gen II⁺ with multialkali photocathode (Na₂KSb:Cs) and Gen III with GaAs(Cs,O) photocathode. The much higher sensitivity of the GaAs(Cs,O) photocathode leads to higher performance of Gen III tubes (FOM of more than 2000) in comparison with conventional Gen II⁺ tubes (FOM less than 1700).

With the use of the state-of-the-art technologies increasing absorption of photosensitive layers, multialkali photocathode with sensitivity of 1000 uA/lm was developed in ZAO «Ekran FEP». Using both improved multialkali photocathode and high secondary emission MCP the signal to noise ratio more than 27 and figure of merit more than 2000 for IIT was achieved. The results on performance of the modern multialkali photocathode IIT erase the boundaries between Gen II⁺ and Gen III tubes and makes the term «generation of IIT» obsolete.

Современные электронно-оптические преобразователи (ЭОП) принято различать по «поколениям» в соответствии с типом используемого фотокатода: II⁺ поколение — ЭОП с мультищелочным фотокатодом (МФ, Na₂KSb:Cs), III поколение — ЭОП с GaAs(Cs,O) фотокатодом. Помимо фотокатода, отличительной особенностью классических ЭОП III поколения является использование ионно-барьерной плёнки на входной поверхности МКП, которая служит для защиты фотокатода от обратного потока ионов, возникающего в процессе работы ЭОП и приводящего к снижению чувствительности фотокатода. Вместе с этим ИБП задерживает часть электронов, испускаемых фотокатодом, тем самым ухудшает контраст изображения и снижает отношение сигнал-шум прибора. Лишь применение бесплёночной технологии позволило в полной мере раскрыть потенциал ЭОП с GaAs(Cs,O) фотокатодом [1].

В ЭОП II⁺ поколения используется мультищелочной фотокатод (МФ, Na₂KSb:Cs), преимуществом которого является лучшая стойкость к остаточной атмосфере вакуумного объема ЭОП по сравнению с GaAs(Cs,O) фотокатодом. Использование данного фотокатода позволяет изготавливать бесплёночные ЭОП, не применяя специальных мер для увеличения долговечности фотокатода. Однако, МФ, изготавливаемые по классической технологии, обладают относительно низкой чувствительностью: 700 мкА/лм в среднем и не более 900 мкА/лм на лучших образцах (для GaAs(Cs,O) от 2000 до 3000 мкА/лм), что сказывается на отношении сигнал-шум прибора (20-24 против 27-28 для классических ЭОП III поколения).

Стоит отметить, что ни тип фотокатода, ни его интегральная чувствительность сами по себе в полной мере не определяют качество прибора и дальность обнаружения объектов. Для определения качества ЭОП применим параметр figure of merit (FOM, эффективность), определяющийся как $FOM = ОСШ \times f_{пр}$, где ОСШ – отношение сигнал-шум, $f_{пр}$ – предел разрешения. В свою очередь, на ОСШ главным образом влияют чувствительность фотокатода и усилительные свойства МКП.

За рубежом фирмами Photonis и NNVT были разработаны и запущены в производство ЭОП с МФ с высокими параметрами: интегральная чувствительность фотокатода более 1000 мкА/лм, ОСШ 30 и FOM более 2000 [2], что аргументирует позицию многих зарубежных компаний об отказе от использования термина «поколение ЭОП» в пользу параметра FOM.

С применением наноструктурированных просветляющих покрытий и улучшением технологии роста фотокатодов на предприятии «Экран ФЭП» преодолен рубеж чувствительности в 1000 мкА/лм для МФ. Одновременное применение МФ с повышенной чувствительностью и МКП с улучшенным коэффициентом вторичной эмиссии позволило получить образцы ЭОП, по параметрам не уступающими классическим ЭОП с GaAs фотокатодом: ОСШ более 27 и FOM более 2000.

Литература

1. Миронов А.В., Калоев А.В., Дёмин А.Ю., Русецкий В.С., Толкачёв С.В., Мараховка И.И., Копотилов А.В., Кислых Н.В., Баланюк В.В. Электронно-оптический преобразователь на основе GaAs с бесплёночной технологией МКП и импульсным источником питания. Тезисы докладов XXVI международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Москва, 2022

2. Image intensifier tube 4G+. URL: <https://www.exosens.com/products/image-intensifier-tube-4g-plus-technology>

Перспективы освоения микроканальных пластин нового поколения для техники ночного видения

Кулов Сослан Кубадиевич, Самканашвили Д.Г., Бекузаров Т.В.

ООО ВТЦ «Баспик». Владикавказ. Россия. nis@baspik.com

Perspective for the development of new generation microchannel plates for night vision technology

Kulov Soslan K., Samkanashvili D. Bekuzarov T.
LLC VTC "Baspik", Vladikavkaz, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-117

Due to a number of unique properties (miniature size, compactness, high gain and spatial resolution, high speed, self-saturation of gain, low power consumption, and so on), MCPs are increasingly used in various fields of science and technology, primarily in night vision technology.

Основное применение микроканальных пластин (МКП) связано с техникой ночного видения: электронно-оптическими преобразователями изображений (ЭОП), где МКП выполняет функцию усиления электронных изображений, и приборами ночного видения (ПНВ) на ЭОП. Характеристики МКП, ЭОП и ПНВ взаимосвязаны и взаимообусловлены. Прогресс в МКП предопределяет прогресс в развитии направлений ЭОП и ПНВ. В связи с освоением и развитием новейших поколений малошумящих ЭОП с высоким пространственным разрешением весьма актуальными являются задачи улучшения технического уровня, качества и надежности МКП.

Благодаря ряду уникальных свойств (миниатюрность, компактность, высокое усиление и пространственное разрешение, высокое быстродействие, самонасыщение усиления, малое потребление мощности и так далее), МКП находят все возрастающее применение в различных областях науки и техники, прежде всего, в технике ночного видения.

Для достижения конкурентных преимуществ в ЭОП и ПНВ нового поколения необходимо будет в ближайший годы решить ряд параметрических и конструкторских задач, прежде всего:

- иметь фактор шума до 1,5 или менее;
- иметь предел разрешения не менее 80 пар лин/мм;
- снизить газосодержание и газовыделение МКП с целью исключения необходимости использования ионно-барьерной пленки (ИБП) на входе МКП и ЭОП новых поколений;

- путем оптимизации конструкции обеспечить необходимые требования к механическим нагрузкам МКП в составе ЭОП применения новых поколений.

Решение данных задач позволит выйти на лидирующие позиции в рамках производства микроканальных пластин нового поколения и приборов на их основе.

Литература

1. Кулов С.К., Романов Г.П., Петровский Г.Т. и др. Микроканальные пластины//Электронная промышленность. – 1988–№12. –С.13–16
2. Саликов В. Л. Приборы ночного видения: история поколений //В.Л. Саликов// Специальная техника. – 2000. –№2. –С. 40–48

Микроканальная пластина с повышенной долговечностью для ЭОП III поколения

Альков П.С.¹, Балясный Лев Михайлович¹, Бриллиантов В.Д.¹,
Грузевич Ю.К.¹, Филиппов Н.А.²

¹АО «НПО Геофизика-НВ». Москва. Россия. geo-nv@geo-nv.com

²МИЭТ. Москва. Россия

Microchannel plate with increased durability for 3-rd generation Image Intensifier Tube (ИТ)

Alkov P.S., Balyasny L.M., Brilliantov V.D., Gruzevich Yu.K., Filippov N.A.
NPO Geophysics-NV JSC, Moscow, Russia, geo-nv@geo-nv.com

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-119

Method for manufacturing a ИТ with increased durability for the third generation ИТ is proposed, which eliminates the effect of electron stimulated desorption (ESD), thereby allowing to abandon the use of IBF on MCP. Thus, to eliminate ESD, a uniform thin film of aluminum oxide is applied to the inner surface of the MCP channels by atomic layer deposition (ALD), which acts as a barrier to ions and at the same time is a secondary emission layer with a high secondary emission coefficient.

В современных ЭОП III поколения роль умножителя фотоэлектронов выполняет микроканальная пластина (МКП). Она позволяет увеличить входной сигнал в сотни и тысячи раз. Благодаря появлению МКП стало возможно использовать ПНВ даже в условиях отсутствия лунного освещения.

В ЭОП III поколения для защиты фотокатода на основе GaAs от электронно-стимулированного газовыделения (ЭСГ) из МКП используется ионно-барьерная плёнка (ИБП), нанесённая на торцевую поверхность МКП со стороны фотокатода. Без ИБП срок эксплуатации прибора снижается до нескольких десятков часов. Однако, ИБП во многом лимитирует характеристики ЭОП: снижает отношение сигнал шум, увеличивает размер ореола вокруг изображения ярких источников света [1].

Предлагается способ изготовления МКП с повышенной долговечностью для ЭОП III поколения, который нивелирует эффект ЭСГ, тем самым позволяя отказаться от использования ИБП в ЭОП.

Так, для устранения ЭСГ на внутреннюю поверхность каналов МКП наносится равномерная тонкая плёнка оксида алюминия методом атомно-слоевого осаждения (АСО), которая выступает барьером для ионов и

одновременно является вторично-эмиссионным слоем с большим коэффициентом вторичной эмиссии.

Атомно-слоевое осаждение (Atomic Layer Deposition, ALD) - циклический процесс нанесения тонких пленок материалов на поверхность субстрата с атомарной точностью, основанный на поверхностно-контролируемых и самонасыщаемых химических реакциях и/или адсорбционных процессах между поверхностью и газовыми прекурсорами.

АСО, по своей сути, – это разновидность химического метода осаждения из газовой фазы (CVD). Процесс АСО состоит из последовательных циклов. В каждом цикле сначала на поверхность субстрата подается один из прекурсоров, который взаимодействует с поверхностью и создает мономолекулярный слой. Затем избыток реагента удаляется, например, путем продувки инертным газом. После этого второй реагент подается для реакции с предыдущим слоем и создания следующего мономолекулярного слоя. Этот цикл повторяется, пока не достигнута желаемая толщина пленки [2-5].

Основное преимущество АСО перед обычным способом проведения реакции CVD, в том, что исключается взаимодействие реагентов в газовой фазе и достигается прецизионный контроль толщины наносимого слоя материала с около 100% конформностью.

Компанией Arradience уже был разработан способ нанесения АСО на поверхности каналов МКП с улучшенной вторичной эмиссией (рисунок 1) [6].

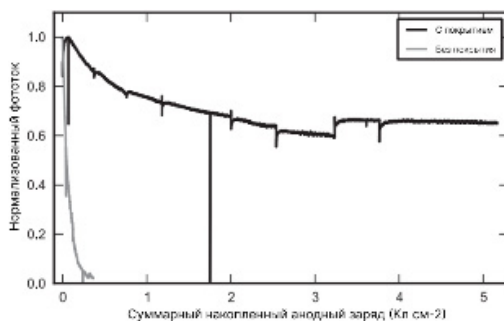


Рис.1. Выходной фототок МКП с покрытием и без в течение всего срока службы, построенный как функция общего заряда

На базе АО «НПО Геофизика-НВ» совместно с ЦКП «МИЭТ» были проведены опыты по нанесению плёнки оксида алюминия на внутреннюю поверхность каналов МКП методом АСО. Полученные пластины были использованы для изготовления опытной партии ЭОП, которая в настоящий момент проходит испытания на долговечность приборов.

1. Грузевич Ю. Оптико-электронные приборы ночного видения. Litres, 2022.

2. Соснов Е.А., Малков А.А., Малыгин А.А. Нанотехнология молекулярного наслаивания в производстве неорганических и гибридных материалов различного функционального назначения (обзор). I. История создания и развития метода молекулярного наслаивания // Журнал прикладной химии. – 2021. – Т. 94. – №. 8. – С. 967-985.

3. Алябьев А.Ю. Применение технологии атомно-слоевого осаждения оксида гафния в производстве элементов электронной компонентной базы // Информатика, телекоммуникации и управление. – 2015. – №. 4 (224). – С. 51-58.

4. Одинокое В.В. Низкотемпературные вакуумно-плазменные процессы в технологическом оборудовании // Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий. – 2019. – Т. 1. – №. 10. – С. 260-266.

5. Дрозд А. В. Молекулярное наслаивание, опыт применения в микроканальных пластинах // Молодой ученый. – 2016. – №. 7. – С. 230-235.

6. Conneely T. M., Milnes J. S., Howorth J. Extended lifetime MCP-PMTs: Characterisation and lifetime measurements of ALD coated microchannel plates, in a sealed photomultiplier tube // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2013. – Т. 732. – С. 388-391.

Дефекты микроканальных пластин, влияющие на чистоту поля зрения электронно-оптических преобразователей III поколения

Альков П.С.¹, Балясный Лев Михайлович¹, Бриллиантов В.Д.¹,
Грузевич Ю.К.¹, Корначева Н.Л.¹, Юрасова Е.В.², Кулов С.К.³, Алкацева Т.Д.³,
Самканашвили Д.Г.³

¹ АО «НПО Геофизика-НВ». Москва, Россия, geo-nv@geo-nv.com

² МИЭТ. Москва, Россия

³ ООО ВТЦ «Баспик». Владикавказ, Россия

Defects of microchannel plates affecting the purity of the field of view of IIIrd gen tubes

Alkov P.S., Balyasny L.M., Brilliantov V.D., Gruzevich Y.K., Kornacheva N.L.,
Yurasova E.V., Kulov S.K., Alkatseva T.D., Samkanashvili D.G. (VTC «Baspik»,
Vladikavkaz).

NPO Geophysics-NV JSC, Moscow, Russia, geo-nv@geo-nv.com

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-122

К электронно-оптическим преобразователям (ЭОП), применяемым в приборах ночного видения (ПНВ), предъявляются высокие требования по чистоте поля зрения электронного изображения (ЧПЗ ЭИ). Микроканальная пластина (МКП) – тот элемент, который наряду с другими факторами оказывает влияние на ухудшение ЧПЗ на данный момент. Доля брака вакуумных блоков (ВБ) в производстве ЭОП достигает 20%, что говорит о большой актуальности анализа дефектов МКП, возникающих на протяжении всего её жизненного цикла.

Основные виды дефектов: дефекты формы, посторонние частицы (ПЧ) и налёты, отслоение контактных электродов на основе Сг.

Дефекты формы МКП, как правило производственные и (или) связаны с технологией производства. Так большой проблемой является искажение геометрии каналов по границам спекания многожильных световодов (МЖС). Диаметр каналов в этих местах как правило отличается от номинального. При меньшем диаметре, а, следовательно, и калибре канала может отличаться коэффициент усиления при рабочих напряжениях, что приводит к возникновению на ЭИ некоторых типов сотовой структуры (СС) [2, 3]. Сотовая структура также может возникать из-за загрязнений по границам спекания [1].

Предотвращение возникновения сотовой структуры может быть достигнуто изменениями в технологии производства МКП, при которых при спекании МЖС не будет происходить деформации каналов /3/.

Также уменьшение контраста СС достигается проведением

фотоэлектронной тренировки (ФЭТ) МКП за счёт снижения каскадного коэффициента вторичной электронной эмиссии (КВЭЭ) и очищения загрязнений по границам спекания [1]. Хранение пластин в вакууме является действенной профилактикой падения порога тока появления СС [2]. Для предотвращения появления СС от загрязнений требуется проведение исследований по очистке МЖС до спекания [4].

На поверхности МКП на выходном контроле у производителя или входном контроле у потребителей отмечаются поверхностные загрязнения, которые носят различный характер и требуют разных подходов для их ликвидации [5]. Очистка МКП в ультразвуковой ванне с генератором плавающей частоты и продувка очищенным воздухом или инертным газом после промывки в деионизованной воде, изопропиловом спирте (одном из основных загрязнителей [5]) и других растворителях могут снизить количество оставшихся ПЧ на всех поверхностях МКП [6].

Большое влияние на ЧПЗ ЭИ в ЭОП оказывают ПЧ на поверхностях МКП. Как правило они вызывают автоэмиссионные явления из-за высокой напряжённости поля (до 10 и более кВ/мм) в катодном и экранном промежутках ЭОП, что также может привести к выходу из строя прибора вследствие пробоя.

МКП, используемых в производстве ЭОП, могут иметь ПЧ, оставшиеся после контроля у производителя, а также сформировавшиеся в процессе перевозки и хранения. Они должны устраняться теххимической обработкой (ТХО) на входном контроле у потребителей. Однако следует учитывать, что сама ТХО, как правило, является источником новых ПЧ, таким образом, ТХО может даже ухудшить чистоту МКП.

В следствие наличия в составе материалов МКП Na и K, на их поверхностях образуются карбонаты, силикаты щелочных металлов и их кристаллогидраты. Поэтому, хранение и перенос МКП между операциями требует соблюдения очень строгих норм (хранение в вакууме, переноска в контейнерах с сухим азотом), а последовательность операций должна соблюдать правила улучшения вакуума. Уменьшение и устранение сроков хранения также положительно сказывается на чистоте МКП.

Также появляются ПЧ, которые явно привносятся в производстве ЭОП, например, частицы меди с участков напыления, которые должны быть разнесены с операциями обработки МКП или частицы железа из-за использования неподходящей оснастки нанесения ИБП.

Для уменьшения вероятности отслоения электродов, необходимо материалов с близким к стеклу оболочки КТР (например, NiCr или РС – резистивный слой, в составе которого, помимо Ni и Cr, есть и Si).

Литература

1. Савенко В.И., Самканашвили Д.Г. Диагностика сотовой структуры на электронном изображении микроканальных пластин на наноуровне, прошедших фотоэлектронную тренировку //Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2018. – №. 10. – С. 550-556.
2. Авдеев К.А., Кулов С. К., Самканашвили Д.Г. Поведение сотовой структуры электронного изображения микроканальных пластин на хранении //Приоритеты мировой науки: новые подходы и актуальные исследования. – 2022. – С. 6-11.
3. Пахомов Н.С., Самканашвили Д.Г., Кривов С.В. Опробование конструкции МКПО 18-6 с уменьшенным диаметром канала в углу МКС // Приоритеты мировой науки: новые подходы и актуальные исследования. – 2022. – С. 38-43.
4. Коломенский А.Н., Кулов С.К., Гусалов А.И. Влияние операции мойки МЖС на появление дефектов по границам спекания //Приоритеты мировой науки: новые подходы и актуальные исследования. – 2022. – С. 32-37.
5. Кастуев М.К. и др. Влияние операции обработки заготовок МКП в изопропиловом спирте на их внешний вид //Приоритеты мировой науки: новые подходы и актуальные исследования. – 2022. – С. 26-31.
6. Лучкин А.Г., Лучкин Г.С. Очистка поверхности подложек для нанесения покрытий вакуумно-плазменными методами // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15. – №. 15. – С. 208-210.

Увеличение эффективной площади каналов МКП ионным травлением

Альков П.С.¹, Баясный Лев Михайлович¹, Бриллиантов В.Д.¹,
Грузевич Ю.К.¹, Филиппов Н.А.², Пестов А.Е., Михайленко М.С.³

¹АО «НПО Геофизика-НВ». Москва. Россия. geo-nv@geo-nv.com

²Центр коллективного проектирования МИЭТ. Москва. Россия

³Институт физики микроструктур РАН. Нижний Новгород. Россия

Increasing the effective area of MCP channels by ion etching
Alkov P.S., Balyasny L.M., Brilliantov V.D., Gruzevich Yu.K., Filippov N.A.
(CCU METU) Pestov A.E., IPM RAS, Nigniy Novgorod
NPO Geophysics-NV JSC, Moscow, Russia, geo-nv@geo-nv.com

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-125

Developed optimal parameters for the formation of funnels at the input of the MCP channels due to ion etching with rapid rotation of the sample installed at the channel angle with accelerated argon ions with an energy of 800 eV and a current density of 0.7 mA/cm² and an etching time of 60 minutes.

В электронно-оптическом преобразователе (ЭОП) III поколения микроканальная пластина (МКП) определяет такие параметры прибора, как усиление, разрешение и отношение сигнал/шум. Проблема собственных шумов МКП остро сказывается в приборах ночного видения, усилителях слабого сигнала и других подобных приборах а также в фотоприемных устройствах для научного применения, в т.ч. для астрофизических проектов.

Вторым положительным моментом использования МКП с открытыми каналами является увеличение квантового выхода в случае нанесения фотокатода на поверхность МКП. В проекте «Спектр-УФ» будут использованы солнечно слепые МКП с фотокатодом CsI, нанесенным на первую МКП. Ожидается, что использование МКП с открытыми каналами увеличит квантовый выход на 10-20% по сравнению с вариантом нанесения прозрачного фотокатода CsI на защитное стекло MgF₂, что особо важно при наблюдениях слабых астрофизических источников в режиме счета фотонов.

Динамический шум МКП зависит от дисперсии коэффициента усиления, величины коэффициента вторичной электронной эмиссии первого соударения и эффективной площади каналов [1].

$$F = \frac{1}{\gamma} \left(1 + \frac{1}{\sigma_1} + \frac{1+G/\sigma_1}{G} \right) \quad (1)$$

где F — фактор шума МКП; γ — эффективная площадь каналов; σ_1 — коэффициент вторичной эмиссии первого удара; G — коэффициент усиления.

Главной проблемой МКП является коэффициент сбора фотоэлектронов в микроканалы [2]. Варьированием угла раствора входа канала удастся добиться повышения величины этого параметра так, чтобы практически все эмитированные фотоэлектроны попадали в канал, как показано на рисунке 1.

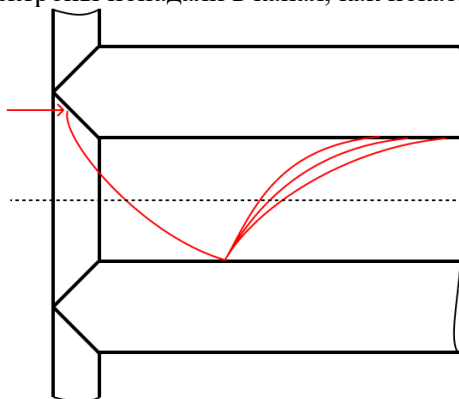


Рис. 1. Траектории фотоэлектронов в каналах МКП воронкообразного типа.

Таким образом, одним из действенных способов уменьшения фактора шума МКП является увеличение её эффективной площади за счёт формирования конусообразного входа канала (т.е. фасок, воронок или раструбов).

В литературе можно встретить два основных способа такой обработки МКП:

- Электронным лучом [3];
- Ионным пучком.

Совместно с ЦКП «МИЭТ» и Институтом физики микроструктур РАН (ИФМ РАН), г. Нижний Новгород было проведено ионное травление МКП с целью отработки параметров, при которых удастся получить раструбы правильной конусной формы. Для ионной обработки поверхности использовались МКП 18-6 и 25-6, которые чаще всего используются в составе ЭОП для приборов ночного видения, где 18, 25 – обозначение диаметра пластины в мм, а 6 – обозначение диаметра каналов в мкм.

В ЦКП «МИЭТ» травление осуществлялось на установке FISCHIONE model 1060, с параметрами $j = 0.35 \text{ mA/cm}^2$, $U = 400 \text{ V}$, $t = 60 \text{ мин}$ и $j = 0.47 \text{ mA/cm}^2$, $U = 500 \text{ V}$, $t = 60 \text{ мин}$. Обработка МКП проводилась 2 часа, при этом пластины были расположены с наклоном в 5 градусов по направлению угла наклона каналов, что соответствует углу их наклона по данным производителя пластин, такое расположение должно обеспечить нормальное

падение ионного пучка. Результат представлен на рисунке 2, явно видно, что обработка прошла успешно, отчётливо проявились раструбы каналов, однако они имеют ярко выраженную «зубчатую» форму, а также больший протрав одной стороны каналов, что говорит о неправильном расположении пластины. Для устранения «зубчатой» формы раструбов было принято решение придать вращение пластине во время обработки.

В ИФМ, г. Нижний Новгород ионная обработка осуществлялась с помощью технологического источника ускоренных ионов КЛАН-103М (НТК «Платар») типа Кауфмана с накальным катодом и плоской ионно-оптической системой. МКП обрабатывали под углом 10 градусов со вращением с параметрами $j = 0.7 \text{ mA/cm}^2$, $U = 800 \text{ В}$, $t = 60 \text{ мин}$. Измерения провели на СЭМ, результаты которого приведены на рисунке 3. Как видно, проявились раструбы без искажения формы входных отверстий.

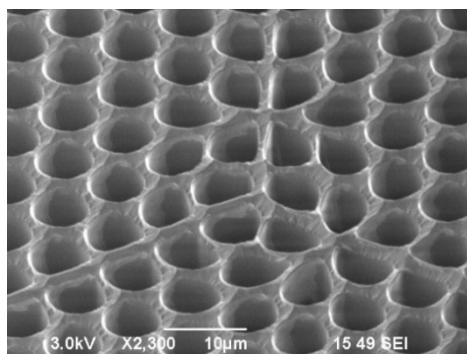


Рис. 2. РЭМ изображение МКП 18-6 после травления на стыке шестиугольных МЖС

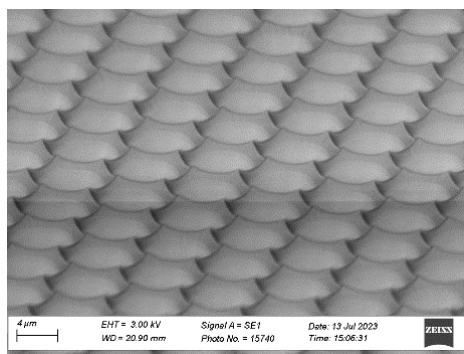


Рис. 3. СЭМ изображение поверхности после травления МКП 25-6 с открытыми каналами

Таким образом, были подобраны оптимальные параметры для формирования воронок на входе каналов МКП за счет ионного травления с быстрым вращением образца, установленного под углом наклона каналов ускоренными ионами аргона с энергией 800 эВ и плотностью тока 0.7 mA/cm^2 и временем травления 60 минут.

1. Грузевич Ю. Оптико-электронные приборы ночного видения. Litres, 2022.
2. Иванов В.Я. Методология компьютерного проектирования микроканальных усилителей. – 2019.
3. Авдеев С.П., Кравченко А.А., Гусев Е.Ю. Влияние электронно-лучевой обработки на параметры фотоэмитирующих структур и фактор шума МКП //Прикладная физика. – 2007. – №. 3. – С. 67.

Двухспектральное оптико-электронное устройство для обнаружения пятна лазерного дальномера (ЛЦД) на удаленном объекте

Альков П.С.¹, Балясный Л.М.¹, Грузевич Ю.К.¹, Мартыненко И.А.¹,
Чистов Олег Валерьевич¹, Широков Д.А.¹, Егоренков А.А.², Пашук А.В.²

¹ АО «НПО Геофизика-НВ». Москва, Россия. geo-nv@geo-nv.com

² АО «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОН». Санкт-Петербург, Россия. info@nielectron.ru

A bispectral optoelectronic device for detecting a spot of a laser rangefinder on a remote object

Alkov P.S., Balyasny L.M., Gruzevich Yu.K., Martinenko I.A., Chistov O.V.,
Shirokov D.A., Egorenkov A.A.* , Pashuk A.V.*

NPO Geophysics-NV JSC, Moscow, Russia, geo-nv@geo-n.v.com

**JSC «ELEKTRON», Saint-Petersburg, Russia, info@nielectron.ru*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-128

Одной из актуальных задач при проведении испытаний и эксплуатации лазерных целеуказателей и дальномеров, работающих в инфракрасном диапазоне спектра (1,06 и 1,54 мкм), является визуализация пятна лазерного излучения при дальнометрировании объекта наблюдения в широком диапазоне освещенности.

Наблюдение объектов в этом диапазоне от 5×10^{-3} лк до 10^5 лк, то есть от безлунной ночи до солнечного дня в реальном времени перекрывают только приборы ночного видения (ПНВ) на основе электронно-оптических преобразователей (ЭОП) и телевизионные камеры на основе ПЗС или КМОП матриц и матриц, работающих в коротковолновом ИК диапазоне.

Однако, ПНВ на основе ЭОП неудовлетворительно работают при высоких освещенностях и даже с так называемым автостробированием, а камеры коротковолнового ИК диапазона не обладают высокой чувствительностью для работы в ночных условиях.

Для решения задачи обнаружения пятна лазерного излучения на больших дальностях наблюдения, было создано ОЭПУ на основе ЭОП 3⁺ поколения с фотокатодом с отрицательным средством к электрону (ОЭС-фотокатодом) из соединения $\text{In}_{0,17}\text{Ga}_{0,83}\text{As}/\text{GaAs}$ на стекле, обладающим квантовой эффективностью на длине волны 1,06 мкм до 1% и состыкованной с ним с помощью волоконно-оптического фоконя матрицей ПЗС или КМОП [1].

Для реализации возможности наблюдения пятна излучения была организована синхронизация частоты ЛЦД и частоты стробирования ЭОП с

помощью фотоприемного устройства (ФПУ), введенного в состав ОЭПУ.

Таким образом, была получена предельная дальность обнаружения пятна ЛЦД на удаленном объекте до 17 км в условиях солнечного дня.

В настоящее время кроме ЛЦД, работающих на длине волны 1,06 мкм, разработаны и выпускаются ЛЦД работающие на длине волны 1,54 мкм, в безопасном для глаз наблюдателя диапазоне.

Для решения проблемы обнаружения пятна такого ЛЦД в этом диапазоне нами предлагается использовать гибридный прибор с ИК фотокатодом [2, 3], так как традиционные ОЭС-фотокатоды в этом диапазоне не работают. В настоящий момент в АО «ЦНИИ «Электрон» разработано фотоприемное устройство «УТК-4» на основе вышеупомянутого гибридного прибора.

Спектральная характеристика этого фотокатода и изображение тест-таблицы с гибридного прибора показаны на рисунках 1 и 2.

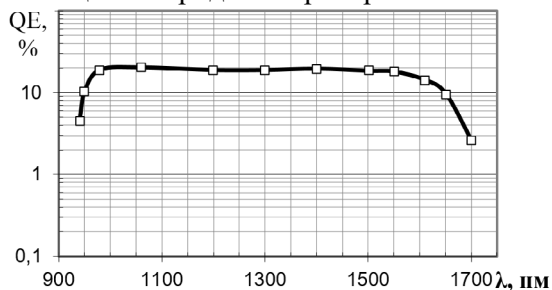


Рис.1 Квантовая эффективность ИК фотокатода

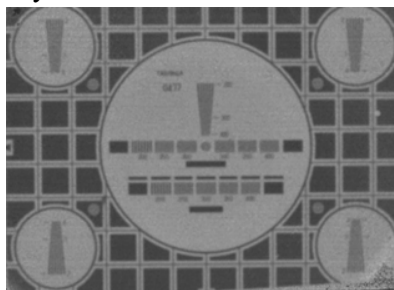


Рис.2 Изображение тест-таблицы, полученное от гибридного прибора

ИК фотокатод, в зависимости от приложенного напряжения, может достигать квантовой эффективности 15-20% в диапазоне длин волн от 1 до 1,6 мкм.

Взамен катодолюминесцентного экрана для визуализации изображения в гибридных приборах используют электронно-чувствительную матрицу ПЗС или КМОП с бомбардировкой электронами обратной стороны матрицы. Таким образом, коэффициент заполнения элементов матрицы в отличие от ЭОП с микроканальной пластиной (МКП) близок к 100%. Шум усиления при торможении фотоэлектронов в кремниевой матрице также значительно ниже, чем при ударной ионизации у ЭОП с МКП. Поэтому отношение сигнал/шум гибридных приборов значительно выше, чем у традиционных телевизионных камер на основе ЭОП.

Предлагаемое двухспектральное ОЭПУ работает на том же принципе, что и описанное в работе [1], но в обоих диапазонах дальнометрирования.

Литература

1. Патент РФ на полезную модель № 186487 U1 от 22.01.2019 г. Балясный Л.М, Гордиенко Ю.Н., Грузевич Ю.К., Альков П.С., Широков Д.А. и др. Устройство для круглосуточного наблюдения положения пятна излучения на удаленном объекте.

2. А.А. Егоренков и др. Гибридный матричный фотоприемник для ИК-области спектра // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2021. № 4. С. 15-22.

3. Айнбунд М. Р., Егоренков А. А., Пашук А. В. Особенности изображений воды, льда, снега, предметов и человека, формируемых гибридной телевизионной камерой в ближнем инфракрасном диапазоне // Научно-технический вестник ИТМО, выпуск №5, том 21, 2021

**Создание квазипористых структур на основе минимальных
поверхностей для микроканальных теплообменных аппаратов и
поверхностей, рассеивающих теплоту**

Миронов Алексей Игоревич, Кулебякин С.Д., Навасардян Е.С., Нисан А.В.,
Филимонов А.С., Алекперов Э.С.

ФГБОУ ВО МГТУ им. Баумана, Москва, Россия, miraleksmgtu@yandex.ru

**Creation of quasi-porous structures based on minimal surfaces for
microchannel heat exchangers and heat dissipating surfaces**

Mironov Aleksey Igorevich, Kulebyakin Savely Dmitrievich,
Navasardyan Ekaterina Sergeevna, Nisan Anton Vyacheslavovich,
Filimonov Alexey Sergeevich, Alekperov Eldar Samedovich
Bauman Moscow State Technical University (BMSTU). Moscow, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-131

(The article considers the application of additive technologies for the manufacture of regenerators. The advantages and disadvantages of using volumetric printing made of aluminum were also considered. A model made using this technology is shown. Measurements were carried out to compare the theoretical model with the manufactured sample.)

Микроканальные теплообменные аппараты и специальным образом сконфигурированные эффективные поверхности для отвода теплоты — это основные элементы, обеспечивающие теплоотвод во всех системах охлаждения, в том числе и системах охлаждения фотоприемных устройств [1]. Главным конструктивным элементом теплообменных аппаратов канального типа является контактное устройство (насадка). До настоящего времени возможность управления потоком (прогнозирование структуры течения, формирование температурных градиентов, градиентов давления) за счет изменения геометрии таких структур считалась недостижимой из-за ограничений, связанных с технологиями листовой штамповки или прокатки. Сегодня в мировую практику металлообработки вошли современные аддитивные технологии и стало возможным создание аналитически определенных поверхностей любой, сколь угодно сложной геометрии и аналитически описываемой конфигурации [3].

Эти технологии позволят открыть новые типы тепло- и теплообменных суперкомпактных поверхностей на базе трижды периодических минимальных поверхностей (ТПМП/TPMS), конфигурация которых полностью поддается методам численного анализа.

В данной работе представлены некоторые образцы теплообменных

поверхностей нового типа на базе ТПМП поверхностей, а также результаты измерений геометрических размеров при 3D печати алюминиевым порошком. Измерения выполнялись для сравнения качества и определения отклонений, спроектированных и созданных методом 3D печати структур.

Создание представленных структур позволит провести целый ряд экспериментальных исследований для получения новых эмпирических зависимостей для определения критерия Нуссельта, позволяющих рассчитывать тепло- и тепломассообмен на контактных устройствах нового типа.

Основными фактически генерируемыми при построении теплофизическими свойствами и геометрическими характеристиками квазипористых структур на основе минимальных поверхностей являются минимальное гидравлическое сопротивление в направлении движения потока, высокая теплопроводность по направлению движения рабочего вещества, однородность структуры, равномерная проницаемость и высокие показатели теплоёмкости и механической прочности [4].

Основное достоинство структур на базе периодических поверхностей – наличие однозначного математического описания, что позволяет изготовить насадку под конкретную задачу [6].

3D печать алюминием – это технология создания прототипов деталей и изделий из алюминия методом послойного лазерного спекания, сплавления материала [5]. Алюминий часто применяют для изготовления теплообменного оборудования из-за отличной теплопроводности материала, устойчивости к окислению и коррозии, устойчивости к высокому давлению при относительно небольшом весе аппарата [7]. Особенностью деталей, изготовленных из алюминия по технологии лазерного спекания, является прилипание порошка. Что в свою очередь оставляет полу-шероховатый, ступенчатый профиль поверхности [8]. Для печати алюминием характерны точности размеров до $\pm 0,1\%$.

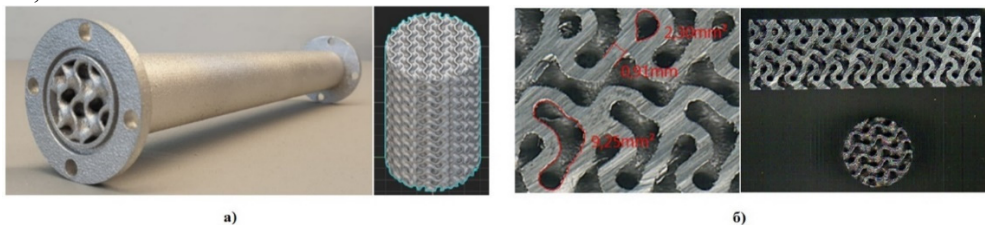


Рисунок 1 – Насадочное устройство изготовленное на 3D принтере:
а) Структура на основе поверхности – гироид; б) продольный разрез образца.

В рамках научно-исследовательской работы была смоделирована структура на основе ТПМП гироид и изготовлена с помощью 3D печати по технологии спекания алюминиевого порошка АСП-45 AlSi10Mg (Русал) под воздействием лазера мощностью 275 Вт (рисунок 1-а). Так как, напечатанная модель имеет сложную разветвленную структуру, то большой интерес

представляет результат печати внутри самого гироида. В целях исследования этого вопроса был выполнен продольный разрез насадочного устройства и измерены площади в этом сечении (рисунок 1-б).

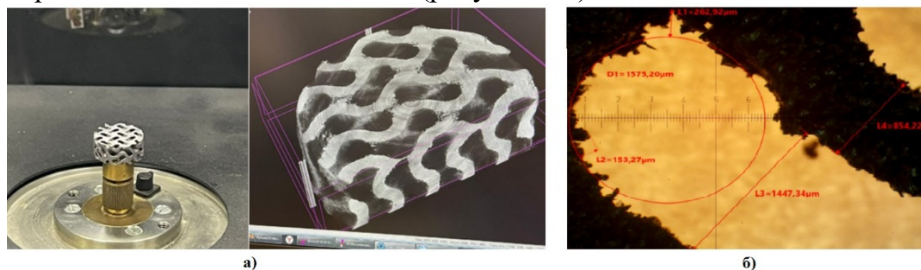


Рисунок 2 – Анализ геометрии насадочной структуры:
а) метод рентгеновской томографии; б) замеры шероховатости по выступам.

Также, для проведения исследований внутренней структуры насадочного устройства на основе минимальных поверхностей можно применять рентгеновскую томографию изделия (рис. 2-а). Томограф позволяет послойно видеть структуру изготовленной насадки.

Так как, процесс изготовления изделия – спекание, то поверхность обладает характерной неровностью («шершавостью»). Для более детального изучения поверхности была проведена грубая оценка шероховатости по выступам (таблица 1). Измерения проводились с увеличением масштаба в 40 раз с использованием микроскопа (рис. 2-б).

Таблица 1 – Грубая оценка шероховатости поверхности.

	D1	L1	L2	L3	L4
Длина/диаметр, мкм	4948,65/1575,20	262,92	153,27	1447,34	854,22
Площадь, мкм	1948785,20	–	–	–	–

Таким образом применение аддитивных технологий, а именно объемной печати различными материалами поможет усовершенствовать процесс отвода тепла в микрокриогенных машинах, путем изготовления сложных специальным образом сконфигурированных эффективных поверхностей для отвода теплоты в зоне сжатия (крышка компрессорной полости, части корпуса в зоне сжатия) и структурах регенераторов.

Литература:

1. Luo X., Liu Y., Liu W. A honeycomb microchannel cooling system for microelectronics cooling //Heat transfer engineering. – 2011. – Т. 32. – №. 7-8. – С. 616-623.
2. Di Giulio E. et al. Wire mesh stack and regenerator model for thermoacoustic devices //Applied Thermal Engineering. – 2023. – Т. 221. – С. 119816.
3. Armstrong M., Mehrabi H., Naveed N. An overview of modern metal additive manufacturing technology //Journal of Manufacturing Processes. – 2022. – Т. 84. – С. 1001-1029.

4. Wang A. et al. 3D printing of aluminum alloys using laser powder deposition: a review //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Т. 116. – №. 1. – С. 1-37.
5. Кулик В. В., Навасардян Е. С., Паркин А. Н. Численное моделирование пористой насадки регенератора микрокриогенных газовых машин //Инженерный журнал: наука и инновации. – 2017. – №. 8 (68). – С. 11
6. Brendle S. Minimal surfaces in: a survey of recent results //Bulletin of Mathematical Sciences. – 2013. – Т. 3. – №. 1. – С. 133-171.
7. Елистратова А. А., Коршакевич И. С., Тихоненко Д. В. Технологии 3D-печати: преимущества и недостатки //Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2015. – Т. 1. – №. 11. – С. 557-559.
8. Ляшенко Б.А. и др. Повышение качества коррозионной защиты теплообменной аппаратуры //Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2011. – №. 24 (1). – С. 249-257.

Методика измерения теплофизических параметров криостатов охлаждаемых ФПУ

Архипов С.С., Козырев М.Е., Чиж Кирилл Всеволодович

АО «Московский завод «САПФИР». Москва. Россия. ko-ckb@mail.ru

Measurement technique heat physics parameters of cryostats cooled photodetector devices

Arkhipov S.S., Kozyrev M.Ye, Chizh K.V.

Joint-stock company «Moscow factory «SAPPHIRE», Moscow, ko-ckb@mail.ru

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-135

In the report results of researches on working out of a technique of measurement heat physics parameters of cryostats cooled photodetector devices are presented. Such parameters concern heat transfer to cryostat, the resulted cooled weight cryostat and temperature of cooled cryostat.

В докладе приводятся результаты исследований по разработке методики измерения теплофизических параметров криостатов охлаждаемых фотоприемных устройств. К таким параметрам относятся теплоприток к криостату, приведенная охлаждаемая масса криостата и температура криостатирования. Они являются определяющими при разработке конструкции криостата и выборе охлаждающего устройства, которое будет работать с ним в составе ФПУ.

В основу разработанной методики были положены способы измерения теплопритоков и охлаждаемой массы криостата с помощью электрического расходомера, а именно:

- способ измерения теплопритоков, включающий в себя процесс измерения расхода жидкого азота, испаряющегося из колодца криостата приемника, процесс контроля температуры доньшка колодца и расчет теплопритока для конечного момента времени, соответствующего полному выкипанию азота;

- способ определения приведенной охлаждаемой массы, заключающийся в контроле изменения теплопритока к криостату и изменения температуры доньшка колодца держателя фотоприемника для двух последующих измерений, а также времени между измерениями, с последующим расчетом по формуле величины приведенной охлаждаемой массы.

Для реализации разработанной методики бы создан универсальный измерительный комплекс на основе недорогих и широко применяемых электронных модулей. Измерительный комплекс состоит из

сертифицированного измерителя расхода газа с цифровым выходом, многоканального 16-битного АЦП, высокоточных интегральных источников тока для термодатчиков, системы сопряжения на основе 32-битного контроллера семейства STM32, персонального компьютера и специального программного обеспечения. Комплекс позволяет измерять расход газообразного азота с точностью, которую позволяет примененный тип расходомера, и проводить одновременно измерение температуры в пределах от 60 К до 300 К при помощи бескорпусных диодных термодатчиков с характеристиками в соответствии с ТУ 6341-001-07539943-03, исполнение 1, группа Б.

Специальное программное обеспечение позволяет наблюдать процессы в реальном времени и сохранять данные в текстовом формате или в формате Excel. При помощи данного комплекса были выполнены измерения теплопритоков и охлаждаемых масс криостатов различных типов экспериментальных и серийных образцов ФПУ. Измерительный комплекс используется также при настройке саморегулирующихся дроссельных микрохолодильников, входящих в состав быстродействующих ФПУ, и оптимизации их параметров.

Согласно ТУ 6341-001-07539943-03 характеристики применяющихся в ФПУ термодатчиков описываются линейной функцией, которая задается по двум реперным температурам – 293 К и 77 К. С использованием специально разработанного технологического криостата, состыкованного с газовой криогенной машиной «Сапфир-МКС», выполнены исследования зависимости выходного сигнала диодного ТД (ТУ 6341-001-07539943-03, исполнение 1, группа Б), в качестве эталонного ТД применялся ДТ-670 фирмы «Lake Shore Cryotronics», градуированный в диапазоне температур от 1,2 К до 500 К.

Проведенные исследования показали, что истинные характеристики термодатчиков отличаются от линейной зависимости. На уровне температур 80-90 К расхождения реальных показаний ТД и градуировочных значений составляют 1,5-2 К. Кроме того, при измерениях температур ниже 77 К, эти расхождения еще больше увеличиваются. В результате исследования предложена формула для градуировки ТД, учитывающая нелинейность их характеристик в диапазоне температур от 77 К до 60 К.

Литература

1. Архипов С.С., Ильин А.С., Козырев М.Е. К вопросу об измерениях теплофизических параметров ФПУ. Труды Российской конференции и школы молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «Фотоника-2017». Новосибирск, 2017.
2. Карпов В.В., Козырев М.Е., Кузнецов С.А. Способ измерения теплопритоков охлаждаемых ИК-приемников. Патент на изобретение №2791432.
3. Карпов В.В., Козырев М.Е., Кузнецов С.А. Способ определения приведенной охлаждаемой массы ИК-приемников и их тепловых моделей. Патент на изобретение №2809939.
4. Термодатчик бескорпусный диодный, группа А (или Б), Исполнение 1 (или 2), ТУ 6341-001-07539943-03.

Исследование теплофизических характеристик инфракрасных фотоприёмных устройств с цифровыми и аналоговыми фотомодулями

Бурлаков Владислав Игоревич, Гапонов О.В., Морковников Н.И.,
Власова О.И., Хрущев А.О.

ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия. vlad-burlakov@mail.ru

Investigation of thermophysical characteristics of infrared focal-plane arrays with time delay integration mode, which using readout integrated circuits with analog and digital outputs

Burlakov V.I., Gaponov O.V., Morkovnikov N.I., Vlasova O.I., Khrushchev A.O.
Orion R&P Association, JSC. Moscow. Russia. vlad-burlakov@mail.ru

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-137

Research has been performed on the thermophysical characteristics (TPC) of infrared (IR) focal-plane array (FPA) with time delay integration (TDI) mode, designed to register low-power optical signals in the IR spectrum range. The TPC of two kinds of IR FPA with TDI mode, using different types of readout integrated circuit (ROIC) are compared – a ROIC with analog outputs (ROIC-A) and a ROIC with digital outputs (ROIC-D). When using ROIC-D, the TPC of IR FPA with TDI mode is improved by at least 20 %, which determines the prospects of using this type of ROIC. The result obtained is ensured by the fact that the use of ROIC-D made it possible to significantly redesign the structure of IR FPA with TDI mode and abandon some of the components that make a significant contribution to the overall heat dissipation from the IR FPA with TDI mode. The improvement of the TPC of IR FPA with TDI mode, using a ROIC-D, is additionally ensured by the fact that a ROIC-D has a noticeably lower intrinsic heat dissipation compared to a ROIC-A.

Современные инфракрасные (ИК) фотоприёмные устройства (ФПУ) с режимом временной задержки и накопления (ВЗН) широко применяются для регистрации маломощных оптических сигналов в инфракрасном спектральном диапазоне. Режим ВЗН позволяет существенно улучшить основные параметры ИК ФПУ: снизить неравномерность чувствительности; увеличить отношение сигнал/шум; повысить пространственное разрешение [1-3] и т.д. Основным структурным элементом ИК ФПУ является фоточувствительный модуль (ФМ), который существенно влияет на структуру ИК ФПУ и его различные характеристики, такие как фотоэлектрические, теплофизические и массогабаритные. Из-за этого встаёт вопрос о выборе вида ФМ, используемого

в составе ИК ФПУ с режимом ВЗН. Существуют два основных вида ФМ – ФМ с аналоговыми выходами (ФМ-А) и ФМ с цифровыми выходами (ФМ-Д). ФМ-Д и ФМ-А состоят из двух основных частей – большой интегральной схемы считывания (БИС считывания) и матрицы фоточувствительных элементов.

В настоящей работе приводятся результаты исследований, посвящённых расчёту и сравнительному анализу теплофизических и массогабаритных характеристик ИК ФПУ на базе ФМ-А (ИК ФПУ-А), и ИК ФПУ на базе ФМ-Д (ИК ФПУ-Д). Эти исследования позволили выявить особенности технических решений и конструкций при использовании двух обозначенных выше видов ФМ.

ФМ-Д отличается от ФМ-А структурной схемой БИС считывания. БИС считывания ФМ-Д отличается от БИС считывания ФМ-А наличием дельта-сигма аналого-цифрового преобразователя вместо каскада усилителей [4]. На рис. 1 приведены структурные схемы БИС считывания ФМ-А и БИС считывания ФМ-Д, на рис. 1а представлена структурная схема БИС считывания ФМ-А, а на рис. 1б представлена структурная схема БИС считывания ФМ-Д.

Использование ФМ-Д дало возможность существенно переработать структуру ИК ФПУ с режимом ВЗН. Сигнал на выходе ФМ-Д формируется в цифровом виде, что позволило отказаться от крупногабаритного и достаточно мощного по тепловыделению и энергопотреблению блока аналого-цифрового преобразования, который использовался в ИК ФПУ-А. Замена ФМ-А на ФМ-Д улучшила характеристики ИК ФПУ с режимом ВЗН – снизились энергопотребление, тепловыделение, масса и объём, при этом уровень шума не увеличился [5].

Тепловыделение ИК ФПУ-Д также снизилось за счёт уменьшения собственных тепловыделений ФМ-Д в два раза по сравнению с ФМ-А. Этот положительный эффект является очень важным, поскольку ИК ФПУ с режимом ВЗН состоит не из одного, а из нескольких ФМ.

Переход от применения ФМ-А к ФМ-Д при разработке ИК ФПУ-Д привёл к значительным изменениям конструктивного исполнения изделия с достижением более высоких эксплуатационных характеристик. Тепловыделение ИК ФПУ-Д, за счёт конструкционных изменений и уменьшения собственных тепловыделений ФМ-Д, снизилось не менее чем на 20% по сравнению с ИК ФПУ-А. Принятые технические решения существенно уменьшили массогабаритные параметры ИК ФПУ-Д – масса снизилась на 25%, а объём снизился на 37% по сравнению с ИК ФПУ-А. Использование ФМ-Д вместо ФМ-А, благодаря снижению тепловыделения, уменьшает нагрузку на систему охлаждения ИК ФПУ. Снижение массы и объёма также определяет перспективность использования ИК ФПУ-Д.

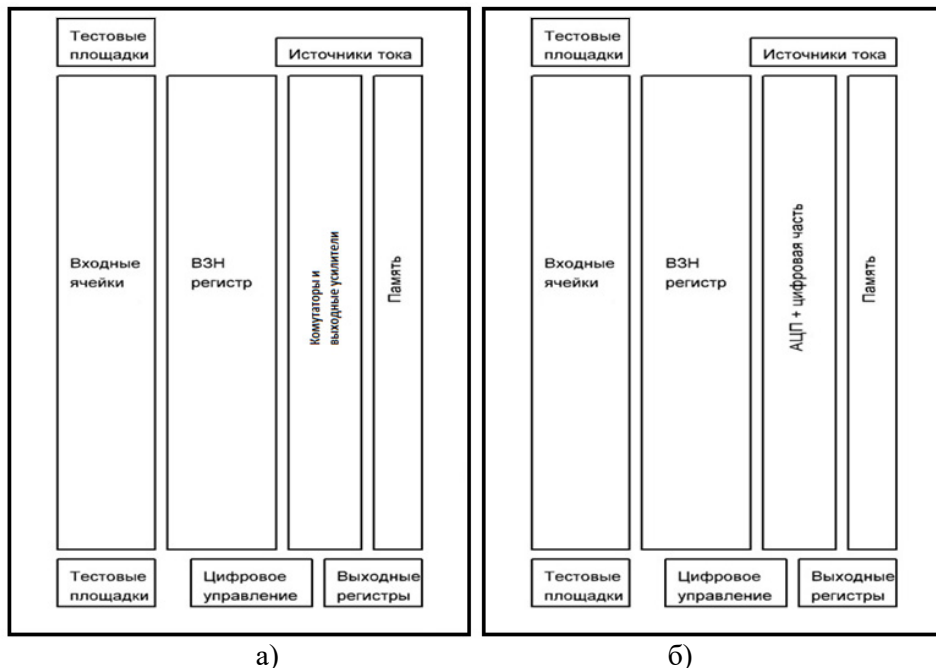


Рис. 1. Структурные схемы БИС считывания основных видов ФМ.
а) – структурная схема БИС считывания ФМ-А; б) – структурная схема БИС считывания ФМ-Д

1. Кузнецов П.А., Мошев И.С., Сало В.В., Кошанцев Н.Ф. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 6. С. 635–638

2. Филачев А.М., Таубкин И.И., Тришенков М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. – М.: Физматкнига, 2011

3. Кузнецов П.А., Хромов С.С. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 321–325

4. Бурлаков В.И., Гапонов О.В. Инновационные технологии в электронике и приборостроении: Сборник докладов Российской научно-технической конференции с международным участием. – Москва, 2021. Том 1. С. 198–202

5. Бурлаков В.И., Гапонов О.В. Фотосенсорика: новые материалы, технологии, приборы, производство: тезисы докладов X научно-практической конференции молодых учёных и специалистов. – Москва, 2021. С. 49–50

Измерение функции передачи модуляции инфракрасных объективов с использованием микроболометрических матричных детекторов

Скрипачева Лилия Викторовна, Хафизов Р.З.

АО «ОКБ «АСТРОН». МО. Лыткарино. Россия. slv@astrohn.ru

Measurement of the modulation transmission function of infrared lenses using microbolometric matrix detectors

Skripacheva Liliya V., Khafizov R.Z.

АО «ОКБ «АСТРОН», Lytkarino. Russia. slv@astrohn.ru

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-140

The FPM measurement method presented in this paper, based on the analysis of the signal profile in the IR image of a slit target, makes it possible to conduct experimental rapid testing of IR lenses after their assembly. The data obtained can be used to predict the limiting characteristics for the detection, recognition and identification of thermal objects by optoelectronic devices using manufactured IR lenses.

В настоящей работе рассмотрен метод измерения ФПМ, основанный на анализе профиля сигнала в ИК изображении щелевой мишени.

Экспериментальная реализация метода измерений ФПМ ИК-объективов по профилю сигнала в изображении щелевой мишени.

На рисунке 1 показана схема измерений ФПМ с использованием щелевой мишени.

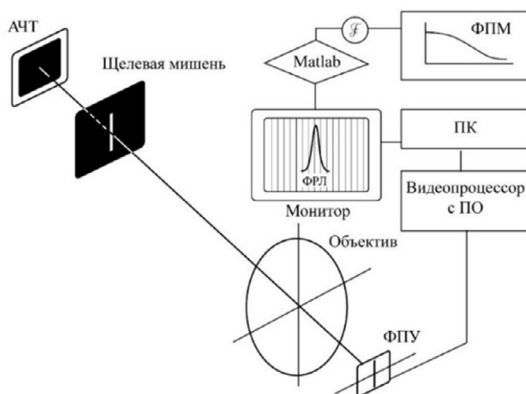


Рис. 1. Схема измерений ФПМ

АЧТ с температурой $T=35^{\circ}\text{C}$ через экран со щелью шириной 1 мм, расположенном на расстоянии 5,5 м от тестируемого объектива, формирует тепловое изображение в фокальной плоскости (рисунок 2А).

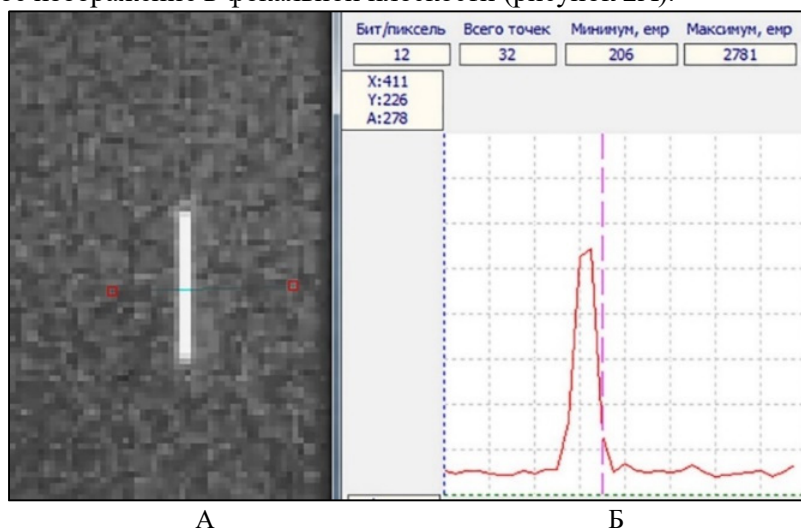


Рис. 2. А: Изображение щелевой мишени, Б: Функция рассеяния линии

Для апробации метода использовался тепловизионный атермальный объектив Астрон-100АТ14 с фокусным расстоянием 100 мм (F/1,4), просветляющим покрытием на спектральный диапазон $8\div 14$ мкм и асферическим элементом для минимизации aberrаций.

Формирование теплового изображения щелевой мишени осуществлялось ФПУ с матричным микроболометрическим детектором Астрон 640БД17 (число элементов 640×480 , шаг элементов 17 мкм). Для захвата и вывода видеосигнала использовался видеопроцессор RT-827VP.

Рисунок 2Б иллюстрирует форму теплового изображения щелевой мишени, сформированного в результате сечения видеосигнала по 32 пикселям матрицы.

Обработка результатов для расчета ФПМ

Для измерения разрешающей способности оптической системы с учетом aberrационных искажений распределение интенсивности излучения в изображении щелевой мишени в фокальной плоскости многоэлементного детектора вдоль строки (столбца) матрицы можно описать одномерным гауссовским распределением (рисунок 3).

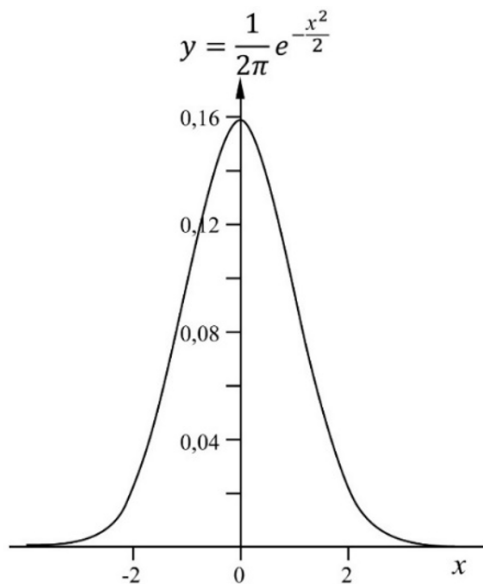


Рис. 3. Распределение интенсивности излучения в изображении щелевой мишени в фокальной плоскости детектора

Для сравнения данных с предельными характеристиками оптической системы, определяемых функцией распределения интенсивности излучения в диске Эйри, её аппроксимируют как гауссову функцию, используя величину стандартного отклонения в качестве меры ширины диска.

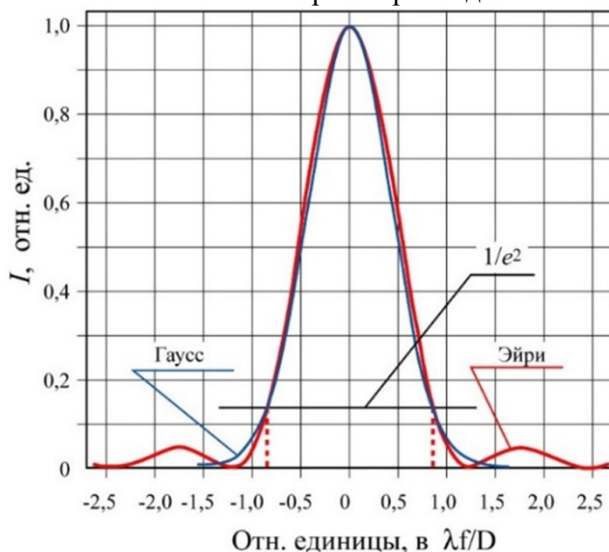


Рис. 4. Аппроксимация функции распределения интенсивности излучения в диске Эйри гауссовой кривой

На рисунке 5 представлены нормированные гауссовы аппроксимации диска Эйри для ИК-объектива, использованного в эксперименте, для длин волн $\lambda = 4, 10$ и 12 мкм.

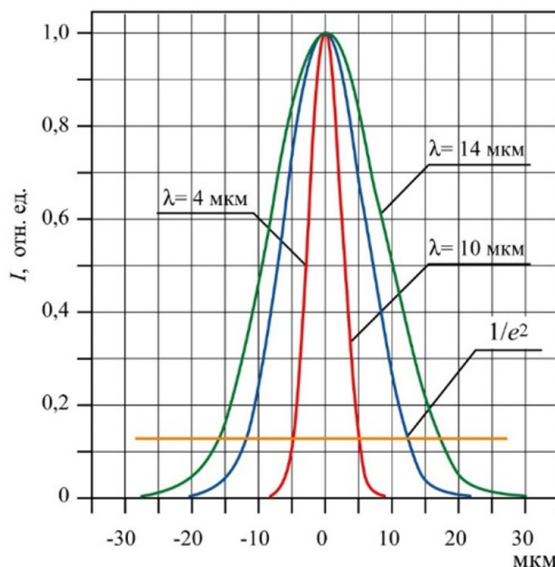


Рис. 5. Гауссовы аппроксимации кружка Эйри для длин волн ИК излучения $\lambda = 4, 10$ и 14 мкм

На рисунке 6 приведены результаты расчета ФКЭ объектива Астрон-100АТ14, использованного для проведения измерений, для случая дифракционного ограничения при $\lambda = 14$ мкм и для экспериментально измеренной σ , равной $12,75$ мкм.

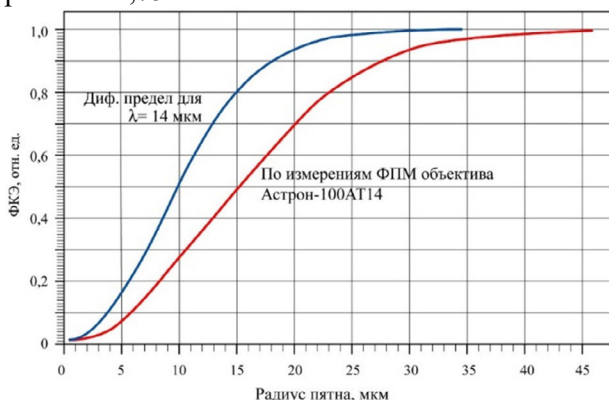


Рис. 6. Функции концентрации энергии объектива Астрон-100АТ14 для случая дифракционного ограничения при $\lambda = 14$ мкм и для экспериментально измеренной σ , равной $12,75$ мкм

Представленный в работе метод измерения ФПМ, основанный на анализе профиля сигнала в ИК изображении щелевой мишени, дает возможность проводить экспериментальное экспресс-тестирование ИК объективов после их сборки. Полученные данные могут использоваться для прогнозирования предельных характеристик по обнаружению, распознаванию и идентификации тепловых объектов опико-электронными приборами, использующими изготавливаемые ИК-объективы.

Литература

1. URL: <https://www.gst-ir.net/ru/products/uncooled-infrared-detectors.html> (дата обращения: 10.02.2024).
2. K. Masaoka, Line-Based Modulation Transfer Function Measurement of Pixelated Displays, IEEE Access, vol. 8, pp 196351- 196362, 2020.
3. Theory and Measurement of MTF, Image Science, pp 1-9, 2015 URL: <https://www.photonicsonline.com/doc> (дата обращения: 10.02.2024).
4. URL: <http://rastr.net> (дата обращения: 10.02.2024).

Методический подход к оценке термоупругих свойств микроболометрических приемников мембранного типа

Солодков Алексей Аркадьевич, Попов В.К., Москвичев В.Ю., Бетров С.Б.,
Ерастов Д.А., Соколов К.В., Худаяров З.Ф., Шилейко Н.А.

*АО «ОКБ «АСТРОН». Лыткарино. МО. Россия. sn@astrohn.ru.
info@astrohn.ru*

Methodological approach to assessing thermoelastic properties membrane-type microbolometer receivers

Solodkov Aleksey Arkadievich, Popov V.K., Moskvichev V.Yu., Betzov S.B.,
Erastov D.A., Sokolov K.V., Hydoyarov Z.F., Shileyko N.A.
JSC «OKB «Astron». Lytcarino. Russia. info@astrohn.ru

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-145

A methodological approach to assessing the thermoelastic properties of membrane-type microbolometric receivers at the design stage is presented.

Приведен методический подход к оценке термоупругих свойств микроболометрических приемников мембранного типа на этапе проектирования

В последние годы определилась тенденция развития конструкций матричных микроболометрических приемников (далее – МБП) в части увеличения формата матричного массива (более 10^6 элементов) и уменьшения шага элементов в массиве (до 12...8 мкм). Это требует уменьшения размеров активной области МБП и принятия компенсационных решений, в частности, удлинения проводников для подключения активной области МБП к схеме коммутатора-мультиплексора и применения более эффективных абсорберов с развитой рабочей поверхностью в качестве элементов конструкции МБП [1].

Примеры изменения формы проводников для подключения активной области МБП к коммутатору-мультиплексору сигналов при уменьшении размеров термочувствительных элементов представлены на рисунке 1. Примеры вариантов конструкций абсорберов для МБП, располагаемых сверху над активной областью термочувствительного элемента МБП, представлены на рисунке 2.

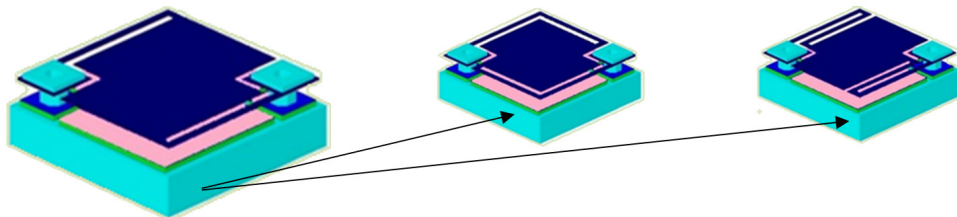


Рис. 1. Примеры изменения формы проводников для подключения активной области МБП к коммутатору-мультиплексуру сигналов при уменьшении размеров термочувствительных элементов

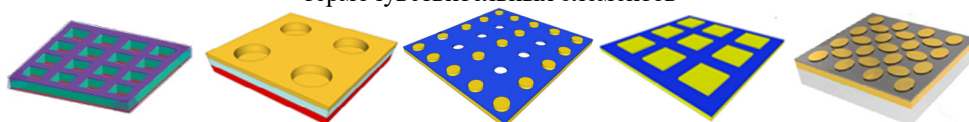


Рис. 2. Примеры вариантов конструкций абсорберов для МБП, располагаемых сверху над активной областью термочувствительного элемента МБП

Указанные варианты изменения конструкции МБП, представляющей собой относительно жесткую мембрану (удлинение проводников и введение абсорберов с развитой рабочей поверхностью), необходимо дополнительно оценивать в части возможного изменения термоупругих свойств, проявляющихся при протекании тока через конструкцию.

Для оценки термоупругих свойств конструкций мембранного типа предложено использовать пакеты компьютерного моделирования COMSOL Multiphysics и ANSYS [2], реализующие расчетные процедуры на базе метода конечных элементов. Исходные образцы конструкций формируются в САПР AutoCad или SolidWorks. Пример результатов моделирования термоупругих свойств мембраны МБП представлен на рисунке 3.

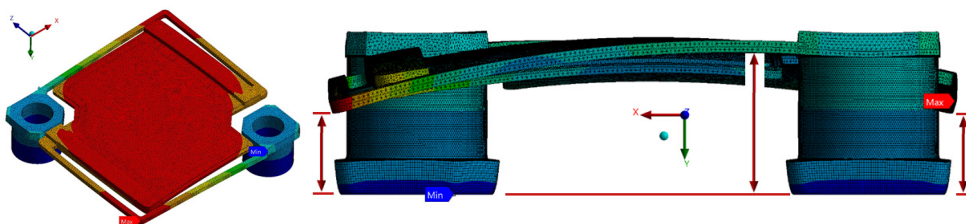


Рис. 3. Результаты моделирования термоупругих свойств мембраны МБП

Результат моделирования, представленный на рисунке 3, свидетельствует о появлении деформации изгиба, при этом максимальная амплитуда перемещения элементов конструкции (в данном случае – проводников для подключения активной области МБП к схеме коммутатора-мультиплексура сигналов) не является критичной.

Литература

1 Metal-Insulator-Metal-Based Plasmonic Metamaterial Absorbers at Visible and Infrared Wavelengths. S. Ogawa, M. Kimata. // *Materials*, 2018, 11, 458; doi:10.3390/ma11030458.

2 Y. Deng, S. Tang, H. Zeng, Z. Wu, D. Tung. Experiments on Temperature Changes of Microbolometer under Blackbody Radiation and Predictions Using Thermal Modeling by COMSOL Multiphysics Simulator // *Sensors* 2018, 18, 2593; doi:10.3390/s18082593; www.mdpi.com/journal/sensors.

**Разработка эпитаксиального и планарного оборудования для
материалов A^3B^5 - переход от R&D к производственно-
ориентированному уровню**

Петров Станислав Игоревич, Алексеев А.Н.

АО «НТО». Санкт-Петербург. Россия. petrov@semiteq.ru

**Development of epitaxial and wafer processing equipment for A_3B_5 materials
– transition from R&D to production-oriented level**

Petrov Stanislav Ig., Alexeev A.N.

SemiTEq JSC, Saint-Petersburg, Russia, petrov@semiteq.ru

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-148

The results of promising developments of epitaxial and wafer processing equipment for microwave microelectronics, optoelectronics and radiophotonics are presented. The current level of development and production of prototypes of equipment for growth of device heterostructures based on III-nitrides, arsenides and antimonides, as well as MCT are shown. The results of the development of production-oriented equipment for plasma etching and PECVD, as well as electron beam and magnetron sputtering are presented.

Представлены результаты перспективных разработок эпитаксиального и планарного оборудования для СВЧ-микроэлектроники, оптоэлектроники и радиофотоники. Показан текущий уровень разработок и производства опытных образцов оборудования для выращивания широкого спектра приборных гетероструктур на основе нитридов, арсенидов и антимонидов третьей группы, а также КРТ. Представлены результаты разработки производственно-ориентированного оборудования для плазмохимического травления и осаждения, а также электронно-лучевого и магнетронного напыления.

АО «НТО» более 20 лет специализируется на разработке и производстве высокотехнологичного сверхвысоковакуумного и высоковакуумного оборудования для проведения комплекса ключевых технологических операций при изготовлении ЭКБ для микроэлектроники, являясь при этом единственным российским разработчиком и производителем установок молекулярно-лучевой эпитаксии на основе материалов A_3B_5 . В настоящее время АО «НТО» серийно выпускает установки МЛЭ для работы с подложками диаметром до 100 мм, а также ряд установок плазмохимии, физического осаждения и термического отжига для обработки подложек диаметром 100-200 мм, в которых используются собственные ключевые технические решения, в том числе целый

ряд запатентованных ноу-хау. Технические характеристики выпускаемого оборудования находятся на уровне лучших мировых аналогов, а по части параметров превосходят их. Всего на сегодняшний день АО «НТО» произведена поставка более 100 различных установок, в частности более 20 установок МЛЭ и комплектующих к ним, в т.ч. зарубежным заказчикам (Индия, Канада, Сингапур, Республика Беларусь и др.).

На российском рынке сегодня существует потребность в установках МЛЭ для выращивания эпитаксиальных гетероструктур на основе материалов АЗВ5 на подложках диаметром 100-150 мм с роботизированной загрузкой. Данные установки должны обеспечить стабильность ростовых параметров, которая критически важна для целого ряда перспективных приборов оптоэлектроники и микроэлектроники. Среди них VCSEL (вертикально-излучающие полупроводниковые лазеры), QCL (квантово-каскадные лазеры), однофотонные излучатели для квантовых компьютеров на основе гетероструктур с квантовыми точками, инфракрасные фотоприемники на основе арсенидов, антимонидов и КРТ, мощные и малошумящие СВЧ транзисторы на основе GaAs и GaN и др.

Кроме того, для решения ряда задач необходимы установки МОС-гидридной эпитаксии с групповой загрузкой пластин. Помимо этого, существует необходимость разработки установок плазмохимии и физического осаждения, близких функциональных аналогов зарубежного оборудования для реализации уже используемых технологических маршрутов для производства ЭКБ на ключевых российских предприятиях. В частности, требуется разработка установок плазмохимии с цилиндрическим источником индуктивно-связанной плазмы, а также источников электронно-лучевого напыления российского производства.

В докладе представлены результаты разработки установок МЛЭ для выращивания гетероструктур на основе нитридов, арсенидов и антимонидов третьей группы и КРТ, а также МОГФЭ гетероструктур на основе GaN совместно с ведущими организациями отрасли. Кроме того, представлены результаты разработки оборудования для планарной обработки пластин. Рассматриваются вопросы проектирования и технологичности изготовления ключевых функциональных узлов оборудования. Данные разработки обеспечат российских разработчиков и производителей полупроводниковых приборов средствами производства мирового уровня. Продемонстрированы результаты использования серийно выпускаемого отечественного оборудования в производственных циклах отечественных предприятий производителей ЭКБ.

Трёхкоординатный робот для монтажа оптических элементов

Семенча Александр Вячеславович, Вибе Д.В., Мелконян П.С., Клинков В.А.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
Санкт-Петербург. Россия. vil-l@yandex.ru*

Three-coordinate robot for mounting optical elements

Semencha Alexander Vyacheslavovich, Vibe D.V., Melkonyan P.S., Klinkov V.A.
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. St. Petersburg. Russia.
vil-l@yandex.ru*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-150

Optical quality control of diamonds in the infrared range requires the creation of an immersion medium between the diamond and the optical microscope. A robot has been developed for mounting a multilayer structure made of glass, diamond and immersion media. The robot automatically performs sequential installation of the multilayer structure.

Для оптического контроля качества алмазов в инфракрасном диапазоне требуется создание между алмазом и оптическим микроскопом иммерсионной среды, позволяющей заглянуть внутрь камня, в обход искажений, возникающих на неоднородной поверхности минерала. В качестве иммерсионной среды, прозрачной в инфракрасном диапазоне, подходит легкоплавкое халькогенидное стекло специального состава. Такое стекло хорошо поддаётся формованию в линзу с последующим обволакивающим нанесением на поверхность алмаза.

С целью нанесения иммерсионной среды с двух противоположных сторон камня разработан программно-аппаратный комплекс на базе трёхкоординатного робота (рисунок 1). Робот позволяет монтировать оптические элементы, создавая многослойную конструкцию из объектов исследования, иммерсионных сред и прочих оптических объектов (рисунок 2). Для горячего монтажа элементов, на работе установлены подогреваемые столы, работающие в диапазоне температур 20–320 градусов Цельсия.

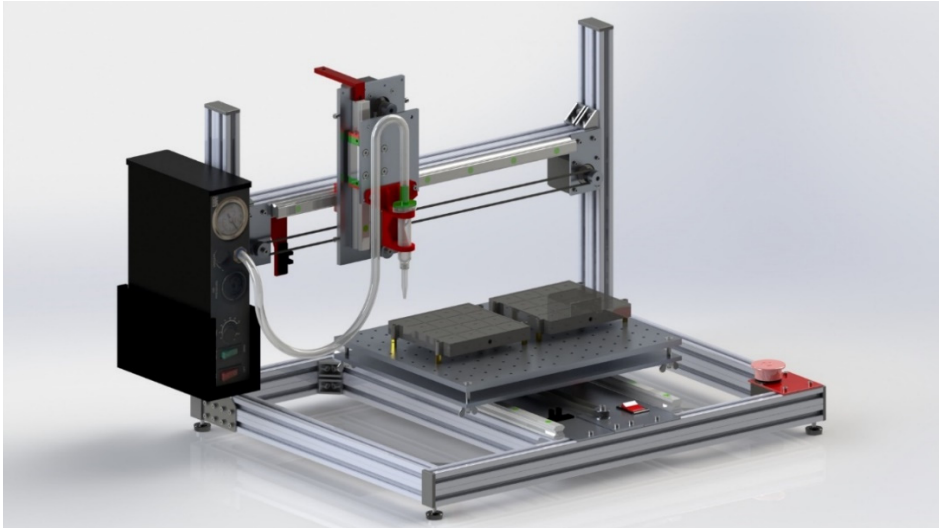


Рис. 1. Трёхкоординатный робот

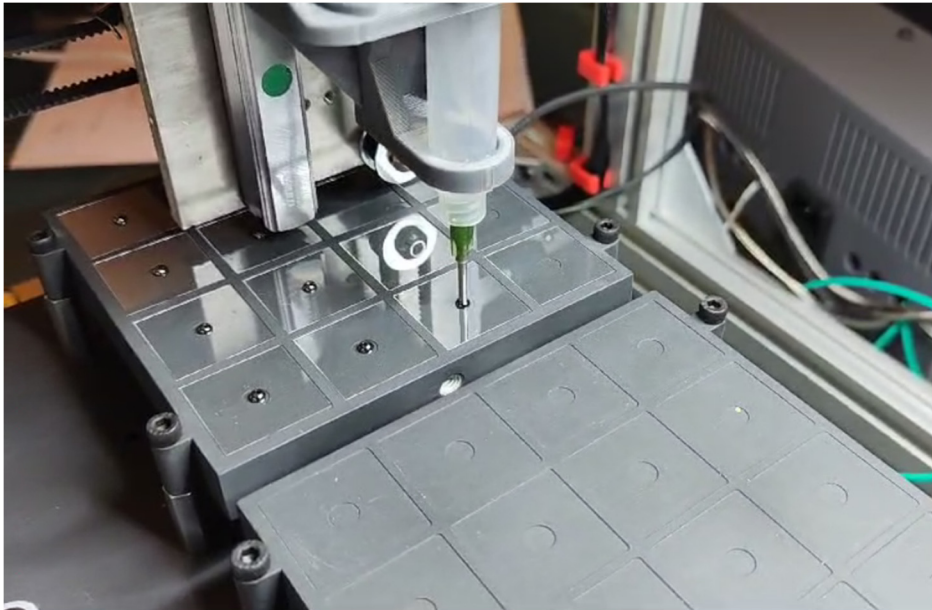


Рис. 2. Монтаж иммерсионной среды

Робот имеет универсальную конструкцию, позволяющую устанавливать на него такие инструменты, как: вакуумный захват, лазер, шпиндель и пр. – позволяющие осуществлять широкий спектр автоматической обработки и монтажа элементов. Точность позиционирования элементов составляет 20 мкм, диапазон скоростей от 1 до 150 мм/с.

Для многослойного монтажа, например, (рисунок 3): стекло – иммерсионная среда – алмаз – иммерсионная среда – стекло – робот оборудован несколькими системами координат, позволяющими размещать на рабочем столе робота до четырёх групп различных объектов с привязкой каждой к своей системе координат. С помощью вакуумного захвата робот перемещает объекты из одной системы координат в другую. Таким образом, робот может осуществлять одновременный автоматический монтаж из четырёх различных компонентов, расположенных на четырёх системах координат с последующей выкладкой готовой продукции в свободной зоне рабочего стола.

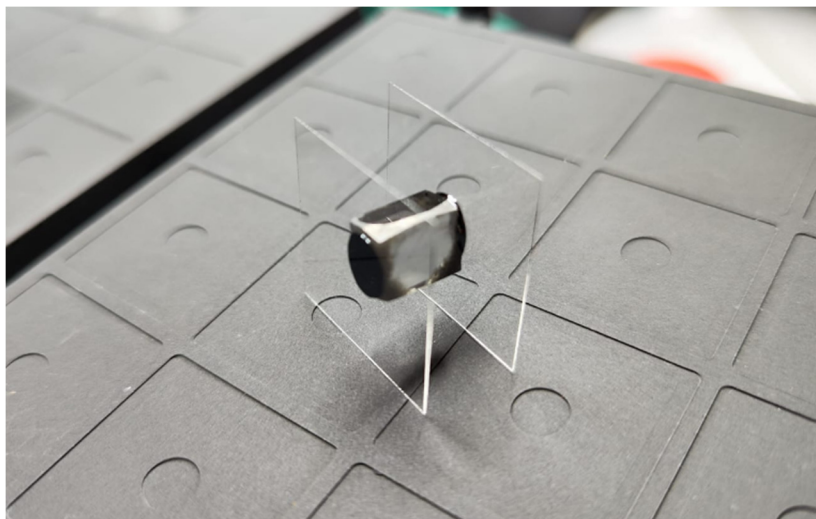


Рис. 3. Многослойный оптический элемент

Самофокусировка излучения, как коллапс волнового вектора

Якушенков Павел Олегович

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН. Москва. Россия.

Loss24680@yandex.ru

Self-focusing, as the collapse of the wave vector

P.O. Yakushenkov

Lebedev Physical Institute of the RAS. Moscow. Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-153

This article proposes a GRT approach to the phenomenon of self-focusing. The refractive index is considered as a component of the metric tensor, and the addition to the refractive index due to nonlinear effects in the self-focusing area is considered as an additional curvature that compensates diffraction divergence by pulling photon trajectories inward so that photons in the self-focusing area propagating at certain angles experience collapse and do not go beyond the waveguide region.

В данной статье предлагается подход ОТО к явлению самофокусировки. Показатель преломления рассматривается, как компонента метрического тензора, а добавка к показателю преломления из-за нелинейных эффектов в области самофокусировки, как дополнительное искривление, которое компенсирует дифракционную расходимость, стягивая траектории фотонов внутрь так, что фотоны в области самофокусировки, распространяющиеся под определенными углами, испытывают коллапс и не выходят за волноводную область.

Подход, предлагаемый здесь к самофокусировке основывается на ОТО. Показатель преломления рассматривается, не как поправка к скорости света, а как к течению времени, то есть меняется метрика, координата времени искривляется, и свету нужно пройти больший путь по кривому, а не по прямому пути. В электродинамике считается, что скорость света в веществе изменяется, однако в теории относительности скорость света во всех системах отсчета одинакова. В данной работе предлагается рассмотреть распространение света в веществе с точки зрения ОТО и ввести эффективную метрику, такую, что $dt' = dt\sqrt{g_{00}}$, где g_{00} - компонента метрического тензора и $n = \sqrt{\epsilon} = \sqrt{g_{00}}$, то есть скорость света не меняется, а меняется траектория в четырехмерном пространстве за счет увеличения пути по координате времени. Согласно уравнению Эйнштейна, электрические и магнитные поля тоже вносят вклад в искривление пространства, так как входят в тензор энергии-импульса-материи. Предполагается, что в веществе из-за ϵ появляется дополнительное поле $4\pi\mathbf{P}$ ($\mathbf{D} = \mathbf{E} + 4\pi\mathbf{P}$) и дополнительный потенциальный барьер U в уравнении Шредингера. Он очень маленький для массивных частиц, так как

электромагнитное поле на изменение пространства-времени не сильно влияет, и частица с массой m этого даже не почувствует ($mc^2 \gg U$). Но фотон, масса и заряд которого равны нулю, чувствует барьер, и для него барьер существенный, и существенно меняется действие, траектория и путь.

Ранее в работе [2] рассматривался случай неплоского фронта распространения света, то есть между волновыми векторами двух фотонов был угол, тогда бифотонному состоянию приписывалась масса, как формальная константа, исходя из закона сохранения энергии. $m^2 c^4 = E^2 - p^2 c^2$, энергия

двух фотонов $E = 2\hbar\omega$, импульс $p = 2\hbar k = 2\hbar\omega \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)/c$, а значит $m = 2\hbar\omega \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)/c^2$.

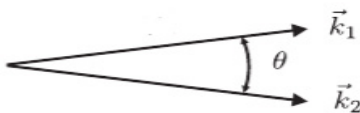


Рис. 1. Угол между волновыми векторами

Тогда получим, что скорость распространения $v = c^2 p/E$ будет $c\sqrt{1 - m^2 c^2/E^2}$. Развивая дальше данную мысль, поскольку скорость света не меняется, а меняется метрика, и раз показатель преломления $n = \sqrt{g_{00}} = c/v$, тогда, поскольку и масса фотона равна нулю, можно считать эту массу также искривлением, вследствие неплоского фронта распространения. То есть вместо массы можно приписать искривление, которое дает угол между фотонами, как и наоборот, а вместо скорости, отличной от c , можно приписать показатель преломления, равный корню из метрического тензора. Тогда получим, что

$$\sqrt{g_{00}} = c/v = 1/\sqrt{1 - m^2 c^2/E^2} = 1/\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) = \sqrt{2/(1 + \cos\theta)}$$

Тогда при углах расходимости порядка 0,1 получим, что показатель преломления, вычисленный по данной формуле, порядка нескольких тысячных, как разница показателей преломления в кварцевых световодах.

Коллапс – явление, случающееся во многих областях: при коллапсе звезды в черную дыру, масса звезды проходит через горизонт событий, но за пределы гравитационного радиуса назад не возвращается; при транспортном коллапсе автомобили въезжают в пробку, но оттуда не выезжают, образуя стокилометровые заторы; при коллапсе на финансовых рынках инвесторы вкладывают деньги, но назад их не получают, образуются долги и кризис. Рассматривая область самофокусировки, как область сердцевин волновода с

повышенным показателем преломления из-за нелинейных эффектов, в этом волноводе лучи, расходимость которых меньше угла полного внутреннего отражения, будут оставаться там. То есть если угол полного внутреннего отражения больше угла дифракционной расходимости, лучи под таким углом будут входить в волновод, а из него не выходить. Таким образом для фотонов образуется некая область "чёрных углов" в волноводе, как для частиц звезды область чёрной дыры внутри гравитационного радиуса.

В зоне самофокусировки пространство-время имеет искривление, которое стягивает траектории под углом полного внутреннего отражения, то есть если лучи расходились под углом дифракции равному ему, то они стянутся в параллельный пучок. А наоборот параллельный пучок превратится в пучок с углом расходимости равным углу полного внутреннего отражения, который потом перейдет в параллельный. Самофокусировка образует искривление и волновод, обеспечивая разные показатели преломления и аппретурный угол

сходимости, компенсируя расходимость: $n_2 I = \Delta n = \sqrt{g_{00}} = \sqrt{2/(1 + \cos \theta)}$

Итак, если у фотонов имеется угол расходимости между ними, то это равносильно появлению искривления, вызванного неплоским фронтом распространения, которое также может быть описано массой, как формальной

константой и показателем преломления $n = \sqrt{g_{00}} = \sqrt{2/(1 + \cos \theta)}$. В области самофокусировки (в волноводной области с повышенным показателем преломления) появляется дополнительное искривление из-за нелинейности

показателя преломления такое что $n_2 I = \Delta n = \sqrt{g_{00}} = \sqrt{2/(1 + \cos \theta)}$, которое дает дополнительный угол сходимости, компенсируя дифракционную расходимость. Таким образом область пучка, где мощность превышает пороговую мощность самофокусировки, образует волновод с повышенным показателем преломления $n_2 I = \Delta n$, где траектории лучей стягиваются под углом полного внутреннего отражения, не выпуская изнутри фотоны, угол расходимости между которыми был меньшим, то есть фотоны в данной области, распространяющиеся под такими углами, испытывают коллапс.

1. Якушенков П. О. Диэлектрическая проницаемость с точки зрения ОТО. В сборнике: VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике. 2019.

2. S. V. Vintskevich et. al. Lorentz-invariant mass and entanglement of biphoton states // Laser Phys. Lett. 2019. 16 065203.

3. Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц. Теоретическая физика. Теория поля. т. 2. М.: Наука, 1988. -509 стр.

4. Сивухин Д. В. Общий курс физики в 5 т. Т. IV. Оптика. – М.: Физматлит, 2004.

Исследование фотосенсорных характеристик фотоприемников средневолнового ИК-диапазона на основе ККТ

Яковлев Виктор Олегович¹, Сапцова О.А.¹, Короннов А.А.¹, Попов В.С.^{1,2}

¹ *Московский физико-технический институт. Долгопрудный. МО. Россия.
iakovlev.vo@phystech.edu*

² *ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия*

Study of the photosensor characteristics of mid-IR photodetectors based on CQDs

Yakovlev V.O.¹, Siptsova O.A.¹, Kononov A.A.¹, Popov V.S.^{1,2}

MIPT, Dolgoprudny, Russia

Orion R&P Association Inc. Moscow, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-156

This paper describes the developed setup for studying the speed and spectral sensitivity of photoresistors based on colloidal quantum dots in the spectral range of 3-5 microns.

Коллоидные квантовые точки (ККТ) – новый перспективный материал, позволяющий создавать на их основе фотоприемники ИК-диапазона. Главными преимуществами данных фотодетекторов является низкая стоимость и отсутствие технологических ограничений на шаг и формат матрицы, при этом границами спектрального диапазона фоточувствительности в следствие квантово-размерного эффекта возможно управлять за счёт изменения размера ККТ не меняя их химический состав. Оптимизация архитектуры и способов формирования фоточувствительных элементов является сложным многоитерационным процессом требующем большого числа экспериментальных образцов. Поэтому необходимо проводить экспресс-тесты лабораторных образцов фотосенсоров для контроля их основных характеристик и ускорения процесса исследования. Имеющиеся на рынке не специализированные измерительные установки, позволяющие поводить исследования быстродействия или фоточувствительности на спектральном диапазоне 3-5 мкм дорогостоящи и часто недоступны в РФ. В связи с этим, была разработана специализированная установка для исследования данных фотоэлектрических параметров (Рис. 1).

Установка позволяет проводить экспресс-тесты фотодетекторов и получать абсолютные значения фоточувствительности, быстродействия. Конструкция установки позволяет удобно модифицировать её путем замены модулей, что повышает удобство использования и универсальность установки.

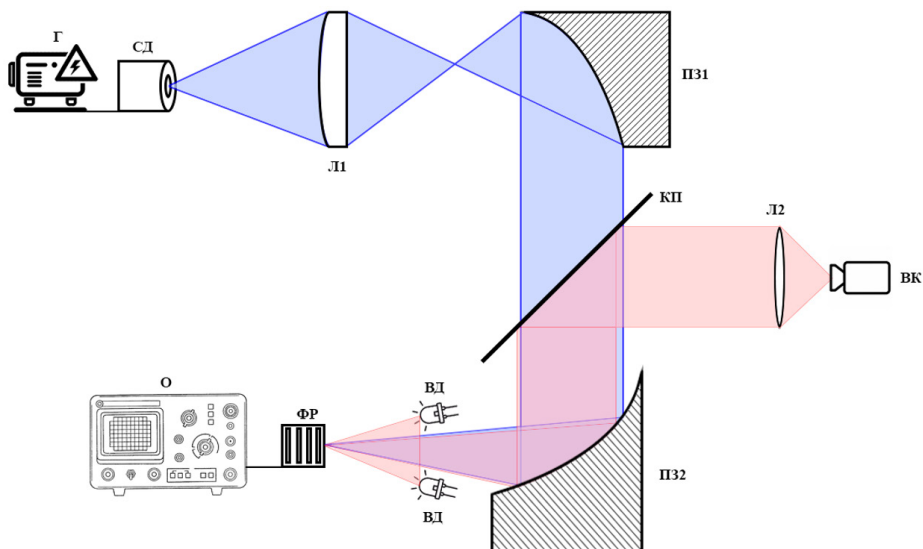


Рис. 1. Принципиальная схема установки. Г – Генератор сигналов высокой частоты, СД – светодиод, Л1, Л2 – линзы, ПЗ1, ПЗ2 – параболическое зеркало, КП – кремниевая пластинка, ВК – видеокамера, ВД – дополнительные светодиоды видимого диапазона, ФР – фоторезистор, О – осциллограф, либо мультиметр

С использованием разработанной установки проведены тестовые измерения фотоэлектрических характеристик фоторезисторов на основе ККТ.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-03-2023-106 от 13.01.2023 г. (проект № FSMG-2022-0034).

Литература

- [1] Пономаренко, В. П. Фотоэлектроника на основе квазинульмерных структур (обзор) / В. П. Пономаренко, В. С. Попов, С. В. Попов. — Успехи прикладной физики. — 2021. — № 1. — С. 25-67.
- [2] Санько С.А. Разработка и исследование полупроводникового ИК-фотодиода: дис. канд. наук: 11.04.04. - Томск, 2020. - 80 с.
- [3] ГОСТ "Оптика и фотоника. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприёмные устройства. Термины и определения" от 12.10.2021 № 59605-2021 2021.
- [4] ГОСТ "Оптика и фотоника. Устройства фотоприёмные второго и последующих поколений. Методы измерений фотоэлектрических параметров и определения характеристик." от 03.01.2022 № 59606-2021 2022.

Результаты определения терморadiационных характеристик на рефлектометрах «РС-К» и «РИ-К» материалов космических аппаратов

Просвириков В.М.¹, Шамаев Алексей Михайлович¹, Дунаев А.Ю.²

¹АО «КОМПОЗИТ». Королев. МО. Россия. info@kompozit-mv.ru

²ФГБУ «ВНИИОФИ». Москва. Россия

Results of measurement of the thermo-optical properties of spacecraft materials using «RS-K» and «RI-K» reflectometers

Prosvirnikov V.M.¹, Shamayev A.M.¹, Dunaev A.Yu.²

¹JSC «KOMPOZIT». Korolev. Russia

²FSUE «VNIIOFI». Moscow. Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-158

Solar absorption α_s and emissivity ϵ of various spacecraft materials received using the «RS-K» solar reflectometer, «RI-K» infrared reflectometer, «Cary 500» two-beam spectrophotometer and «Frontier» Fourier spectrometer are compared. Possible ways to upgrade the «RS-K» and «RI-K» reflectometers and to develop to methods of determining the thermo-optical properties are presented.

В АО «Композит» разработаны приборы: рефлектометр солнечный «РС-К» и рефлектометр инфракрасный «РИ-К», предназначенные для определения терморadiационных характеристик (ТРХ) (α_s , ϵ) материалов и покрытий КА, а также разработан ГОСТ Р 59313-2021 по методам их определения. ТРХ (α_s , ϵ) определяют температуру поверхности КА. Измерение ТРХ (α_s , ϵ) является одним из условий, определяющих надежность работы радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов КА.

Терморadiационные характеристики (α_s , ϵ) определяются двумя методами [1]:

- расчётом по измеренным значениям спектрального коэффициента отражения в диапазонах длин волн 0,2-2,5 мкм и 3-20,0 мкм;

- на интегральных приборах с использованием образцов сравнения.

Рефлектометры «РС-К» и «РИ-К» измеряют интегральные коэффициенты отражения R_s , ρ в диапазонах длин волн 0,2-2,5 мкм и 3,0-20,0 мкм, соответственно, относительным методом с использованием образцов сравнения. Значения R_s , ρ образцов сравнения определяются на спектральных приборах [2].

Для достоверного определения α_s и ϵ материалов, измеряемый образец и

образца- сравнения должны иметь подобные спектры и характер отражения. На КА используют материалы и покрытия имеющие различные спектры и характер отражения.

Основным элементом рефлектометра солнечного «РС-К» является интегрирующая сфера. Отражённое образцом и претерпевшее многократное отражение от внутренней поверхности интегрирующей сферы излучение, создаёт на стенке сферы освещённость, пропорциональную коэффициенту отражения образца, которая регистрируется фотоприёмниками. С целью имитации спектра солнечного излучения и повышения точности определения R_s образцов в рефлектометре применены пять фотоприёмников с регулируемой чувствительностью в диапазоне длин волн 0,25-2,5 мкм в комбинации с источником излучения. Для повышения точности определения коэффициента отражения R_s образцов со смешанным характером отражения в сферу установлены два экрана.

Основным элементом рефлектометра инфракрасного «РИ-К» является измерительная камера, состоящая из зеркального эллипсоида и интегрирующей сферы. Внутренняя поверхность интегрирующей сферы имеет высокий коэффициент диффузного отражения. Направленный поток модулированного излучения от инфракрасного источника через отверстие в стенке эллипсоида [3] попадает на образец. Отражённое образцом во всех направлениях излучение собирается зеркальным эллипсоидом и попадает в интегрирующую сферу. Усреднённая освещённость стенки интегрирующей сферы регистрируется приёмником излучения пироэлектрического типа.

Повышена точность в определении ϵ при отличии спектра и характера отражения образца сравнения и измеряемого образца, а также снижена нелинейности фотометрических измерений и получены достоверные данные для образцов с различными значениями теплопроводности.

В таблицах 1 и 2 представлены результаты определения R_s , ρ полученные на рефлектометрах «РС-К» (градуировка на образце-ЭКОМ-ЖС-2) и «РИ-К» (градуировка на образце-ник.зеркало), и методом расчёта по измеренным значениям спектров отражения на высокоточных спектральных приборах с интегрирующими сферами.

Таблица 1. R_s образцов полученный на различных приборах

Образец	Характер отражения	Значение коэффициента отражения в УФ диапазоне	R_s на Спектрофотометре	R_s на «РС-К»
К-208	Зеркальный	0,1-0,3	0,910	0,900
АМг6	Диффузный	0,4-0,7	0,810	0,790
АК-5126	Диффузный	0,05-0,30	0,812	0,800
ЭКОМ-6	Диффузный	0,4-0,5	0,497	0,492

Таблица 2- ρ образцов полученный на различных приборах

Образец	Характер отражения	ρ на ИК-Фурье спектрометре	ρ на «РИ-К»
Медь	Диффузно-зеркальный	0,920	0,925
Эмаль ЭКОМ-1П	Диффузный	0,570	0,510
Ткань кремнезёмная	Диффузный	0,290	0,260

Определены направления совершенствования методики и приборов для определения терморadiационных характеристик (α_s, ϵ):

- подбор оптимального количества и чувствительности фотоприёмников для получения достоверных данных на образцах, имеющих спектрально-селективный характер отражения;

- доработка конструкции приборов для определения терморadiационных характеристик образцов с нерегулярным характером отражения;

- расширение динамического диапазона измерений с включением дополнительных образцов сравнения, в том числе образцов с крайними высокими и низкими значениями интегрального коэффициента отражения;

- повышение точности определения A_s, ϵ на образцах сравнения с определением их индикатрис отражения в диапазоне длин волн 0,2-20,0 мкм и разработка абсолютного метода измерений (без образца сравнения) спектрального коэффициента отражения образцов.

Литература

1. ГОСТ Р 59313-2021 «Системы космические. Методы измерения коэффициента поглощения солнечного излучения и коэффициента теплового излучения терморегулирующих покрытий и материалов».

2. Парфинский В.А. Фотометрические методы измерений коэффициента излучения при температурах, близких к комнатным // Оптический журнал 1995, № 6, Россия, Санкт-Петербург, ИТМО.С 63-71.

3. Edgar R. Miller; Richard J. Mell, both of Huntsville, Ala. // Patent Method and apparatus for measuring total specular and diffuse optical properties from the surface of an object 5,659,397 Aug. 19, 1997.

Оптические свойства стёкол $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-L}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5\text{-CeO}_2$

Седегова Татьяна Юрьевна, Клинков В.А., Арчелков В.Б.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
Санкт-Петербург. Россия. TatianaSedegova@yandex.ru*

Optical properties of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-L}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5\text{-CeO}_2$ glasses

*Sedegova Tatyana, Klinkov Viktor, Archelkov Vsevolod
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Saint-Petersburg. Russia.
TatianaSedegova@yandex.ru*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-161

Optical materials are exposed to strong radiation, which changes their properties and renders optical elements unusable. It's necessary to create a material that is minimally exposed to ionizing radiation. In this work it's proposed to use phosphate glasses doped cerium, because cerium minimizes the effect of radiation on the substance. The results of studies of the dependence of optical properties of such glass on the effect of radiation are presented.

Оптические материалы в условиях воздействия ионизирующих излучений деградируют в результате появления полос наведенного поглощения. В результате снижается величина пропускания в видимой и ближней ИК области спектра, представляющих особый интерес для элементов солнечной энергетики. Поэтому создание оптического материала с высокой радиационно-оптической устойчивостью (РОУ) является актуальной задачей материаловедения и физики конденсированного состояния.

Широко известны стёкла серий 100 и 200, специально разработанные для эксплуатации в отмеченных условиях. Данные системы базируются на силикатной стеклообразной матрице, они имеют высокие температуры синтеза (свыше 1400°C), а также высокие требования по примесному составу переходных элементов. На данный момент имеются экспериментальные результаты, доказывающие превосходство по РОУ фосфатных систем перед силикатными []. Кроме того, область границы фундаментального поглощения фосфатных систем, содержащих в качестве протекторной добавки ионы церия, смещена более чем на 80 нм в высокоэнергетическую область, что расширяет возможный спектральный диапазон устройств на их основе.

Многокомпонентные фосфатные стёкла уже нашли широкое применение в лазерной оптике благодаря не только своим оптическим свойствам, но и высокой устойчивости к кристаллизации, термооптическим характеристикам и технологичности получения [1]. Благодаря возможности

вариации состава многокомпонентных фосфатных стёкол без кристаллизации возможно получение материалов, содержащих специальные протекторные добавки в высоких концентрациях, в данном случае, в качестве такой добавки используется церий. Кроме того, введение ионов-модификаторов, таких как лантан, алюминий, свинец позволяет изменять механические и химические свойства стёкол [2,3].

Объектом данного исследования были стёкла на основе системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-La}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5$. В работе проведены исследования воздействия гамма облучения на спектральные свойства. В качестве источника гамма-облучения использовался изотоп Co^{60} , максимально поглощенная доза составила 10^7 Рад. Исследование спектров наведённого поглощения позволило установить отсутствие появления центров окраски и незначительное смещение границы фундаментального поглощения в низкоэнергетическую область.

На рисунке 1 представлены спектры поглощения стёкол составов $27(\text{Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O})\text{-}51\text{P}_2\text{O}_5\text{-}21\text{PbO}\text{-}1\text{CeO}_2$ и $37(\text{Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O})\text{-}62(\text{La}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5)\text{-}1\text{CeO}_2$ после облучения 10^7 Рад. У первого образца после облучения появились центры окраски с максимумами 490 нм и 730 нм. При этом первый из них представляет собой типичный центр окраски фосфатных стекол, а второй, ассоциирован с присутствием атомов свинца, представляя собой электронный центр окраски. Вариация составов матрицы позволило установить, что во втором образце центров окраски не появилось, что замещение PbO на La_2O_3 приводит к повышению РОУ при исследованных дозах облучения. Дальнейшее исследование будет посвящено подбору дополнительных ионов протекторов, позволяющих повысить допустимую дозу поглощенного излучения.

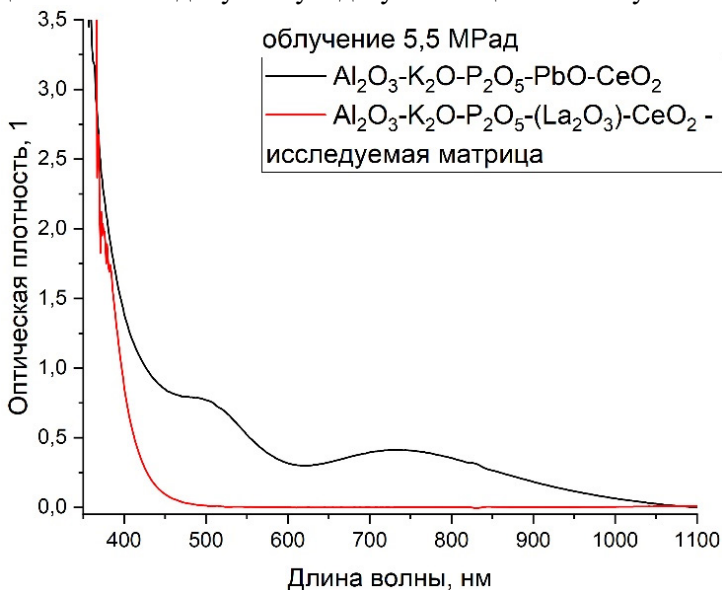


Рис. 1. Спектры поглощения исследуемого состава и аналогичного

1. Heng X. et al. Reduced radiation damage in a multicomponent phosphate glass by Nb⁵⁺ or Sb³⁺ doping // *Optical Materials Express*. – 2015. – Т. 5. – №. 10. – С. 2272-2280.

2. Barik S. K. et al. Synthesis and characterization of rare-earth doped aluminium phosphate glasses // *Progress in Nuclear Energy*. – 2022. – Т. 152. – С. 104372.

3. Abul-Magd A. A., Abu-Khadra A. S., Abdel-Ghany A. M. Influence of La₂O₃ on the structural, mechanical and optical features of cobalt doped heavy metal borate glasses // *Ceramics International*. – 2021. – Т. 47. – №. 14. – С. 19886-19894.

Метрологическое обеспечение измерений энергетической освещенности в широком диапазоне длин волн

Дунаев Александр Юрьевич, Пугачёв В.С., Павлович М.Н.

ФГБУ «ВНИИОФИ». Москва. Россия. dunaev@vniiofi.ru

Metrological assurance for total irradiance measurements in wide spectral range

*Dunaev Aleksandr Yurievich, Pugachev V.S., Pavlovitch M.N.
FGBU VNIIOFI, Moscow, Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-164

Improved Primary State Standard for total irradiance measurements GET 197-2024 is described. Descriptions of total irradiance scale realization and dissemination methods are given. Improved GET 197 and GET 86 are realized. Metrological assurance for units of total irradiance in the range from 10 to 50000 W/m².

В настоящее время единство измерений энергетической освещенности в диапазоне от 10 до 1000 Вт/м² обеспечивается при помощи абсолютного радиометра Государственного первичного эталона ГЭТ 86-2017. Государственный эталон создан во ВНИИОФИ на основе специально разработанного абсолютного радиометра MAR-1 оригинальной конструкции, входящего в состав Государственного эталона. Принцип работы радиометра основан на замещении оптической мощности, поглощенной приемной полостью, электрической мощностью, рассеиваемой в обмотке замещения.

Абсолютный радиометр участвовал в международных сличениях с Мировым радиационным эталоном в 2015 году. Результаты проведенных международных сличений показали, что расхождение показаний абсолютного радиометра ВНИИОФИ и группового Мирового радиационного эталона не превышает 0,1 %. При этом суммарная стандартная неопределенность самого группового Мирового радиометрического эталона определена как 0,3 %.

Для обеспечения единства измерений энергетической освещенности в диапазоне больших значений и калибровки датчиков во ВНИИОФИ в 2023 году совершенствован и утвержден Государственный первичный эталон единицы энергетической освещенности в диапазоне от 1 до 50 кВт/м². Первичный эталон реализует метод на основе абсолютного радиометра с электрическим замещением AP-10 и высокотемпературной модели черного тела [1,2]. Радиометр AP-10 сличается с MAR-1 при значении энергетической освещенности 1000 Вт/м². Для передачи единицы энергетической

освещенности в составе усовершенствованного эталона применяется компаратор. Принципиальная схема усовершенствованного эталона приведена на рисунке 1.

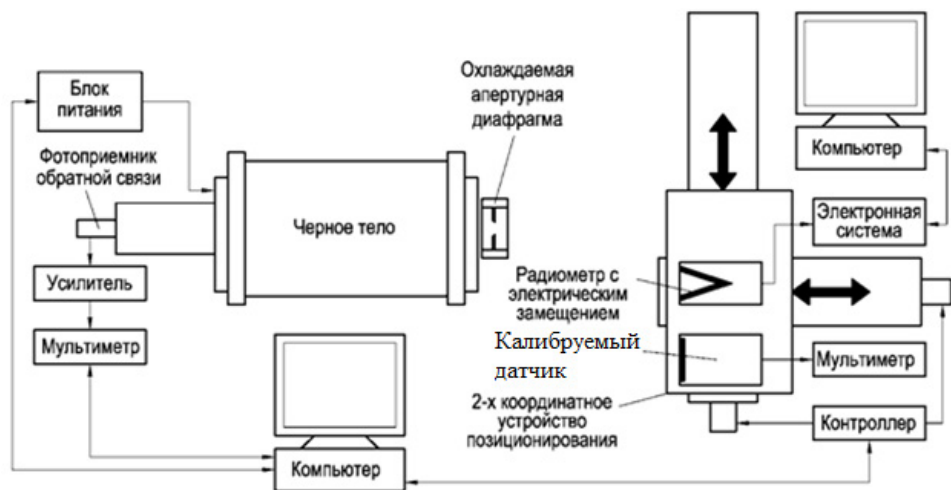


Рис. 1. Принципиальная схема усовершенствованного эталона ГЭТ 197-2024

1. Benjamin K. Tsai, Charles E. Gibson, Annageri V. Murthy, Edward A. Early, David P. Dewitt, and Robert D. Saunders. Heat-Flux Sensor Calibration. National Institute of Standards and Technology Special Publication 250-65, Gaithersburg, May 2004, P. 37.

2. S.A. Ogarev, B.B. Khlevnoi, M.L. Samoilov, D.A. Otryaskin, L.A. Grigor'eva, M.V. Solodilov, and V.I. Sapritskii. High-Temperature Blackbody Models for Use in Photometry, Radiometry, and Radiation Thermometry. Measurement Techniques, Vol. 58, No. 11, February 2016, pp. 1255-1260, DOI 10.1007/s11018-016-0880-x.

Использование меры качества квантового состояния для оценки источников фотонов в протоколах защищенных каналов связи, основанных на поляризационно-запутанных фотонных парах

Дёмин Андрей Васильевич

ФГБУ «ВНИИОФИ». Москва. Россия. demin@vniiofi.ru

Using a quantum state quality measure to evaluate photon sources in secure communication channel protocols founded on polarization-entangled photonic pairs.

Demin Andrey Vasilyevich

All-russian research institute for optical and physical measurements, FBGU
«VNIIOFI». Moscow. Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-166

The paper proposes a new criterion for estimating polarization-entangled biphoton sources introduced by the polarization state. A measure of the quality of the quantum state (fideliti) is used as a standard for the quantum state generated by the source. Experimental setups for the study of fideliti properties are described.

Развитие квантовых технологий определило необходимость измерять новые характеристики для их метрологического обеспечения. Как в свое время развитие нанотехнологий определило необходимость измерений новых оптических параметров - квадратичные и кубичные нелинейности – χ^2 , χ^3 , величины самовоздействия и т.д., то создание квантовых сенсоров с использованием свойств запутанности, сжатия квантовых состояний и разработка различных протоколов передачи данных, основанных на поляризационно-запутанных квантовых состояниях, требует введение меры их качества. В качестве стандарта меры предлагается использовать меру качества квантового состояния (фиделити). (англ. fidelity). являющейся мерой близости двух квантовых состояний – требуемого в практической задаче квантового состояния и состояния фотонов, генерируемых используемым на практике источником. Математически величину фиделити F определяют выражением:

[1] $F = |\langle \psi_t | \psi_r \rangle|^2$, где $|\psi_t\rangle$ и $|\psi_r\rangle$ - требуемое от источника квантовое состояние фотонов и реально генерируемое им.

Если источник генерирует фотоны в смешанном состоянии $\hat{\rho}$ то фиделити определяют как: $F = \langle \psi_t |_{\hat{\rho}} | \psi_t \rangle$, где $\hat{\rho}$ - матрица плотности поляризационного состояния источника. $\hat{\rho} = \sum_j p_j |\psi_j\rangle \langle \psi_j|$, где $|\psi_j\rangle$

определяется из $|\psi\rangle = \gamma_1|HH\rangle + \gamma_2|HV\rangle + \gamma_3|VH\rangle + \gamma_4|VV\rangle$, [2]

Таким способом анализируется источник ошибок при квантовом распределении ключа, связанный не со статистикой фотонов, а с неточным совпадением квантового состояния поляризации, приготавливаемого источником, и «идеального».

Ошибки при генерировании ключа возникают не только из-за прослушивания, но и из-за неизбежной неидеальности оборудования. Например, если Алиса использует источник, приготавливающий фотоны с погрешностью, то Боб в результате измерений получит ошибочные биты в, так называемом, сыром ключе. Цель работы – показать, что величину сырой битовой ошибки, вносимой неидеальным квантовым состоянием поляризации фотонов при квантовом распределении ключа можно оценить на основании единственного параметра – фиделити.

Литература

[1] Jozsa R. Fidelity for mixed quantum states // Journal of modern optics 41, no.12 (1994): 2315-2323. DOI: 10.1080/09500349414552171

[2] Фроловцев, Д.Н., Магницкий С.А., Дёмин А.В. Методика измерений поляризационно-запутанных состояний бифотонов с помощью квантового томографа // Измерительная техника. 10 (2022): 21-27. DOI: 10.32446/0368-1025it.2021-10-21-27

Стенд измерения параметров многоэлементных фотоприемных устройств

Мингалев Александр Владимирович, Габдуллин И.М., Буркин Д.Ю.,
Савин Д.Е., Батавин М.Н., Шушарин С.Н.

АО «НПО ГИПО». Казань. Россия. gipo@shvabe.com

A stand for measuring parameters of multi-element photodetector devices

A.V. Mingalev, I.M. Gabdullin, D.Y. Burkin, D.E. Savin, M.N. Batavin,
S.N. Shusharin

JSC “NPO GIPO”, Kazan, Russian Federation. *gipo@shvabe.com*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-168

The report provides a description of a stand for measuring the parameters of multi-element photodetectors, allowing to automatically measure the photoelectronic parameters of multi-element radiation detectors operating with radiation registration in 3-5 and 8-12 μm wavelength ranges, during the development and serial production of thermal imaging devices.

В докладе приведено описание стенда измерения параметров многоэлементных фотоприемных устройств, который позволяет полностью в автоматическом режиме выполнять измерение фотоэлектрических параметров многоэлементных приемников излучения, работающих с регистрацией излучения в диапазонах длин волн 3-5 и 8-12 мкм, при разработке и серийном производстве образцов тепловизионной техники.

Входной контроль многоэлементных фотоприемных устройств (далее - МФПУ) является важной частью технологической цепочки при серийном изготовлении образцов тепловизионной техники, необходимость выполнения которого обусловлена высокими требованиями к стабильности и повторяемости параметров МФПУ, устанавливаемых в серийно-изготавливаемые тепловизионные приборы (далее - ТВП), для обеспечения сокращения времени выполнения настроечных работ ТВП.

Стенд измерения параметров МФПУ (далее - Стенд) предназначен для проведения входного контроля МФПУ и позволяет в автоматическом режиме выполнять измерение фотоэлектрических параметров МФПУ, заявленных производителем. Расположение основных составных частей Стенда представлено на рисунке 1. Внешний вид устройства опико-механического представлен на рисунке 2.

На кронштейне устройства опико-механического (поз. 6 рисунок 2)

закреплены блок подключения (поз. 5 рисунок 2), проверяемое МФПУ (поз. 4 рисунок 2, в состав Стенда не входит), блок излучателей (поз. 2 рисунок 2) и два субблока 1БЭ/К (поз. 1 и 3 рисунок 2).

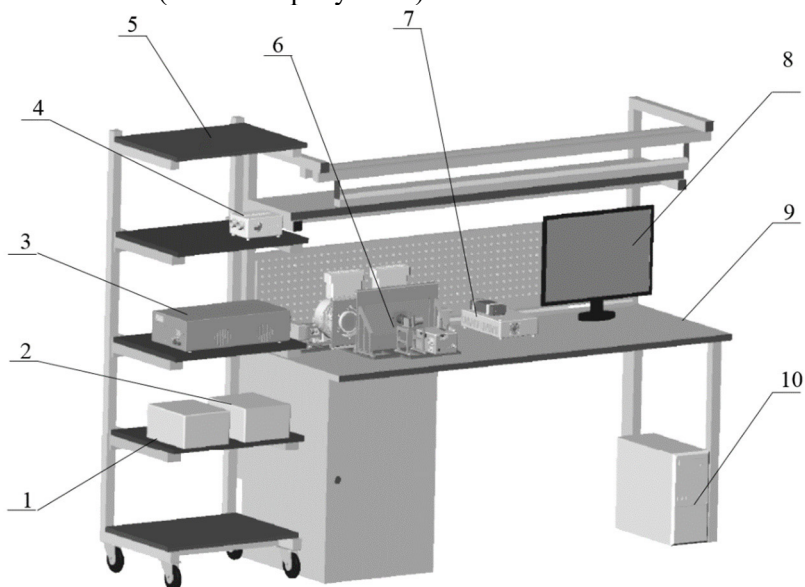


Рис. 1. Стенд измерения параметров многоэлементных фотоприемных устройств:
1, 2 – источники питания, 3 – блок управления, 4 – Субблок 2 БЭ/К, 5 – стойка подкатная, 6 – устройство оптико-механическое, 7 – блок управления узлом линейных перемещений, 8 – монитор персонального компьютера, 9 – стол рабочий, 10 – ПК

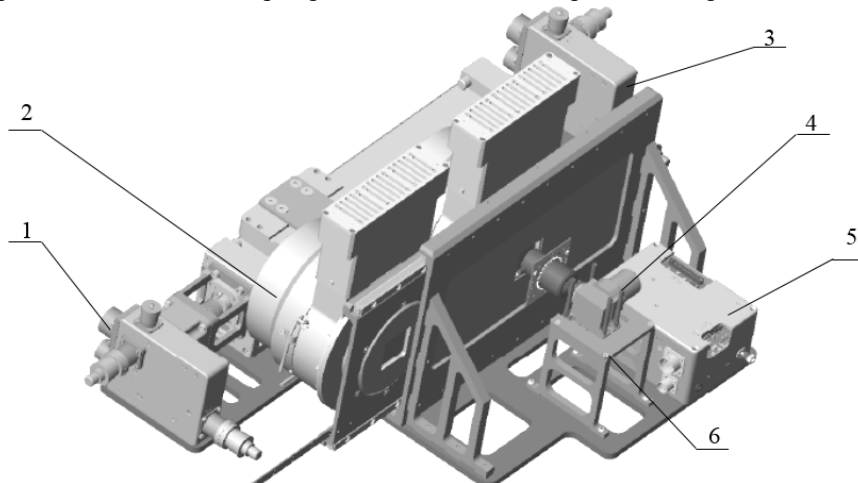


Рис. 2. Устройство оптико-механическое 1 – субблок 1БЭ/К, 2 – блок излучателей, 3 – субблок 1БЭ/К, 4 – проверяемое фотоприемное устройство (ФПУ), 5 – блок подключения, 6 – кронштейн.

МФПУ через сменный модуль сопряжения (на рисунке 2 не обозначен) подсоединяется к блоку подключения (поз. 5 рисунок 2), который имеет в своем составе плату видеотракта, предназначенную для формирования управляющих сигналов и питающих напряжений на МФПУ, а также для обработки выходных сигналов с МФПУ и передачи их в ПК (поз. 10 рисунок 1). При этом для каждого типа МФПУ используется свой модуль сопряжения.

Блок излучателей (поз. 2 рисунок 2) состоит из двух моделей абсолютно черных тел (АЧТ), каждое из которых имеет свою температуру нагрева, и предназначено для формирования теплового эталонного инфракрасного излучения, при этом излучатели имеют возможность одновременного передвижения по специальной направляющей в плоскости расположения фоточувствительных элементов МФПУ.

Программное обеспечение (далее - ПО), установленное на ПК, выполняет автоматическое управление процессом измерения, включая настройку режимов работы блоков и модулей Стенда таких, как температура и положение излучателей, значения напряжений, формируемых источниками питания, время накопления и напряжение смещения МФПУ. Также ПО выполняет определение следующих параметров МФПУ: уровень выходного сигнала (DC Level), вольтовая чувствительность (Responsivity), разность температур эквивалентная шуму (РТЭШ) (NETD), обнаружительная способность (Detectivity), количество и взаимное расположение дефектных пикселей (Bad Pixel). При этом результаты выполненных измерений записываются в базу данных, расположенную на сервере в локальной сети.

Степень автоматизации процесса контроля параметров МФПУ, реализованная в Стенде, позволяет сократить время выполнения входного контроля МФПУ за счет применения двух излучателей и режима автоматического управления всем процессом измерения. Кроме того, применение сменных модулей сопряжения с возможностью обновления микропрограммного обеспечения блока подключения позволяет производить измерение фотоэлектрических параметров новых типов МФПУ, что делает возможным проводить оценку полного перечня заявляемых отечественными и зарубежными производителями параметров, указываемых в паспортах на МФПУ.

Напыление сверхтонких пленок золота методом импульсной лазерной абляции на подложки кремния и кварца

Колосовский Данил Антонович¹, Бекреева Д.В.², Залялов Т.М.³,
Пономарев С.А.³, Шухов Ю.Г.¹, Морозов А.А.¹, Старинский С.В.¹

¹*ИТ СО РАН им. С.С. Кутателадзе. Новосибирск. Россия. danil-ak@yandex.ru*

²*Новосибирский государственный университет. Новосибирск. Россия*

³*ИФП СО РАН. Новосибирск. Россия*

Growth of ultrathin gold films on silicon and quartz substrates by pulsed laser deposition

Kolosovsky Danil A.¹, Bekreeva D.V.², Zalyalov T.M.³, Ponomarev S.A.³,
Shukhov Y.G.¹, Morozov A.A.¹, Starinskiy S.V.¹

¹*S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia.*

²*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia.*

³*Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia.*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-171

In this report, it is demonstrated that pulsed laser ablation is a promising method for the deposition of continuous conductive gold films with a thickness of less than 10 nm. The surface morphology of the films was investigated by atomic force microscopy and scanning electron microscopy, the optical properties of the films were studied by spectrophotometry and the electrophysical properties were analysed by measurements of volt-ampere characteristics. The results show that the ultrathin films exhibit metallic properties down to a thickness of 4 nm, have high transmittance and low RMS surface roughness.

Сверхтонкие пленки золота, толщиной менее 10 нм, активно используются в гибких прозрачных электродах для оптоэлектронных приборов, тонкопленочных солнечных элементах, дисплеях и сенсорных экранах, фотодетекторах и светодиодах [1]. Выращивание сплошных и сверхтонких пленок золота на различных подложках, таких как кварц, оксид кремния, нитрид кремния, графен и т.д., как известно, затруднено из-за плохого смачивания золотом этих подложек, что приводит к формированию трехмерных островков на начальных этапах роста пленки. Формирование металлической пленки происходит по следующему механизму: зарождение островков, рост островков, слияние островков, перколяция и заполнение каналов с образованием сплошной тонкой пленки. Для снижения порога перколяции сверхтонких пленок золота обычно используют адгезионные или

затравочные слои [1], а также охлаждение подложки до криогенных температур [2]. Однако, использование адгезионных слоев приводит к увеличению оптических потерь и несовместимостью с требованиями оптоэлектронных устройств, а охлаждение подложки до криогенной температуры является сложной технологической задачей. В данной работе предлагается использовать метод импульсной лазерной абляции (ИЛА) для напыления сверхтонких пленок золота.

Напыление пленок осуществлялось при давлении 10 Па в вакуумной камере в атмосфере кислорода с помощью твердотельного импульсного Nd:YAG лазера с длиной волны (λ) 532 нм. Анализ морфологии поверхности пленок проводился методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) на микроскопе Bruker Multimode 8 и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе JEOL JSM 6700F. Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) пленок проводилось на зондовой станции, оснащенной параметрическим анализатором полупроводниковых приборов Keithley 4200-SCS Semiconductor с модулем измерения сверхмалых токов 4210-SMU. Анализ оптических свойств пленок осуществлялся на спектрографе СФ-2000. Спектры пропускания были получены в диапазоне длин волн 193-1050 нм.

Результаты измерения ВАХ показали, что с уменьшением толщины пленок золота с 7,4 нм до 3,9 нм сопротивление растёт с 50 Ом до 370 Ом, что говорит о хорошей электропроводности пленок. Увеличение электрического сопротивления с уменьшением толщины связано с перколяцией пленок, что подтверждается спектрами пропускания пленок. Анализ морфологии поверхности показал, что среднеквадратичная шероховатость поверхности не превышает 0.7 нм, что советует 2-3 монослоям. Параметр сплошности пленок, отношение площади поверхности, занимаемой пленкой, к площади подложки, варьируется от 1 до 0,9 для пленок толщиной 10-5 нм, в то время как в литературе такой параметр достигается лишь при охлаждении подложки до температуры 153 К [2].

В работе показано, что методом ИЛА можно напылять проводящие сверхтонкие пленки золота, толщиной менее 5 нм, на подложки кремния и кварца без использования адгезионных слоев и/или охлаждения подложки до криогенных температур.

1. Yakubovsky D. I. et al. Ultrathin and ultrasmooth gold films on monolayer MoS₂ // *Advanced Materials Interfaces*. – 2019. – Т. 6. – №. 13. – С. 1900196.

2. Lemasters R. et al. Ultrathin wetting layer-free plasmonic gold films // *ACS Photonics*. – 2019. – Т. 6. – №. 11. – С. 2600-2606.

Локальные измерения слабых напряжений на поверхности структур (013) HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs с помощью генерации второй гармоники

Ступак М.Ф.¹, Дворецкий Сергей Алексеевич², Михайлов Н.Н.²,
Макаров С.Н.¹, Елесин А.Г.¹

¹ КТИ НИП СО РАН. Новосибирск. Россия

² ИФП СО РАН. Новосибирск. Россия. dvor@isp.nsc.ru

**Local measurements of weak stresses on the surface of (013)
HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs structures using second harmonic generation**
Stupak M.F.¹, Dvoretzky Sergei A.², Mikhailov N.N.², Makarov S.N.¹, Elesin A.G.¹

¹ TDI SIE SB RAS. Novosibirsk. Russia

² ISP SB RAS. Novosibirsk. Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-173

A study of residual mechanical stresses in the surface layer of the HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs structure based on the registration of the second harmonic signal characteristics of reflected IR laser radiation sample passed through a nonlinear crystal using phase matching was carried out by new developed null method "on reflectance". It is shown that such a sensitive method makes it possible to obtain information about the anisotropy of the polarization of the reflected radiation, caused by the residual deformation.

Разработанный ранее нуль-метод "на просвет" на основе регистрации характеристик сигнала генерации второй гармоники (ГВГ) зондирующего лазерного ИК-излучения, возбуждаемой в нелинейном кристалле при использовании фазового синхронизма, позволял проводить контроль слабых деформаций в объеме полупроводниковых кристаллов с кристаллической решеткой типа сфалерита [1]. Представлены экспериментальные результаты регистрации "запрещенного" сигнала ГВГ в нелинейном кристалле при отражении зондирующего ИК излучения от приповерхностного широкозонного варизонного слоя (013) HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs гетеро-структуры при вращении образца типичной (Рис.1). Наблюдаются 2 узких несимметричных максимума, отстоящие друг от друга на $\sim 180^\circ$, более отчетливо видные на вставке. Равномерный сигнал между максимумами принимается за нулевой уровень отсчета. Наблюдаемые особенности максимумов и их различие по форме соответствуют ориентации образца в исследуемой области, при которой в отраженном излучении появляется составляющая поляризации, перпендикулярная к поляризации падающего

лазерного излучения. Результаты свидетельствуют о том, что практически весь сигнал ГВГ в максимумах развертки ФЭУ соответствует слабой анизотропии кристаллической структуры исследуемого приповерхностного слоя образца, связанной с его слабой деформацией. Воздействие на образец при воздействии зондирующего лазерного ИК-излучения мощностью $\sim 0,8$ мВт приводит к появлению сложной картины сигнала ГВГ и его изменениям. При начальном измерении наблюдаются отчетливые максимумы сигналов ГВГ (рис. 1). После воздействия ИК излучения в течение 2 мин. наблюдается постепенное увеличения уровня сигналов ГВГ из-за увеличивающегося двулучепреломления и появление минимумов на месте максимального сигнала ГВГ. После 15 минутного воздействия наблюдается стационарная стадия, в которой появившиеся минимумы сигнала в ГВГ практически не изменяются. После 20 минутной выдержки образца без воздействия ИК излучением сигналы ГВГ возвращаются к прежним зависимостям (рис. 1).

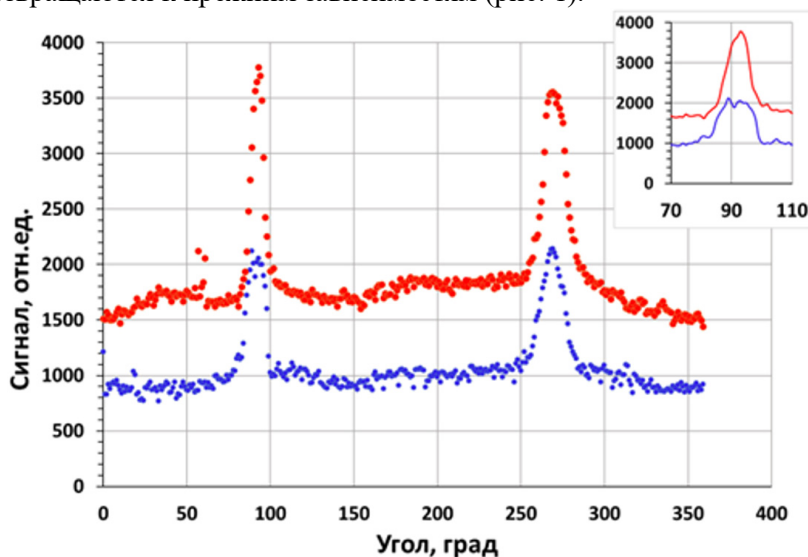


Рис.1. Сигналы ГВГ: красные точки без поляроида; синие точки – с поляридом

Появление максимумов в методе ГВГ определяется деформациями в исследуемом образце [2]. Они также проявляются в виде асимметрии в минимумах азимутальной зависимости сигнала ГВГ от приповерхностного слоя HgCdTe [3]. Тонкая структура наблюдаемых максимумов сигнала ГВГ свидетельствует о сложном характере механических напряжений, искажения которых проявляются при нагреве.

Была определена величина механических напряжений в приповерхностном слое HgCdTe, определяемая несоответствием параметров решеток. Нуль-метод «на отражение» является эффективным инструментом исследований деформаций, их характеристик и изменений.

Работа поддержана в рамках государственного задания Минобрнауки России № FWGW-2022-0002 и № 1023031400007-9-1.3.6.

Литература

1. Мушер С.Л., Ступак М.Ф., Сыскин В.С. Использование фазового синхронизма в качестве нуль-метода для сканирования полей объемных деформаций в полупроводниковых материалах // Квантовая электроника. 1996. Т. 23. Вып. 8. С. 762–764.

2. Stupak M.F., Dvoretzky S.A., Mikhailov N.N., Makarov S.N., Elesin A.G. Local measurement of weak stresses on the surface of HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs structures using the null method // Journal of Applied Physics. 2023. V. 134. P. 185102.

3. Ступак М.Ф., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Макаров С.Н., Елесин А.Г., Верхогляд А.Г. Высокочувствительная экспрессная нелинейно-оптическая диагностика кристаллического состояния гетероструктур типа сфалерита // ЖТФ. 2021. Т. 91. № 11. С. 1799–1808.

Изучение электрофизических характеристик границы раздела HfO₂/HgCdTe с различной обработкой поверхности методом PE-ALD

Краснова Ирина Андреевна, Закиров Е.Р., Сидоров Г.Ю.

ИФП СО РАН. Новосибирск. Россия. krasnovaia@isp.nsc.ru

Studying electrophysical characteristics of the HfO₂/HgCdTe interface with different surface treatments by means of the PE-ALD method

Krasnova Irina A., Zakirov E.R., Sidorov G.Yu.

*Rzhanov Institute of Semiconductor Physics Siberian Branch Russian Academy of
Sciences.*

Novosibirsk. Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-176

Passivation of the HgCdTe surface is an important task nowadays. Several methods of surface treatment have been considered in this work. They consisted in formation of various ultrathin layers prior to deposition of a HfO₂ insulating film. The studies were carried out by X-ray photoelectron spectroscopy and measurements of capacitance-voltage characteristics. The intermediate ultrathin layers were shown to have a great effect on the electrophysical parameters of the dielectric-semiconductor interface.

Узкозонный полупроводник Hg_{1-x}Cd_xTe (КРТ) широко используется в производстве оптоэлектронных устройств ИК-диапазона, в исследованиях физики топологических изоляторов и двумерного электронного газа, а также при разработке лазеров и детекторов ТГц излучения. Важным этапом при создании устройств на основе КРТ является пассивация и защита поверхности полупроводника. В литературе большое внимание уделяется осаждению различных диэлектриков и широкозонных полупроводников, но практически нет информации о состоянии поверхности перед их осаждением. В данной работе исследовалось влияние различных вариантов обработки поверхности КРТ перед нанесением диэлектрического покрытия HfO₂ на электрофизические параметры формируемой границы раздела.

Исследования проводились на ГЭС МЛЭ Hg_{0.78}Cd_{0.22}Te n-типа, с концентрацией электронов, определяемой бесконтактным методом Холла, около $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. За реперный выступал образец, на который HfO₂ наносился без дополнительных обработок. Остальные образцы КРТ были химически очищены от естественного собственного оксида и поверхностных загрязнений в водном аммиаке (NH₄OH), а затем все, кроме одного, подвергнуты различной

обработке. Два образца были окислены в удаленной плазме ВЧ-разряда, генерируемой в установке атомно-слоевого осаждения, в течение 1 и 10 минут при комнатной температуре. Один образец с использованием метода PE-ALD был покрыт тонкой пленкой Al_2O_x (прекурсор ТМА окислялся удаленной плазмой ВЧ-разряда в атмосфере $O_2:N_2$), а другой – тонкой пленкой $Al(N,O)$ (использовалась плазма чистого N_2). Было выполнено 30 циклов осаждения при температуре подложки 100 °С. Полученные покрытия отдельно исследовались методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). На все образцы методом PE-ALD при 120 °С был осажден диэлектрик HfO_2 толщиной около 20 нм (прекурсор ТЕМАН окислялся удаленной кислородной плазмой), а затем на его поверхности сформированы индиевые контакты. На полученных МДП-структурах при температуре жидкого азота были измерены вольт-фарадные характеристики.

Методом РФЭС установлено, что в результате окисления в течение 1 и 10 минут на поверхности КРТ образуется собственный оксид толщиной ~ 1 и 2 нм соответственно. Толщина слоя оксида алюминия составила ~ 4 нм, а нитрида алюминия ~ 2 нм. В пленках нитрида алюминия, получаемых с использованием атмосферы чистого азота, наблюдается высокое содержание оксида и гидроксида алюминия. В то время как в пленках, формируемых с использованием в смеси азота и кислорода, содержание азоте не превышает порог чувствительности методики химического анализа.

Образцы, которые окислялись в удаленной плазме, отличаются положительным встроенным зарядом диэлектрика, причем величина его плотности растет с $3.0 \cdot 10^{11}$ до $1.9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при увеличении времени окисления. Остальные МДП-структуры характеризуются отрицательным встроенным зарядом плотностью ~ $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Из петли гистерезиса, развивающейся практически линейно при увеличении диапазона циклической развертки напряжения смещения, определены плотности медленных состояний: наименьшая – $1.0 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{В}^{-1}$ (структура с Al_2O_x), наибольшая – $9.6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{В}^{-1}$ (структура с 2 нм собственного оксида). У реперного образца плотность медленных состояний составила $3,0 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{В}^{-1}$.

Установлено, что применение обработок с последующим осаждением оксида гафния приводит к увеличению концентрации донорных центров в области пространственного заряда КРТ.

Применение методики обработки поверхности КРТ перед нанесением диэлектрического покрытия является перспективным направлением исследований по пассивации поверхности КРТ, результаты которых могут быть применены в существующей технологии изготовления фотоприемных устройств.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-10134, <https://rscf.ru/project/21-72-10134/>

Исследование гибридизации матричных фотоприемных устройств на установке с автоколлиматором

Иродов Никита Александрович¹, Болтарь К.О.^{1,2}, Лопухин А.А.¹,
Акимов В.М.¹

¹ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия. orion@orion-ir.ru

²Московский физико-технический институт. Долгопрудный. МО. Россия

Investigation of hybridization matrix photodetector devices on equipment with autocollimator

Irodov N.A.¹, Boltar K.O.^{1,2}, Lopukhin A.A.¹, and Akimov V.M.¹

¹Orion R&P Association Inc., Moscow, Russia. orion@orion-ir.ru. www.orion-ir.ru

²Moscow Institute of Physics and Technology. Dolgoprudny. Moscow Region.
Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-178

Results of researches hybridization of ROIC and Focal Plane Array (FPA) are discussed. Work was performed by flip chip method on hybridization equipment with an autocollimator and without an autocollimator. We investigated of necessity to use an autocollimator for various formats of photodetectors. Based on research the processes of hybridization were optimized. We were found that it is more reliable and rational to hybridize large-sized FPA and ROIC of 640×512 pixels on equipment with an autocollimator. And small-sized Detector Arrays and multi-row photodetectors are better to hybridize on equipment without an autocollimator.

Представлены результаты исследований процессов гибридизации кристаллов БИС считывания и МФЧЭ матричных фотоприемных устройств ИК-диапазона, которые проводились на установках с автоколлиматором и без автоколлиматора методом перевернутого кристалла и определена необходимость использования автоколлиматора для различных фотоприемников: крупноформатных, малогабаритных и многорядных.

Проведено значительное количество процессов гибридизации кристаллов БИС и МФЧЭ формата 640×512 с шагом 15 мкм с габаритными размерами ~ 10×9 мм² (длина×ширина) на установках с автоколлиматором и без автоколлиматора. Этот формат является наиболее сложным в плане гибридизации, из-за небольших размеров индиевых микроконтактов, порядка 7×7 мкм², высотой 5 мкм и с расстоянием между соседними элементами 15 мкм (рис. 1) [1, 2].

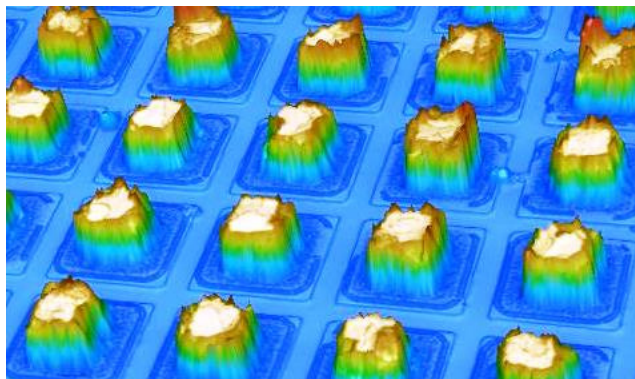


Рис. 1. Фрагмент МФЧЭ 640×512 с шагом 15 мкм с In микроконтактами порядка 7×7 мкм² и высотой 5 мкм

Измеренные по периметру зазоры между кристаллами БИС и МФЧЭ в трех точках по каждой стороне, показывают степень сжатия индиевых микроконтактов, по которым вычислен перекося кристалла МФЧЭ относительно БИС считывания [3]. Экспериментальные данные показывают, что перекося зазоров 80% модулей после гибридаизации на установке без автоколлиматора находятся в пределах от 2,0 до 5,0 мкм, причем медианное значение перекося составляет 3,5 мкм, а на установке с автоколлиматором перекося зазоров 80% модулей находятся в пределах от 1,0 до 3,0 мкм, и медианное значение перекося составляет 2,0 мкм (табл. 1).

Таблица 1. Перекося зазора между БИС считывания и МФЧЭ для различных форматов

Формат	Нижний предел зазора, мкм	Верхний предел зазора, мкм	Медианное значение, мкм
640×512, шаг 15 мкм, с автоколлиматором	1,0	3,0	2,0
640×512, шаг 15 мкм, без автоколлиматора	2,0	5,0	3,5
320×256, шаг 30 мкм, с автоколлиматором	1,0	3,5	2,0
320×256, шаг 30 мкм, без автоколлиматора	3,0	5,0	4,0
384×288, шаг 25 мкм, с автоколлиматором	0,5	2,0	1,5
384×288, шаг 25 мкм, без автоколлиматора	2,0	4,0	3,0

Это доказывает то, что процесс гибридаизации крупноформатных матриц целесообразнее проводить на установке с автоколлиматором. Это также подтверждено на графиках (рис. 2) интегральных функций распределения количества процессов гибридаизации кристаллов БИС считывания и МФЧЭ по величине перекося зазоров для установок с автоколлиматором и без автоколлиматора для формата 640×512 с шагом 15.

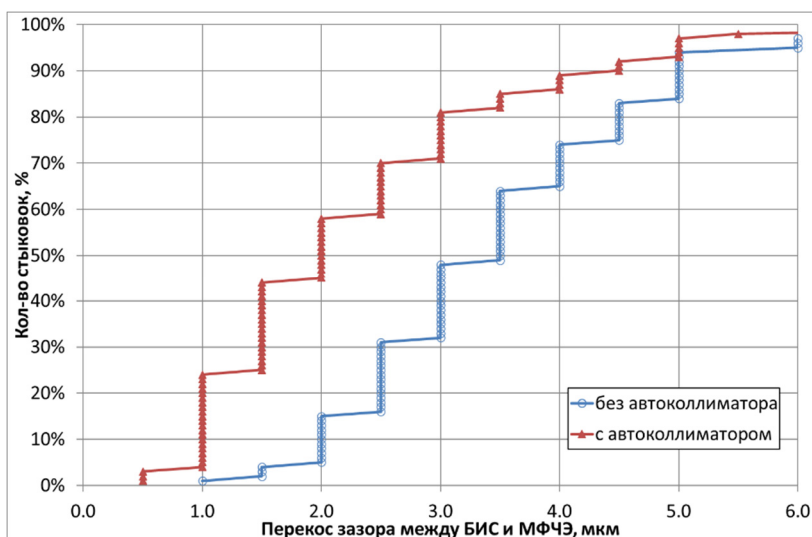


Рис. 2. Интегральные функции распределения количества процессов гибридации кристаллов БИС считывания и МФЧЭ по величине перекосов зазоров для установок с автоколлиматором и без автоколлиматора

Проведено большое число процессов гибридации и последующие измерения зазоров между кристаллами БИС и МФЧЭ форматов 320×256 с шагом 30 мкм, 384×288 с шагом 25 мкм с габаритными размерами схожими с форматом 640×512 с шагом 15 мкм на установках с автоколлиматором и без автоколлиматора (табл. 1). Эти результаты подтвердили данные, полученные для формата 640×512 с шагом 15 мкм, и показывают, что перекося между кристаллами зависит не от формата изделия, а от габаритных размеров БИС и МФЧЭ.

Встречаются случаи, когда использование автоколлиматора является нецелесообразным или невозможным. Экспериментально определено, что на установке с автоколлиматором нет возможности использовать автоколлиматор при гибридации многорядных фотоприемных устройств (длинные и узкие МФЧЭ, так называемые линейки) форматов 4×288 (габариты ~ 9×2 мм²), 10×1024 (габариты ~ 16×3 мм²). Это связано с тем, что для работы автоколлиматора, МФЧЭ должна быть примерно с одинаковым соотношением сторон, а если одна из сторон будет узкая, то есть уже, чем марка автоколлиматора, то получится, что она будет отражаться не от МФЧЭ, а от столика, на котором находится кристалл и, следовательно, выравнивание плоскопараллельности будет выполняться относительно столика, что приведет к перекося гибридации. Также автоколлиматор не способен охватить всю длину некоторых линеек.

Экспериментально определено, что при гибридизации малогабаритных МФЧЭ и БИС считывания, формата 64×64 элементов (габариты ~3×3 мм²), использование автоколлиматора также является невозможным из-за недостаточных размеров кристаллов. Из-за мелких габаритов МФЧЭ имеют небольшую кривизну, а так как нижний столик всегда плоскопараллелен верхнему в установке без автоколлиматора, то величина зазора после гибридизации не превышает установленные пределы.

На основе проведенных исследований оптимизированы процессы гибридизации и установлено, что на установке с автоколлиматором надежнее и рациональнее гибридизировать крупноформатные МФЧЭ и БИС-считывания, а на установке без автоколлиматора проводить процессы гибридизации малогабаритных матричных фотоприемников формата 64×64 из-за недостаточных размеров кристаллов для правильного отражения изображения марки автоколлиматора, и многорядных фотоприемных устройств формата 4×288, 10×1024, так как автоколлиматор не способен работать на узких и длинных МФЧЭ.

Литература

1. Болтарь К.О., Поварихина В.В., Иродов Н.А. Способ сборки ИК-фотоприемника: Патент: RU2526489. – 2013.
2. Иродов Н.А., Болтарь К.О., Власов П.В., Лопухин А.А. / Дефекты гибридизации матричных фоточувствительных элементов и схем считывания // Прикладная физика. – 2016. – №5. – С. 51-54.
3. Акимов В.М., Васильева Л.А., Болтарь К.О., Климанов Е.А. Способ оперативного контроля качества стыковки: Патент: RU2660020. – 2018.

Процессы фотолитографии для изготовления матричных фоточувствительных структур из коллоидных квантовых точек на основе сульфида свинца

Мирофьянченко Екатерина Васильевна¹, Ким А.С.^{1,2}, Тальвеже В.В.¹,
Попов М.А.^{1,3}, Еремкин Н.В.¹, Мирофьянченко А.Е.¹, Ильинов Д.В.¹,
Попов В.С.^{1,3}, Пономаренко В.П.^{1,3}

¹ ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия. emirofyanchenko@yandex.ru

² НИТУ «МИСиС». Москва. Россия

³ Московский физико-технический институт. Долгопрудный. МО. Россия

Application of photolithography for manufacturing PbS colloidal quantum dots based FPA

Mirofyanchenko E.V.¹, Kim A.S.^{1,2}, Talvezhe V.V.¹, Popov M.A.^{1,3}, Eremkin N.V.¹,
Mirofyanchenko A.E.¹, Ilinov D.V.¹, Popov V.S.^{1,3}, Ponomarenko V.P.^{1,3}
Orion R&P Association Inc., Moscow. Russia. orion@orion-ir.ru

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-182

This work presents the results of research patterning PbS colloidal quantum dots (PbS-CQD), using direct UV photolithography. The technological complexity of the mentioned method is defined by the probable interaction of exchanged ligands with photoresist components. Optimal regime for photolithography processes, including photoresist application, development and removing, are selected and the recipe of the wet etchant for photosensitive PbS-CQD layers is determined. Also, it is established that the use of developed regime does not provide degrading electrophysical characteristics of photosensitive structures based on PbS-CQD.

В работе рассматривается проведение процессов фотолитографии по слоям коллоидных квантовых точек PbS. Отмечена технологическая сложность проведения процесса из-за возможного взаимодействия лигандов квантовых точек с химическими компонентами фоторезистов. В работе проведена оптимизация режимов нанесения, проявления фоторезиста и его удаления. Определён состав химического травителя для фоточувствительных слоев. Подчеркивается, что применение разработанных режимов технологических процессов не приводит к ухудшению электрофизических характеристик фоточувствительных структур на основе коллоидных квантовых точек PbS.

В последние несколько лет появились промышленные образцы фотоприемников на основе коллоидных квантовых точек PbS. Применение подходов, используемых в микроэлектронике, позволит обеспечить

совместимость новой технологии и снижение стоимости в дальнейшем. Фотолитография является сложным комплексным технологическим процессом, включающим такие операции как: нанесение, термообработка, экспонирование и проявление фоторезиста, химическое травление и снятие маски фоторезиста. Кроме того, проведение фотолитографии по слоям, содержащим коллоидные квантовые точки (ККТ), представляет собой более сложный процесс, ключевой аспект которого заключается во взаимодействии лигандов, покрывающих квантовые точки, с химическими компонентами фоторезистов [1,2]. Это взаимодействие порождает ряд технических трудностей, которые необходимо учитывать при проведении фотолитографических операций. Взаимодействие лиганд и химических компонентов фоторезиста могут приводить как к деградации свойств самих фоточувствительных слоев, так и используемого фоторезиста. Проведение процессов фотолитографии по слоям ККТ требуют поиска оптимальных режимов нанесения, проявления фоторезиста и его снятия.

В работе показано влияние отдельных операций фотолитографии на фоточувствительные слои ККТ PbS. Подобраны и использованы различные химические травители для проведения процесса ФЛГ. Оценка влияния технологических операций проводилась методами оптической и растровой микроскопии, также исследовались электрофизические характеристики.

Разработан способ, позволяющий проводить процессы фотолитографии по фоточувствительным слоям коллоидных квантовых точек. В результате проведенной работы проведена настройка режимов технологических операций, ранее не применяемых при создании фоточувствительных элементов на основе ККТ PbS в РФ. Проведено изготовление более 10 образцов, включая формирование слоёв металлизации и фоточувствительных слоев, проведение процессов фотолитографии и травление. На основе результатов по имеющейся выборке образцов было подтверждено отсутствие негативного влияния процессов фотолитографии на их электрофизические характеристики.

Литература

1. Zhou, W., Zheng, L., Cheng, X. et al. PbS colloidal quantum dots patterning technique with low vertical leakage current for the photodetection applications. *J. Mater Sci: Mater Electron* 31, 5900–5906 (2020);
2. Hu C, Aubert T, Justo Y, Flamee S, Cirillo M, Gassenq A, Drobchak O, Beunis F, Roelkens G, Hens Z. The micropatterning of layers of colloidal quantum dots with inorganic ligands using selective wet etching. *Nanotechnology*. 2014 May 2;25(17):175302.

Структурный массив фотодиодов с изменяемой площадью для определения качества пассивации в МФПУ на основе InSb

Шишигин Сергей Евгеньевич, Лопухин А.А., Пермикина Е.В.,
Мирофьянченко Е.В., Мирофьянченко А.Е., Таубес Е.В.

ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия. orion@orion-ir.ru

Structural array of photodiodes with variable area for determining the passivation quality in InSb FPA's

Shishigin S.E., Lopukhin A.A., Permikina E.V., Mirofyanchenko E.V.,
Mirofyanchenko A.E., Taubes E.V.

Orion R&P Association, Inc. Moscow. Russian Federation. Shishigin.95@bk.ru

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-184

Test array structures with a variable area of p-n junctions are proposed to determine the quality of passivation in 640×512 InSb FPA with a pitch of 15 μm by measuring the dependences of the dark current on the ratio of the perimeter to the area of the photodiodes. The capabilities of the manufactured test array structures are analyzed. It is shown that the proposed structures make it possible to determine the sources of dark current, as well as to significantly accelerate the development of new passivating coatings in InSb FPA.

В современных МФПУ среднего ИК спектрального диапазона с высокой разрешающей способностью [1, 3] одной из наиболее сложных проблем является необходимость пассивации значительной части *p-n*-перехода, выходящего на поверхность матриц фоточувствительных элементов. Эффективность пассивации наиболее широко исследуется, используя метод VADA (массив диодов с изменяемой площадью) посредством измерения зависимостей темнового тока от отношения периметра к площади массива фотодиодов с изменяемой площадью [2]. В широкоформатных МФПУ необходимо измерять темновые токи на фоточувствительных элементах заданной топологии и малой площади, соизмеримой с шагом МФЧЭ, что затруднительно осуществить в обычных тестовых структурах.

Предлагается использовать тестовые структуры МФЧЭ с изменяемой топологией (Рис. 1а), изготовленные на периферии рабочих пластин и гибридизированные с существующими БИС считывания формата 640×512 с шагом 15 мкм, с целью получения зависимостей темнового тока от отношения периметра к площади массива фотодиодов с изменяемой площадью, используя в качестве измерителя темнового тока БИС считывания.

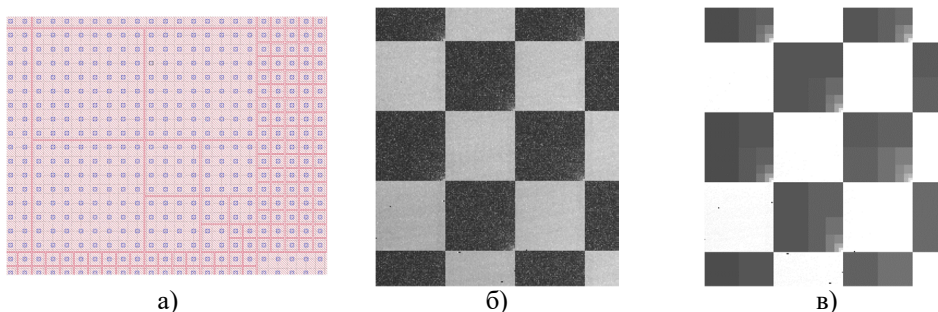


Рис. 1. Изображения топологии тестовых матричных структур и темновых токов после гибридизации с БИС считывания формата 640×512 с шагом 15 мкм:
а) фрагмент изображения топологии двух фотошаблонов («по мезе» – красного и «окна» – синего цветов) с рядом областей размером 1×1 ; 2×2 ; 4×4 ; 8×8 ; 16×16 и 32×32 ячеек, расположенных по направлению диагонали от правого нижнего до левого верхнего угла;
б) фрагмент изображения темновых токов, полученное после гибридизации с БИС считывания МФЧЭ с типичной пассивацией при максимально возможном обратном смещении на ФД (более 2В);
в) фрагмент изображения аналогично 1б с усреднением в пределах объединенных областей p - n -переходов.

Как показано на рисунке 1а, площадь областей изменяется по направлению диагонали, как 2^{2n} , где $n=0 \dots 5$. Максимальная площадь объединенного массива фотодиодов, равная $32 \times 32 = 1024$ элементов, ограничена плотностью утечек МФПУ на основе InSb, которая позволяет при статистической обработке полученных результатов получить достоверные значения VADA.

Темновой ток измерялся в области, где дифференциальное сопротивление фотодиода превышало дифференциальное сопротивление затвор-исток входного транзистора по разряду емкости накопления [3]. Темновые ВАХ типичного образца МФПУ на основе InSb с расщеплением VADA при смещении dV_b менее -2В показаны на Рис. 2а. Соответствующее этому большому смещению изображение темновых токов показано на Рис. 1б. Видна неоднородность темновых токов, обусловленная конкуренцией входных усилителей с различными входными сопротивлениями, подключенными к объединенному фотодиоду большой площади. Однако, средний ток в пределах объединенных областей p - n -переходов показывает достоверную величину, так как суммарный темновой ток течет только через входные транзисторы, как показано на Рис. 1в.

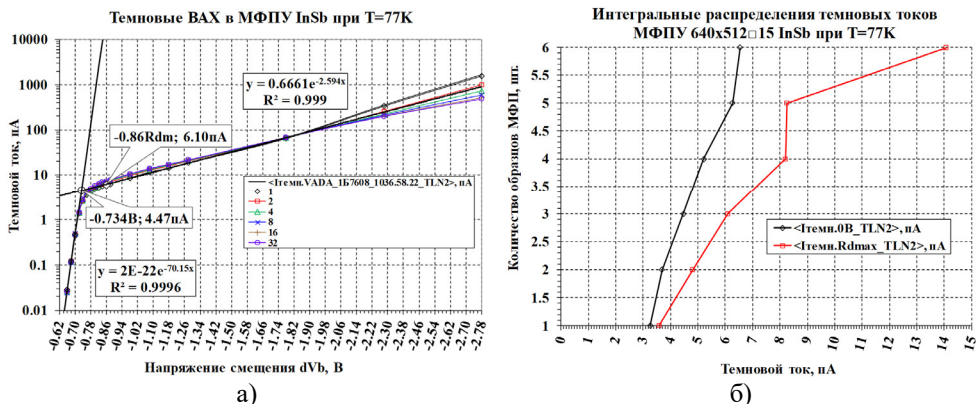


Рис. 2. а) Темновые ВАХ типичного образца МФПУ на основе InSb с расщеплением VADA при смещении dV_b менее -2В; б) Интегральные распределения оптимальных темновых токов образцов МФПУ с различной пассивацией, рассчитанных по точке пересечения экспонент (транзисторной и фотодиодной) (чёрный ромб) и в точке максимального дифференциального сопротивления (красный квадрат).

На рис. 2а видно, что оптимальные темновые токи образцов МФПУ с различной пассивацией можно определить двумя способами: по точке пересечения экспонент (транзисторной и фотодиодной) и в точке максимального дифференциального сопротивления. Соответствующие этим способам интегральные распределения построены на рис. 2б для измеренных шести образцов. Из измеренных данных средний медианный темновой ток оказался $5\div 7$ нА, а дифференциальное сопротивление ~ 50 ГОм. Таким образом, предложенные матричные структуры с изменяемой площадью p - n переходов позволяют определить источники темнового тока и существенно ускорить разработку новых пассивирующих покрытий в МФПУ на основе InSb.

Литература

- [1] G. Gershon, A. Albo, M. Eylon, O. Cohen, Z. Calahorra, M. Brumer, M. Nitzani, E. Avnon, Y. Aghion, I. Kogan, E. Ilan, A. Tuito, M. Ben Ezra and L. Shkedy, Semiconductor Devices (SCD), Israel // Large Format InSb Infrared Detector with 10 μm Pixels, OPTRO-2014-2931891.
- [2] V. Gopal // "A general relation between zero-bias resistance-area product and perimeter-to-area ratio of the diodes in variable-area diode test structures," Semiconductor science and technology, vol. 11, p. 1070, 1996.
- [3] Балиев Д.Л., Болтарь К.О., Киселева Л.В., Ложников В.Е., Лопухин А.А., Мансветов Н.Г., Полунеев В.В., Рудневский В.С., Савостин А.В. «Матричное фотоприемное устройство на основе антимонида индия формата 640x512 с шагом 15 мкм» // Прикладная физика, 2014, № 2. С. 41-44.

Моделирование, исследование и оптимизация параметров микроригенных систем Стирлинга

Некрасов Глеб Игоревич¹, Шаров А.А.¹, Болтарь К.О.^{1,2}, Коротаев Е.Д.¹,
Дектерева Е.Д.¹, Кулеш А.В.¹, Гурьев Д.И.¹

¹ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия. orion@orion-ir.ru

²Московский физико-технический институт. Долгопрудный. МО. Россия

Modeling, research and optimization of parameters for micro-cryogenic Stirling systems

Nekrasov G.I., Sharov A.A., Boltar K.O., Korotaev E.D., Dektereva E.D.,
Kylesh A.V., Gyriev D.I.

Orion R&P Association Inc. Moscow. Russia. orion@orion-ir.ru

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-187

The paper presents the results of optimizing the design parameters of cryocoolers in order to improve the output characteristics of cryocoolers, increase reliability and manufacturability. A comprehensive study of the compressor pair assembly was carried out - one of the critical ones that significantly affects the performance and characteristics of the cryocooler. By comparing the results of computer modeling and experimental studies, structural parameters were optimized for elements of microcryogenic systems such as an integral Stirling cryocooler to achieve its best output characteristics.

В АО «НПО «Орион» созданы микроригенные системы (МКС), предназначенные для охлаждения фотоприёмных устройств инфракрасного диапазона, в том числе матричных, работающие по обратному одноступенчатому циклу Стирлинга. МКС конструктивно выполнены в интегральном исполнении с приводом роторного типа, который обеспечивает работу поршневого компрессора, в корпусе которого имеется полость картера и полость сжатия, а также регенератор с поршнем-вытеснителем.

В работе изложены результаты оптимизации конструктивных параметров МКС с целью улучшения выходных характеристик МКС, повышения надёжности и технологичности.

Проведено комплексное исследование узла компрессорной пары – одного из критически важных, существенно влияющих на работоспособность и характеристики МКС.

Исследование включало:

- компьютерное моделирование деформаций деталей узла при

воздействии температуры внешней среды с учётом степени затяжки винтовых соединений;

- экспериментальное исследование работы узлов компрессорной пары в условиях температурных воздействий, как автономное, так и в составе МКС;

- компьютерное моделирование гидравлических характеристик компрессорной пары МКС при различных значениях рабочего зазора, в том числе, при различных конструктивных исполнениях поршня;

- измерение коэффициента гидравлического сопротивления компрессорных пар МКС при различных значениях рабочего зазора с последующим исследованием выходных характеристик МКС с данными компрессорными парами;

- сравнительное исследование шероховатости рабочей поверхности компрессорных поршней, изготовленных из материалов различных типов с различными видами антифрикционных покрытий, в том числе после наработки.

В результате моделирования и экспериментов установлены требования к параметрам деталей узла компрессорной пары, обеспечивающие наилучшие выходные характеристики МКС:

- получены оптимальные значения зазоров в сопрягаемых деталях, в том числе диапазон значений рабочего зазора в компрессорной паре, обеспечивающий оптимальное минимальное время достижения температуры криостатирования при минимуме потребляемой МКС мощности;

- определены допускаемые моменты затяжки винтовых соединений;

- уточнены требования к шероховатости рабочей поверхности компрессорного поршня.

Также проведены эксперименты по уточнению запорочного давления рабочего газа (гелия) для оптимизации холодопроизводительности МКС.

По результатам расчётно-экспериментальных исследований найдены оптимальные объёмы камеры расширителя и оптимизирована длина регенератора.

На основе сравнения результатов компьютерного моделирования экспериментальных исследований проведена оптимизация конструктивных параметров элементов микрокриогенных систем типа интегральной МКС Стирлинга для достижения наилучших выходных характеристик.

Технологические решения для серийного производства газовых микроригенных машин Стирлинга

Банников Максим Викторович, Шаров А.А., Терентьев Д.С., Некрасов Г.И.

ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия. orion@orion-ir.ru

Technological solutions for serial production of gas micro-cryogenic Stirling machines

Bannikov M.V., Sharov A.A., Terentev D.S., Nekrasov G.I.
Orion R&P Association Inc. Moscow. Russia. orion@orion-ir.ru

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-189

As a result of the research, the task of which was to study the influence of the technological process parameters for the manufacture and assembly of a cryocooler on its output characteristics, optimal ranges of values for a number of technological parameters were obtained, and recommendations were developed for improving the design of cryocoolers.

Для охлаждаемых инфракрасных фотоприёмных устройств (ФПУ), работающих при температуре 70-80К широкое применение нашли газовые криогенные машины (ГКМ), принцип действия которых основан на обратном цикле Стирлинга [1]. ГКМ создаются в интегральном исполнении, при этом в компрессоре ГКМ используется привод роторного типа.

В связи с широким применением ГКМ данного типа в современных инфракрасных ФПУ актуальной становится оптимизация технологии их изготовления применительно к условиям серийного выпуска.

В результате проведённых исследований, задачей которых было изучение влияния параметров технологического процесса изготовления и сборки ГКМ на её выходные характеристики, получены оптимальные диапазоны значений ряда параметров технологического процесса, а также выработаны рекомендации по улучшению конструкции ГКМ.

В частности, проведён эксперимент по исследованию надёжности ГКМ, при котором несколько экземпляров ГКМ подверглись суммарной наработке более 20 тыс. часов каждый с периодическим контролем основных характеристик ГКМ, что позволило выявить наиболее критичные элементы конструкции. На основе комплексного анализа полученных экспериментальных данных разработана уточнённая методика прогнозирования ресурса ГКМ, учитывающая влияние её конструктивных параметров с использованием весовых коэффициентов.

Одной из основных причин возможного ухудшения характеристик МКС

в процессе эксплуатации является потеря герметичности внутреннего объёма компрессора, в результате которого снижается начальное значение заправочного давления гелия и ухудшается холодопроизводительность МКС. Для улучшения герметизации в качестве уплотнения фланцевых соединений МКС предлагается использовать упругие металлические С-образные кольца, обеспечивающие дополнительное уплотнение за счёт воздействия на них давления рабочего газа. С этой целью переработана конструкция фланцевых соединений МКС.

Проведено комплексное исследование функционирования деталей в узле компрессорной пары - одного из важнейших компонентов в составе ГКМ, включающее наряду с экспериментальным исследованием влияния конструкции и технологии сборки данного узла в составе корпуса компрессора, также и компьютерное моделирование [2], важной составной частью которого является анализ воздействия температуры внешней среды. В результате выработаны рекомендации, как по оптимизации зазоров в сопрягаемых деталях узла, так и по проведению сборочных операций, в частности уточнены необходимые моменты затяжки винтовых соединений.

Для обеспечения максимального коэффициента холодопроизводительности ГКМ важно обеспечить максимальную чистоту рабочего газа (используется газообразный гелий высокой чистоты с объёмной долей 99,9999% по гелию). Для исключения «загрязнения» в рабочей полости газами, абсорбированными корпусом и другими деталями ГКМ технологией предусмотрено их предварительное обезгаживание, а также межоперационное хранение деталей и сборочных единиц в боксах при повышенной температуре, защищённых от воздействия атмосферного воздуха. Кроме того, технологический процесс внедрён стенд газовой заправки, который в автоматическом режиме позволяет реализовать программу заправки включающую, наряду с чередующимися циклами заполнения объёма компрессора ГКМ гелием, также и циклы предварительного вакуумирования для максимального удаления возможных газовых примесей.

Получена зависимость основных выходных характеристик ГКМ, таких как время достижения температуры криостатирования, холодопроизводительность и потребляемая мощность от давления заправки. При этом давление заправки конкретного экземпляра ГКМ может быть оптимизировано с учётом достижения оптимального соотношения значений выходных параметров.

Также в технологию внедрён ряд операций промежуточного контроля, позволяющих повысить надёжность технологического процесса:

- измерение коэффициента гидравлического сопротивления регенератора и компрессорной пары;
- контроль упругого осевого разбега приводного вала;
- промежуточные запуски ГКМ в состоянии неполной сборки на

«холостом ходу» для автономной проверки правильности работы подвижных частей и механизмов.

Комплекс мер, принятых на основе проведённых исследований позволяет осуществлять производство ГКМ на серийном уровне с высокой степенью надёжности.

Литература

1. Новотельнов В.Н. и др. Криогенные машины. - Спб.: Политехника, 1991. – 335 с.
2. Некрасов Г.И. и др. Моделирование, исследование и оптимизация параметров микрокриогенных систем Стирлинга (в настоящем сборнике).

Численный эксперимент для оценки оптимальной волюметрической схемы криогенной газовой машины Стирлинга с пульсационной трубой

Чехович Вячеслав Алексеевич

МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва. Россия. czechowicz@mail.ru

Numerical experiment in order to evaluate the optimal volumetric design of Stirling pulse-tube cryocooler

Chekhovich Viacheslav Alexeevich

Bauman Moscow State Technical University. Moscow. Russia. czechowicz@mail.ru

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-192

The cryocooler is designed for cryostating of objects that require cryogenic temperatures and low vibration levels for full functioning. In 2023, the development of a two-stage methodology for calculating thermodynamic processes in this type of cryocoolers was completed. The first step is to find the optimal volumetric scheme from the point of view of the problem conditions. The second step involves direct calculation of real thermodynamic processes in Stirling pulse-tube cryocoolers.

This article discusses a numerical experiment conducted in order to search for a volumetric scheme of Stirling pulse-tube cryocooler with the maximum possible consideration of factors affecting the performance of this cryogenic unit.

Keywords: Microcryogenic gas machine (MCGM); pulse tube; thermoacoustics, cryogenics, low temperature.

Криогенная газовая машина (далее – КГМ) Стирлинга с пульсационной трубой предназначена для криостатирования объектов, требующих криогенный уровень температур и низкий уровень вибраций для полноценного функционирования. В 2023 году была завершена разработка двухэтапной методики расчёта термодинамических процессов в данном типе КГМ. Первым этапом является поиск оптимальной с точки зрения условий задачи волюметрической схемы. Второй этап подразумевает непосредственный расчёт реальных термодинамических процессов в КГМ с пульсационной трубой.

В данной статье рассмотрен численный эксперимент, проведённый в целях поиска волюметрической схемы КГМ с пульсационной трубой с максимально возможным учётом факторов, влияющих на работоспособность данного криогенного агрегата.

Ключевые слова: Микрокриогенная газовая машина (МКГМ); пульсационная труба; термоакустика, криогенная техника, низкая температура.

КГМ, использующая пульсационную трубу в качестве объёма расширения гелия газообразного (рабочего тела внутри КГМ), представляет собой совокупность аппаратов, пример которой представлен на рисунке 1. Источник пульсаций 1 является поршневым компрессором с одним поршнем или двумя оппозитными поршнями, который производит осцилляцию давления внутри замкнутой полости КГМ. Объект криостатирования соединяется с теплообменником полезной нагрузки 2, а теплообменник 3 отводит отработавшую тепловую энергию. Коаксиальный узел охлаждения 4 является совокупностью регенератора (пористой структуры, от конфигурации и технологии упаковки которой в наибольшей степени зависит эффективность КГМ) и пульсационной трубы, расположенной внутри регенератора. Фазосдвигание исполняют два аппарата: инерционная труба 5 (импеданс) и ресивер 6 (замыкающий объём).

Модель расслоения газового столба (далее – МРГС) была разработана и защищена авторским свидетельством в 2023 году [1] в целях решения задачи оптимизации КГМ с точки зрения всех возможных факторов, таких как: температура окружающей среды, давление заправки, частота пульсаций и др. Данная модель исполняет решение согласно обобщённой волнометрической схеме, приведённой на рис. 2. Схема состоит в общем случае из 12 аппаратов, а именно: рабочего объёма 1, мёртвого объёма компрессора 2, горячего теплообменного аппарата 3, клапана 4, регенератора 5, холодного теплообменного аппарата 6, пульсационной трубы 7, горячего теплообменника 8, клапана фазосдвигателя 9, инерционной трубы 10, ресивера 11 и перепускной магистрали 12. Перспектива использования данной схемы состоит в применении модели к КГМ по циклу Эриксона [2]. Касаемо схемы КГМ Стирлинга с пульсационной трубой [3], в ней отсутствуют аппараты 4, 9 и 12. На первом этапе производится многопараметрическая оптимизация, главным параметром которой является ГОО (главное объёмное отношение, равное отношению рабочего объёма источника пульсаций к объёму пульсационной трубы). На входе задаётся необходимое количество исходных параметров, которых в модели для обоих этапов предусмотрено 263. Лучшим вариантом оптимизации является так называемый «перекрёстный вариант», который предусматривает среди исходных данных некоторое количество значений температуры окружающей среды и давления заправки, чтобы можно было оценить эффективность КГМ для любой пары выше приведённых параметров. Этап состоит из выполнения следующего перечня задач. Рассчитывается цикл по трём параметрам: осцилляция давления (амплитуда колебаний давления в ресивере), главное температурное отношение (отношение максимальной и минимальной температур в регенераторе) и отсечка процесса холодоиспользования (условный момент перехода из процесса расширения в изохорный процесс). Для решения этой задачи используются совместно методики Рэдебоу [4] и Шмидта [5].

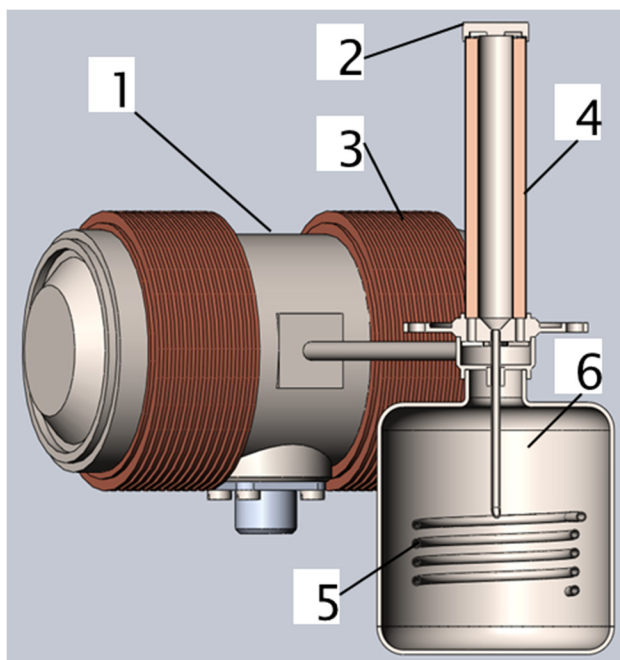


Рис. 1. КГМ с пульсационной трубой

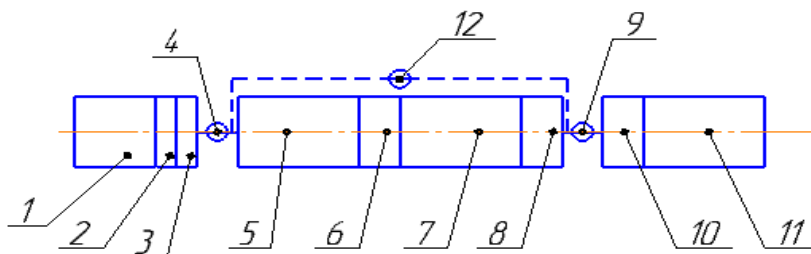


Рис. 2. Обобщённая волномерическая схема КГМ с пульсационной трубой

Далее производится оптимизация теплообменников нагрузки и учёт потерь холодопроизводительности по соотношения из [6], при котором выбирается лучший вариант для каждого значения ГОО. Производится расчёт диаметра и длины инерционной трубы, а также оптимальный объём ресивера.

Модель реализована на языке GNU Octave в программном комплексе MATLAB в виде скрипта формата m.

На рис. 3 показаны примеры графических результатов, полученных при расчёте на примере КГМ с компрессором от модели Ricor K508. Данные результаты показывают, что в оптимальной схеме частота пульсаций должна составлять 65 ± 2 Гц, а диаметр инерционной трубы $0,9 \pm 0,1$ мм.

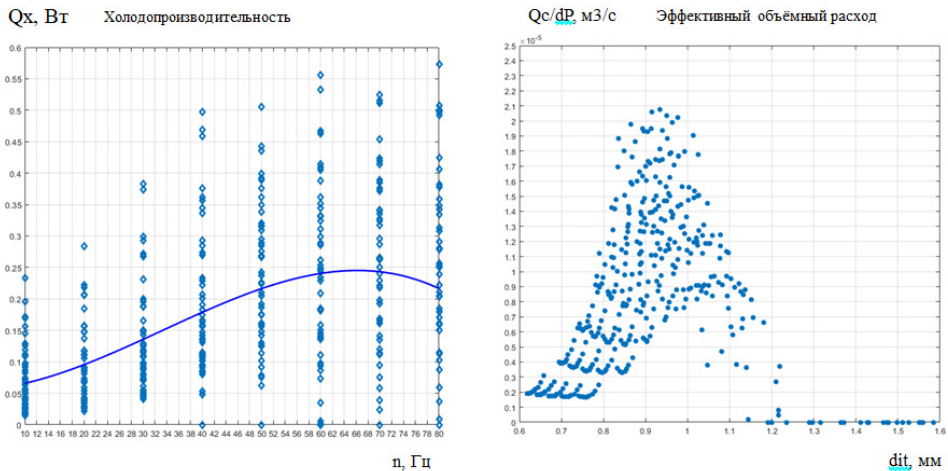


Рис. 3.

В таблице 1 приведены результаты, полученные в численном эксперименте. Эксперимент проводился в диапазоне ГОО от 0.5 до 1.5.

Таблица 1 – Оптимальные параметры КГМ на базе компрессора Ricor K508.

Параметр	Значение параметра
Диаметр компрессорного поршня	14 мм
Ход компрессорного поршня	2 мм
Диапазон давлений заправки гелием	21...40 атм
Максимальная пусковая частота пульсаций	67 Гц
Криостатирующая частота пульсаций	47 Гц
Длина узла охлаждения («холодного пальца»)	47 мм
Размеры пульсационной трубы в сечении	4x0,2 мм
Размеры кольцевого регенератора в сечении	7,6x0,5 мм – наружное кольцо
Пористая структура регенератора	Сетка 004 из 12X18Н10Т согласно ТУ 14-4-576-99
Внутренний диаметр перепускного теплообменника	1,4 мм
Длина перепускного теплообменника	60 мм
Внутренний диаметр инерционной трубы	0,8 мм
Длина инерционной трубы	200 мм
Типоразмер ресивера, т.е. его объём равен третьей степени типоразмера, умноженный на $(\pi/4)$	30 мм

Выводы

Полученная в результате численного эксперимента волюметрическая схема может стать отправной точкой для дальнейшего усовершенствования КГМ. Исследование показало, что минимальная мощностью потребления, необходимая для достижения 80 К уровня температур на объекте криостатирования с тепловыделением 0,3 Вт, составляет 18 Вт. В целом, МРГС производит существенное упрощение дальнейшего проектирования КГМ путём сужения области допустимых значений проектных параметров, что позволяет существенно сократить сроки разработки таких агрегатов.

Литература

1. Программа для расчёта термодинамических процессов в криогенных газовых машинах замкнутого цикла с пульсационной трубой. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023615109 от 10.03.23.
2. А.Д.Суслов и др. Криогенные газовые машины. // М.: Машиностроение, 1982, 213 с., ил.
3. Архаров А.М. и др. Криогенные системы: Учебник для студентов вузов по специальностям «Техника и физика низких температур» и «Холодильная, криогенная техника и кондиционирование». Т.1. Основы теории и расчёта/ А.М.Архаров, И.А.Архаров, В.П.Беляков и др.; Под общ. ред. А.М.Архарова и А.И.Смородина. – 2-е изд., перераб. и доп.. – М.: Машиностроение, 1999. – 720 с.: ил.
4. Yamuna Prasad Banjare. Theoretical and Experimental Studies on Pulse Tube Refrigerator // Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology Rourkela, 769008, 2009.
5. Г.Уокер. Машины, работающие по циклу Стирлинга: Пер. с англ.: - М.: Энергия, 1978. – 152 с., ил.
6. А.М. Архаров и др. Машины низкотемпературной техники. Криогенные машины и инструменты: учебник / [А.М.Архаров, И.А.Архаров, А.Н. Антонов и др.]; под общ. ред. А. М. Архарова и И.К.Буткевича. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. - 582 с. : ил.

Базовая технология полирования пластин InSb для эпитаксиального роста фоточувствительных материалов методом МЛЭ

Трофимов А.А.¹, Козлов Р.Ю.^{2,3}, Кривобок В.С.^{1,4},
Улькаров Вадим Айратович¹, Молодцова Е.В.², Павлов П.В.², Павлова О.С.²,
Косякова А.М.¹, Комаровский Н.Ю.^{2,3}, Нестюркин М.С.^{2,3}, Клековкин А.В.⁴,
Минаев И.И.⁴, Ерошенков В.В.¹, Аtrashков А.С.¹, Ковин Я.А.¹

¹ ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия. ulkarov@yandex.ru

² АО «Гиредмет» им. Н.П. Сажина. Москва. Россия

³ НИТУ «МИСИС». Москва. Россия

⁴ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН. Москва. Россия

The basic technology of InSb wafer polishing for epitaxial growth of photosensitive materials by the MBE method

A.A. Trofimov¹, R.Yu. Kozlov^{2,3}, V.S. Krivobok^{1,4}, V.A. Ul'karov¹,
E.V. Molodtsova², P.V. Pavlov², O.S. Pavlova², A.M. Kosyakova¹,
N.Yu. Komarovskiy^{2,3}, M.S. Nestyurkin^{2,3}, A.V. Klekovkin⁴, I.I. Minaev⁴,
V.V. Eroshenkov¹, A.S. Atrashkov¹, Ya.A. Kovin¹

¹ Orion R&P Association, JSC, Moscow, Russia

² N.P. Sazhin Research and Development Institute of Rare Metal Industry
(Giredmet JSC). Moscow. Russia

³ National University of Science and Technology «MISIS». Moscow. Russia

⁴ P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences. Moscow.
Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-197

As a result of the work carried out within the framework of import substitution and ensuring the technological independence of the Russian Federation in terms of the strategic material of solid-state optoelectronics, the possibility of obtaining substrate plates from domestic InSb grown by the Chokhralsky method that meet the requirements of MBE for epitaxial processes was investigated.

В результате проведенных работ в рамках импортозамещения и обеспечения технологической независимости РФ в части стратегического материала твердотельной оптоэлектроники исследована возможность получения из отечественного InSb, выращенного методом Чохральского, пластин-подложек, удовлетворяющих требованиям МЛЭ для проведения эпитаксиальных процессов.

Лидирующими мировыми производителями полированных подложек

InSb различной кристаллографической ориентации и диаметром вплоть до 125 мм являются компании WaferTech (Великобритания) и Ram-Xiamen (Китай) [1,2]. В РФ в настоящий момент серийное производство полированных пластин InSb не осуществляется, а в связи с санкционными ограничениями спрос на такие пластины, предназначенные для проведения эпитаксиальных процессов, сохранился. Таким образом, задача получения отечественного подложечного InSb, удовлетворяющего требованиям МЛЭ является актуальной.

Из слитка InSb, выращенного методом Чохральского АО «Гиредмет», способом проволоочной резки были получены пластины толщиной 920-930 мкм. Одним из требований к пластинам-подложкам для МЛЭ эпитаксии является толщина 550 мкм. На основе этих данных была разработана следующая схема обработки пластин InSb. Обработка пластин-подложек InSb производилась на установках «Logitech PM5», данные установки позволяют проводить процессы одностороннего шлифования и полирования. В первую очередь обрабатывалась обратная сторона пластин: был проведён процесс шлифования абразивной суспензией Al_2O_3 с размером частиц 9 мкм, в результате которого было снято 100 мкм полупроводникового материала. Затем с целью уменьшения глубины нарушенного слоя на обратной стороне пластин был проведён процесс шлифования абразивной суспензией Al_2O_3 с размером частиц 3 мкм. В результате после всей обработки обратной стороны толщина пластин-подложек составила 785 мкм. Далее по разработанной схеме обрабатывалась лицевая сторона аналогичным образом. Для получения уменьшенного нарушенного слоя и зеркальной поверхности лицевой стороны пластин InSb был проведён процесс предфинишного полирования абразивной суспензией Al_2O_3 с субмикронным размером частиц. Далее для удаления дефектов с поверхности лицевой стороны пластин было проведено финишное полирование на полировальной ткани «ChemCloth» с применением химических полирующих травителей. Ввиду применения агрессивных полирующих травителей было проведено модифицирование опорного кольца прецизионного держателя (drive ring) с целью предотвращения его коррозии и попадания продуктов коррозии на полировальную ткань.

Для контроля плоскостности и равномерного снятия полупроводникового материала по всей площади пластин-подложек в процессе шлифования-полирования производились периодические измерения толщины пластин в 5 точках (рис. 1), а также измерения профиля по диаметрам пластин на контактном профилеометре «DektakXT» (рис. 2).

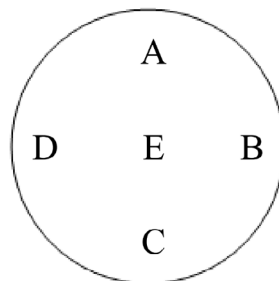


Рис. 1. Расположение точек измерения на пластине

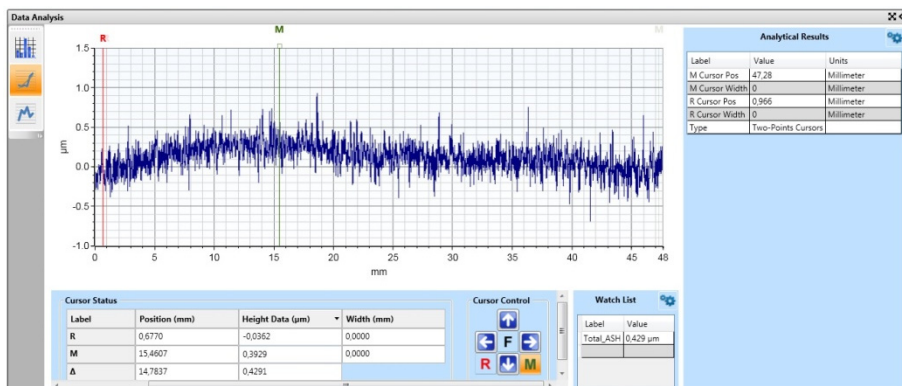


Рис.2. Профиль пластины-подложки после шлифования абразивной суспензией с размером частиц 3 мкм.

В результате после финишного полирования была получена поверхность пластин-подложек InSb с показателями шероховатости 0.2-0.3 нм. Измерения проводились на атомно-силовом микроскопе и оптическом профилометре «SENSOFAR S NEOX». Полученные значения шероховатости поверхности соответствуют требованиям к подложкам InSb для метода МЛЭ.

Технологическая апробация путем проведения эпитаксиального роста методом МЛЭ на подготовленных подложках InSb осуществлялась в ФИАН им. П.Н. Лебедева в рамках работ, направленных на разработку и создание фоточувствительных материалов для спектрального диапазона 3-12 мкм на основе низкоразмерных гетероструктур, включая короткопериодные сверхрешетки [3,4]. В результате проведения эпитаксиального процесса на подготовленной подложке InSb успешно выращен слой InAsSb толщиной ≈ 700 нм с удовлетворительной морфологией поверхности и шероховатостью (рис. 3).

Из анализа полученных видно, что эпитаксиальные слои InAsSb, выращенные методом МЛЭ на подложке из InSb, выращенного методом Чохральского в АО «Гиредмет» и подготовленной к эпитаксиальным процессам в рамках совместных работ с АО «НПО «Орион» и ФИАН, по качеству практически не уступают полированным подложкам

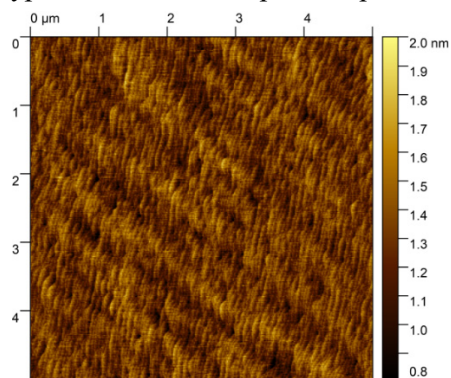


Рис. 3. Морфология эпитаксиального слоя InAsSb с содержанием As 0.007%, выращенного на подготовленной в рамках совместных работ подложке InSb

компании Ram-Xiamen (Китай).

В ходе совместных работ разработана лабораторная технология подготовки подложек InSb, которая при необходимости может быть эффективно применена для мелкосерийного выпуска такой продукции. В настоящее время завершается разработка промышленной технологии получения полированных пластин InSb в АО «Гиредмет».

Литература

1. Wafer Technology Ltd. URL: <http://www.wafertech.co.uk/>
2. Xiamen PAM Co, Ltd. <https://www.powerwaywafer.com/compound-semiconductor>
3. В. С. Кривобок, Д. А. Пашкеев, А. В. Клековкин, И. И. Минаев, К. А. Савин, Г. Н. Ерошенко, А. Е. Гончаров, С. Н. Николаев. Разработка дизайна интерфейсов для получения короткопериодных сверхрешеток InAs/GaSb методом молекулярно-пучковой эпитаксии // Краткие сообщения по физике, 2023, том 9, 51-60.
4. В. С. Кривобок, С. Н. Николаев, Д. А. Пашкеев, И. И. Минаев, К. А. Савин, Г. Н. Ерошенко, А. В. Клековкин. Получение ХВп структур на основе InSb методом молекулярно-пучковой эпитаксии // Школа молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике» (БПИО-2023). Москва 2023

Подложки CdZnTe для эпитаксиального выращивания твердых растворов A²B⁶ методом МЛЭ

Трофимов Александр Александрович¹, Денисов И.А.², Андрусов Ю.Б.²,
Гришечкин М.Б.², Царегородцев Д.О.¹, Косякова А.М.¹, Антонова В.Е.¹,
Гладышева К.А.¹

¹ГНЦ РФ АО «НПО «Орион», Москва, Россия, aa-trofimov@yandex.ru
²АО «Гиредмет» им. Н.П. Сажина. Москва. Россия

CdZnTe substrates for epitaxial growth A²B⁶ by MBE

A.A. Trofimov¹, I.A. Denisov², Yu.B. Andrusov², M.B. Grishechkin²,
D.O. Tsaregorodtsev¹, V.E. Antonova¹, K.A. Gladysheva¹

¹ Orion R&P Association, JSC. Moscow. Russia

² Sazhin Giredmet JSC. Moscow. Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-201

The molecular beam epitaxy method places high demands on the morphology of the substrate surface. CdZnTe is an isotype material for epitaxial growth of photosensitive HgCdTe layers. However, such substrates, especially those with larger diameters, are difficult to process. JSC NPO Orion managed to achieve a surface roughness of RMS = 0.5 nm on CdZnTe substrates with a diameter of 50.8 mm, measured at a length of 7 μm using atomic force microscopy.

Keywords: CdZnTe, polishing, surface roughness, HgCdTe

Одними из востребованных фотоприемников в России и мире являются матричные фотоприемные устройства длинноволнового ИК диапазона (ИК ФПУ) на основе HgCdTe [1,2]. Получение высококачественного материала HgCdTe является сложной задачей из-за неоднородности состава и образования различных видов структурных дефектов во время эпитаксиального роста. Для полной реализации потенциала HgCdTe необходима высококачественная, бездефектная и по возможности атомарно-гладкая поверхность этого материала [3]. На морфологию поверхности эпитаксиальных слоев HgCdTe влияют не только ростовые условия, но и подготовка поверхности подложки.

В АО «НПО «Орион» в рамках развития технологии и освоения производства подложек CdZnTe диаметром 50,8 мм, предназначенных для эпитаксиального выращивания HgCdTe методом МЛЭ [4] продолжается работа по улучшению технологии подготовки таких подложек.

Подложки CdZnTe изготовлены из слитков, выращенных методом Бриджмена в АО «Гиредмет» [5-7], при этом концентрация цинка составляет

3,9...5,1%, что обеспечивает номинальное совпадение кристаллических решеток CdZnTe и HgCdTe [8] и позволяет выращивать эпитаксиальные слои HgCdTe с параметрами, соответствующими качеству объемных кристаллов [9].

В настоящее время показатели качества подготовки поверхности подложек CdZnTe кристаллографической ориентации (211)В характеризуются следующими значениями: разнотолщинность (TTV) на диаметре 50,8 мм, составляет $\leq 1,5$ мкм; шероховатость поверхности, измеренная методом атомно-силовой микроскопии, составляет $RMS = 0,5$ нм, на длине 7 мкм. Морфология поверхности подложки CdZnTe представлена на рисунке.

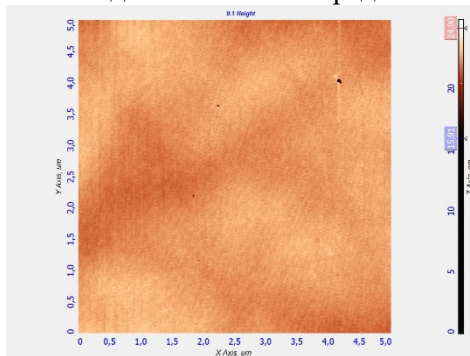


Рис. 1. CdZnTe surface morphology by AFM 5×5 μm area

Финишное полирование пластин CdZnTe осуществлялось химико-механическим методом с применением полировальной ткани Chemcloth Logitech (Великобритания) и химического полирующего травителя следующего состава — $Br:C_2H_6O_2:CH_3OH$, где концентрация брома составляет 0,1 %. Определение технологических условий процесса таких как: нагрузка на обрабатываемый образец, скорость вращения полировальной плиты, тип полировальной ткани, время обработки, концентрация окислителя в составе химического полирующего травителя и, собственно, сам состав и дозировка его подачи — является комплексной научно-технологической задачей, призванной обеспечить равномерный подвод химического полирующего травителя ко всей поверхности обрабатываемого образца, а также равномерный отвод продуктов химической реакции и, по возможности, уравнивание скоростей химического травления и механического воздействия на образец полировального полотна.

В настоящее время совместно с АО «Гиредмет» проводится работа по апробации результатов в ходе эпитаксиального роста HgCdTe методом жидкофазной эпитаксии и оценке влияния подготовки подложки на качество эпитаксиальных слоев.

1. Rogalski, A., *Infrared Detectors*, USA, CRC Press, 2019.
2. Бурлаков И.Д., Болтарь К.О., Кузнецов С.А., Пономаренко В.П // материалы XXVI Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения (г. Москва, АО «НПО «Орион»), 2022 г, 475 с.
3. Mohd Qasim, P. Parthiban, Debangshu Narayan Das // Effect of Ultra Soft CMP Processing Parameters on Topography of HgCdTe Wafer Surfaces // ECS Journal of Solid State Science and Technology 8(11), P 719-726
4. Трофимов А.А., Денисов И.А. и др. // Успехи прикладной физики, 2022, т. 10, № 3, с. 289-300
5. Гришечкин М.Б., Денисов И.А., Смирнова Н.А., Шматов Н.И., Силина А.А. // Прикладная физика, 2014, №5, с. 510-514.
6. M. V. Grishechkin, I. A. Denisov, A. A. Silina, N. I. Shmatov, *Non-Ferrous Metals*, No. 2, 23 (2016).
7. Гришечкин М.Б., Денисов И.А., Силина А.А., Шматов Н.И. // Цветные металлы, 2016, № 12.
8. Кульчицкий Н.А., Наумов А., Старцев В. // Электроника: Наука. Технология. Бизнес, 2020, № 6, с. 114-121.
9. Сенченков А.С. // Успехи прикладной физики, 2021, т. 9, № 5, с. 402-409

Разработка промышленно-ориентированной технологии изготовления полированных пластин InSb диаметром до 100 мм

Козлов Роман Юрьевич^{1,2}, Трофимов А.А.³, Молодцова Е.В.², Павлов П.В.²,
Павлова О.С.², Нестюркин М.С.^{1,2}, Щеников Н.В.²

¹ АО «Гиредмет» им. Н.П. Сажина. Москва. Россия. RYKozlov@rosatom.ru

² НИТУ «МИСИС». Москва. Россия

³ ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия

Development of industry-oriented technology of processing polished wafers InSb UP to 100 mm

R.Y. Kozlov^{1,2}, A.A. Trofimov³, E.V. Molodtsova², P.V. Pavlov², O.S. Pavlova²,
M.S. Nesturkin^{1,2}, N.V. Schenikov²

¹ JSC "State Research and Design Institute of rare-metal industry "Giredmet"
named after N.P. Sazhin, Moscow. Russia. RYKozlov@rosatom.ru

² National Research Technological University "MISIS". Moscow. Russia

³ NPO Orion. Moscow. Russia.

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-204

InSb (indium antimonide) is a semiconductor material that has unique properties such as high electron mobility and high sensitivity to infrared radiation. In the present work the peculiarities of growth of single crystals of indium antimonide and obtaining polished wafers based on them are discussed.

Keywords: InSb, Czochralskii method, polished wafers.

InSb (антимонид индия) - это полупроводниковый материал, который обладает уникальными свойствами, такими как высокая подвижность электронов и большая чувствительность к инфракрасному излучению. В настоящей работе рассматриваются особенности роста монокристаллов антимонида индия и получения полированных пластин на их основе.

Ключевые слова: InSb, метод Чохральского, полированные пластины.

Фоточувствительный материал InSb является наиболее востребованным для производства матричных односпектральных фотоприемников, предназначенных для применения в инфракрасных головках самонаведения (ИК ГСН) 3-го поколения с мгновенным способом пеленгования источников излучения двигателей летательных аппаратов (ЛА) с длиной волны 4-5 мкм (T = 500-900 К) и надежной селекцией при постановке помех пиротехнических генераторов ИК-излучения тепловых ложных целей (ТЛЦ). [1,2] Также полированные пластины антимонида индия используются в качестве подложек

для эпитаксиального роста фоточувствительных слоев [3] и короткопериодных сверхрешеток для создания приборов и устройств микро-, нано-, оптоэлектроники, как народнохозяйственного, так и оборонного значения [4,5].

В России выращивание монокристаллических слитков антимонида индия осуществляется в АО «Гиредмет» [6-10], где в настоящее время завершается разработка промышленно-ориентированной технологии получения полированных пластин InSb диаметром до 100 мм. Производственные мощности АО «Гиредмет» включают в себя современное прецизионное оборудование и обеспечивают полный цикл производства от выращивания монокристаллических слитков различного диаметра до пассивации и консервации полированных пластин InSb в инертную атмосферу.

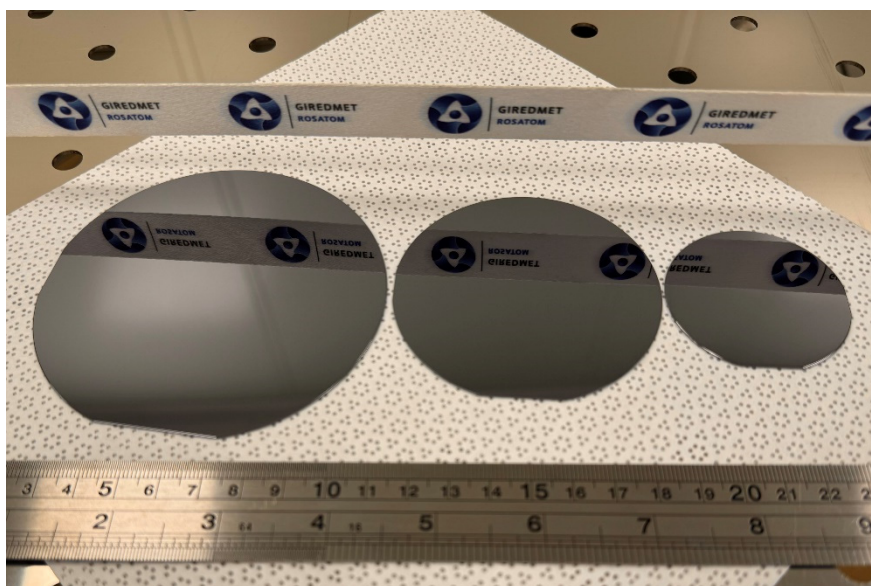


Рис. 1. Полированные пластины InSb диаметром 50,8 мм, 76,2 мм и 100 мм

Для характеристики пластин применяется высокоточное оптическое контрольно-измерительное оборудование, что обеспечивает мониторинг качества на всех этапах изготовления.

В результате в АО «Гиредмет» получены опытные партии полированных пластин InSb с качеством подготовки поверхности на уровне мировых аналогов [11,12].

Литература

1. Patz, Douglas Leonard; McDaniel, Robert Lee. Integrated Focal Plane Array Programs by DARPA (англ.). — Arlington, VA: System Planning Corporation, July 1980. — 33 p.;
2. Петров В. Совершенствование противотанковых средств. // Зарубежное военное обозрение: ежемесячный военно-практический журнал Министерства обороны Союза ССР. — М.: «Красная звезда», 5 января 1984. — №1 — С.36-41 — ISSN 0134-921X;
3. А.Криер, С.Л.Хуанг, А.Хаммиш, J.Phys.D: Appl.Phys., 34 (2001) 874;
4. Сысоев И. А., Катаев В. Ф., Ермолаева Н. В. «Технология получения многослойной эпитаксиальной структуры для термоэлектрического генератора на основе полупроводниковых соединений АЗВ5» // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии, 2010, № 2 (10), стр. 90-96;
5. В. С. Ковшов, А. В. Никонов, Д. А. Пашкеев, Е. А. Лопатина. Современное состояние разработок и исследований сверхрешеток II типа для приборов ИК-фотоэлектроники (обзор) // Прикладная физика. 2021. № 2. С. 97-111;
6. Патент РФ №2482228 от 20.05.2013, Бюл. №14;
7. Комаровский Н.Ю., Молодцова Е.В., Белов А.Г., Гришечкин М.Б., Козлов Р.Ю., и др. Исследование монокристаллов антимонида индия, полученных модернизированным методом Чохральского в различных кристаллографических направлениях. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023;89(8):38-46;
8. Н.Ю. Комаровский, Е.В. Молодцова, А.А. Трофимов, С.С. Кормилицина, В.А. Улькаров, М.С. Нестюркин, А.А. Зареченская, Д.О. Царегородцев. Исследование зависимости прочностных характеристик монокристаллического InSb от кристаллографической ориентации и условий роста // Прикладная физика, 2023, №3, с. 63-72;
9. Р.Ю. Козлов, С.С. Кормилицина, Е.В. Молодцова, Е.О. Журавлев. Выращивание монокристаллов антимонида индия диаметром 100 мм модифицированным методом Чохральского // Известия вузов. Материалы электронной техники, 2021, Т.24, №3, 190-198;
- 10.Абрамова Е. Н., Козлов Р. Ю., Сыров Ю. В., Хохлов А. И., Пархоменко Ю. Н. Современные научные и практические решения в технологии изготовления подложек полупроводниковых соединений АЗВ5. Обзор // Конденсированные среды и межфазные границы, 2024, № 26 (1), с. 3-24;
- 11.Wafer Technology Ltd. URL: <http://www.wafertech.co.uk/>;
- 12.Xiamen PAM Co, Ltd. <https://www.powerwaywafer.com/compound-semiconductor>.

К вопросу о канальной неоднородности в монокристаллах InSb(Te), выращенных в различных кристаллографических направлениях

Комаровский Никита Юрьевич^{1,2}, Молодцова Е.В.¹, Журавлев Е.О.¹,
Козлов Р.Ю.^{1,2}, Князев С.Н.¹

¹ АО «Гиредмет» имени Н.П. Сажина. Москва. Россия.

Nickkomarovskiy@mail.ru

² Национальный исследовательский технологический университет
«МИСИС». Москва. Россия

Revisiting the channel inhomogeneity of InSb grown in different crystallographic directions

N.Y. Komarovskiy^{1,2}, E.V. Molodtsova¹, E.O. Zhuravlev¹, R.Y. Kozlov^{1,2},
S.N. Knyazev¹

¹ JSC "State Research and Design Institute of rare-metal industry "Giredmet"
named after N.P. Sazhin, Moscow, Russia e-mail: *Nickkomarovskiy@mail.ru*

² National Research Technological University "MISIS", Moscow, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-207

To produce FPA by molecular beam epitaxy (MBE), InSb (indium antimonide) with crystallographic orientation (111) is used. Wafers (111) can be obtained both from single crystals grown in the [211], [100] and [110] directions, and from single crystals [111]. The development of MBE technology determines the relevance of obtaining InSb (111) wafers without channel inhomogeneity, since cutting wafers at large angles relative to the growth direction is often economically impractical. In connection with this fact, the optimal solution to this problem is the selection of thermal and dynamic parameters of the growth process.

Для изготовления матричных ФПУ методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) применяется InSb (антимонид индия) с кристаллографической ориентацией (111). Пластины (111) могут быть получены как из монокристаллов, выращенных в направлениях [211], [100] и [110], так и из монокристаллов [111]. Развитие технологии МЛЭ обуславливает актуальность получения пластин InSb (111) без канальной неоднородности, поскольку рез пластин под большими углами относительно направления выращивания является, зачастую, экономически нецелесообразным. В связи с данным фактом, оптимальным решением данной задачи является подбор тепловых и динамических параметров ростового процесса.

Монокристаллический антимонид индия, по-прежнему, является одним

из основных полупроводниковых материалов, составляющих элементную базу значительной области твердотельной электроники — оптоэлектроники. На его основе изготавливаются линейные и матричные фотоприемники, работающие в спектральном диапазоне длин волн 3-5 мкм, которые используются в качестве фоточувствительного элемента в системах тепловидения [1].

Наибольшее распространение получили подложки InSb с кристаллографической ориентацией (100), вырезанные из монокристаллов, выращенных в направлении [100]. В настоящее время все более широко применяются подложки InSb с кристаллографической ориентацией (111), в связи с применением молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) при изготовлении матричных ФПУ. Пластины (111) могут быть получены как из монокристаллов, выращенных в направлениях [211], [100] и [110], так и из монокристаллов [111] (рис. 1).

Гномостереографические проекции плоскостей семейств: ● {100} ● {111} ● {112}



Рис. 1. Разметка слитка под резку, исходя из положения гномостереографических проекций соответствующих плоскостей [2]

Для устойчивого роста монокристаллов InSb методом Чохральского были подобраны температурные и динамические условия выращивания, во многом определяющие геометрию фронта кристаллизации. Отличительной особенностью кристаллов, выращенных в направлении [111] является формирование канальной неоднородности в центре кристалла, обусловленной активным захватом легирующих атомов плоскостями с наибольшей ретикулярной плотностью – {111} (рис. 2).

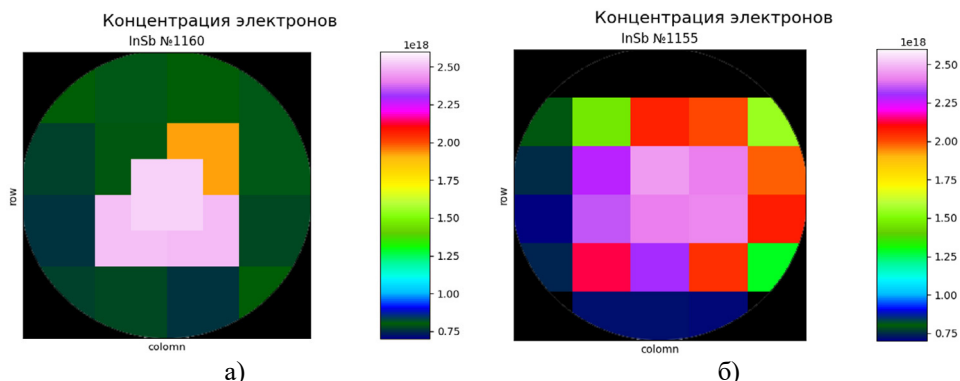


Рис. 2. Концентрационная неоднородность в конце монокристалла InSb [111]
а) – начало; б) – конец

В свою очередь в монокристаллах [100], [110], [112], такая неоднородность наблюдается в виде небольших сегментов и исчезает при выходе кристалла на диаметр.

Как было сказано выше, развитие технологии МЛЭ обуславливает актуальность получения пластин InSb (111) без канальной неоднородности, поскольку рез пластин под большими углами относительно направления выращивания (рис. 1) является, зачастую, экономически нецелесообразным. В связи с данным фактом, оптимальным решением данной задачи является подбор тепловых (модернизации теплового узла ростовой печи) и динамических (скорость вращения затравочного кристалла и тигля с расплавом) параметров ростового процесса.

Литература

1. Гринченко Л. Я., Пономаренко В. П., Филачев А. М. Современное состояние и перспективы ИК-фотоэлектроники // Прикладная физика. 2009. No 2. С. 57—62;
2. Комаровский Н. Ю. и др. Исследование зависимости прочностных характеристик монокристаллического InSb от кристаллографической ориентации и условий роста // Прикладная физика. – 2023. – №. 3. – С. 63.

Некоторые тенденции развития технологий выращивания объемных кристаллов фотоники

Сатункин Г.А.¹, Наумов Аркадий Валерьевич²

¹ *Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых
материалов РАН. Черноголовка. МО. Россия*

² *АО «ОКБ «АСТРОН». Лыткарино. МО. Россия. info@astrohn.ru*

Some trends in progress of photonics bulk crystals growth

Satunkin G.A.¹, Naumov A.V.²

¹ *FSBI Institute of Microelectronics Technology and Special Clean Materials of the
RAS. Chernogolovka. Moscow Region*

² *JSC "Optical and Mechanical Design Bureau Astron," Lytkarino. Moscow Region.
info@astrohn.ru*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-210

The stability and nonlinear dynamics of crystal growth by the "vertical Bridgeman" method were analyzed. The crystal grew without contact of the crystal with the crucible walls. On the example of the cadmium-zinc-tellurium crystal, mathematical modeling of the dynamics of transient processes was carried out, it was shown that the mechanical forces caused by surface tension and pressure in the upper and lower menisci should remain in equilibrium. It has been shown that it is possible to obtain crystals from the melt using an additional control channel - variable pressure in the meniscus of the melt.

Проанализированы стабильность и нелинейная динамика роста кристалла методом «вертикального Бриджмена», без контакта растущего кристалла со стенками тигля. На примере кристалла кадмий-цинк-теллур проведено математическое моделирование динамики переходных процессов, показано, что механические силы, вызванные поверхностным натяжением и давлением в верхнем и нижнем менисках, должны оставаться в равновесии. Показано, что возможно получение кристаллов из расплава с использованием дополнительного канала управления - переменного давления в мениске расплава.

Несмотря на значительные успехи в области фундаментальных исследований и многочисленные новые технологические разработки, задача получения однородных, высокого оптического качества монокристаллов остается крайне актуальной. Это связано с повышенными требованиями к качеству кристаллов для новых приложений в оптоэлектронике. Можно утверждать, что пришла новая волна революционных изменений в работах по всем кристаллам, выращиваемым по новым технологиям и на обновленном оборудовании. Так, например, наблюдаемое отделение закристаллизовавшийся

части расплава от стенки тигля в росте Бриджмена впервые наблюдалось как незапланированное спонтанное явление в опыте микрогравитации [1-3]. В этом режиме роста, изображенном на рис. 1, кристалл растет без контакта с ампулой.

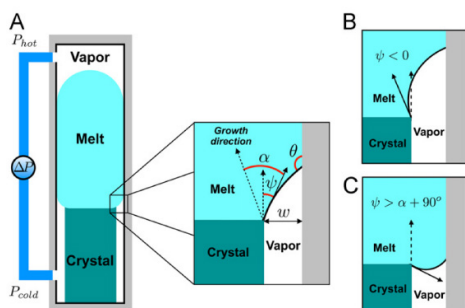


Рис.1. Выращивание кристалла методом «отделенного» Бриджмена

Вместо этого имеется узкий зазор, в котором находится газ. Расплав над зазором поддерживается жидким мениском, который соединяет линию существования трех фаз кристалла со стенкой ампулы. Выращивание методом Бриджмена без контакта кристалла со стенками оснастки открывает возможность получения принципиально новых качеств кристалла.

Нами проанализировано существование, стабильность и нелинейная динамика отдельных состояний роста кристалла по «отделенному Бриджмену» [4]. Чтобы «отделенный» рост сохранялся, механические силы, вызванные поверхностным натяжением и давлением в верхнем и нижнем менисках, должны оставаться в равновесии. Критические переменные, влияющие на этот баланс, показаны на рис. 1. На примере кристалла кадмий-цинк-теллур мы провели математическое моделирование динамики переходных процессов, ранее проведенное для обычного способа Бриджмена. Показано, что возможно получение кристаллов из расплава с использованием дополнительного канала управления - переменного давления в мениске расплава. Расчетные результаты, полученные нами, показывают, что контроль давления может стабилизировать «отделенный» рост в реальных условиях процесса, но при определенных ограничениях. Пределы накладываются ограниченным диапазоном форм, которые могут быть приняты нижним мениском, как показано на рис. 1.

Представляется крайне необходимым постановка работ по созданию прототипа технологии получения высококачественных монокристаллов сложного состава описанным методом.

Литература

1. W.R. Wilcox, J.F. Yee, M.C. Lin, K. Sarma, S. Sen, Directional solidification of InSb–GaSb alloys, in: G.W. Morganthaler, G.E. Simonson (Eds.), Skylab Space Experiments, American Astronautical Society, Tarzana, 1975, pp. 27–41.
2. A.F. Witt, H.C. Gatos, M. Lichtensteiger, M.C. Lavine, C.J. Herman, Crystal growth and steady-state segregation under zero gravity: InSb, Journal of Electrochemical Society 122 (1975) 276–283.
3. J.T. Yue, F.W. Voltmer, Influence of gravity-free solidification on solute microsegregation, Journal of Crystal Growth 29 (1975) 329–341.
4. T. Duffar, Bulk crystal growth under microgravity conditions, in: P. Capper (Ed.), Bulk Crystal Growth of Electronic, Optical, and Optoelectronic Materials, John Wiley & Sons, West Sussex, UK, 2005, pp. 477–524.

Исследование 100 мм пластин Ge, предназначенных для эпитаксиальных процессов

Малыгин Владислав Анатольевич¹, Косякова А.М.¹, Гончаров А.Е.¹,
Гладышева К.А.¹, Кулаковская Т.В.², Топиков Д.В.², Трофимов А.А.¹

¹ ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва, Россия. mva1431@yandex.ru

² АО «Германий». Красноярск, Россия

Investigation of 100 mm Ge substrates intended for epitaxial processes

Malygin Vladislav Anatolievich¹, Kosyakova A.M.¹, Goncharov A.E.¹,
Gladysheva K.A.¹, Kulakovskaya T.V.², Topakov D.V.², Trofimov A.A.¹

¹ Orion R&P Association, JSC, Moscow, Russia

² Germanium, JSC, Krasnoyarsk, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-212

Germanium is one of the most important strategic rare metals. It transmits radiation in the range of 2-16 microns and has a high refractive index, which makes it possible to obtain high optical power of devices in the range of 8-12 microns. Currently, the application of germanium shows great potential in solar energy. In recent years, cooperation between JSC Germanium and Orion R&P Association in terms of quality research of Ge plates and correction of technological processes has led to an improvement in the parameters of the products obtained.

Германий – один из важнейших стратегических редких металлов. Сегодня сфера его применения охватывает наукоемкие технологии, связанные с космическими исследованиями, волоконно-оптическими линиями связи, инфракрасной техникой и тепловидением, катализаторами и т.д. [1]. Этот элемент является наиболее подходящим для линз и окон инфракрасных оптических систем. Германий пропускает излучение в интервале 2-16 мкм и имеет высокий коэффициент преломления, что позволяет получить высокую оптическую мощность приборов в диапазоне 8-12 мкм. Именно в этом диапазоне работают системы для обнаружения объектов по их собственному излучению как военного, так и гражданского назначения.

Одним из крупнейших производителей германиевой продукции в России и в мире является компания АО «Германий» (г. Красноярск) холдинга АО «Швабе», обладающая полным производственным циклом, начиная с гидрометаллургического процесса разложения исходного сырья до получения следующей продукции, а именно:

- тетрахлорид германия особой чистоты для волоконно-оптических линий связи;

- диоксид германия разных марок, для производства РЕТ-пластика и т.д.;
- гранулы из германия, используемые в ювелирном деле и электронике;
- германий поликристаллический зонноочищенный, применяемый для выращивания монокристаллов германия различных марок;
- изделия из германия для ИК-оптики в виде линз, пластин и прямоугольных окон;
- полированные подложки из германия для производства фотоэлектрических преобразователей.

Основным видом бортовых энергоустановок на подавляющем большинстве существующих и разрабатываемых в нашей стране и за рубежом космических аппаратов являются солнечные батареи с полупроводниковыми фотоэлектрическими преобразователями на основе германия [2]. В настоящее время основным солнечным элементом, применяемым в космической отрасли, является трехкаскадный солнечный элемент из A^3B^5 соединений GaInP/GaAs/Ge. Обладая большей эффективностью фотопреобразования, трехкаскадные солнечные элементы на подложке из германия являются более радиационно-стойкими в сравнении с кремниевыми солнечными элементами, что делает их наиболее привлекательными для применения в космической отрасли [3].

Для изготовления таких подложек требуются монокристаллы германия с повышенными требованиями к структурным характеристикам, так как наличие дислокаций приводит к несоответствию параметров кристаллических решеток германия и соединений A^3B^5 , препятствуя росту высококачественных эпитаксиальных слоев на германиевой подложке [4]. С другой стороны, качество чистоты поверхности полированных подложек (epi-ready), количество и размер поверхностных дефектов, следы высыхания, невидимые невооруженным взглядом, могут привести к локальному неравномерному эпитаксиальному росту [5].

Неравномерный эпитаксиальный рост является одной из актуальных проблем при создании Ge подложек. Эта проблема может быть вызвана шероховатостью поверхности, кристаллическими ямками, частицами загрязнений или неоднородными слоями собственного оксида. Площадь и плотность этих дефектов будут определять влияние на эпитаксиальный рост и конечную производительность солнечного элемента.

Крупнейший зарубежный производитель высокотехнологичной продукции из германия, включая полированные epi-ready подложки, компания Umicore (Бельгия) также столкнулась с подобной проблемой и применяет различные виды очистки пластин для повышения качества поверхности (рис. 1) [5].

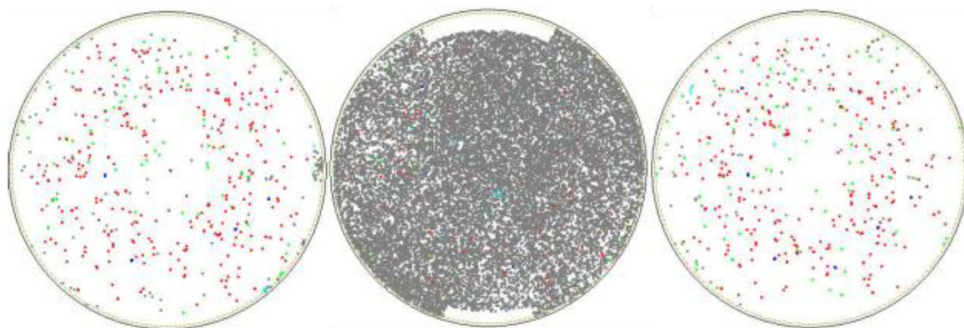


Рис. 1. Чистая, загрязненная и повторно очищенная пластина (слева направо) компании Umicore, исследованная с помощью прибора KLA-Tencor Candela

В условиях жестких санкционных ограничений и необходимости развития отечественных наукоемких технологий для обеспечения импортозамещения и технологического суверенитета страны повышение качества подложек из германия для производства фотоэлектрических преобразователей является актуальной задачей. В рамках технологического сотрудничества АО «НПО «Орион» (г. Москва) проводит исследования опытных партий германиевых подложек производства АО «Германий» (г. Красноярск) с помощью имеющегося аналитического оборудования, что позволяет по полученным результатам оперативно корректировать технологические процессы, обеспечивая стабильное повышение качества и увеличение выхода годных полированных 100 мм подложек Ge (рис. 2).

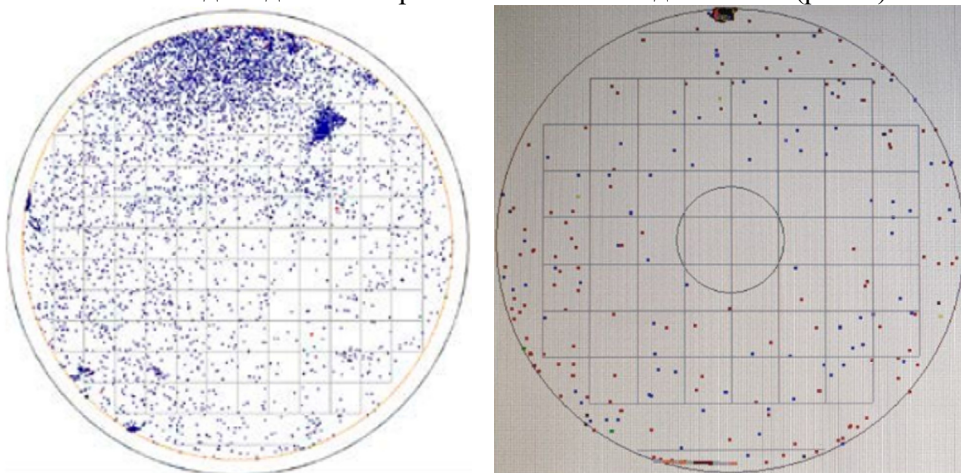


Рис. 2. Сравнение чистоты поверхности Ge пластин производства АО «Германий» (г. Красноярск) ранее (2015 г.) и в настоящее время (2024 г.).

Применение результатов исследований и корректирование технологического процесса изготовления германиевых пластин привело к

увеличению эффективности фотопреобразования трехкаскадных солнечных элементов GaInP/GaAs/Ge, получаемых на отечественных пластинах Ge производства АО «Германий». Наблюдается стабилизация всех основных электрических параметров солнечных элементов: плотности тока короткого замыкания, напряжения холостого хода. Достигнутое значение КПД (29%) соответствует мировому уровню.

Литература

1. Claeys Cor L. Germanium-based technologies: from materials to devices/ L. Cor Claeys, E. Simoen – Berlin [etc.]: Elsevier, 2007.
2. Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, В.Д. Румянцев. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики/Физика и техника полупроводников, 2004, том 38, вып.8.
3. Скачков А.Ф. Состояние и перспектива развития многокаскадных солнечных элементов космического назначения/А.Ф. Скачков, Г.И. Юрко//Перспективные системы и задачи управления: материалы Всерос.научно-прак. конф. (Ростов-на-Дону, 6-10 апреля 2015 г.). – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015, т.2.
4. О.М. Алимов, К.Е. Аношин, А.В. Наумов. Особенности выращивания низкодислокационных кристаллов германия большого диаметра методом Чохральского/ Известия вузов. Материалы электронной техники, 2015, т.18, №4.
5. The next generation of germanium substrates: EXPOGER™/Pieter Arickx, Rufi Kurstjens, Wim Geens, Kristof Dessein//E3S Web of Conferences 16, 03010 (2017).

Структурные и оптические свойства InAs/GaSb сверхрешеток полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии

Кривобок Владимир Святославович^{1,2}, Ерошенко Г.Н.¹, Минаев И.И.¹,
Клековкин А.В.¹, Савин К.А.¹, Гончаров А.Е.², Муратов А.В.¹, Дубовая А.Р.^{1,3},
Николаев С.Н.¹

¹ *Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН. Москва. Россия.
krivobokvs@lebedev.ru*

² *ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия*

³ *Московский физико-технический институт. Долгопрудный. МО. Россия*

Structural and optical properties of InAs/GaSb superlattices grown by molecular beam epitaxy

Krivobok V.S.^{1,2}, Eroshenko G.N.¹, Minaev I.I.¹, Klekovkin A.V.¹, Savin K.A.¹,
Goncharov A.E.², Muratov A.V.¹, Dubovaya A.R.^{1,3} Nikolaev S.N.¹

¹ *P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow,
Russia krivobokvs@lebedev.ru*

² *Orion R&P Association Inc. Moscow. Russia*

³ *Moscow Institute of Physics and Technology. Dolgoprudny. Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-216

Series of type two InAs/GaSb superlattices (SL) were obtained by molecular beam epitaxy, their structure and optical properties were studied using XRD, TEM, AFM and IR reflection spectroscopy. It is shown that the reflection spectra measured at different temperatures enable one to separate a contributions from the phonon subsystem, SL mini-zones and the interference governed by finite SL thickness.

В настоящий момент фотодетекторы на основе короткопериодных сверхрешеток (СР) второго типа вызывают большой интерес. Использование детекторов в среднем ИК диапазоне на их основе можно рассмотреть, как альтернативу для систем кадмий-ртуть-теллур (HgCdTe) и фотодетекторов на полупроводниковых квантовых ямах (QWIP) [1]. InAs и GaSb являются популярной парой для реализации системы СР, которые находятся в группе постоянной решеткой 6,1 Å. Основными преимуществами таких структур является возможность подавления Оже-рекомбинации [2,3] и межзонного туннелирования за счет высокой подвижности и большой эффективной массы электронов [4], а также отсутствие ограничений, связанных с правилами отбора для оптических переходов [5].

В данной работе серия короткопериодных InAs/GaSb СР получена методом молекулярно-лучевой эпитаксии на GaSb (100) подложках. Качество

поверхности, структурное совершенство и параметры слоев СР подтверждены с помощью атомно-силовой микроскопии, рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной микроскопии. В частности, рис. 1а,б иллюстрирует атомарную структуру слоев сверхрешетки с периодом 7.5 нм, и ее кривую качания записанную вблизи рефлекса (004). Соотношение толщин слоев InAs и GaSb в сверхрешетке $d_{\text{InAs}}/d_{\text{GaSb}} = 0.5$, что подтверждается приведенными на рис. 1б экспериментальными данными. Для управления интерфейсами сверхрешеток использовалась процедура, описанная в работе [6].

Для исследования электронной подсистемы сверхрешеток применялась ИК Фурье – спектроскопия в широком диапазоне температур, см. спектры на рис. 1в. Как видно из рисунков, в низкочастотной части спектров регистрируется выраженный резонанс, возникающий за счет взаимодействия оптических фононов сверхрешетки с электромагнитным излучением. В высокочастотной части спектра регистрируются осцилляции, вызванные интерференцией излучения на толщине сверхрешетки. Данные особенности не претерпевают заметной перестройки при изменении температуры. В то же время, при температуре 77 К в районе 1000 см^{-1} регистрируется пик, который заметно смещается в низкочастотную область с увеличением температуры до 300К. Данная перестройка спектра исключает связь пика в районе 1000 см^{-1} с фононами или интерференционными эффектами. В то же время, именно такого поведения, согласно моделированию электронного спектра, следует ожидать для резонансной особенности, вызванной переходами между электронной и дырочной минизонами СР. Количественный анализ спектров отражения, опирающийся на расчеты в рамках метода огибающей волновой функции, позволил восстановить комбинированную плотность состояний и оценить структуру минизон выращенной серии СР. Совокупность полученных экспериментальных данных создает предпосылки для разработки бесконтактных методов анализа одноэлектронного спектра СР востребованных в ИК фотосенсорике.

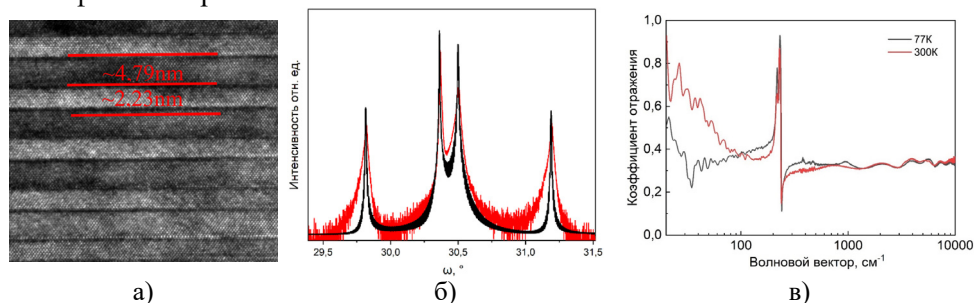


Рис. 1. Визуализация слоев СР с помощью электронной микроскопии (а), рентгеновская кривая качания СР и ее аппроксимация (б), Спектр ИК отражения СР в широком диапазоне (в).

1. Xie L., Wang G., Sun Q. Advances and trends of type-II superlattice infrared detectors //AOPC 2020: Infrared Device and Infrared Technology. – 2020. – Т. 11563. – С. 121-126.
2. Grein C. H., Cruz H., Flatte M. E., Ehrenreich H. Theoretical performance of very long wavelength InAs/In_xGa_{1-x}Sb superlattice based infrared detectors //Applied Physics Letters. – 1994. – Т. 65. – №. 20. – С. 2530-2532.
3. Rogalski A., Antoszewski J., Faraone L. Third-generation infrared photodetector arrays //Journal of applied physics. – 2009. – Т. 105. – №. 9. – С. 4.
4. Rogalski A. Recent progress in infrared detector technologies //Infrared Physics & Technology. – 2011. – Т. 54. – №. 3. – С. 136-154.
5. Литвинов Д.А. и др. Исследование одноэлектронного спектра GaAs/AlGaAs-гетероструктуры для фотодетекторов среднего ик диапазона с помощью измерений низкотемпературной люминесценции //Краткие сообщения по физике Физического института им. ПН Лебедева Российской Академии Наук. – 2020. – Т. 47. – №. 4. – С. 9-16.
6. Krivobok V.S. et al. Interface Design Development for Growing Short-Period InAs/GaSb Superlattices by Molecular-Beam Epitaxy //Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2023. – Т. 50. – №. 9. – С. 396-402.

Спектроскопия сульфидов олова и европия, синтезированных при высоком давлении

Николаев Сергей Николаевич¹, Екимов Е.А.^{1,2}, Усманов И.И.¹, Кондрин М.В.²,
Чернопицкий М.А.¹, Кривобок В.С.^{1,3}

¹ *Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН. Москва. Россия*

² *Институт физики высоких давлений им. Л.Ф.Верещагина РАН. Троицк.
Россия*

³ *ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия. nikolaevsn@lebedev.ru*

Spectroscopy of tin and europium sulfides synthesized at high pressure
Nikolaev Sergey Nikolaevich¹, Ekimov E.A.^{1,2}, Ivanova A.G.³, Usmanov I.I.¹,
Kondrin M.V.², Chernopitsky M.A.¹, Krivobok V.S.^{1,4}

¹*Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Vereshchagin Institute for High Pressure Physics. RAS. Troitsk. Moscow. Russia*

³*Orion R&P Association Inc. Moscow, Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-219

The study analyzed the properties of semiconductor materials synthesized in the Sn-Eu-S system using the HPHT method. Optical and structural characteristics of layered compounds SnS₂ and EuS₂ obtained during growth were investigated. Formation of microcrystals of 2H-SnS₂ and diamond was observed during synthesis from elemental components of tin and sulfur. The luminescent properties of the CSn center in SnS₂ were thoroughly examined, demonstrating the efficiency of CSn center emission even at room temperature. The crystalline structure of EuS₂ was determined, and anisotropy of raman spectra lines was observed and described.

В физике полупроводников заметное место занимает раздел, связанный со слоистыми материалами. Особое внимание обращено на халькогениды переходных металлов, особенно их пленки толщиной в единицы монослоев. Важным фактором является возможность комбинирования различных слоистых материалов, что открывает новые перспективы для исследования. В этой связи представляет интерес синтез слоистых соединений, обладающих нестандартными свойствами.

Несмотря на значительные успехи в эпитаксиальном росте слоистых полупроводников, top-down методы получения атомарно-тонких полупроводниковых пленок остаются востребованными для фундаментальных исследований. В данной работе исследовались полупроводниковые материалы, которые можно синтезировать при высоких давлениях в системе Sn-Eu-S, а также изучались их оптические и структурные характеристики.

Были проведены процессы НРТ синтеза с различной комбинацией исходных материалов. При синтезе SnS_2 из элементарных олова и серы в графитовой капсуле обнаружена смесь микрокристаллов SnS_2 и алмаза. Анализ спектров комбинационного рассеяния света (КРС) и рентгеновской дифракции подтвердил наличие микрокристаллов SnS_2 (2H-политип) с высокой кристаллическостью. Спектр КРС был представлен двумя узкими пиками A_{1g} (310 cm^{-1}) и E_g (201 cm^{-1}), характерными для 2H- SnS_2 , и пиком в районе 270 cm^{-1} .

Кристаллы SnS_2 демонстрируют интенсивную ФЛ в ближнем ИК-диапазоне, связанную с новым центром люминесценции углерода на подрешетке олова. При 5 К это излучение C_{Sn} представлено узкой бесфононной линией с длиной волны 885 нм (1,4 эВ) и фононными сателлитами. Полоса ФЛ обладает регулярной структурой с периодом 270 cm^{-1} (33.6 мэВ). Уровень интенсивности излучения C_{Sn} -центра падает слабо с ростом температуры (около 5 раз от 5 до 300 К), а при температуре выше 200 К происходит перестройка спектра ФЛ.

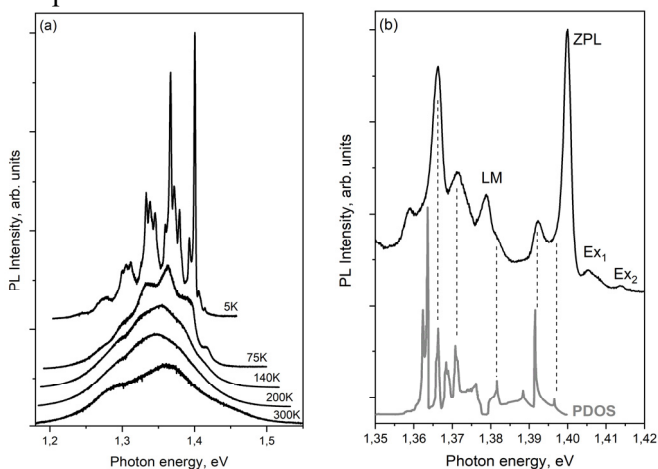


Рис. 1. Спектры излучения C_{Sn} , записанные при различных температурах и нормированные на интегральную интенсивность (а) и тонкая структура излучения C_{Sn} в области бесфононного перехода при температуре 5 К (б).

Добавление Eu в ростовую камеру привело к образованию новой слоистой фазы EuS_2 . Анализ рентгеновской дифракции на монокристалле позволил определить его кристаллическую решетку и точечную группу симметрии ($P2_1/a$, #14-1). Исследование спектров КРС кристаллов EuS_2 , разрешенных по поляризации, выявило анизотропию интенсивности полос с волновыми векторами 400 и 411 cm^{-1} для A_g и B_g фононных мод. Разработан метод определения кристаллографических направлений в EuS_2 на основе поляризационных зависимостей спектров КРС. Электрофизические

исследования кристаллов EuS_2 показали, что это полупроводник р-типа с шириной запрещенной зоны около 0.9 эВ.

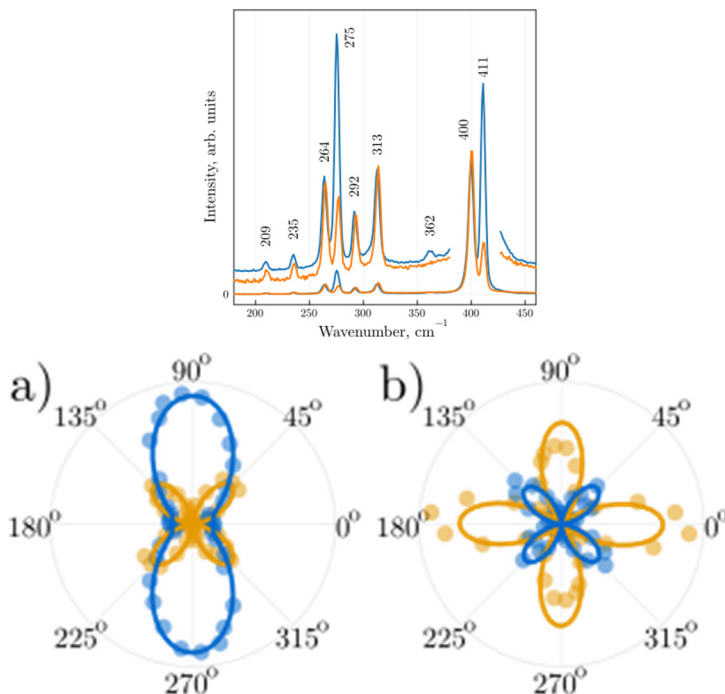


Рис. 2. Спектры КРС двух кристаллов EuS_2 при температуре 80 К. Угловые зависимости интенсивности КРС линий 400 и 411 cm^{-1} . В параллельных (а), скрещенных (б) поляризаторах

Методом НРНТ в системе Sn-Eu-S были синтезированы алмаз, SnS_2 и EuS_2 . Исследованы люминесцентные свойства C_{Sn} центра в 2Н политипе SnS_2 в широком диапазоне температур, выявлена высокая эффективность излучения C_{Sn} при комнатной температуре, а также признаки структурной перестройки центра при температуре более 200 К. Определена кристаллическая структура новой моноклинной фазы EuS_2 и ее точечная группа симметрии ($P2_1/a$, #14-1). Обнаружена поляризационная зависимость спектров КРС EuS_2 обусловленная различием тензоров КРС для A_g и B_g фоновых мод.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-22-00444.

Исследование влияния постростового отжига на дислокационную структуру кристаллов германия

Григорович Андрей Павлович^{1,2}, Кулаковская Т.В.¹, Шиманский А.Ф.²,
Каплунов И.А.³, Васильева М.Н.²

¹*АО «ГЕРМАНИЙ». Красноярск. Россия. gar-97@yandex.ru*

²*Сибирский федеральный университет. Красноярск. Россия*

³*Тверской государственный университет. Тверь. Россия*

Investigation of the effect of post-growth annealing on the dislocation structure of germanium crystals

Grigorovich Andrey P.^{1,2}, Kulakovskaya T.V.¹, Shimanskii A.F.², Kaplunov I.A.³,
Vasilyeva M.N.²

¹*JSC «Germanii». Krasnoyarsk. Russia*

²*Siberian Federal University. Krasnoyarsk. Russia*

³*Tver State University. Tver. Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-222

The results of a study of the influence of post-growth annealing directly in the growth installation before the start of cooling on the dislocation density in germanium single crystals are presented. It has been established that the use of annealing increases the structural perfection of crystals and reduces the dislocation density by an average of five times.

Основным типом дефектов, оказывающих значительное влияние на структурное совершенство и свойства кристаллов германия, являются дислокации. Высокая плотность дислокаций затрудняет применение кристаллов в оптике, детекторах ионизирующих излучений и исключает возможность их использования в фотовольтаике в качестве подложек для эпитаксиальных структур типа GaInP/GaInAs/Ge, являющихся основой фотопреобразователей с высоким КПД. Наличие дислокаций вызывает несоответствие параметров кристаллических решеток Ge и соединений АПВВ, препятствуя росту высококачественных эпитаксиальных слоев на германиевой подложке.

Цель работы – исследование влияния постростового отжига, непосредственно в ростовой установке перед началом охлаждения [2], на плотность дислокаций в монокристаллах германия, выращенных по методу Чохральского.

Выращивание производили на установке «TDR-Z80A» в среде вакуума с использованием теплового узла, состоящего из двух графитовых нагревателей,

основного и дополнительного, – для нагревания боковой поверхности слитка. Направление роста кристаллов – [100]. Для контроля распределения температуры в тепловом узле размещали термпары на различной высоте от поверхности расплава.

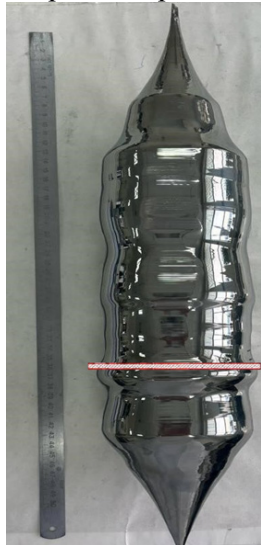


Рис. Фотография кристалла

Выращены шесть экспериментальных кристаллов диаметром ~ 100 мм с длиной цилиндрической части ~ 300 мм, три из которых подвергались постростовому отжигу. На рисунке представлена фотография одного из полученных кристаллов и показано положение плоскости, в которой определялась плотность дислокаций. Отжиг производили в течение 40 ч в изотермических условиях при температуре 700 °С (выше температуры пластической деформации германия) после отрыва кристалла от расплава и выравнивания температуры по всему объему. В завершение процесса производилось снижение температуры до температуры окружающей среды. В таблице представлены результаты определения плотности дислокаций в экспериментальных кристаллах.

Таблица – Плотность дислокаций в экспериментальных кристаллах

Образцы	Без отжига			С отжигом		
	1	2	3	4	5	6
Плотность дислокаций $N_d, \text{см}^{-2}$	318	369	283	105	54	14

По результатам экспериментов можно заключить, что использование постростового отжига кристаллов германия, непосредственно в ростовой установке перед началом охлаждения, повышает их структурное совершенство и снижает плотность дислокаций более чем в пять раз.

Работа выполнена в рамках государственного задания на науку ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», проект FSRZ-2020-0013.

Литература

[1] Luque A., Hegedus S. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. 1st edn. – Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2003. – 1138 p.

[2] Пат. 2261295 РФ, МПК С30В 15/00 (2000.01), С30В 29/08 (2000.01), С30В 33/02 (2000.01). Способ выращивания монокристаллов германия / Смирнов Ю.М., Каплунов И.А., Колесников А.И.; опубл. 27.09.2005, Бюл. № 27.

[3] А.с. 797275 СССР С30В 15/00, С30В 29/22. Способ выращивания монокристаллов оксидных соединений со структурой силленита / Шадеев Н.И., Кутвицкий В.А., Шиманский А.Ф. и др.; Красноярский институт цветных металлов. – № 2707231/22-26; 27.12.78.

Моделирование и оптимизация электрооптического эффекта в модуляторе Маха-Цендера на технологической платформе InP

Гришаков Константин Сергеевич, Васильевский И.С.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». Москва.
Россия, ksgrishakov@mephi.ru*

Modeling and optimization of electro-optical effect in InP based Mach-Zehnder modulator

Grishakov Konstantin S., Vasil'evskii I.S.

National research nuclear university "MEPhI", Moscow, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-224

Using a numerical solution of the exciton problem in momentum space, the absorption spectra and refractive index changes in the presence of a constant electric field are calculated for structures with coupled quantum wells based on InGaAlAs, which are used as an active region in InP based Mach-Zehnder modulators. The effect of introducing mechanically strained InAs and GaAs nanoinserts into quantum wells on the electro-optical effect has been studied. The possibility of a significant increase in the electro-optical effect beyond the absorption edge at a wavelength of about 1.55 μm using mechanically strained GaAs nanoinserts has been demonstrated.

Электрооптический модулятор Маха–Цендера на технологической платформе InP с активным волноводом, образованным множеством квантовых ям (КЯ), является одним из перспективных кандидатов для высокоскоростной оптической связи и фотонных интегральных схем. Задача состоит в том, чтобы в активной области модулятора под действием электрического поля получить большие изменения показателя преломления с малыми потерями на поглощение на рабочей длине волны ≈ 1.55 мкм. Ранее было показано, что использование различных гетероструктур с двумя туннельно-связанными КЯ позволяет достичь усиления электрорефрактивного эффекта (изменение показателя преломления под действием электрического поля) на порядок по сравнению со структурами с одиночной прямоугольной КЯ [1, 2]. Однако расчеты в этих работах проводились в упрощенных постановках задачи, в частности применялся вариационный принцип для нахождения энергии экситонов и силы осцилляторов.

В данной работе, используя численное решение экситонной задачи в импульсном пространстве, проведены расчеты спектров поглощения и изменений показателя преломления при наличии постоянного электрического поля для структур с туннельно-связанными КЯ на основе InGaAlAs. Впервые

исследовано влияние на электрооптический эффект введения в КЯ механически напряженных нановставок InAs и GaAs. Показана возможность существенного увеличения электрооптического эффекта за краем поглощения на длине волны ≈ 1.55 мкм при использовании таких нановставок. Введение напряженных нановставок в КЯ позволяет эффективно управлять энергией и волновой функцией дырок в гетероструктурах InAlGaAs на подложках InP, а, следовательно, и их оптическими свойствами [3]. Впервые предложенный в данной работе новый подход к квантовому дизайну гетероструктур модуляторов в перспективе позволит улучшить их параметры, в частности, позволит снизить полуволновое напряжение, уменьшить габариты модулятора.

Работа выполнена в рамках государственного задания (код проекта FSWU-2024-0009).

1. Zolotarev V. V., Shashkin I. S., Golovin V. S. et al. *Semicond. Sci. Technol.* 2019. Vol. 34. P. 095005.

2. Zhou P., Nakano Y., Tanemura T. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2020. Vol. 59. P. 082004.

3. Галиев Г. Б., Васильевский И.С., Климов Е.А. и др. *Физика и техника полупроводников.* 2015. Т. 49 (9). С. 1243

Исследование влияния различных бром-содержащих компонентов при получении чернил ККТ HgSe на свойства фотосенсоров на их основе

Хахимов Карим Тимурович¹, Королева Т.В.¹, Миленкович Т.¹, Сапцова О.А.¹,
Яковлев В.О.¹, Шуклов И.А.¹, Попов В.С.^{1,2}

¹ *Московский физико-технический институт. Долгопрудный. МО. Россия.*

Karim.Khakimov@gmail.com

² *ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия*

Study of the effect of various bromine-containing components during ink preparation on the properties of photosensors based on HgSe CQDs

Khakimov Karim T.¹, Koroleva T.V.¹, Milenkovich T.¹, Saptsova O.A.¹,
Yakovlev V.O.¹, Shuklov I.A.¹, Popov V.S.^{1,2}

¹ *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University).*

Moscow region. Dolgoprudny. Russia

² *Orion R&P Association Inc. Moscow. Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-226

One of the potential materials for MWIR optoelectronics are HgSe colloidal quantum dots. Preparing the HgSe CQD ink is one of the essential steps in producing photosensors which properties can be affected by applying certain bromine-containing components. This work discusses effect of various bromine-containing components on optical and electronic properties of photosensors.

В последнее время активно развивается направление фотосенсорики основанной на использовании в качестве фоточувствительного материала коллоидных квантовых точек (ККТ) [1]. Подбирая подходящим образом материал и размер ККТ можно создавать фоточувствительные приборы для различных частей инфракрасного (ИК) спектра. Уже существуют коммерческие приборы на основе ККТ способные регистрировать коротковолновое ИК излучение, однако разработка фотосенсоров на средневолновый (MWIR) и длинноволновый (LWIR) ИК диапазон находятся на ранних стадиях [1]. На данный момент существует несколько материалов потенциально применимых для MWIR-фотодетекторов: HgTe, HgSe, HgS, Ag₂Se [2].

ККТ HgSe привлекают внимание в качестве фоточувствительного материала при создании фотосенсоров на MWIR и LWIR диапазоны. Данный материал привлекателен тем, что он более устойчив к окислению, чем, например, HgTe [3], а также тем, что для него характерны внутризонные

переходы, способные обеспечить фоточувствительность не только в диапазоне 3-5 мкм, но и в диапазоне 8-14 мкм и далее [4].

Синтез и постсинтетическая обработка ККТ влияют на свойства создаваемых фоточувствительных элементов. В ходе постсинтетической обработки ККТ проводят замену лигандов стабилизирующих ККТ во время синтеза на другие, более короткие, не снижающие электрофизических свойств ККТ в фоточувствительных слоях [5]. Одним из подходов к постсинтетической обработке является изготовление суспензий пригодных для формирования слоев ККТ методами спин-коутинга или печати, так называемых чернил. Одним из важных аспектов в получении чернил на основе ККТ является эффективность замены лигандов на поверхности ККТ, и блокирование процесса образования ловушек на поверхности ККТ. Использование различных галогенсодержащих соединений – один из путей решения этой задачи. В данном исследовании рассмотрено влияние различных бром-содержащих компонентов и времени обмена на оптические свойства чернил и электрофизические свойства фоторезистора на основе ККТ HgSe.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-03-2023-106 от 13.01.2023 г. (проект № FSMG-2022-0034).

1. Попов В.С., Пономаренко В.П., Попов С.В. Гибридно-монолитные ИК-матрицы на основе коллоидных квантовых точек и 2D-материалов // Прикладная физика. – 2023. № 6. С. 45 – 53.

2. Пономаренко В.П., Попов В.С., Шуклов И.А., Иванов В.В., Разумов В.Ф. Фотосенсоры на основе коллоидных квантовых точек // Успехи химии. – 2024. Т. 9. RCR5113

3. Infrared Photodetection Based on Colloidal Quantum-Dot Films with High Mobility and Optical Absorption up to THz / E. Lhuillier et al. // Nano Lett. – 2016. – V. 16. – № 2. – P. 1282 – 1286. DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b04616

4. HgSe Self-Doped Nanocrystals as a Platform to Investigate the Effects of Vanishing Confinement / B. Martinez et al. // ACS Appl. Mater. Interfaces. – 2017. – V. 9. – № 41. – P. 36173 – 36180. DOI: 10.1021/acsami.7b10665

5. Chen M. Mid-Infrared Intraband Photodetector via High Carrier Mobility HgSe Colloidal Quantum Dots / M. Chen, Q. Hao, Y. Luo, X. Tang // ACS Nano. – 2022. – V. 16. – № 7. – P. 11027 – 11035. DOI: 10.1021/acsnano.2c03631

Моделирование методом Монте-Карло прыжковой проводимости в массиве квантовых точек

Герт Антон Владимирович, Бельтюков Я.М.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Санкт-Петербург. Россия. anton.gert@mail.ioffe.ru

Monte Carlo simulation of hopping conduction in a quantum dot array

Gert Anton V., Beltukov Y.M.

Ioffe Institute, Saint-Peterburg. Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-228

Simulations of hopping conductivity in a quantum dot array have been carried out with the kinetic Monte Carlo method. The injection of charge carriers from the contacts and coulomb interaction are taken into account. As the result, the band diagrams of p-n transformations at reverse and forward bias are obtained.

Важную роль для свойств структур на основе массивов квантовых точек играют явления переноса зарядов. Перенос заряда в таких структурах в основном ограничен относительно слабой подвижностью носителей заряда при прыжковой проводимости. Поэтому исследование транспорта электронов и дырок в массивах квантовых точек является важной задачей для оптимизации работы приборов на их основе.

В данной работе представлена модель, разработанная в рамках кинетического метода Монте-Карло [1, 2], для расчета прыжковой проводимости в массиве квантовых точек с легирующими примесями. Темпы прыжков электронов и дырок рассчитывались в приближении Миллера-Абрахамса [3]. Было учтено кулоновское взаимодействие подвижных зарядов между собой, а также их взаимодействие с заряженными примесями.

Получена зависимость подвижности носителей заряда от неоднородного уширения энергетических уровней, связанного с дисперсией нанокристаллов по размерам, а также от разброса туннельных констант.

В рамках метода Монте-Карло было проведено моделирование прыжковой проводимости в массиве квантовых между двумя металлическими контактами с учетом инжекции носителей заряда из контактов. В итоге были получены зонные диаграммы p-n перехода при обратном и прямом смещении.

1. C. C. Battaile, The Kinetic Monte Carlo Method: Foundation, Implementation, and Application, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 197, 3386 (2008).

2. D. N. Tsigankov, E. Pazy, B. D. Laikhtman, and A. L. Efros, Long-time relaxation of interacting electrons in the regime of hopping conduction, Phys. Rev. B 68, 184205 (2003).

3. A. Miller, E. Abrahams, Impurity Conduction at Low Concentrations, Physical Rev. 120, No. 3, P. 745-755 (1960).

Влияние γ -облучения на оптический композит с нанокристаллами CsPbBr₃

Арчелков Всеволод Борисович, Клинков В.А., Седегова Т.Ю.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
Санкт-Петербург. Россия. seva.archelkov@gmail.com*

Effect of γ -irradiation on optical composite with CsPbBr₃ nanocrystals

Archelkov Vsevolod Borisovich, Klinkov Viktor Artemovich,
Sedegova Tatiana Yurievna

St Petersburg Peter the Great Polytechnic University. St. Petersburg. Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-229

Halide perovskites nanocrystals have great potential for use in solar cells due to their highly efficient radiative properties. However, perovskites structures are chemically unstable. This problem can be solved by isolating the crystals in an amorphous glassy matrix. In this work the radiation resistance of polymer matrix with halide perovskites and the influence of radiation on the absorption capacity of the polymer matrix were investigated.

Производство солнечных батарей, несмотря на свою экологичность и удобство, долгое время оставалось дорогостоящим процессом. Для изготовления батарей на основе полупроводников, таких как кремний и арсенид галлия, требуется высокая чистота производственных помещений, работа в вакууме, фотолитография и т.д. А также стоимость выработки такой энергии в 3-4 раза выше, чем тепло-, гидро- или атомными электростанциями. Однако в последние годы, наметились тенденции к удешевлению технологии солнечных элементов (СЭ) [1]. Основные причины активного развития и внедрения полимерных и композитных СЭ связаны с прогрессом в области химии полимеров и нанотехнологий. Эти технологии стали одним из приоритетных направлений развития современной органической электроники благодаря их низкой себестоимости и возможности массового производства при использовании стандартных технологий [2]. Это обеспечивает низкие затраты и высокую надежность производства СЭ на основе органических материалов. На сегодняшний день органические СЭ, включая полимерные, идеально подходят для замены кремниевых фотоэлектрических элементов. Они обладают малым весом, гибкостью, доступной стоимостью изготовления и низкими требованиями к производству [3]. Благодаря этим характеристикам они окупаются быстрее.

Перовскит - это тип кристаллической структуры, которая эффективно

поглощает свет и преобразует его в электрическую энергию. Перовскитовые СЭ вызвали большой интерес в солнечной промышленности благодаря высокой эффективности, низкой стоимости и простоте производства. Они могут стать переломным моментом на рынке солнечной энергии, поскольку дешевле в производстве и более гибкие, чем традиционные кремниевые СЭ [4]. Однако перовскитовые СЭ все еще нуждаются в решении некоторых проблем, таких как проблемы стабильности в процессе производства. Одним из способов повышения стабильности может стать полимерная матрица.

В работе проводилось исследование радиационной стойкости полимерной матрицы с галлогенидными перовскитами и влияние радиационного излучения на поглощающую способность полимерной матрицы. На рисунке 1 представлен спектр поглощения исходного полимера и полимера с галлогенидными перовскитами фазы CsPbBr₃ до облучения и 2,5 Мрад.

Как видно из рисунка 1 у образцов с перовскитами присутствует эскитонный пик при 520 нм, который соответствует пику люминесценции перовскитов. Также степень излучения не значительно влияет на оптическую плотность образцов. Можно сказать, что под воздействие излучение перовскиты сохраняют высокую стабильность и могут использоваться в качестве покрытий на солнечные панели.

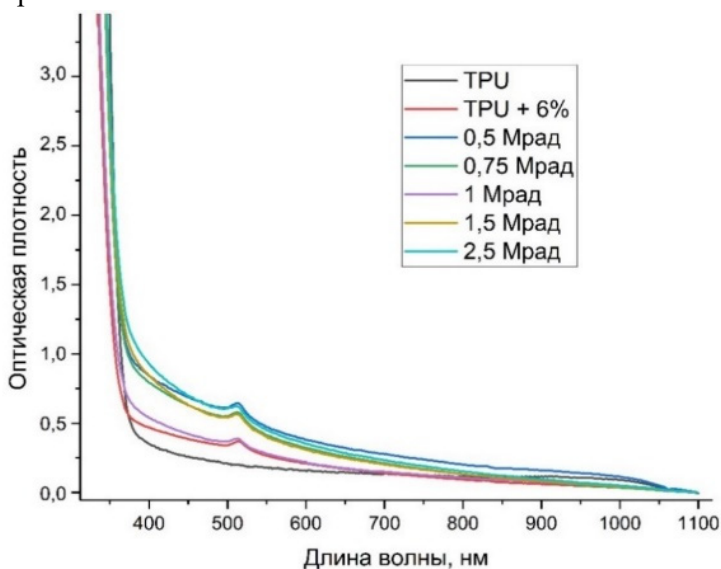


Рис. 1. Спектр поглощения TPU с разной степенью доз облучения высокоэнергетичными электронами

1 Алешин А. Н. Полимерные и композитные солнечные элементы //Альтернативная энергетика и экология. – 2008. – №. 10. – С. 116-122.

2 Ma K. et al. Efficient D1: D2: A ternary all-polymer solar cell with optimized photoactive layer morphology realized by compatible two polymer donor //Optical Materials. – 2024. – Т. 147. – С. 114735.

3 Mehdipour-Ataei S., Aram E. A review on the effects of metallic nanoparticles and derivatives on the performance of polymer solar cells //Materials Today Sustainability. – 2024. – С. 100722.

4. Che G. et al. Boosting the efficiency and stability of CsPbBr₃ perovskite solar cells through modified multi-step spin-coating method //Journal of Alloys and Compounds. – 2023. – Т. 969. – С. 172423.

**Высокоэффективные тройные полимерные солнечные
фотоэлементы на основе двух нефуллереновых акцепторов с
комплементарными спектрами поглощения от ближней до средней
ИК области**

Кештов М.Л.¹, Годовский Дмитрий Юльевич¹, Шикин Д.Ю.¹, Калинин Д.П.¹,
С. Карак², Г.Д. Шарма³

¹ *Институт элементоорганических соединений им. Несмеянова РАН. Москва.
Россия. dmigo@yandex.ru*

² *Индийский технологический институт. Дели. (IIT Delhi). Индия*

³ *Институт информационных технологий LNM. Кафедра физики и
электроники, коммуникационной техники. Джайпур (Радж). Индия*

**High Performance Ternary polymer solar cells by combination Two non-
fullerene racceptors with complementary absorption bands from Near-
infrared Wavelengts to Medium Wavelengts**

M.L. Keshtov^a, Dmitry Yulievich Godovsky^a, D.Y. Shikin^a, D.P. Kalinkin^a,
S. Karak^b, Ganesh D. Sharma^c

^a *A.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement compounds of the RAS. Moscow,
Russia*

^b *Indian Institute of Technology Delhi (IIT Delhi)*

^c *Department of Physics and Electronics Communication Engineering, The LNM
Institute for Information Technology, Jamdoli, Jaipur (Raj.) 302031, India*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-232

We have designed and synthesized a new D-A type copolymer donor denoted as P137, consisting of dithienoquinoxalineimide (DTQxI) as acceptor fragment and benzodithiophene with thiophene-conjugated side chain (BDTT) as D unit. The P137 not only exhibits a strong dipole moment, but also shows a wide bandgap of 1.8 eV and a deep HOMO energy level of 5.45 eV. When paired with narrow bandgap nonfullerene acceptor BTP-eC9 and medium bandgap nonfullerene acceptor DBTBT-IC, the optimized binary OSCs showed over all PCE of 14.91 and 12.36%, respectively. After incorporation of DBTBT-IC into the host binary P137:BTP-eC9, the air processed ternary OSC attained PCE of 17.25%. The improvement is the PCE for ternary OSC is associated with the broad absorption profile, compact π - π stacking distance, large π - π stacking crystal coherence length, effective utilization of exciton via energy transfer from DBTBT-IC to BTP-eC9, reduced trap density and suppressed recombination losses. These results provide new insight in the design of new non-halogenated D-A copolymer donors without any linkers for the development of organic solar cells.

Мы разработали и синтезировали новый полимерный донор типа D-A (P137), состоящий из дитиенохиноксалинимидного (фрагмента DTQxI) в качестве акцептора и бензодитиофена с боковой тиофеновой цепью (BDTT) в роли донорного звена. P137 не только демонстрирует сильный дипольный момент, но также демонстрирует широкую запрещенную зону 1,87 эВ и низко лежащий уровень ВЗМО -5,45 эВ. Оптимизированный Бинарные ПСФ на основе узкозонного нефуллеренового ВТР-еС9 и среднезонного нефуллереного DBTVT-IC акцепторов показали эффективность 14,91 и 12,36% соответственно. После включения DBTVT-IC в основной бинарный слой P137:ВТР-еС9, тройной ПСФ достиг эффективности 17,25%. Улучшение эффективности тройного ПСФ связано с широким профилем поглощения, компактным π - π стекингом, большой длиной когерентности кристалла, эффективным использованием экситона посредством передачи энергии от DBTVT-IC к ВТР-еС9, уменьшением плотности ловушек и подавлением рекомбинационных потерь. Эти результаты дают новое представление о разработке новых негалогенированных донорных сополимеров типа DA без каких-либо связующих для разработки органических солнечных фотоэлементов.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by RSF (No 24-43-02039).

Перовскитные солнечные элементы – история становления и потенциал применения в качестве фотодетекторов ближнего ИК диапазона

Тарасов Алексей Борисович, Белич Н.А.

*Лаборатория новых материалов для солнечной энергетики, факультет Наук
о материалах МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия,
Alexey.bor.tarasov@yandex.ru*

Perovskite solar cells – the history of discover and the potential for use as near-infrared photodetectors

Tarasov Alexey Borisovich, Belich N.A.

*Laboratory of New Materials for Solar Energy, Faculty of Materials Sciences,
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-234

Perovskite solar cells are a class of thin-film solar cells first described in 2009, which demonstrated explosive growth in efficiency and stability up to 26% and 6000 hours, which is already competitive in comparison with existing solar cell technologies. The report will address the history of perovskite solar cells development, current problems and challenges of the industry, as well as the results and scientific and technical capabilities in the field of development of perovskite solar cells achieved by scientists of the Faculty of Materials Sciences of Moscow State University. Main issues of perovskite solar cells metrology will be addressed along with recent results of the development of a simple and universal scalable encapsulation strategy for perovskite solar cells.

Перовскитные солнечные элементы - впервые описанный в 2009 году класс тонкопленочных СЭ, продемонстрировавших взрывной рост показателей КПД и стабильности. Если в 2009 для первых лабораторных прототипов они составляли всего 3.9% и 15 минут соответственно, то в 2024 достигли значений более 26% и 6000 часов, конкурентных в сравнении с уже существующими технологиями СЭ.

Уникальный физико-химические свойства гибридных перовскитов, такие как высокие подвижности носителей заряда, рекордные коэффициенты экстинкции, высокая толерантность к дефектам и примесям, а также наименьшая из всех тонкопленочных СЭ толщина устройства в менее чем 2 мкм, вкупе с возможность создавать их недорогими растворными методами из

доступных реактивов, делают их чрезвычайно привлекательным объектом исследования. Практически идеальная спектральная совместимость гибридных перовскитов с кремнием делает их главным кандидатом на реализацию тандемных перовскит-кремниевых технологий и потенциально может дать новый импульс развитию кремниевых технологий СЭ наземного и космического применения.

В докладе будут рассмотрены основные вопросы становления и развития перовскитных солнечных элементов, актуальные проблемы и вызовы отрасли, а также результаты и научно-технические возможности в области разработки перовскитных солнечных элементов, достигнутые учеными факультета наук о материалах МГУ.

Помимо этого, будут рассмотрены основные вопросы метрологии функциональных показателей перовскитных солнечных элементов, в частности особенности измерения их КПД в различных режимах (сканирование вольтамперных кривых с разной скоростью, отслеживание точки максимальной мощности, светоциклирование).

Будут представлены результаты разработки простой и универсальной масштабируемой стратегии инкапсуляции перовскитных солнечных элементов, основанную на термовакуумном испарении защитного слоя MgF_2 или MoO_3 -х с последующей герметизацией устройства стеклом и полимером, отверждаемым УФ-излучением. Предлагаемый способ инкапсуляции выгодно отличается от большинства других известных подходов к инкапсуляции, поскольку он полностью безвреден для перовскита и транспортирующих слоев и может быть обработан при комнатной температуре. Вакуумное нанесение укупорочного слоя способствует эффективному удалению остатков воды, кислорода и органических растворителей из устройства перед герметизацией и может быть легко выполнено с использованием стандартного оборудования для нанесения металлического электрода. Предложенная стратегия применима к любым лабораторным прототипам перовскитных солнечных элементов, независимо от их геометрии и архитектуры, и обеспечивает превосходную стабильность устройств в условиях окружающей среды и длительной эксплуатации. После 1000-часового испытания на стабильность при температуре окружающего воздуха (относительная влажность 30-60%) элементы сохранили в среднем 92,9% своей первоначальной эффективности при освещении интенсивностью в 1 Солнце при постоянном отслеживании точки максимальной мощности (MPPT, ISOS-L-1) и более 96% при хранении в темноте (ISOS-D-1), что свидетельствует о высокой эффективности предложенного подхода к инкапсуляции.

**Гидрохимический синтез фоточувствительных пленок для
диапазона 0,4-8,0 мкм с разработкой на их основе линейки
быстродействующих ИК-детекторов**

Марков Вячеслав Филиппович, Маскаева Л.Н., Стук В.И., Скорняков Л.Г.

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина. Екатеринбург. Россия. v.f.markov@urfu.ru*

**Hydrochemical synthesis of photosensitive films for the 0.4-8.0 μm range with
the development of a line of high-speed IR detectors based on them**

Markov V.F., Maskaeva L.N., Stuk V.I., Skorhyakov L.G.

*Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin.
Ekaterinburg. Russia. v.f.markov@urfu.ru*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-236

Thin films of supersaturated solid solutions of substitution $\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{S}$ ($0 < x \leq 0.16$), $\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{Se}$ ($0 < x \leq 0.145$), $\text{Sn}_x\text{Pb}_{1-x}\text{Se}$ ($0 < x \leq 0.10$). were synthesized by chemical precipitation from aqueous media on substrates of citall, fused quartz, photoglass, oxidized and monocrystalline silicon. Based on them, a range of high-speed, variable in maximum position and spectral sensitivity range economically available IR detectors with a high level of reliability and radiation resistance has been developed, covering the operating range of the spectrum from 0.4 to 8.0 μm . The interrelationships between the conditions of film production, their structure, composition, photosensitive and spectral characteristics are established in the work.

На основе технологически низкотемпературного гидрохимического метода синтеза разработана линейка быстродействующих переменных по положению максимума и спектральной области чувствительности экономически доступных ИК-детекторов с высоким уровнем надежности и радиационной стойкости, перекрывающая рабочий диапазон спектра от 0.4 до 8.0 мкм. Фотодетекторы разработаны на основе высокофункциональных тонких пленок наноструктурированных пересыщенных твердых растворов замещения халькогенидов металлов в системах CdS-PbS , CdSe-PbSe , SnSe-PbSe .

Путем варьирования условий процесса гидрохимического синтеза на подложках из ситалла, плавленного кварца, фотостекла, окисленного и монокристаллического кремния получены тонкие пленки высокообогащенных твердых растворов замещения широкого диапазона составов: $\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{S}$

($0 < x \leq 0.16$), $\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{Se}$ ($0 < x \leq 0.145$), $\text{Sn}_x\text{Pb}_{1-x}\text{Se}$ ($0 < x \leq 0.10$). При послойном химическом осаждении SnSe и PbSe с увеличением числа слоев в сэндвич-структурах были синтезированы твердые растворы $\text{Sn}_x\text{Pb}_{1-x}\text{Se}$, содержащие до 13 моль% SnSe . При формировании обсуждаемого твердого раствора за счет инверсии зон проводимости компонентов системы найдены технологические условия сдвига спектрального диапазона чувствительности в более длинноволновую область спектра по сравнению с PbSe . В работе установлены взаимосвязи между условиями получения пленок, их структурой, составом, фоточувствительными и спектральными характеристиками. В частности, при температурах вблизи комнатных обеспечивается возможность регулирования спектральной чувствительности твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{S}$, $\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{Se}$, $\text{Sn}_x\text{Pb}_{1-x}\text{Se}$ в диапазонах 0.4-3.0, 0.6-4.6, 1.0-6.0 мкм соответственно. При использовании азотного охлаждения длинноволновая граница спектральной чувствительности твердого раствора $\text{Sn}_x\text{Pb}_{1-x}\text{Se}$ достигает 8.2 мкм. Для слоев твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{S}$ в качестве температурной границы устойчивости на воздухе установлен диапазон 443-443 К, а для пленок $\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{Se}$ и $\text{Sn}_x\text{Pb}_{1-x}\text{Se}$ около 700 К. Синтезированные пленки твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{S}$ и $\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{Se}$ продемонстрировали аномально высокие значения вольт-ваттной чувствительности при относительно малых значениях постоянной времени (3-60 мкс).

Изготовлены экспериментальные образцы высокочувствительных фотодетекторов на основе синтезированных пленок твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{S}$, $\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{Se}$, $\text{Sn}_x\text{Pb}_{1-x}\text{Se}$ различного состава и проведена их аттестация, разработаны конструктивные схемы их комплексирования в едином фотоприемном устройстве с целью создания мультиспектрального технического зрения роботов и других потенциально востребованных мультиспектральных оптоэлектронных устройств различного назначения.

Микроканальные электронные усилители: основные параметры и сферы применения

Кулов Сослан Кубадиевич, Кулова Н.С., Рыжков А.А.,
Самканашвили Д.Г.

ООО ВТЦ «Баспик». Владикавказ. Россия. nis@baspik.com

Microchannel electron multipliers: the main parameters and spheres of application.

Kulov S.K., Kulova N.S., Ryzhkov A.A., Samkanashvili D.G.
LLC VTC “Baspik”, Vladikavkaz. Russia. nis@baspik.com

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-238

Microchannel electron multipliers (MEMs) are a sort of microchannel plates (MCPs) designed for detection and amplification of charged particles and radiation. MEMs consist of millions of ultra-thin conductive glass capillaries, each acting as an independent secondary electron multiplier. Such plates are used as parts of different scientific and analytical devices to solve the task of weak signals amplification and particle coordinate parameters detection. MEMs advantages are fast response, high gain, increased active area, low power consumption and stable operation under exposure to magnetic fields. Due to these features they have found implementation in nuclear scientific projects of Megascience level as an essential part of Cherenkov detectors. Nowadays MEMs are used in controlling equipment for semiconductive quality control and for proton detection in nuclear medical diagnostic devices.

Микроканальные электронные усилители (МЭУ) – разновидность крупноформатных микроканальных пластин (МКП), состоящих из миллионов сверхтонких проводящих стеклянных капилляров. Относятся к классу изделий электронной техники, предназначенных для работы в вакууме в качестве многоканальных детекторов и электронных усилителей пространственно-организованных потоков заряженных частиц и излучений с целью получения, в частности, электронных изображений. Каждый капилляр микроканального электронного усилителя действует как независимый вторично-электронный умножитель. Подобные свойства капилляров и, соответственно, самой пластины приобретаются за счет термоводородного восстановления стенок каналов. В ходе целенаправленного изменения свойств исходного материала – стекла – такое микрокапиллярное изделие способно детектировать на входе различные частицы и излучения, преобразовывая их в электронные потоки в каналах.

Развитие и совершенствование МЭУ происходило параллельно с

развитием МКП для ЭОП и было связано с увеличением разнообразия конструкций, достижения значимых для потребителей параметров за счет совершенствования технологического процесса. Основные пути совершенствования продукции – повышение плотности каналов, увеличение рабочего динамического диапазона и уменьшение собственных шумов МЭУ.

В настоящее время МЭУ находят применение в таких типах электронных вакуумных приборов как фотоэлектронные умножители (ФЭУ), позиционно-чувствительные детекторы пространственно-организованных потоков частиц (ПЧД), которые в свою очередь входят в состав широкого спектра научно-исследовательской и аналитической аппаратуры. Эффективность использования МЭУ в приборах применения создается благодаря комплексу уникальных свойств - миниатюрности, малому энергопотреблению, высокому пространственному и временному разрешению, регулировкой усиления, низкой чувствительности к внешним магнитным полям, малым шумам и надежности.

На базе МЭУ конструируются детекторы открытых и закрытых типов (вакуумированные), с помощью которых решаются задачи работы с фотонами электромагнитного излучения (оптического и ультрафиолетового диапазонов, мягкого рентгеновского излучения, жесткого рентгеновского излучения, гамма-излучения) и корпускулярными потоками (электронов, протонов, нейтронов, α -частиц, положительных и отрицательных ионов).

В настоящее время сферы применения МЭУ расширяются. Высокое временное разрешение МЭУ-детекторов позволяет эффективно использовать изделия в черенковских детекторах [1] для мониторинга пучков ускорителей. В этом случае удовлетворяются требования исследователей к точности определения времени столкновения в протонных детекторах - менее 50 пс. Зарубежные производители ФЭУ и ЭОП (Hamamatsu, Photek, Photonis) последние 15 лет работали над освоением многоанодных ФЭУ на крупноформатных МКП для решения исследовательских задач в рамках работы крупнейших мировых коллайдеров (например, детектор FFD в составе эксперимента ALICE на Большом Адронном Коллайдере) [2]. Созданные для данного направления изделия и технологии в настоящее время внедряют для решения задач ядерной медицины с целью разработки и совершенствования ПЭТ и иных устройств протонной диагностики, и лечения опухолевых процессов [3].

Другая область применения МЭУ – контроль поверхности полупроводников на атомном уровне, осуществляемый детектирующими системами на основе линий задержки (Delay Line Detection system).

Микроканальные структуры могут использоваться для регистрации рентгеновского излучения. Входящие рентгеновские лучи взаимодействуют со свинцовым стеклом микроканальной пластины, производя фотоэлектроны. Согласно результатам моделирования, наибольшая чувствительность

наблюдается для излучения с энергией 6-10 кэВ [4].

С учетом планов развития научно-исследовательских проектов уровня Megascience, ядерной медицины и полупроводниковой промышленности в нашей стране, устройства с микроканальными усилителями являются одной из перспективных и стратегически важных областей развития национальной оптико-электронной компонентной базы.

Литература

1. Performance study of the fast timing Cherenkov detector based on a microchannel plate PMT. D A Finogeev et al 2017 J. Phys.: Conf. Ser. 798 012168
2. Anode current saturation of ALD-coated Planacon® MCP-PMTs. Antamanova E.V., Bearden I.G., Garcia-Solis E.J. // JINST – 2018. V.13 T09001.
3. A Design of a PET Detector Using Micro-Channel Plate Photomultipliers with Transmission-Line Readout. H Kim, H Frisch, C-T Chen. Nucl Instrum Methods Phys Res A 2010;622(3):628-636.
4. Performance of microchannel plate based detectors for <25 keV x rays: Monte Carlo simulations and comparisons with experimental results. Craig A. Kruschwitz; Ming Wz.

**Тонкоплёночные полимерные наноконкомпозиты, содержащие
полупроводниковые квантовые точки со структурой ядро/оболочка
CdSe и CdSe@CdS@ZnS**

Мурадова Айтан Галандар кызы, Хакимов К.Т., Степанова У.А.

*Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева.
Москва. Россия. aytanmuradova@gmail.com*

**Thin-film polymer nanocomposites containing semiconductor quantum dots
with CdSe and CdSe@CdS@ZnS core/shell structures**

Muradova Aytan G., Khakimov K.T., Stepanova U.A.
D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia. Moscow. Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-241

In this work, thin-film polymer nanocomposites with core/shell/shell type CdSe and CdSe@CdS@ZnS quantum dots were obtained. The effect of the synthesis temperature, shell structure, and quantum dot concentration on the optical properties of the composite was studied. The optimal temperatures for the synthesis of quantum dots have been established, and the prospects for using multishell structures in thin-film polymer nanocomposites have been confirmed.

Создание лазеров с перестраиваемой частотой излучения – одно из актуальных направлений в электронике, так как на данный момент единственными наиболее доступными источниками перестраиваемого по частоте света излучения являются лазеры на красителях, которые, однако, имеют ряд таких недостатков, как низкая фотохимическая устойчивость, высокая токсичность активной среды и появление термооптических искажений в результате их работы. Альтернативой жидким лазерным активным средам на основе красителей могут выступать твердотельные полимерные среды, активированные квантовыми точками (КТ), которые могут решить проблему деградации красителя и увеличить время эксплуатации лазерно-активной среды.

В данной работе был проведён синтез монодисперсных полупроводниковых КТ со структурой ядро/оболочка/оболочка CdSe@CdS@ZnS одностадийным методом синтеза в глицерине, а также получен наноконкомпозит на их основе. Изучены фотолюминесцентные свойства полученных образцов. Спектры поглощения образцов снимались с использованием спектрофотометра Varian Cary 50, спектры фотолюминесценции – спектрометра Perkin Elmer LS 55, изображения ПЭМ получены при помощи просвечивающего электронного микроскопа

JEOL JEM-2100F. Исследования фотолюминесценции пленочных образцов проводили на спектрофлуориметре Fluorolog FL3-22 (Horiba Jobin Yvon, Франция).

Синтез КТ проходил в несколько этапов. Ядро КТ получали введением в реакционную смесь, содержащую прекурсор кадмия $\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, водного раствора Na_2SeSO_3 при температуре синтеза, которая варьировалась от 100 до 150°C для получения «ядра» требуемого размера. Оболочку из CdS и ZnS наращивали введением водного раствора тиаоацетамида. Полученные нанокристаллы экстрагировались н-гептаном. Очистка включала в себя переосаждение этанолом и реэкстракцию [1].

С увеличением температуры синтеза размер КТ CdSe увеличивался с 2 до 4 нм. Размер КТ CdSe@CdS@ZnS синтезированных при 100°C составил 5 ± 1 нм. Пик спектра поглощения КТ CdSe с увеличением температуры синтеза сдвигался с 507 до 558 нм. С увеличением количества оболочек пик спектра поглощения сдвигался с 507 до 548 и 562 нм, соответственно для КТ CdSe, CdSe@CdS и CdSe@CdS@ZnS.

Пленки на основе ПММА, содержащие квантовые точки CdSe и CdSe@CdS@ZnS были сформированы на стеклянных подложках размером $25 \times 25 \times 1,5$ мм методом центрифугирования раствора ПММА и КТ. Исследованы их структурные и оптические свойства. Продемонстрировано влияние концентрации внедренных квантовых точек и температуры на структурные свойства пленок нанокompозитов на основе ПММА.

Для нанокompозитов, содержащих КТ CdSe наблюдалось красное смещение длины волны пика фотолюминесценции с 562 до 575 нм для частиц, синтезированных при 100°C, при увеличении их концентрации в композите с 0,001 моль/л до 0,01 моль/л. Увеличение концентрации КТ CdSe@CdS@ZnS с 0,001 моль/л до 0,005 моль/л приводило к резкому увеличению интенсивности фотолюминесценции. Дальнейшее повышение концентрации КТ до 0,01 моль/л не вносило значительных изменений в свойства композита. Было обнаружено, что увеличение концентрации КТ CdSe@CdS@ZnS не приводит к смещению длины волны пика фотолюминесценции нанокompозита, что говорит об агрегационной стабильности полученной системы «КТ-композит».

1. Improving the Photoluminescence Properties of CdSe, CdSe/CdS Semiconductor Quantum Dots for Making Solid-State Laser Active Media / Stepanova U.A. et al. // Nanobiotechnology Reports. – 2022. – V. 17. – № 3. – P. 356 – 365. DOI: 10.1134/s2635167622030193

**Свойства морфологии тонких пленок, созданных на основе
коллоидных квантовых точек халькогенидов ртути в зависимости
от вариации параметров нанесения**

Миленкович Теодора, Шуклов И.А., Попов В.С.

*Московский физико-технический институт. Долгопрудный. МО. Россия.
tmilenkovich@phystech.edu*

**Study of morphological properties of thin films based on colloidal quantum
dots of mercury chalcogenides depending on the variation of application
parameters**

Milenkovich Teodora, Shuklov I.A., Popov V.S.
MIPT, Dolgoprudny, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-243

Nowadays, colloidal quantum dots (CQDs) are of great interest due to the fact that the Nobel Prize in Chemistry was awarded for their discovery in 2023. Photosensitive films were prepared based on CQDs using inexpensive and simple methods, which makes them promising for the use in the field of microelectronics. Colloidal quantum dots are nanocrystalline semiconductors whose surface is covered with an organic monolayer consisting of coordinating ligands. Thin films based on mercury chalcogenides CQDs and various ligand exchanges were prepared by using layer-by-layer deposition applying spin-coating and analyzed with atomic-force and kelvin probe force microscopy. Photoelectrical characteristics of prepared photoresistor structures were studied by measuring VAC under various illumination modes (laser 980 nm, darkness).

В настоящее время коллоидные квантовые точки (ККТ) вызывают к себе большой интерес благодаря тому, что за их открытие вручена Нобелевская премия по химии 2023 года. На основе ККТ создаются фоточувствительные пленки недорогими и простыми методами, что делает их перспективными для использования в области микроэлектроники. [1] В силу квантоворазмерного эффекта оптические свойства ККТ зависят от диаметра ядра полупроводника и спектральный диапазон поглощения можно регулировать контролем размера. Коллоидные квантовые точки – нанокристаллические полупроводники, чья поверхность покрыта монослоем состоящим из координирующих органических лигандов. Цель представленной работы состояла в создании фоточувствительных тонких пленок, поглощающих в диапазоне 3-5 мкм. В качестве материалов, подходящих под нашу задачу выбраны халькогениды ртути, а именно - сульфид, теллурид и селенид ртути. Теллурид ртути уже

десятилетие активно исследуется из-за его уникальных характеристик, таких как большой диапазон спектральной перестраиваемости, большой радиус экситона Бора (30 нм) и ширина запрещенной зоны для объемного материала оцениваемой в 0 еВ [2]. Перечисленные характеристики позволяют теллуриду ртути быть использованным для разработок фотоустройств (резисторов, диодов, детекторов) и лазеров [3, 4]. Для других двух выбранных нами материалов (селенид и сульфид ртути) не до конца изучены оптические свойства и их зависимость от параметров синтеза, и это являлось основанием для выбора варьируемых параметров для оптимизации создания пленок. Для перечисленных материалов была сделана серия экспериментов по изучению зависимости морфологии пленок от замены лигандов, среды переосаждения синтезируемого раствора, растворителя для нанесения и режима спин-коатинга (динамический/статический). Пленки получены из растворов ККТ методами «мокрой химии» на золотые встречно-штыревые электроды на подложке из окисленного кремния (HgTe и HgSe) и стекла (HgS). Замены лигандов производились послойным нанесением методом спин-коатинг. Лиганды для замены подбирались под каждый материал, так как состав лигандной оболочки и ее толщина оказывают влияние на характеристики полученных пленок. [5,6] Эксперименты проводились в двух разных средах – на воздухе и в инертной аргоновой среде. Атомно-силовая микроскопия в полуконтактном режиме была использована для изучения морфологии поверхности и определения толщины полученных пленок в зависимости от различных замен лигандов (этандитиол-1,2, роданид, сульфид и иодид). Для сравнения с образцами, полученными методом layer-by-layer deposition с заменой лигандов в пленках были созданы образцы на основании «чернил», т.е. с проведенной заменой лигандов в коллоидном растворе. С помощью кельвин-зондовой микроскопии были изучены электрические свойства пленок полученных на основе «чернил». В рамках работы были проведены нанесения на встречно-штыревые электроды, и для этих резисторных структур были измерены ВАХ при различных режимах засветки (980 нм, АЧТ).

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-03-2022-107/10 от 03.11.2022 (проект № FSMG-2022-0034).

Литература

1. Ponomarenko V.P., Popov V.S., Shuklov I.A., Ivanov V.V., Razumov V.F, Photosensors based on Colloidal Quantum Dots // Russ. Chem. Rev., 93, RCR5113.
2. Lhullier E. [et al.]. Mercury Chalcogenide Quantum Dots: Material Perspective for Device Integration // Chem. Rev. 2021. V. 121 (7). P. 3627-3700.

3. Keuleyan S. [et al.]. Mercury Telluride Colloidal Quantum Dots: Electronic structure, size-dependant spectra and photocurrent detection up to 12 μ m // *ASC Nano*. 2014. V. 8 (8). P. 8676-8682.

4. Chen M. [et al.]. Mercury Telluride Quantum Dot Based Phototransistor Enabling High Sensitivity Room Temperature Photodetection at 2000 nm // *ASC Nano*. 2017. V. 11 (6). P. 5614-5622.

5. Boles, M. [et al.]. The surface science of nanocrystals. // *Nature Mater*. 2016. V. 15. P. 141–153.

6. Shuklov I.A., Razumov V.F. Lead chalcogenide quantum dots for photoelectric devices // *Russ. Chem. Rev.* 2020. V. 89 (3). P. 379–391.

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

С01 Характеристики быстродействующих малоформатных матричных фотоприемников на основе InSb

Пермикина Е.В.¹, Лопухин А.А.¹, Болтарь К.О.^{1,2}, Барышева К.В.¹,
Гришина А.Н.¹

¹ ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия. Elenapermikina3@gmail.ru

² Московский физико-технический институт. Долгопрудный. МО. Россия

High speed small-format InSb FPA characterization

Permikina E.V., Lopukhin A.A., Boltar K.O., Barysheva K.V., Grishina A.N.
Orion R&P Association, Inc. Moscow. Russian Federation.
Elenapermikina3@gmail.ru

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-246

High speed small-format InSb FPA of the mid-infrared range defects and uniformity of sensitivity are investigated. Group technology of thinning make it possible to obtain 22% defect-free of total number and the defects-free central region FPA. Ionic milling backside of the FPA before anti-reflective coating can significantly suppress the recombination of photo carriers, as well as decreases of sensitivity spread over the array area in several times.

Для распознавания высокоскоростных объектов применяются быстродействующие охлаждаемые матричные ФПУ на основе антимонида индия. Быстродействие обеспечивается тактовой частотой порядка 8 МГц в режиме интегрирования во время считывания. Малая фотоэлектрическая взаимосвязь ФЧ элементов малоформатных матриц позволяет получать тепловизионные изображения с четкими очертаниями, уменьшая размытие границ объектов. На утоньшенных МФЧЭ (матричных фоточувствительных элементах) ближняя взаимосвязь в области 3x3 элемента не превышает 5% [ГОСТ 17772-88, метод 1.17]. Хорошая однородность чувствительности по площади фотодиодной матрицы и минимизация до нуля числа фотоэлектрических дефектов позволяют с максимальной точностью распознавать объекты.

Структура МФП (матричных фотоприемников) на основе InSb представляет собой матрицу фоточувствительных элементов толщиной базовой области около 10 мкм, гибридованную с мультиплексором (БИС считывания) на растре и двухспектральным фильтром.

Статистическая обработка и анализ данных по дефектности МФЧЭ, полученных из пластин слитков антимонида индия, показали, что для изготовления фотодиодных матриц с оптимальными характеристиками наиболее пригодны пластины, взятые из середины слитков. Отбор пластин для изготовления МФЧЭ в соответствии с анализом статистических данных позволяет увеличить процент выхода бездефектных МФПУ.

Для реализации массового изготовления фотоприемников наиболее оптимально применение групповой технологии утоньшения и отмывки МФП [1]. Групповая технология химико-динамической полировки при утоньшении фотодиодных матриц со стороны засветки позволила сократить краевые эффекты, связанные с переутоньшением матриц по периметру МФЧЭ, благодаря чему улучшилась однородность распределения чувствительности по площади МФП в несколько раз, и уменьшилось число угловых отрывов, что позволило увеличить число бездефектных фотоприемников.

На рисунке 1 показано интегральное распределение дефектности матричных фотоприемников. От общего числа МФП бездефектные фотоприемники составили 22%, а с одним фотоэлектрическим дефектом 48% (при бездефектной центральной области) для групповой технологии утоньшения. Видно, что дефектность большей части МФП не превышает 10-ти элементов. В среднем, дефектность составила ≈ 2 шт. (измерено 360 МФП)

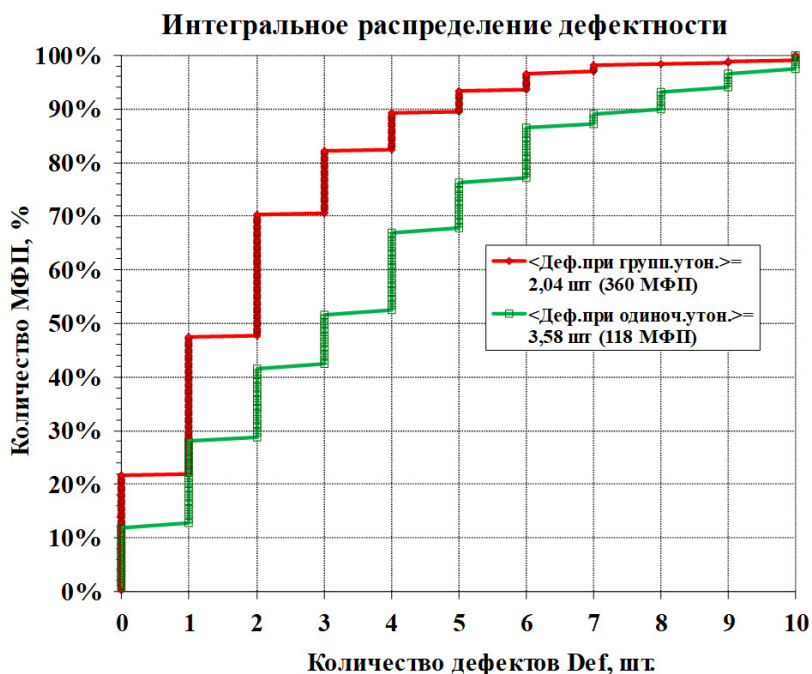


Рис. 1. Интегральное распределение дефектности матричных фотоприемников

Улучшилась однородность чувствительности по площади МФП (не хуже, чем $1 \div 2\%$) в связи с применением технологии обработки низкоэнергетичными ионами аргона смотрящей стороны МФЧЭ [2, 3]. Ионная обработка стравивала значительную часть нарушенного поверхностного материала и инициировала большой положительный встроенный заряд на границе раздела со стороны падающего излучения. Увеличение поверхностного потенциала сформировало отталкивающее поле для неосновных носителей заряда и подавило рекомбинацию фотоносителей на поверхности, благодаря чему разброс чувствительности (токовой или вольтовой) по площади МФЧЭ уменьшился в несколько раз.

[1] *Лопухин А. А., Ерошенков В.В., Иродов Н.А., Савостин А.В., Барышева К.В., Власов П. В., Пермикина Е. В., Гришина А. Н.* Способ группового изготовления утоньшенной гибридизированной сборки для матричного фотоприемника. Патент РФ № 2811380. 2023

[2] *Лопухин А. А., Пермикина Е. В., Болтарь К. О., Гришина А. Н.* Матрицы ФПУ с улучшенной однородностью // *Успехи прикладной физики*, 2023, том 11, № 5. С. 421-431.

[3] *Власов П. В., Гришина А. Н., Лопухин А. А., Пермикина Е. В., Шишигин С.Е.* Способ изготовления утоньшенного многоэлементного фотоприемника на основе антимонида индия с улучшенной однородностью и повышенной механической прочностью. Патент РФ № 2811379. 2023.

**C02 Тестовые структуры для исследования МФПУ на основе InSb с
высокой разрешающей способностью и полем зрения при
обнаружении тепловых объектов**

Лопухин А.А., Пермикина Е.В., Барышева К.В.

АО «НПО «Орион». Москва. РФ. alexmatr0@mail.ru

**Testing array patterns for research InSb FPA with high resolution and a field
of view at detection of thermal objects**

Lopukhin A.A., Permikina E.V., Barysheva K.V.

Orion R&P Association, Inc. Moscow. Russian Federation. alexmatr0@mail.ru

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-249

The topology of squares mesa and rounded mesa of testing array patterns with 10, 12, 15 μm pitch based on InSb intended for hybridization with available 15 μm pitch 640x512 ROIC for research of basic photo-electric characteristics, such as deficiency, detectivity, a photoresponse are considered. The topology of testing array patterns of a kind of scanning apertures with universal pitch exceeding the diffusion length of non-basic charge carriers in InSb and multiple for testing array with various pitch, a number of the sizes of square windows down to 1 μm , intended for crosstalk measurement are offered. The structure of a complete set of photomasks with distribution over the area of testing array patterns for thinning on the InSb whole plate is presented in order to obtain ultra-thin structures with a controlled thickness over the area with to increase strength and minimize the crosstalk. Possibilities of realisation of the offered testing array patterns are analysed.

В современных МФПУ среднего ИК спектрального диапазона с высокой разрешающей способностью и полем зрения при обнаружении тепловых объектов широко используются фотодиодные матрицы из InSb [1]. При уменьшении шага элементов фотодиодных матриц наиболее критическим параметром становится фотоэлектрическую взаимосвязь, а также усиливается влияние периферии элементов по отношению к их площади. Для решения проблемы взаимосвязи применяются структуры с тонкой фоточувствительной базой, что требует упрочнения МФЧЭ и выбора компромисса между величиной взаимосвязи и квантовым выходом. С другой стороны, современные МФПУ построены по гибридной схеме, где наиболее сложной и дорогостоящей частью является БИС считывания, требующая длительного периода разработки.

В работе предложены топологии тестовых матричных структур на основе InSb с квадратной и круглой формами мезы, шагом элементов 10, 12 и 15 мкм, предназначенных для гибридизации с существующими БИС считывания

формата 640x512 с шагом 15 мкм [2] с целью получения основных фотоэлектрических характеристик МФПУ, таких как дефектность, обнаружительную способность, квантовый выход. Рассмотрены 6 вариантов тестовых структур МФЧЭ (Рис. 1). Квадратная форма мезы обусловлена плотной упаковкой элементов в матричной структуре для достижения максимального квантового выхода. В свою очередь, круглая меза оптимальна с точки зрения уменьшения влияния периферии фоточувствительной области на фотоэлектрические характеристики. Поэтому, необходимо провести сравнительные исследования квадратной и круглой форм мезы. Выбранный ряд шагов 15, 12, 10 мкм позволит выявить тенденции основных фотоэлектрических параметров МФПУ. На рис. 1 показаны изображения угловых фрагментов совмещения топологий верхних слоев БИС считывания формата 640x512 с шагом 15 мкм с учетом 6 рядов общих контактов (два из которых выполняют функцию «охранных колец») с различными топологиями МФЧЭ.

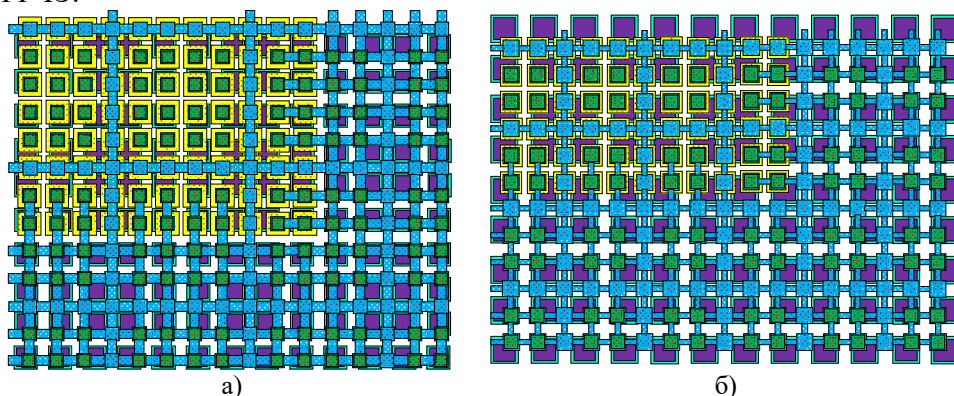


Рис. 1. Изображения угловых фрагментов совмещения топологий верхних слоев БИС считывания формата 640x512 с шагом 15 мкм (CrNi - ■, In - ■) с топологиями МФЧЭ:

для шага 12 мкм а)- квадрат-круг (Меза - ■ - ●, Окно - ■ - ●, CrNi - ■ - ●, In - ■ - ●);
для шага 10 мкм б)- квадрат-круг (Меза - ■ - ●, Окно - ■ - ●, CrNi - ■ - ●, In - ■ - ●).

Для измерения взаимосвязи предлагается воспользоваться способом сканирующих масок [3], в котором топология тестовых структур представляет собой матрицу квадратных окошек с универсальным шагом 181 мкм (50x40 окошек) или 121 мкм (76x60 окошек) кратным для матричных структур с различным шагом и рядом размеров квадратных окошек AN, где N= 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 мкм, внедренных в фотошаблон «Окно» на периферии за пределами стандартных пластин диаметром 50,8 и 76,2 мм, но в пределах пластины диаметром 100 мм (см. рис.2). Такие сканирующие маски изготавливаются на двухсторонне полированной пластине из оптически прозрачного кремния в ИК-диапазоне спектра диаметром 100 мм путем напыления непрозрачного покрытия типа CrNi и вытравливания в нем окошек низкоэнергетическим потоком ионов Ag^+ .

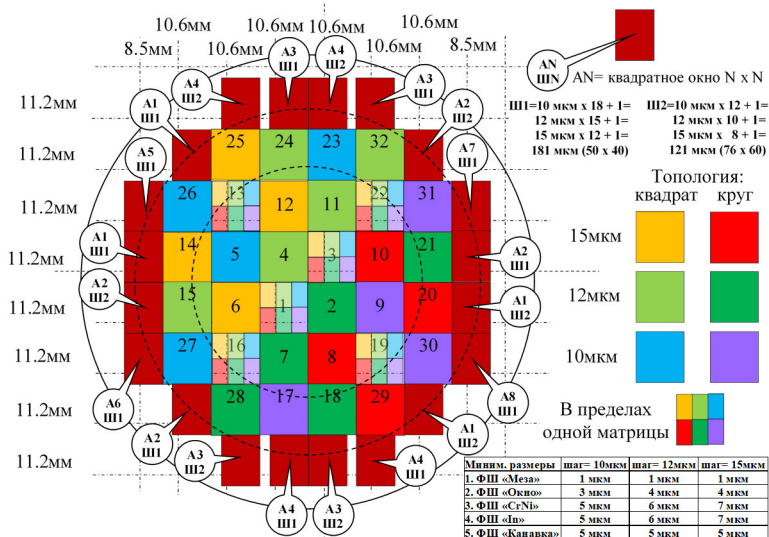


Рис. 2. Структура необходимых пяти фотошаблонов(ФШ) с минимальными размерами, с распределением по площади 12-ти (24-х) матричных тестовых структур (выделенных цветом) для реализации утоньшения на пластине InSb диаметром 50,8 мм (76,2 мм) с целью получения сверхтонких структур (менее 8 мкм) с контролируемой толщиной по площади для минимизации взаимосвязи, обеспечения требуемого квантового выхода и повышения прочности.

На рис. 2 показана структура необходимых пяти фотошаблонов(ФШ) с минимальными размерами в зависимости от шага элементов МФЧЭ (см. таблицу). В зависимости от диаметра пластины InSb (50,8 мм или 76,2 мм) предлагается распределение по площади (12-ти или 24-х) выделенных цветом полноценных матричных тестовых структур с квадратной и круглой мезой и шагом элементов: 15, 12 и 10 мкм, которые для матричных тестовых структур с номерами 1, 3, 13, 16, 19, 22 реализуются в пределах одной матрицы. Такое распределение позволит точнее сравнивать варианты матричных тестовых структур вследствие лучшей корреляции характеристик МФЧЭ. Реализация утоньшения на целой пластине InSb позволит получать сверхтонкие структуры менее 8 мкм с контролируемой толщиной по площади для минимизации фотоэлектрической взаимосвязи, обеспечения требуемого квантового выхода и повышения прочности за счет исключения переутопленных областей.

Минимальные размеры топологий 5-ти необходимых фотошаблонов, приведенные в таблице на рис. 2, близки к реализованной квадратной топологии фотошаблонов для шага элементов 15 мкм. Достоверность сравнения основных фотоэлектрических характеристик различных вариантов топологий обеспечивается их размещением в пределах одной матрицы в отличие от матриц в пределах одной пластины и, тем более, от матриц,

полученных из разных пластин и измерением с помощью существующего апробированного БИС считывания формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм.

Литература

[1] *G. Gershon, A. Albo, M. Eylon, O. Cohen, Z. Calahorra, M. Brumer, M. Nitzani, E. Avnon, Y. Aghion, I. Kogan, E. Pan, A. Tuito, M. Ben Ezra and L. Shkedy, Semiconductor Devices (SCD), Israel // «Large Format InSb Infrared Detector with 10 μm Pixels», OPTRO-2014-2931891.*

[2] *Балиев Д.Л., Болтарь К.О., Киселева Л.В., Ложников В.Е., Лопухин А.А., Мансветов Н.Г., Полунеев В.В., Рудневский В.С., Савостин А.В. «Матричное фотоприемное устройство на основе антимонида индия формата 640x512 с шагом 15 мкм» // Прикладная физика, 2014, № 2. С. 41-44.*

[3] *Болтарь К.О., Акимов В.М., Арбузов М.А., Лопухин А.А. «Способ получения распределения чувствительности по площади пикселя матричного фотоприёмника» // Патент № RU2783220C1 от 10.11.2022 Бюл. №31.*

С03 Широкополосный микроболометрический приемник инфракрасного, терагерцового и миллиметрового излучения

Демьяненко Михаил Алексеевич

ИФП СО РАН. Новосибирск. Россия. demyanenko@isp.nsc.ru

Wideband microbolometer detector for infrared, terahertz and millimeter wave radiation

Dem'yanenko Michael A.

ISP SB RAS. Novosibirsk, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-253

The sensitivity of a broadband inverted type microbolometer detector has been studied. It is shown that the sensitivity of the detector remains almost constant from the infrared (10 μm) to the millimeter wavelength range (1000 μm). The measured sensitivity ranged from 540 to 1000 V/W, which, however, is six times less than the expected value. The latter is due to the shortcomings of the technology, in particular, high compressive stresses in the silicon oxynitride supporting layers, which led to their deformation and contacting with the substrate.

Микроболометрический приемник инвертированного типа [1] изготавливался на подложке высокоомного кремния. Размер подвешенной мембраны, состоящей из слоев оксинитрида кремния, оксида ванадия и поглотителя излучения в виде тонкого слоя нихрома со слоевым сопротивлением ≈ 100 Ом/кв, составлял 440×380 мкм (Рис. 1а). Высота подвески составляла 2 мкм. Излучение падало на приемник через окно вакуумного корпуса, выполненное из высокоомного кремния, плотно прижатое к подложке приемника. Болومتر включался в режиме генератора тока, при этом напряжение смещения болометра V_b составляло 1,87 В. В качестве источников излучения использовались: АЧТ-4И, квантовокаскадный лазер (Lytid QCL TeraCascade 100) с длиной волны излучения 100 мкм, и 300 ГГц источник излучения с рупорной антенной (Terasense). Контроль мощности излучения осуществлялся с помощью акустооптического приёмника Tydex GC-1D (диапазон длин волн 1-8 000 мкм).

Временные зависимости отклика приемника V_s на модулированное излучение трех вышеуказанных диапазонов приведены на рисунках 1b, 1c и 1d. На рисунке 1c приведены зависимости $V_s(t)$ измеренные по мере повышения давления воздуха в вакуумном корпусе приемника, подтверждающие болومترическую природу измеряемого сигнала. Измеренная чувствительность приемника S , приведенная ко входу усилителя, составила: 540, 600 и 1000 В/Вт, соответственно для ИК, ТГц и миллиметрового диапазонов.

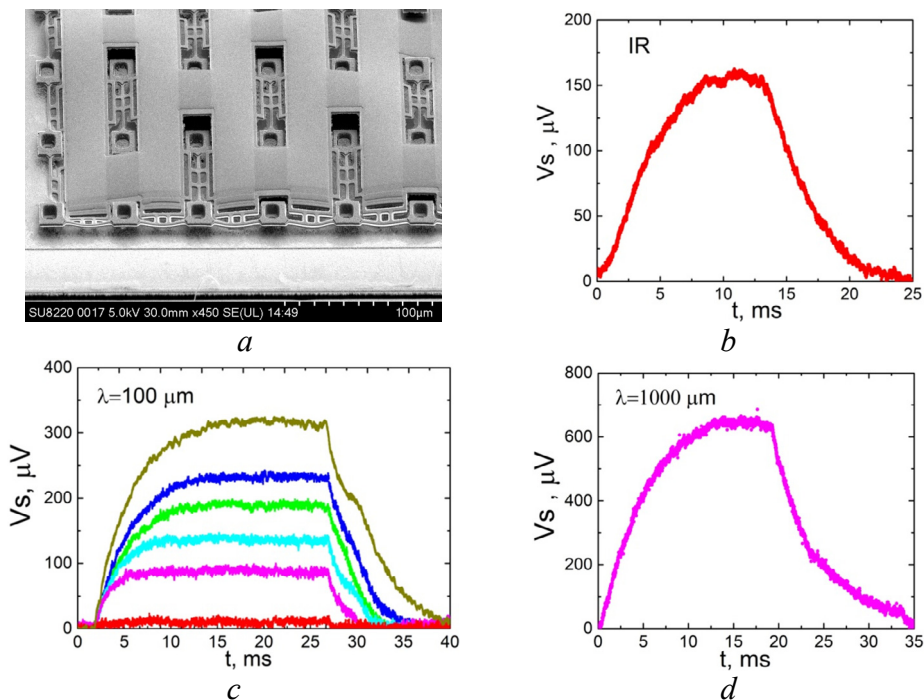


Рис.1. Фрагмент микроболометрического приемника (а), зависимости отклика приемника V_s от времени t на инфракрасное (b), терагерцовое (c) и миллиметровое (d) излучение.

Измеренные значения хорошо согласуются с теоретической оценкой $S = \eta \alpha V_b / G = 830$ В/Вт, полученной для измеренных температурном коэффициенте сопротивления оксида ванадия $\alpha = 2\%/K$ и теплопроводности болометра $G = 45 \cdot 10^{-6}$ Вт/К, а также в предположении, что коэффициент поглощения излучения $\eta = 1$. Измеренная теплопроводность болометра значительно превышает рассчитанное значение, обусловленное теплопроводностью несущих балок, которое составляет $\approx 7,4 \cdot 10^{-6}$ Вт/К. Это обусловлено как касанием подложки и гофрированной (вследствие внутренних напряжений) мембраны болометра, так и, по-видимому, не полностью вытравленным жертвенным полиимидным слоем.

Работа выполнена при поддержке РФФ, №-23-72-3003.

Литература

1. Демьяненко М.А. Эффективные широкополосные приемники терагерцового излучения на основе болометров с тонким металлическим поглотителем. Журнал технической физики, 2018, том 88, вып. 1. стр. 121–126.

С04 Получение многослойных подвесных структур чувствительных элементов микроболометров с низкой остаточной деформацией

Демидович С.А., Соловьев Я.А., Колос В.В., Ковальчук Н.С.

ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». Минск. Беларусь. SDemidovich@inregal.by

Obtaining stable suspended structures in microbolometers by controlling internal mechanical stresses in silicon nitride

Demidovich S., Solovjov J., Kolos V., Koval'chuk N.

JSC "INTEGRAL" - manager holding company «INTEGRAL». Minsk. Republic of Belarus.

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-255

Low-temperature (up to 300 °C) deposition of dielectric films of silicon nitride using the method of plasma-chemical vapor deposition in inductively coupled plasma (ICP CVD) to create stable microelectromechanical systems was experimentally studied. A process for forming layers of silicon nitride with the ability to control residual stresses from compressive to tensile with a transition through zero has been developed, and control principles have been established. A microbolometer sample was obtained that was resistant to mechanical and thermal deformation.

В настоящее время в производстве микроболометров актуален вопрос разработки низкотемпературных методов получения тонких слоев диэлектриков с заданными механическими напряжениями. Для обеспечения эксплуатации микроболометра в диапазоне рабочих температур необходимо выбирать режимы формирования диэлектрических слоев таким образом, чтобы исключить механические напряжения в структуре, которые могут привести к деформации структуры и, как следствие, термической закоротки (касания) подвесной структуры на кристалл мультиплексора [1]. Для управления механическими деформациями в структуре пикселя были выбраны несущие слои из нитрида кремния. Ранее была показана характеристика процесса осаждения SiN_x в газовых смесях $\text{SiH}_4 + \text{N}_2 + \text{Ar}$ и $\text{SiH}_4 + \text{N}_2 + \text{Ar} + \text{He}$, а также оценен дрейф остаточных напряжений в течение трех недель после осаждения [2]. Целью работы является получение многослойных подвесных структур чувствительных элементов микроболометров с низкой остаточной деформацией.

Для разработки технологии формирования межслойных диэлектрических слоев использовали низкотемпературное плазмохимическое осаждение на установке STE ICP200D (SemiTEq, Санкт-Петербург) с

реактором индуктивно-связанной плазмы. Контроль остаточных механических напряжений в пленках и уровень деформации пикселя проводился на установке FRT MicroProf 200. Визуальный анализ структуры пикселя проводился с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на электронном микроскопе Hitachi S 4800.

Установлены зависимости характеристик слоев нитрида кремния от рабочего давления в камере и мощности ICP (рисунок 1).

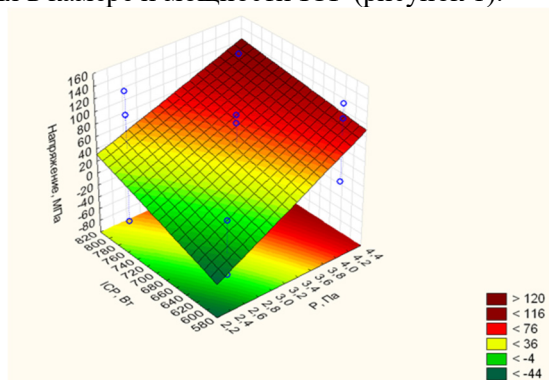


Рис. 1. Зависимость механических напряжений пленки нитрида кремния от мощности ICP и рабочего давления

Изменение рабочего давления в камере от 2,5 до 4,2 Па и мощности ICP от 600 до 800 Вт позволяет получать пленки нитрида кремния с возможностью управления остаточными напряжениями от сжимающих (-86 МПа) до растягивающих (+130 МПа) с переходом через ноль (рисунок 1).

С учетом совокупности всех слоев чувствительного элемента, и возможностью управления остаточными механическими напряжениями в несущих слоях нитрида кремния, построена модель пикселя с минимальной деформацией. По результатам моделирования были получены и воспроизведены на реальных образцах подвесные структуры с максимальной деформацией не более 0,1 мкм (рисунок 2, а, б)

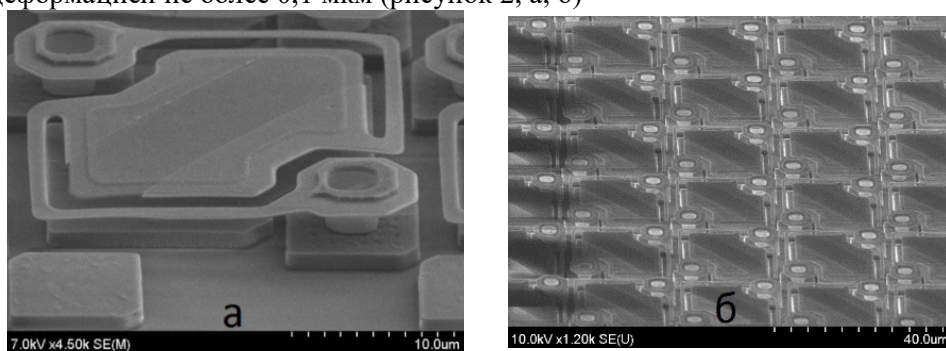


Рис. 2. СЭМ-контроль сформированных пикселей: а – единственный; б – общий вид

Разработан процесс формирования несущих слоев нитрида кремния с управляемыми остаточными механическими напряжениями, позволяющий создавать трехмерные пленочные структуры со сбалансированными механическими напряжениями и минимальными деформациями применительно к ФПУ, МЭМС и другим видам сенсоров и датчиков.

1. Cole, B. E. Monolithic two-dimensional arrays of micromachined microstructures for infrared applications / B. E. Cole, R. E. Higashi, R. A. Wood // Proceedings of the IEEE. 1998. Vol. 86. № 8. P. 1679–1686.

2. Механические напряжения в пленках SiN_x при химическом осаждении из газовой фазы в плазме высокой плотности /Н.С. Ковальчук, С.А. Демидович, Л.А. Власукова, И.Н. Пархоменко, Ф.Ф. Комаров // Неорганические материалы. 2022. том 58. № 9. С. 938.

C05 Фотоприемные и излучающие наноструктуры на основе халькогенидов свинца: контроль технологии и повышение быстродействия

Халугарова Камиля, Спивак Ю.М., Мараева Е.В., Мошников В.А.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Санкт-Петербург. Россия.
kamilya_kh@mail.ru*

Photodetector and photoemission nanostructures based on lead chalcogenides: technology's control and the ways to increase the speed

Spivak Yu.M., Moshnikov V.A.

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". St. Petersburg, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-258

The need for new generation optoelectronic devices is constantly growing. Developed optoelectronic devices must have an order of magnitude better characteristics than existing ones, which is ensured by the introduction of low-dimensional materials into their structure. In this study an original complex of combined approaches based on atomic force microscopy is presented. The complex provides control the structure peculiarities of nanostructured core-shell hierarchical materials based on porous nanocrystalline lead chalcogenides and solid solutions based on them, encapsulated in shells of their own oxides. Also, the complex provides control of recrystallization of the intragranular space, as well as determination of the composition and thickness of the oxide shell when varying the kinetics of oxide growth by adding iodine to the oxidizing atmosphere. In this case, the control of oxygen diffusion through the shell and the formation of a p-n junction is controlled by LTS methods with chemical etching. At the same time, an urgent task is to increase the speed of the photodetectors. The annealing temperature regimes which ensure an increase in the speed of photodetectors are discussed.

Фотоприемные и излучающие устройства на основе халькогенидов свинца изучаются в течение многих лет, и к настоящему времени накоплен большой экспериментальный материал. Только в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» по этим материалам было защищено более 50 кандидатских и докторских диссертаций [1]. Последние годы особенно актуальными являются разработки панорамных фотоприемников, созданных на кремниевых подложках с использованием буферных слоев [2], а также развитие наноструктурированных слоев, работоспособных при комнатной температуре в диапазоне 2-5 мкм, на основе селенидов свинца и твердых растворов селенид свинца-селенид кадмия [3].

В то же время актуальной задачей является повышение быстродействия фотодетекторов. С точки зрения образования оксидов на полупроводниковых материалах можно использовать представления о «быстрых» и «медленных»

центрах рекомбинации. «Медленные состояния» возникают внутри диэлектрического слоя, а «быстрые состояния» - на границе «диэлектрик-полупроводник».

Целью настоящей работы является краткое обобщение результатов, полученных в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в этом направлении в течение 15 лет. Частично оригинальные методики рассмотрены в учебных пособиях с элементами научно-монографического изложения [4, 5].

В качестве способа увеличения скорости фотоструктур можно использовать идею создания «быстрых состояний» на границе зерен узкозонного полупроводника. «Быстрыми состояниями» могут быть металлические включения, обеспечивающие эффективную рекомбинацию носителей заряда или их удаление с границы раздела фаз. Запаздывание фотодетекторов зависит от наличия или отсутствия «быстрых состояний» на границе зерен узкозонного полупроводника и от толщины слоя оксидной фазы. Создание таких состояний вблизи границы фаз является технологически важной операцией повышения быстродействия фотодетектора. В настоящее время ведется активный поиск путей повышения быстродействия фотодетекторов на основе халькогенидов свинца, в частности за счет объединения слоев халькогенидов с углеродсодержащими частицами [6]. Согласно литературным данным, сегодня решающую роль для включения низкоразмерных материалов в микроэлектронику следующего поколения играет интеграция углеродных наноструктур [7, 8]. Так, вопросам сочетания углеродных наночастиц и нанокристаллов халькогенидов свинца посвящены работы [9, 10]. Авторы работы [9] представили один из первых успешных примеров самосборки плотноупакованных монослоев нанокристаллов теллурида свинца PbTe на монослое графена. Показано, что на монослое графена, полученного методом CVD, происходит самосборка нанокристаллов PbTe в регулярные сверхрешетки.

В работе [10] изучались массивы нанокристаллов халькогенидов свинца PbX (X = S, Se и Te) и металлов с низкой температурой плавления (Zn, Ga, Sn и Cd) на тонкой углерод-содержащей пленке. Получаемые нанокристаллы халькогенидов структурно однородны, не имеют линейных и плоских дефектов и не содержат других примесей.

В работе [11] поликристаллические тонкие пленки PbSe осаждались на подложки кремния методом термического восстановления с использованием углерода в качестве восстановителя. Установлено, что тонкие пленки PbSe с добавлением углерода характеризуется плотной микроструктурой с приблизительно одинаковыми размерами кристаллических зерен, в то время как тонкие пленки без углерода состоят из свободно распределенных кристаллов с разным размером зерен.

Авторы работы [8] демонстрируют широкополосную светочувствительную матрицу (датчик изображения) с высоким разрешением,

чувствительную к ультрафиолетовому, видимому и инфракрасному свету (300-2000 нм).

Мы предполагаем, что образование наночастиц чистого металла (свинца) может стать аналогичным решением проблемы быстрого действия. Данному направлению посвящена работа [12].

Так как элементы нанокompозитов имеют субмикроразмеры, наиболее актуальными представлялись разработки методик контроля на основе методов сканирующей зондовой микроскопии. Большое внимание уделяется и вопросам, связанным с влиянием примеси на кинетику и механизм термического окисления [13, 14]. Связь состава оксидной оболочки и концентрации собственных носителей заряда обсуждалась в [15, 16]. Термодинамические особенности возникновения состояний для быстрых рекомбинаций для улучшения быстрого действия фотоприёмников рассмотрены [17, 18]. Управление образованием пористого пространства внутри оксидных оболочек рассматривалось экспериментально [3] и с помощью моделирования в работе [19]. При этом учитывалось различия коэффициентов диффузии свинца и кадмия с через оксидную оболочку и диффузию кислорода внутрь зерна (эффект Киркендалла), а также возможность управления распределением состава твердого раствора $Pb_{1-x}Cd_xSe$ по диаметру зерна (и смещение из-за варизонности излучательных центров вглубь зерна [20]).

Так как все процессы взаимно влияют друг на друга и параметры структуры, разработка экспериментальных методов анализа и диагностики на основе атомно-силовой микроскопии позволяет эффективно контролировать протекающие процессы. Возможность контроля технологии уже на этапе синтеза позволит решать принципиально новые задачи по увеличению быстрого действия фотоприемных структур на основе халькогенидов металлов

1. Халькогениды и оксиды элементов IV группы. Получение, исследование, применение. Под ред. В.А.Мошникова, Александрова О.А., Максимов А.И., Мошников В.А., Чеснокова Д.Б. СПб.: Технолит, 2008. 240 с.

2. Канагеева Ю.М. и др. Особенности измерений электрофизических свойств фотодиодов на основе эпитаксиальных слоев PbTe для среднего ИК -диапазона с помощью атомно-силовой микроскопии // Вакуумная техника и технология. 2008. Т.18. № 1. С. 3-8.

3. Спивак Ю.М., Мошников В.А. Особенности строения фоточувствительных поликристаллических слоев на основе PbCdSe сетчатого типа // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2010. № 1. с. 97-102.

4. Мошников В.А., Спивак Ю.М. Атомно-силовая микроскопия для нанотехнологии и диагностики: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. 80 с.

5. Мошников В. А., Спивак Ю. М., Алексеев П. А., Пермяков Н. В. Атомно-силовая микроскопия для исследования наноструктурированных материалов и приборных структур: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 144 с.

6. Shin D.H., Choi S.-H. Graphene-Based Semiconductor Heterostructures for Photodetectors // Micromachines. 2018. V. 9. P. 350–379.

7. Ferrari A. C., Bonaccorso F., Fal'ko V., Novoselov K. S. et al. Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems // *Nanoscale*. 2015. V. 7. № 11. P. 4598-4810.

8. Goossens S., Navickaite G., Monasterio C. et al. Broadband image sensor array based on graphene-CMOS integration // *Nature Photonics*. 2017. V. 11. № 6. P. 366-371.

9. Robertson A. W., Ford C., He K., Kirkland A. I., Watt A. A. R., Warner J. H. PbTe Nanocrystal Arrays on Graphene and the Structural Influence of Capping Ligands // *Chemistry of Materials*. 2014. V. 26. № 4. P. 1567-1575.

10. Hu J. Q., Sun Y. G., Chen Z. G. Rapid Fabrication of Nanocrystals through in situ Electron Beam Irradiation in a Transmission Electron Microscope // *Journal of Physical Chemistry C*. 2009. V. 113. № 13. P. 5201-5205.

11. Ma D. W., Cheng C. Preparations and characterizations of polycrystalline PbSe thin films by a thermal reduction method // *Journal of Alloys and Compounds*. 2011. V. 509. № 23. P. 6595-6598.

12. Maraeva E., Maximov A., Permiako, N., Moshnikov V. Thermodynamic analysis and experimental study on the oxidation of PbX (X= S, Se) nanostructured layers // *Micromachines*. 2022. V. 13. №8. P. 1209.

13. Голубченко Н.В., Мошников В.А., Чеснокова Д.Б. Исследование микроструктуры и фазового состава поликристаллических слоев селенида свинца в процессе термического окисления // *Физика и химия стекла*. 2006. Т. 32. № 3. С. 464-478.

14. Голубченко Н.В., Мошников В.А., Чеснокова Д.Б. Влияние примесей на кинетику и механизм термического окисления поликристаллических слоев PbSe // *Неорганические материалы*. 2006. Т. 42. № 9. С. 1040-1049.

15. Мараева Е.В., Мошников В.А., Таиров Ю.М. Модели формирования оксидных слоев в наноструктурированных материалах на основе халькогенидов свинца при обработке в парах кислорода и иода // *Физика и техника полупроводников*. 2013. Т. 47. № 10. С. 1431-1434.

16. Мараева Е.В., Мошников В.А., Петров А.А., Таиров Ю.М. К модели окисления поликристаллических слоев халькогенидов свинца в иодосодержащей среде // *Физика и техника полупроводников*. 2016. Т. 50. № 6. С. 791-793.

17. Спивак Ю.М., Мараева Е.В., Мошников В.А. Анализ особенностей наноструктурирования селенида свинца оксидными фазами // В сб.: *Физика диэлектриков (ДИЭЛЕКТРИКИ-2011), материалы XII Межд. конф., СПб*. 2011. С. 47-49.

18. Мараева Е.В., Мошников В.А. Физико-химические особенности наноструктурирования интерфейсов зерен поликристаллических фотоприемников на основе халькогенидов свинца // *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2018. № 64. С. 146-151.

19. Spivak, Y.M.; Kononova, I.E.; Kononov, P.V.; Moshnikov, V.A.; Ignat'ev, S.A. The Architectonics Features of Heterostructures for IR Range Detectors Based on Polycrystalline Layers of Lead Chalcogenides // *Crystals* 2021, 11, 1143.

20. Безверхний В.П., Спивак Ю.М., Мошников В.А. Анализ путей улучшения эффективности фотолюминесценции в наноструктурированных слоях халькогенидов свинца за счет варизонности. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ № 2022614370, 21.03.2022.

С06 Влияние размера диодов на пространственное разрешение линейных фотоприёмников СВИК-диапазона на основе материала КРТ

Вишняков А.В., Васильев В.В., Сабина И.В., Сидоров Г.Ю.,
Стучинский В.А.

ИФП СО РАН им. А.В.Ржанова. Новосибирск. Россия. vishn@isp.nsc.ru

Influence of diode size on the spatial resolution of MCT-based linear SWIR FPAs

Vishnyakov Alexei Vitalievich, Vasiliev V.V., Sabinina I.V., Sidorov G.Yu.,
Stuchinsky V.A.

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-262

The effect of diode size on the spatial resolution of linear photovoltaic mid-wave infrared focal plane arrays (FPAs) based on the mercury-cadmium-tellurium material has been experimentally studied and analyzed. It was found that, at a constant pixel pitch, the resolution of such FPAs increases with increasing diode size. An explanation to this regularity is given.

Наряду с матричными, линейные фотоприемные структуры фокальной плоскости на основе материала кадмий-ртуть-теллур (КРТ) широко применяются во многих областях науки и техники. Такие фотоприёмные устройства (ФПУ) характеризуются высокими значениями эксплуатационных параметров (чувствительность, обнаружительная способность и др.). Дальнейшее увеличение показателей качества таких ФПУ предполагает оптимизацию геометрии их элементов и характеристик фоточувствительного материала.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное изучение зависимости пространственного разрешения линейных КРТ-фотоприемников от размера фотодиодов. Для случая матричных ФПУ такая зависимость ранее изучалась в расчетных работах [1, 2], в которых было получено, что при длине диффузии фотогенерированных носителей заряда (ФНЗ) ~ 20 мкм и шаге матрицы 15 мкм увеличение латеральных размеров фотодиодов приводит к улучшению разрешения фотоприемника.

Измерения проводились на линейном ФПУ (ЛФПУ) со структурой, описанной в работе [3]. Диаметр фотодиодов составлял 5, 10, 20, и 25 мкм. Для минимизации разброса измеряемых величин из-за неоднородности состава в пределах одного ЛФПУ изготавливались участки структуры с рабочими

диодами всех четырех указанных размеров. Стехиометрический коэффициент материала абсорбера составлял $x=0.3$. Длинноволновая граница fotocувствительности при 80 К была равна 5.2 мкм.

Измерялась функция рассеяния линии (ФРЛ) участков структуры с разным диаметром диодов с последующим вычислением соответствующих частотно-контрастных характеристик (ЧКХ). Профили сканирования пятен засветки измерялись при температуре 110 К. Источником света являлась выходная щель монохроматора, испускающая свет с длиной волны $\lambda = 4$ мкм. Значение объемной длины диффузии ФНЗ в материале абсорбера при 110 К составило $L_d = 43$ мкм; оно было определено из профиля фотоответа сканирующего диода со стороны структуры, свободной от соседних диодов. Толщина fotocувствительного слоя ЛФПУ составляла $d = 6$ мкм, а концентрация акцепторов (вакансий ртути) в нем – $N = 7.5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Для верификации результатов измерений и лучшего понимания полученных зависимостей проводилось Монте-Карло моделирование диффузии ФНЗ в исследованных структурах (использованный вычислительный подход описан в работе [2]). Было получено хорошее соответствие вычисленных распределений измеренным профилям фотоответа диодов. Согласно проведенному расчету, измеренные ФРЛ участков структуры с разным диаметром диодов становились более узкими при увеличении размера диодов, что соответствует увеличению пространственного разрешения ЛФПУ (см. Таблицу; перевод величин разрешения в штр/мм осуществлялся из значения пространственной частоты f на графиках ЧКХ(f) при значении ЧКХ, равном 0.5).

Таблица. Зависимость разрешения и NETD от размера диодов ЛФПУ

Диаметр диодов, мкм	Разрешение, штр/мм	NETD, мК
5	5	49
10	5.6	37
20	6.1	29
25	6.4	27

Улучшение пространственного разрешения линейного ФПУ с увеличением размера фотодиодов может быть понято из следующих соображений. В случае достаточно большой длины диффузии L_d ФНЗ в КРТ положение края оптически активной площадки каждого пиксела задаётся положением краёв p - n -переходов соседних диодов, причем при увеличении размера диодов край оптической поверхности становится более крутым [2]. В результате этого амплитуда гармоника ФРЛ на частоте Найквиста f_N увеличивается, и значения ЧКХ ФПУ на частотах вблизи f_N также увеличивается. Проведенные расчеты показывают, что улучшение разрешения с ростом размера диодов происходит только при достаточно большой длине диффузии ФНЗ. В случае малых L_d размер оптической площадки не

ограничивается краями *p-n*-переходов соседних фотодиодов, и с ростом размеров диодов разрешение ухудшается.

Таким образом, экспериментально показана целесообразность увеличения размеров диодов для достижения лучшего пространственного разрешения линейных фотовольтаических фотоприемников СВИК диапазона на основе материала КРТ. Поскольку при увеличении размера диодов увеличивается также и величина интегрируемого в ВЗН-каналах фотоприемников фототока, увеличение размеров диодов дополнительно ведет к увеличению внутренней квантовой эффективности фотоприемника и величины NETD (см. Таблицу).

Литература

1. I.I. Lee, V.G. Polovinkin, IEEE Transactions on Electron. Devices, 2020, Vol. 67, No. 8, P. 3175-3179.
2. V.A. Stuchinsky *et al.*, Opticheskiy Zhurnal, 2024, Vol. 91, No. 2, P. 59-56.
3. V.V. Vasiliev *et al.*, Opto-Electronics Review, 2010, Vol. 18, No. 3, P. 332–337.

**C07 Фоторезисторы из ГЭС КРТ МЛЭ состава $X=0,2$ и $X=0,3$
с $n-p^+$ переходом, работающие в неравновесном режиме эксклюзии
неосновных носителей заряда**

Гусаров А.В., **Филатов А.В.**, Сусов Е.В., Карпов В.В.

АО «Московский завод «САПФИР». Москва. Россия. ko-ckb@mail.ru

**Photoresistors from $n-Cd_xHg_{1-x}Te$ of structure $X=0.2$ and $X=0.3$ with
 $n-p^+$ transition, working in a nonequilibrium exclusion mode nonbasic carriers
of a charge**

Gusarov A.V., **Filatov A.V.**, Susov E.V., Karpov V.V.

Joint-stock company «Moscow factory «SAPPHIRE». Moscow. Russia. ko-ckb@mail.ru

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-265

Exclusion mode minority charge carrier of photoresistors from $n-Cd_xHg_{1-x}Te$ heteroepitaxial structures of composition $x = 0.187-0.215$ and $x = 0.29-0.3$ with transition graded-band gap layers, received by MBE was investigated. It has been established, that the concentration of electrons in exclusion mode decreases to values close to its own concentration of charge carrier. For photoresistors in the mode of exclusion from $n-Cd_xHg_{1-x}Te$ $x = 0.187-0.215$ and $x = 0.29-0.3$, for $\lambda_m = 12-13 \mu m$ and for $\lambda_m = 4.5-5 \mu m$ $Su_{\lambda_m} \geq 2.4 \times 10^7 V/W$ and detectivity $D_{\lambda_m}^* (1200, 1, 14) \sim 5 \times 10^{11} cm \cdot Hz^{1/2} \cdot W^{-1}$ were received at temperature of 77K. On basis exclusion mode minority charge carrier of photoresistors to us to propose array with number of pixel $\sim 10^6$.

Неравновесный режим эксклюзии неосновных носителей заряда в фоторезисторах из узкозонных полупроводников изучен в работах [1, 2]. Реализация предсказанных теорией эффектов эксклюзии в фоторезисторах из гетероэпитаксиальных структур $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ), изготовленных в ИФП СО РАН методом молекулярно-лучевой эпитаксии, выполнена и представлена нами в работах [3, 4]. Многопиксельные фоточувствительные элементы, изготовленные по технологии без использования разделения пикселей ионным травлением с индиевыми или иными металлическими контактами к варизонному или рабочему слою гетеро структуры КРТ при исходной концентрации электронов $n_{77} \leq 4 \times 10^{14} cm^{-3}$, образующими $n-p^+$ переходы, позволили не только радикально улучшить основные характеристики фоторезисторов, но также разработать принципиально новую конструкцию фоточувствительных элементов с радиальным смещением и

малым тепловыделением для создания матричных фоторезисторов с числом пикселей до 10^6 .

В области растянутого $n-n^+$ перехода под действием электрического поля происходит расщепление уровня Ферми и образование квазиуровней Ферми электронов и дырок, выметание (экслюзия) дырок, и в этом неравновесном режиме концентрация носителей заряда приближается к собственному значению при данной температуре (78К). При этом изменяется соотношение концентраций электронов и дырок и резко падает амбиполярная дрейфовая подвижность, снижается эффект «пролёта» электронов при подаче напряжения смещения и возрастает темновое сопротивление пикселя. В результате снижения концентрации носителей заряда в зоне экслюзии увеличивается время жизни носителей заряда и вольтовая чувствительность повышается до значений $\sim 10^7$ В/Вт. В неравновесном режиме экслюзии падают основные шумы генерации и рекомбинации носителей, остаётся лишь их фотонная составляющая.

В этих условиях обнаружительная способность фоторезисторов диапазона спектра $\lambda = 8-14$ мкм $D_{\lambda m} [1200,1,14]$ достигает значений $\sim 10^{12}$ см \cdot Вт $^{-1}$ \cdot Гц $^{1/2}$. В неравновесном режиме экслюзии для изготовления фоторезисторов стали доступны более узкозонные составы ГЭС КРТ МЛЭ, в длинноволновой области спектра до $\lambda \sim 20$ мкм. при охлаждении до ~ 78 К. Исследованные нами свойства фоточувствительных элементов из ГЭС КРТ МЛЭ составов $x \sim 0.2$ и $x \sim 0.3$ в неравновесном режиме экслюзии неосновных носителей заряда позволили нам разработать конструкцию и технологию изготовления фрагмента матричного фоторезистора с радиальным смещением и числом пикселей $\sim 10^6$ при малой суммарной мощности тепловыделения $P \sim 100$ мВт.

Литература

1. Ashley, T.Elliott, C. T. Non-equilibrium mode of operation for infrared detection. Electron. Lett. 21, P. 451-452, 1985.
2. Ashley, T. Elliott, C. T., White, A. M., Infra-Red Detection Using Minority Carrier Exclusion, SPIE Proc. V.588, P.62-68, 1986.
3. Filatov A.V., Susov E.V. , Karpov V.V., Fotorresistors With Charge – carrier Exclusion For the 8-16 μ m spectral range from Cd_xHg_{1-x} Te heteroepitaxial structures // J. of Optical Technology. 2018.V.85 №.6. P. 359-366.
4. Gusarov, A.V. Filatov, A.V. Susov, E.V., Karpov, V.V., Gindin, P.D. Radially biased photoresistors with heteroepitaxial Cd_xHg_{1-x} Te structure // J. of Optical Technology. 2019. V. 86.P. 108-113.

C08 Разработка $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}/\text{InP}$ pin-фотодиодов для ближнего ИК диапазона 2,2-2,6 мкм на основе метаморфных гетероструктур

Василькова Е.И.^{1,2}, Пирогов Е.В.¹, Баранцев О.В.¹, Воропаев К.О.³,
Васильев А.А.³, Карачинский Л.Я.¹, Новиков И.И.¹, Соболев М.С.^{1,2}

¹*СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова. Санкт-Петербург. Россия.
elenvasilkov@gmail.com*

²*СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Санкт-Петербург. Россия*

³*АО «ОКБ Планета». Великий Новгород. Россия*

Development of $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}/\text{InP}$ pin-photodiodes for SWIR 2,2-2,6 μm band based on metamorphic heterostructures

Elena I. Vasilkova^{1,2}, E.V. Pirogov¹, O.V. Barantsev¹, K.O. Voropaev³,
A.A. Vasil'ev³, L.Ya. Karachinskiy¹, I.I. Novikov¹, M.S. Sobolev^{1,2}

¹*Alferov University, Saint Petersburg, Russia*

²*Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, Russia*

³*JSC "OKB-Planeta", Velikiy Novgorod, Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-267

In this study we present $\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}/\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}/\text{InP}$ pin-photodiodes, fabricated by lift-off photolithography on MBE grown metamorphic heterostructures for use in 2,2-2,6 μm infrared band. Shunt resistance and capacity of pin-photodiode chips with a photosensitive area of 140 μm in diameter was determined to be 25 k Ω ($R_{0A} \sim 4 \Omega \cdot \text{cm}^2$) and 14 pF respectively. Relatively low dark currents (~ 300 nA at -10 mV or ~ 10 μA at -1 V) were obtained for dislocation density in the absorption layer $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ of $\sim 5 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$. Furthermore, a generation of photocurrent was registered in the pin-photodiode chip while illuminated with 2,5 μm infrared light-source.

Фотоприемники на основе полупроводниковых гетероструктур InGaAs/InP на сегодняшний день занимают лидирующее положение для применений в ближней инфракрасной области, таких как обнаружение и анализ газов, тепловое и ночное видение и т.д. [1]. Хотя наиболее освоенным для InGaAs -технологии является волновой диапазон до 1,7 мкм, область спектральной чувствительности можно расширить в длинноволновую область до 2,6 мкм, используя в качестве фотодетектора pin-фотодиод с поглощающим слоем $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$. Для получения активных слоев данного состава на подложках InP необходимо включать в конструкцию гетероструктуры метаморфные буферные слои (МБС). Подобный подход широко используется при изготовлении приборов опто- и нанoeлектроники для минимизации

плотности структурных дефектов в активных слоях, сильно рассогласованных с подложкой по параметру кристаллической решетки [2, 3]. В данной работе рассматривается формирование гетероструктур с МБС для $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}/\text{InP}$ pin-фотодиодов на их основе и изучаются параметры полученных pin-фотодиодов.

Метаморфные гетероструктуры $\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}/\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}/\text{n}^+\text{-InP}(100)$ были получены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке Riber MBE49. МБС состоял из слоя $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ (2 мкм), состав которого менялся с толщиной по линейному закону от $y = 0,52$ до $y = 0,86$, а также содержал растягивающие вставки InAs . С применением данного МБС концентрация прорастающих дислокаций в поглощающем слое $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ составила $\sim 5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$ по изображениям просвечивающей электронной микроскопии в геометрии поперечного сечения. Для получения pin-структуры во время роста слои легировались соответственно Si или Be, а обнаруженная при помощи электрохимического вольт-фарадного профилирования концентрация носителей составила $\sim 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в n^+ -МБС, $\sim 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ в $\text{n-In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ и $\sim 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в p^+ -контактных слоях. Кристаллы фотодиодов с диаметром фоточувствительной площадки 140 мкм были сформированы с помощью взрывной фотолитографии по двойной фоторезистивной маске (рис. 1).

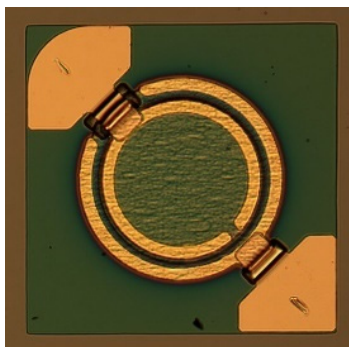


Рис. 1. Фотография кристалла pin-фотодиода

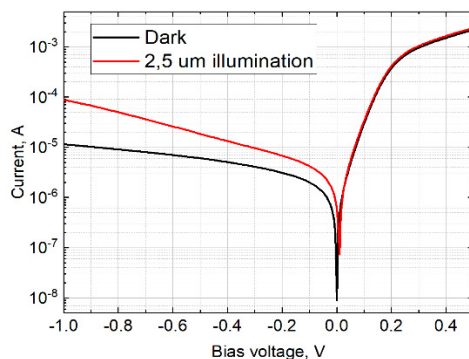


Рис. 2. ВАХ кристалла pin-фотодиода (300 К) в темноте и при падающем излучении с пиковой длиной волны 2,5 мкм

При исследовании изготовленных кристаллов pin-фотодиодов были изучены основные параметры, определяющие работоспособность фотодиода, – это темновые токи, шунтирующее сопротивление и емкость. По темновым вольт-амперным характеристикам (ВАХ) были определены обратные темновые токи: $\sim 10 \text{ мкА}$ при напряжении смещения -1 В, что соответствует плотности тока $0,065 \text{ А/см}^2$, и $\sim 300 \text{ нА}$ при -10 мВ соответственно, или $0,0019 \text{ А/см}^2$ (рис. 2). Рассчитанное из ВАХ шунтирующее сопротивление составило 25 кОм, что соответствует произведению $R_0A \sim 4 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$, где A – площадь приложения

смещения. Кроме того, было обнаружено увеличение токов обратной ветви при освещении кристалла рin-фотодиода инфракрасным излучением с пиковой длиной волны 2,5 мкм. Емкость фотодиода в отсутствие смещения составила порядка 14 пФ и далее уменьшалась с увеличением обратного напряжения, как было определено по вольт-фарадной характеристике.

Таким образом, с применением подхода метаморфного буферного слоя были изготовлены метаморфные гетероструктуры $\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}/\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}/\text{InP}$ и кристаллы рin-фотодиодов на их основе. Измеренные параметры кристаллов рin-фотодиодов с фоточувствительной областью диаметром 140 мкм составили: темновой ток ~ 300 нА при -10 мВ, $R_{0A} \sim 4$ Ом·см², емкость 14 пФ. При воздействии на кристаллы рin-фотодиодов источником инфракрасного излучения с максимумом интенсивности в 2,5 мкм наблюдалось возрастание токов обратной ветви ВАХ за счет генерации фототока. Следовательно, рассматриваемые фотодиоды на основе метаморфных гетероструктур являются перспективными для использования в качестве фотоприемников ближнего инфракрасного диапазона 2,2-2,6 мкм.

1. И. Д. Бурлаков, Л. Я. Гринченко, А. И. Дирочка, Н. Б. Залетаев, *Детекторы коротковолнового ИК-диапазона на основе InGaAs (обзор)*, Успехи прикладной физики **2**(2), 2014.

2. Yu. Egorov, L. Ya. Karachinsky, I. I. Novikov, A. V. Babichev, V. N. Nevedomskiy, V. E. Bugrov, *Optical properties of metamorphic GaAs/InAlGaAs/InGaAs heterostructures with InAs/InGaAs quantum wells, emitting light in the 1250–1400-nm spectral range*, Semiconductors **50**(5), 612-615 (2016).

3. G.B. Galiev, I.S. Vasil'evskii, S.S. Pushkarev, E.A. Klimov, R.M. Imamov, P.A. Buffat, B. Dwir, E.I. Suvorova, *Metamorphic InAlAs/InGaAs/InAlAs/GaAs HEMT heterostructures containing strained superlattices and inverse steps in the metamorphic buffer*, Journal of Crystal Growth **366**, 55-60 (2013).

С09 Примесные дефекты в оптической керамике из фтористого магния (MgF₂)

Дунаев А.А.¹, Евстропьев С.К.^{1,2}, Жулев А.М.³, Дукельский К.В.^{1,2},
Подрухин Ю.Ф.², Полищук Г.С.⁴

¹ АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова». Санкт-Петербург. Россия.
dunaev@goi.ru

² Университет ИТМО. Санкт-Петербург. Россия

³ ИП «Сурков». Никольск. Пензенская обл. Россия

⁴ АО ЛОМО. Санкт-Петербург. Россия

Impurity defects in MgF₂ optical ceramics

Dunaev A.A.¹, Evstropiev S.K.^{1,2}, Zhulev A.M.³, Dukel'skii K.V.^{1,2}, Podruhin J.F.²,
Polishchuk G.S.⁴

¹ Vavilov State Institute, St.-Petersburg, Russia. E-mail: *dunaev@goi.ru*

² ITMO Universty, St.-Petersburg, Russia

³ Individual entrepreneur, Nikolsk city, Penza region, Russia

⁴ JVC LOMO, St.-Petersburg, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-270

In this work the results of microstructural study of MgF₂ optical ceramics are presented. Different types of defects (local inclusions; branched thread-like defects; etc.) were detected and studied in the structure of ceramic material using optical and electron microscopy analysis. The energy-dispersive analysis showed the presence of carbon and oxygen impurities in these defects.

Керамика из магния фтористого (MgF₂) в виде полусферических линз – известный продукт оптического производства. Прозрачность материала в видимой области спектра позволяет визуализировать включения и другие дефекты. Цель настоящего сообщения – выявление возможных причин их появления.

Оптическая керамика MgF₂ получается одноосным вакуумным прессованием исходного порошка квалификации Ч в прессформе при температуре 923 К и давлении 200 МПа в течение 30 мин. Из проблемных зон, выявленных ОТК в 4-х линзах, вырезались образцы 10×10 мм² для исследований. Исследования проведены с помощью лупы ЛИ-3-10х и микроскопа МБС, на оптическом микроскопе Nikon Eclipse Ni-U (Nikon Instruments) и электронном микроскопе VEGA3 TESCAN. Химический состав включений определен методом энергодисперсионного рентгеновского анализа на приставке Essence™ EDS.

Во всех исследованных образцах керамики присутствуют включения и образования, имеющие различную форму и состояние. По совокупности удалось весь массив наблюдений привести к 4-м (по меньшей мере) типам неоднородностей (см. рисунок).

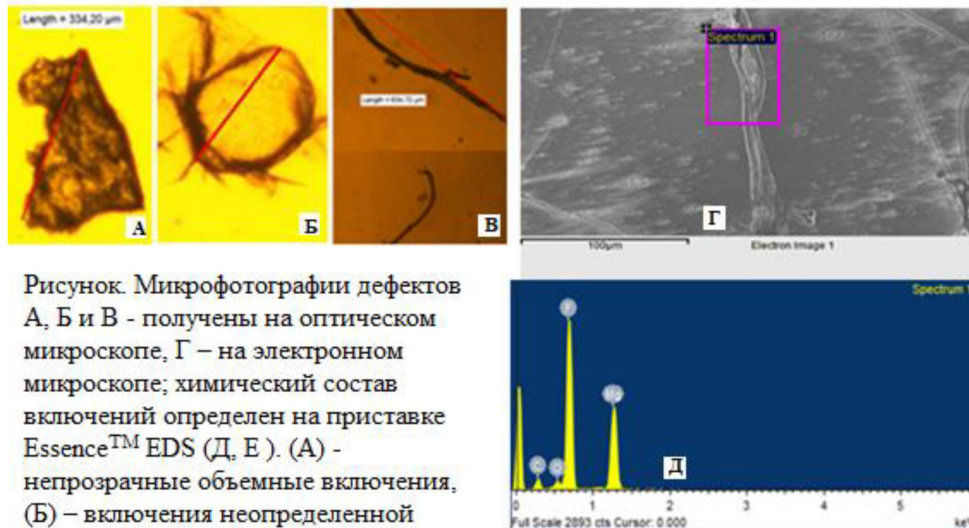


Рисунок. Микрофотографии дефектов А, Б и В - получены на оптическом микроскопе, Г – на электронном микроскопе; химический состав включений определен на приставке Essence™ EDS (Д, Е). (А) - непрозрачные объемные включения, (Б) – включения неопределенной формы, (В) – удлиненные включения типа обрезков проволоки. (Г) - электронно-микроскопический снимок нитевидного включения длиной более 100 мкм и шириной ~ 10 мкм. Анализ химического состава области, выделенной на рисунке цветной рамкой, показал наличие, помимо магния и фтора, примеси углерода и кислорода (Д, Е).

Element	Weight%	Atomic%
C K	6.36	10.16
O K	1.99	2.39
F K	68.09	68.83
Mg K	23.56	18.61
Totals	100.00	

А – единичные непрозрачные компактные включения, наблюдаемые и измеряемые под лупой и МБС. Их размеры, приведенные к условному диаметру, укладывались в интервал 0,1-0,3 мм. При большем увеличении на оптическом микроскопе Nikon Eclipse Ni-U (Nikon Instruments) они утрачивают округлость и приобретают угловатые формы. При сканировании по образцу в поле зрения проявляются объекты типа Б и В. В случае Б их геометрическая форма различна и непредсказуема, в случае Г их вид червеобразен или напоминает обрезки проволоки. Следует отметить, что дефекты типа А, Б и В, оказавшись в зоне полировки, могут быть вскрыты, что способствует нарушению целостности поверхности обрабатываемой детали. Электронно-

микроскопический снимок (Г) зафиксировал нитевидное включение на фоне хлопьевидных образований белёсого цвета.

Анализ химического состава (Д, Е) выделенной рамкой области показал наличие примеси углерода и кислорода.

Заключение

Размеры включений составляют $100\div 350$ мкм, что меньше значений, допускаемых действующим ОСТом на соответствующие керамические изделия. Вместе с тем размер включений позволяет предположить, что эти дефекты могут оказывать некоторое влияние на пропускание образцов в видимой и ИК областях спектра.

Данные энергодисперсионного анализа показали, что включения содержат примеси углерода и кислорода. Полученные в работе результаты позволяют сделать вывод о том, что источником этих примесей могут являться материалы (прекурсоры), использованные для приготовления исходного порошкообразного сырья (шихты).

С10 Площадь эффективной засветки кремниевых фотоэлектронных умножителей

Кочергина О.В., Матковская Т.А.

*Белорусская государственная академия связи». Минск.
Беларусь.kocherginaolya@tut.by*

Effective illumination square of silicon photomultipliers

Kochergina O.V., Matkovskaya T.A.

*Belarusian State Academy of Communications. Minsk. Republic of Belarus.
kocherginaolya@tut.by*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-273

The study is devoted to determining the effective area of the photosensitive surface of a silicon photomultiplier at the operating supply voltage, as well as establishing the dependence of this characteristic on the applied supply voltage. Silicon photomultipliers KOF5-1035 (Belarus), Ketek RM 3325 and ON Semi FC 30035 (Germany) were chosen as objects of study. It was found that the area of the photosensitive surface of the studied silicon photomultipliers, the sensitivity of which decreases by no more than 10% of the maximum value at the breakdown voltage, is 64-65% for all the studied silicon photomultipliers. It was found that over the entire range of supply voltages under study, the sensitivity of the studied silicon photomultipliers decreased by no more than 32% from its maximum value. The results obtained in this article can be applied to create devices for recording optical radiation in the visible range based on silicon photomultipliers.

В настоящее время для реализации технологий передачи информации и ряда других научных задач применяется оптическое излучение видимого диапазона спектра. Особой популярностью пользуются разработки в области квантовой криптографии, технологий *Li-Fi* и *FSO* [1, 2]. Для регистрации такого излучения всё чаще используются кремниевые фотоэлектронные умножители или SiФЭУ. SiФЭУ представляет собой матричный элемент, каждой ячейкой которого, является лавинный фотодиод. Данный вид фотоприемников имеет ряд преимуществ перед электровакуумными фотоэлектронными умножителями и одноэлементными лавинными фотоприемниками. SiФЭУ компактны, прочны, имеют достаточно низкую стоимость, большую площадь фоточувствительной поверхности, большие коэффициенты усиления, хорошую спектральную чувствительность в указанном диапазоне [3].

Целью исследования является установление максимальной эффективной зоны поверхности SiФЭУ при ее засветке, а также зависимости этой зоны от приложенного напряжения питания фотоприемника.

Для проведения исследования были отобраны три SiФЭУ, а именно, КОФ5-1035, Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035. Эти фотоприемники имеют схожую полупроводниковую структуру и параметры. Собрана экспериментальная установка, в которой полупроводниковый лазер генерировал постоянное оптическое излучение с длиной волны 470 нм [4]. Интенсивность оптического излучения J составила $8 \cdot 10^{-8}$ Вт/см², и выбиралась такой, чтобы фототок, при полном нахождении светового пятна оптического зонда на фоточувствительной поверхности, не менее чем в сто раз превышал темновой ток и находился в пределах динамического диапазона исследуемых SiФЭУ. Ослабленный системой нейтральных светофильтров луч поступал на оптическую систему, которая формировала на фоточувствительной поверхности SiФЭУ световое пятно круглой формы. Площадь этого пятна не превышает 0,2 площади фоточувствительной поверхности SiФЭУ. SiФЭУ располагался на координатном столике, индикаторные микрометры которого позволяли смещать световое пятно в горизонтальной плоскости двух направлениях перпендикулярных друг другу. Напряжение питания SiФЭУ контролировалось вольтметром, а протекающий ток измерялся амперметром.

Неравномерность чувствительности фотоприемника определялась согласно методике, описанной в ГОСТ 17772-88. В процессе исследования измерялась зависимость чувствительности S от места нахождения светового пятна оптического зонда на фоточувствительной поверхности кремниевого фотоумножителя. По этой зависимости определялось среднее значение чувствительности $S_{\text{ср}}$ и величину $\Delta S = S_{\text{max}} - S_{\text{min}}$, где S_{max} и S_{min} – максимальная и минимальная чувствительности соответственно. Тогда неравномерность чувствительности SiФЭУ δ определялась как $\delta = \Delta S / S_{\text{ср}}$.

Под зоной эффективной засветки понималась такая площадь фоточувствительной поверхности SiФЭУ, в которой чувствительность SiФЭУ максимальна. Эффективная площадь $A_{\text{эф}}$ для квадратной формы фоточувствительной поверхности определялась на основании ГОСТ 17772-88.

В результате исследования получено, что максимальное значение чувствительности при рабочем напряжении SiФЭУ наблюдается в центральной части фоточувствительной поверхности и симметрично уменьшается при приближении пятна оптического зонда к краю этой поверхности. Максимальное значение чувствительности наблюдается в центре фоточувствительной поверхности и уменьшается при приближении пятна оптического зонда к ее краю. Так $S_{\text{max}} = 245; 223$ и 144 кА/Вт для Ketek PM 3325, ON Semi FC 30035 и КОФ5-1035, соответственно, а $S_{\text{min}} = 173; 168$ и 107 кА/Вт для Ketek PM 3325, ON Semi FC 30035 и КОФ5-1035, соответственно. То есть чувствительность в пределах фоточувствительной

поверхности уменьшалась не более 30 % для всех исследуемых фотоприемников.

Увеличение перенапряжения приводит к уменьшению неравномерности чувствительности. При перенапряжениях $\Delta U > 0$ В зависимость неравномерности чувствительности SiФЭУ от напряжения питания линейна и составляет $0,02 \text{ В}^{-1}$ для всех исследуемых экземпляров. При этом, количество ячеек, для которых напряжение питания SiФЭУ превышает напряжения их пробы, изменяется от 65% до 75%.

Установлена величина эффективной площади фоточувствительной поверхности исследуемых SiФЭУ, которая при рабочем напряжении составила $5,8 \text{ мм}^2$ для Ketek PM 3325 и ON Semi FC 30035 и $1,0 \text{ мм}^2$ для КОФ5-1035, а при увеличении перенапряжения до 1,0 В увеличилась 19–20 % для всех исследуемых SiФЭУ.

1. Макаренко В. // Электронные компоненты и системы. 2020. № 1. С. 46–51.

2. Abderrahmen Trichili, Mitchell Arij Cox // Journal of the Optical Society of America. 2020. № 37(11). p. 1 – 31.

3. Stagliano M., Abegão L., Chiericia A. and d'Errico F. // EPN - International Journal of Science and Engineering. 2018. Vol.4. Is.10. P.21

4. Гулаков И. Р., Зеневич А. О., Кочергина О. В. // Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9, № 2. С.164 – 171.

**C11 Анализ поверхностных дефектов на последовательных стадиях
выращивания ZnTe/CdTe/HgCdTe на подложках Si с ориентацией
(013)**

Якушев М.В., Швец В.А. Кузнецова Л.С., Вдовин В.И., Федина Л.И.

ИФП СО РАН. Новосибирск. Россия. yakushev@isp.nsc.ru

**Analysis of surface defects at successive stages of ZnTe/CdTe/HgCdTe
growth on Si (013) substrates**

Yakushev Maxim V., Shvets V.A., Kuznetsova L.S., Vdovin V.I., Fedina L.I.
ISP SB RAS. Novosibirsk. Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-276.

Surface defects that form during the growth of highly mismatched Si(013)/ZnTe/CdTe/HgCdTe heterostructures were studied by coherent laser profilometry, optical microscopy and ellipsometry. At an initial, - ZnTe stage of growth, the defects appear as small hills or complexes composed of hills and pits on a relatively smooth surface. At the second stage of CdTe growth on ZnTe, pronounced, so-called V-shaped defects appear, the density of which remains approximately unchanged with further growth of the HgCdTe.

Продолжающаяся разработка инфракрасного видения на основе HgCdTe (КРТ) требует дальнейшего повышения чувствительности материала и уменьшения размера пикселя. Улучшение этих параметров напрямую связано с минимизацией плотности ростовых дефектов в КРТ, среди которых, как известно, образование объёмных и поверхностных V-дефектов является основной проблемой [1]. Поскольку V-дефекты зарождаются на возмущениях рельефа поверхности, технологически важным представляется проследить последовательное развитие морфологии поверхности на различных этапах выращивания гетероструктур Si(013)/ZnTe/CdTe/HgCdTe.

Методами эллипсометрии, интерференционной профилометрии и оптической микроскопии была последовательно исследована морфология поверхности плёнок ZnTe/Si с толщиной 11, 25 и 55 нм, затем поверхность 6 мкм плёнки CdTe в структуре Si/ZnTe /CdTe, а также поверхность КРТ. Толщина слоёв ZnTe определялась на спектральном эллипсомере. Установлено, что для плёнок ZnTe наблюдается размытие спектров эллипсометрических параметров вблизи края поглощения, что свидетельствует о сильной дефектности кристаллической структуры, которая возникает из-за большого (12%) несоответствия параметров решёток Si и ZnTe [2].

Анализ морфологии поверхности пленки ZnTe с толщиной 25 нм с

помощью оптической микроскопии показал наличие поверхностных дефектов с латеральными размерами от ~ 1 до ~ 20 микрон и плотностью $\sim 10^4$ шт/см².

Измерения на профилометре показали, что дефекты малых размеров (1-2 мкм) представляют собой холмы или ямки с высотой/глубиной порядка 10 нм на фоне относительно гладкой поверхности, а более крупные дефекты состоят из нескольких малых дефектов, объединённых в кластеры. Характерные примеры дефектов такого вида показаны на рис. 1. Исследования показали, что средняя плотность поверхностных дефектов не зависит от толщины ZnTe и варьируется в диапазоне $(4-6) \cdot 10^3$ шт/см², что совпадает по порядку величины с данными оптической микроскопии.

На поверхности пленки CdTe с толщиной 6 мкм отчетливо визуализируются пирамидальные дефекты с размером основания 5-10 мкм (рис. 2) и небольшое количество мелких дефектов в виде холмов или ямок. При этом средняя плотность дефектов существенно не меняется по сравнению с ZnTe.

Представленные результаты позволяют заключить, что морфологические дефекты на относительно гладкой поверхности роста (по данным профилометрии среднеквадратичная высота рельефа гладкой области составляет 1-2 нм) появляются уже на ранних стадиях эпитаксии ZnTe, и в дальнейшем образования новых не происходит. На некоторых участках поверхности эти дефекты накапливаются, образуя кластеры с развитой морфологией. Можно предположить, что в дальнейшем эти участки являются зародышами, на которых происходит образование и рост V-дефектов.

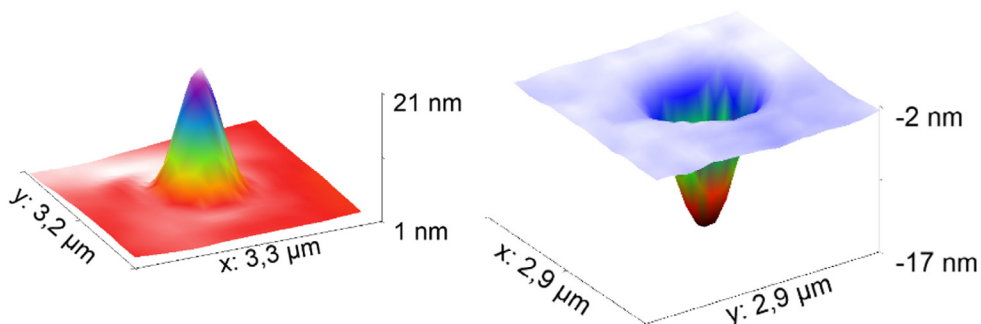


Рис. 1. Характерный вид одиночных дефектов малого размера на поверхности ZnTe (013). (а) холм и (б) ямка, измеренные на оптическом профилометре

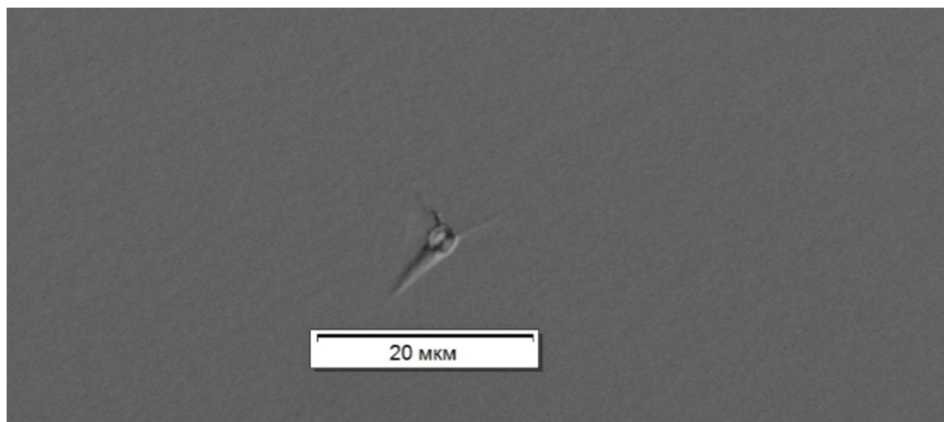


Рис. 2. Характерный вид пирамидальных дефектов на поверхности CdTe (013), измеренные на оптическом микроскопе

Литература

- [1] I.V. Sabinina, A.K. Gutakovsky, Yu.G. Sidorov, A.V. Latyshev// J. Cryst. Growth 274, 339–346 (2005).
- [2] Y. Chen, S. Simingalam, G. Brill, P. Wijewarnasuriya, N. Dhar, J. J. Kim, and D. J. Smith. // J. Electron. Mater., 41(10). pp 2917-2924 (2012).

**C12 Формирование границы раздела HfO₂-CdHgTe методом
низкотемпературного плазменно-стимулированного атомно-
слоевого осаждения**

Закиров Е.Р., Краснова И.А., Сидоров Г.Ю., Кеслер В.Г.

ИФП СО РАН. Новосибирск. Россия. erzakirov@isp.nsc.ru

**Formation of the HfO₂-HgCdTe interface by low-temperature plasma-
enhanced atomic layer deposition**

Zakirov Evgeny R., Krasnova I.A., Sidorov G.Yu., Kesler V.G.

Rzhanov Institute of semiconductor physics, Novosibirsk, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-279

HgCdTe is a widely used material for optoelectronic devices operating in the SWIR to LWIR ranges. Studying HgCdTe passivation approaches is crucial for improving the performance and stability of HgCdTe-based infrared detectors. HfO₂ deposited by PE-ALD is a promising passivation material. However, understanding the passivation mechanisms and optimizing the HfO₂ deposition process are essential for developing high-performance HgCdTe devices. XPS, EELS, AFM, and C-V methods were employed to investigate the properties of the HfO₂-HgCdTe interface formed by PE-ALD at 120 °C.

Пассивация теллурида кадмия-ртути (КРТ, CdHgTe) остается актуальным направлением исследований, работы в котором позволят улучшить характеристики и повысить стабильность оптоэлектронных устройств, изготавливаемых на основе CdHgTe. Пассивирующее покрытие должно обеспечивать высокое качество границы раздела с полупроводником, выражающееся в снижении плотности поверхностных состояний, скорости поверхностной рекомбинации, а также темнового тока и шумов, обусловленных влиянием поверхности узкозонного полупроводника. Для пассивации и защиты поверхности полупроводника от внешних воздействий, как правило, используют диэлектрические пленки либо широкозонные полупроводники, причем в случае КРТ – осаждаемые при низких температурах (~ 100 °C). Атомно-слоевое осаждение (ALD), и в частности плазменно-стимулированное атомно-слоевое осаждение (PE-ALD), является одним из наиболее технологичных методов низкотемпературного нанесения диэлектрика. Известно применение методики ALD для пассивации CdHgTe слоями Al₂O₃ [1] и ZnS [2]. В настоящее время все шире в микро- и нанoeлектронике, в том числе для пассивации полупроводников, применяется high-*k* диэлектрик HfO₂. В данной работе с помощью метода рентгеновской

фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) исследовались начальные стадии формирования границы раздела PE-ALD HfO_2 с CdHgTe , а вольт-фарадные характеристики (ВФХ) структур металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) использовались для изучения ее электрофизических параметров.

Исследования проводились на образцах МЛЭ $\text{Cd}_{0.22}\text{Hg}_{0.78}\text{Te}$, выращенного на подложке $\text{Si}(013)$, как электронной ($n \sim 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$), так и дырочной ($p \sim 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) проводимости. Было выполнено 200 циклов осаждения HfO_2 при температуре подложки $120 \text{ }^\circ\text{C}$ (процедура осаждения HfO_2 описана в работе [3]). Анализ химического состава методом РФЭС осуществлялся на установке ProvenX-ARPES (SPECS), оснащенной источником монохроматизированного рентгеновского излучения $\text{Al K}\alpha$ (1486.71 эВ). Для изготовления МДП-структур на диэлектрике сформировали индиевые контактные площадки. Измерения ВФХ проводились при температуре образцов 77 К .

В результате химического анализа установлено, что сам по себе прекурсор ТЕМАН при многократном напуске и откачке практически не взаимодействует с КРТ. На ранних этапах осаждения HfO_2 (2 цикла PE-ALD) наблюдается незначительное восстановление собственного оксида КРТ, исходно присутствовавшего на поверхности, а на более поздних (10 циклов) – его нарастание. Осаждаемые пленки имеют высокое содержание побочных продуктов окисления прекурсора. Оценка ширины запрещенной зоны диэлектрика, осуществляемая с использованием спектроскопии характеристических потерь энергий электронов (СХПЭЭ), составила 5.8 эВ . Рельеф покрытия, исследованный методом атомно-силовой микроскопии (АСМ), повторяет исходную поверхность КРТ с незначительным повышением шероховатости.

На рис. 1 представлены ВФХ МДП-структур на n - и p - $\text{Cd}_{0.22}\text{Hg}_{0.78}\text{Te}$, измеренные при различной частоте переменного сигнала f . Зависимости имеют характерный низкочастотный вид (при $f < 100 \text{ кГц}$) и проявляют гистерезис электронного типа при циклической развертке напряжения (ширина петли 30 мВ при ширине диапазона развертки 2 В). Эффективный встроенный заряд диэлектрика имеет отрицательный знак и высокую плотность $\sim 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

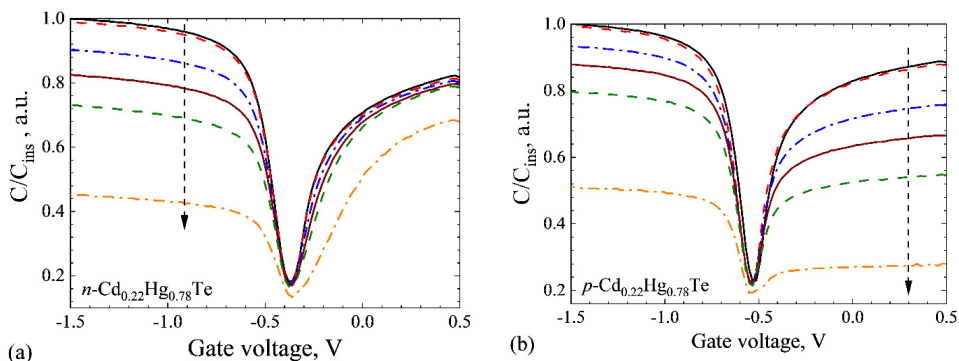


Рис. 1. Вольт-фарадные характеристики МДП-структур с 20 нм PE-ALD HfO_2 на $Cd_{0.22}Hg_{0.78}Te$ n - (a) и p -типа (b). Стрелкой показано изменение кривых при увеличении частоты измерительного сигнала: 5, 100, 500, 700, 1000 и 3000 кГц

Оксид гафния, осаждаемый методом PE-ALD при низких температурах, является перспективным пассивирующим и защитным покрытием для $CdHgTe$, однако требуется снижение плотности встроенного заряда. Возможным решением этой проблемы может стать изменение режима осаждения на начальных стадиях и/или применение дополнительных обработок поверхности $CdHgTe$ перед осаждением диэлектрика.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-10134, <https://rscf.ru/project/21-72-10134/>

1. Zhang P., Ye Z.-H., Sun C.H., Chen Y.-Y., Zhang T.-N., Chen X., Lin C., Ding R.-J., He L. Passivation effect of atomic layer deposition of Al_2O_3 film on $HgCdTe$ infrared detectors // *J. Electron. Mater.* – 2016. – V. 45. – P. 4716–4720.

2. Ailiang C., Changhong S., Fang W., Zhenhua Y. Electrical properties of psams-free ultra-low-temperature ALD ZnS passivation on p -type $HgCdTe$ // *Infrared Phys. Technol.* – 2021. – V. 114. – P. 103667.

3. Gorshkov D.V., Zakirov E.R., Sidorov G.Yu., Sabinina I.V., Marin D.V., Ikusov D.G., Yakushev M.V., Golyashov V.A., Tereshchenko O.E. Study of MIS structures based on $CdHgTe$ and HfO_2 applied by PEALD // *Appl. Phys. Lett.* – 2022. – V. 121. – P. 081602.

C13 Обработки поверхности CdHgTe после жидкостного травления в Br:HBr

Краснова И.А., Закиров Е.Р., Сидоров Г.Ю.

ИФП СО РАН. Новосибирск. Россия. krasnovaia@isp.nsc.ru

Treatments of CdHgTe surface after wet etching in Br:HBr

Krasnova Irina A., Zakirov E.R., Sidorov G.Yu.

*Rzhanov Institute of Semiconductor Physics Siberian Branch RAS. Novosibirsk.
Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-282

The etching of CdHgTe is an important technological step in device fabrication. However, etching forms a layer of elemental tellurium and also deteriorates the insulator–CdHgTe interface. In this work, the influence of different treatments of the CdHgTe surface after wet etching in Br:HBr is considered. The studies were carried out by X-ray photoelectron spectroscopy and measurements of capacitance-voltage characteristics.

Твердый раствор кадмий-ртуть-теллур CdHgTe (КРТ) широко применяется в науке и технике, в том числе при изготовлении оптоэлектронных устройств, работающих в ИК-диапазоне. При изготовлении многоэлементных фотоприемных устройств одной из важных технологических операций является формирование меза-структур. В настоящее время для травления КРТ повсеместно используются растворы брома (например, Br₂:HBr). В результате такого травления на поверхности КРТ образуется тонкий (~ 1 нм) слой элементарного теллура. Известно, что травление в растворах брома оказывает негативное влияние на электрофизические характеристики границы раздела диэлектрик–CdHgTe, которое может быть обусловлено присутствием элементарного теллура и его оксида. В данной работе исследовалось влияние химических обработок, осуществляемых после жидкостного травления КРТ в Br₂:HBr, на химический состав его поверхности и электрофизические характеристики границы раздела диэлектрик–CdHgTe.

Исследования проводились на нелегированном МЛЭ Cd_{0,22}Hg_{0,78}Te (концентрация доноров $n \sim 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$). В качестве реперного выступал образец КРТ, не подвергавшийся каким-либо обработкам. Один образец травили в растворе H₂O:HBr:H₂O₂ (60:10:1) в течение 20 секунд, а остальные – в 0.3% растворе Br₂:HBr в течение 10 секунд. Первый способ обработки после травления в Br₂:HBr заключался в выдержке образца в течение 30 секунд в растворе HNO₃:H₂O₂ (3:1), а другой – в 1 М водном растворе NaBH₄.

Химический состав получаемых поверхностей исследовался методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Затем на все образцы методом PE-ALD при температуре подложки 120 °С был осажден диэлектрик HfO_2 толщиной около 20 нм, а методом фотолитографии и термического испарения сформированы индиевые контакты. На полученных МДП-структурах измерялись вольт-фарадные характеристики при температуре жидкого азота в темноте.

В результате химического анализа установлено, что при травлении CdHgTe в растворе $\text{H}_2\text{O}:\text{HBr}:\text{H}_2\text{O}_2$ толщина слоя элементарного теллура составляет около 0.8 нм, в то время как при стандартном травлении в $\text{Br}_2:\text{HBr}$ она достигает ~ 1.5 нм. Дополнительные обработки в растворах NaBH_4 и $\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}_2$ элементарного теллура на поверхности не оставляют (Рис. 1).

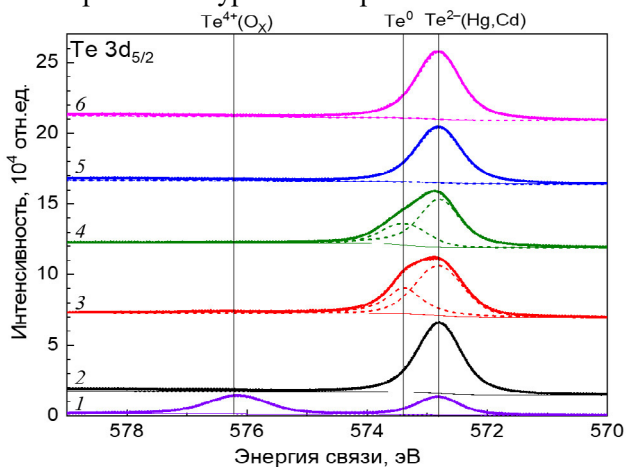


Рис. 1. Фотоэлектронные линии $\text{Te } 3d_{5/2}$ образцов CdHgTe : реперного (1), химически очищенного (2), подвергшийся травлению в $\text{Br}_2:\text{HBr}$ (3) или $\text{H}_2\text{O}:\text{HBr}:\text{H}_2\text{O}_2$ (4), обработанный после травления в $\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}_2$ (5) и водном растворе NaBH_4 (6). Точками показаны экспериментальные данные, а линиями – результат разложения на компоненты.

Анализ вольт-фарадных характеристик показал, что все образцы обладают отрицательным встроенным зарядом диэлектрика, причем любая обработка поверхности увеличивает его величину. Наибольшая плотность отрицательного встроенного заряда наблюдается у образца, который травил в $\text{H}_2\text{O}:\text{HBr}:\text{H}_2\text{O}_2$: $-2.1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. У реперного образца плотность отрицательного встроенного заряда составила $-1.2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Из петли гистерезиса определены плотности медленных состояний, нормированные на ширину диапазона циклической развертки напряжения. Стандартное травление в $\text{Br}_2:\text{HBr}$ уменьшило плотность медленных состояний до $1.7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}\text{В}^{-1}$ по сравнению с реперным образцом ($3.0 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}\text{В}^{-1}$). Обработка в $\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}_2$ позволяет дополнительно снизить плотность

медленных состояний до $1.4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ В}^{-1}$.

Установлено, что любое травление приводит к увеличению концентрации донорных центров в области пространственного заряда КРТ. Но дополнительная обработка приводит к тому, что концентрация становится близкой к концентрации в реперном образце.

Дополнительная обработка поверхности КРТ после жидкостного травления является перспективным методом для удаления слоя элементарного теллура и улучшения электрофизических характеристик границы раздела диэлектрик–CdHgTe. Необходимо дальнейшее развитие этого подхода.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-10134, <https://rscf.ru/project/21-72-10134/>

C14 Контроль качества групповой стыковки кристаллов

Акимов В.М., Иродов Н.А., Лопухин А.А.

ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия. orionf@orion-ir.ru

Quality control of group joining of crystals

Akimov V.M., Irodov N.A., Lopukhin A.A.

Orion R&P Association Inc. Moscow. Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-285

Quality control of the joining of crystals during their group assembly is carried out in two stages. The first step involves optical inspection of gaps on the open peripheral sides of the group assembly at several points. At the second stage, the flatness of the rear surfaces of the FPA group assembly is monitored using a profilometer. Based on the results of measurements of crystal profiles, individual compression of the crystals is carried out. As a result, we obtain a group assembly of FPA crystals with equal gaps.

Представлены результаты разработки и исследования предложенного комбинированного метода контроля качества групповой стыковки кристаллов, используемого при создании матричных фотоприемных устройств инфракрасного диапазона (МФПУ ИК).

Метод групповой стыковки реализуется путем последовательной гибридизации необходимого числа кристаллов БИС на единую подложку с кристаллами матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) и используется для группового утоньшения кристаллов МФЧЭ и разделения сборки на отдельные модули.

После операции стыковки кристаллов БИС считывания и матрицы фоточувствительных элементов методом холодной сварки давлением индиевых столбиков проводится контроль качества стыковки кристаллов модуля путем измерения величин зазоров между кристаллами.

Известен неразрушающий способ контроля качества стыковки [патент RU 2660020], по которому производится визуальный контроль зазоров в нескольких точках, обычно от 3х до 7и в зависимости от размеров кристаллов на каждой из четырех сторон модуля. По результатам измерения размеров индиевых столбиков до и после стыковки модуль отправляется на последующие технологические операции или на достыковку (дожим) кристаллов в случае невыполнения условию критерия стыковки.

Основной недостаток такого способа контроля качества стыковки состоит в невозможности прямого визуального контроля зазоров при

групповой сборке на внутренних сторонах периферийных кристаллов или полностью на всех сторонах внутренних кристаллов, где зазоры визуально не видны. Такая неопределенность в величинах зазоров внутренних модулей может привести к пропуску модулей с большими зазорами и, следовательно, к возможной расстыковке кристаллов при перепадах температур, вибрациях и ударах при их эксплуатации.

Контроль качества стыковки кристаллов при их групповой сборке проводится в два этапа. На первом этапе проводится оптический контроль зазоров известным способом на открытых периферийных сторонах групповой сборки в нескольких точках. На втором этапе проводится контроль плоскостности тыльных поверхностей БИС групповой сборки с помощью профилометра.

Для определения разницы в высотах соседних кристаллов после стыковки проводится измерение профиля по двум трассам, снятых по краям тыльной стороны каждого модуля от одного до другого края групповой сборки по одной координате. Так, например, для групповой сборки 4x4 кристаллов достаточно измерение 8 профилограмм. На полученных профилограммах виден как разброс в высотах сторон соседних кристаллов, отражающий разницу в величинах зазоров между соседними кристаллами БИС, так и перекося кристалла БИС после стыковки. По результатам измерений профилей кристаллов производится, если это необходимо, индивидуальный дожим кристаллов БИС с определенной нагрузкой для выравнивания величин зазоров состыкованных модулей групповой сборки. В итоге получаем групповую сборку кристаллов БИС с равными зазорами.

Литература

Патент РФ № RU 2660020.

C15 Дифракция в фотолитографических процессах, как причина неоднородности чувствительности элементов фотоприемных матриц

Болтарь К.О.^{1,2}, Седнев М.В.¹, Кожаринова Е.А.¹, Головин С.В.¹,
Кузнецова А.Д.¹, Атрашков А.С.¹, Трухачев А.В.¹, Лопухин А.А.¹,
Пермикина Е.Н.¹

¹ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия. orionf@orion-ir.ru

²Московский физико-технический институт. Долгопрудный. МО. Россия

Diffraction in photolithographic processes as the reason for the heterogeneity of the sensitivity of the elements of photodetector matrices

Boltar K.O., Sednev M.V., Kozharinova E.A., Golovin S.V., Kuznetsova A.D.,
Atrashkov A.S., Trukhachev A.V., Lopukhin A.A., Permikina E.N.
Orion R&P Association, JSC, Moscow, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-287

An analysis was carried out of possible factors leading to distortion during the formation of a photomask image on a photoresist layer in contact photolithography processes, which leads to uneven geometric dimensions of the elements of photodetector matrices and, as a consequence, a spread in sensitivity across the elements of matrix IR photodetectors.

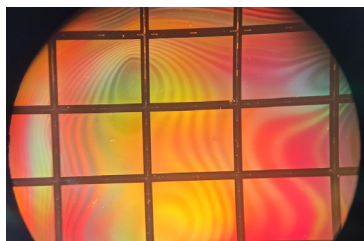
Проведен анализ возможных факторов, приводящих к искажению при формировании изображения фотошаблона на слое фоторезиста в процессах контактной фотолитографии, что приводит к неодинаковости геометрических размеров элементов фотоприемных матриц и, как следствие, разбросу чувствительности по элементам матричных ИК фотоприемников.

Представлены основные результаты этого исследования, полученные при изготовлении фоточувствительных матриц форматов 384*288 с шагом 25 мкм, 320*256 и 640*512 с шагом 30 и 15 мкм, соответственно, на основе гетероэпитаксиальных слоев GaAs/AlGaAs и хВп InGaAs, выращенных на подложках из арсенида галлия и фосфида индия, соответственно. Установлено, что основной причиной разброса чувствительности по элементам матричных ИК фотоприемников является неровность поверхности полупроводниковых пластин с гетеро-эпитаксиальными слоями.

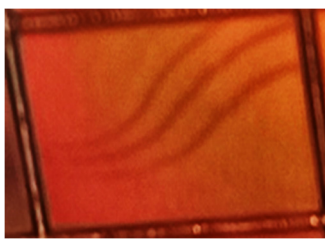
На рис. 1 представлены фотографии фрагмента пластины с матрицами ФЧЭ на основе QWIP-структур после фотолитографии дифракционной решетки (а) и матрицы ФЧЭ А со стороны пикселей перед гибридизацией (б) а

также изображение, полученное фотоприемным модулем с ФЧЭ А, при однородном освещении со стороны подложки (в).

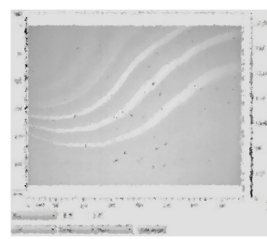
Изолинии одинаковой яркости на рис. 1 показывают картину интенсивности отражения одинаковых размеров, создаваемую при взаимодействии света с масками фоторезиста (1а) и металлическими контактами элементов (1б) матрицы ФЧЭ А, а также распределение чувствительности (1в) фотоприемного модуля с ФЧЭ А при температуре охлаждения 70°К.



а. Фотография фрагмента пластины с матрицами ФЧЭ на основе QWIP-структур после фотолитографии дифракционной решетки.



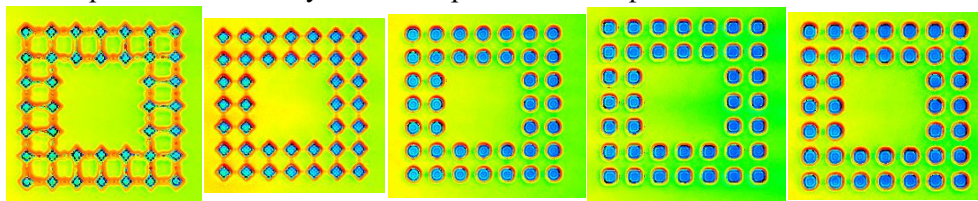
б. Фотография матрицы ФЧЭ А перед гибридизацией



в. Распределение чувствительности фотоприемного модуля с ФЧЭ А при температуре охлаждения 70°К.

Рис. 1.

На рис. 2 представлены фотографии отдельных элементов пяти QWIP матриц формата 384*288 с шагом 25 мкм после фотолитографии дифракционной решетки в слое фоторезиста толщиной 0,5 мкм на пластине диаметром 76 мм с выступающими ростовыми дефектами.



1

2

3

4

5

Рис. 2.

Отклонения от плоскости поверхности пластины, в том числе локально расщепленные на ней выступы, не позволяют установить одинаковое во всех точках расстояние к фотошаблону при проведении фотолитографических процессов. Наличие зазора между фотошаблоном и подложкой приводит к искажению формы и размеров элементов в зависимости от расстояния от шаблона до фоторезиста, нанесенного на пластину с гетеро-эпитаксиальными слоями.

Литература

1. И.Д. Бурлаков, К.О. Болтарь, М.В. Седнев Ионно-плазменные процессы в технологии изготовления МФЧЭ из КРТ // Прикладная физика. 2007. №5. С.58
2. А.В. Трухачев, М.В. Седнев, Н.С. Трухачева, К.О. Болтарь. Исследование глубины и скорости ионного травления QWIP-структур Прикладная физика. 2019. №6. С. 54.
3. Н.С. Трухачева, М.В. Седнев, А.В. Трухачев, А.В. Ляликов Плазмохимическое травление двухслойной маски молибден-фоторезист // Прикладная физика. 2019. №4. С. 54.

С16 Образование дефектов диэлектрических слоев в процессах диффузии в кремнии

Болтарь К.О.^{1,2}, Вильдяева М.Н.¹, Иродов Н.А.¹, Климанов Е.А.¹,
Ляликов А.В.¹, Малыгин А.В.¹, Молчанов Д.С.¹, Макарова Э.А.¹

¹ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия. orionf@orion-ir.ru

²Московский физико-технический институт. Долгопрудный. МО. Россия

Defect insulator layers formation during diffusion in silicon

K.O. Boltar, M.N. Vil'dyeva, N.A. Irodov, E.A. Klimanov, A.V. Lyalikov,
V.A. Malygin, D.S. Molchanov, E.A. Makarova
Orion R&P Association, JSC, Moscow, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-290

It was found that possible origin defects formation is liquid phosphorosilicate glass alloying through oxide layers. Formation silicon-rich phase takes place on silicon surface under defect.

Рассмотрено влияние режимов диффузии фосфора из жидкого источника (POCl_3) и твердого источника (метафосфат алюминия (МФА)) на образование локальных дефектов в слоях SiO_2 и на поверхности кремния. Указанных дефекты могут приводить к образованию локальных n^+ каналов в p^+ - n переходах, вызывая токи утечки в кремниевых фотодиодах.

Цикл изготовления включал операции окисления в парах $\text{H}_2\text{O}+\text{HCl}$, фотолитографии, загонки (осаждения) бора из BN , диффузии бора и диффузии фосфора на пластинах монокристаллического кремния (Cz-Si) n -типа диаметром 100 мм с удельным сопротивлением 4-5 Ом·см и ориентацией (100).

На изготовленных образцах определялась концентрация и распределение по пластине локальных дефектов с помощью оптического микроскопа. Для определения размеров и формы дефектов использовались РЭМ, атомно-силовой микроскоп и профилометр. Состав элементов в дефектах определялся рентгеновской спектроскопией.

Основные результаты сводятся к следующему:

1. Наблюдаемые дефекты окисла представляют собой ямки круглой формы диаметром от 2 до 40 мкм, глубина которых пропорциональна их диаметру (рис. 1) (в некоторых случаях сквозные отверстия в окисле толщиной 0,5 мкм).

2. На профиле дефекта наблюдаются гладкие стенки до глубины 0,15 мкм, затем шероховатый профиль (рис. 2). В центре дефект часто имеет вид розетки (рис. 3).

3. Атомная доля кремния в дефекте достигает 65-68% (в SiO_2 -47%), атомная доля кислорода 32-35% (в SiO_2 -53%).

4. Распределение дефектов по площади пластины является хаотическим вне зависимости от применяемого источника диффузанта (POCl_3 или МФА) и расположения пластин в реакторе: вертикальное или горизонтальное относительно потока газов.

5. Снижение концентрации фосфора (увеличение поверхностного сопротивления) приводит к снижению плотности дефектов (например, при снижении температуры процесса).

6. Рассматриваемые дефекты при диффузии бора не наблюдаются.

7. Плотность дефектов зависит от качества диэлектрической пленки – она меньше при использовании в качестве защиты от диффузанта первичного термического окисла и увеличивается, если окисел предварительно подвергался воздействию диффузии бора.

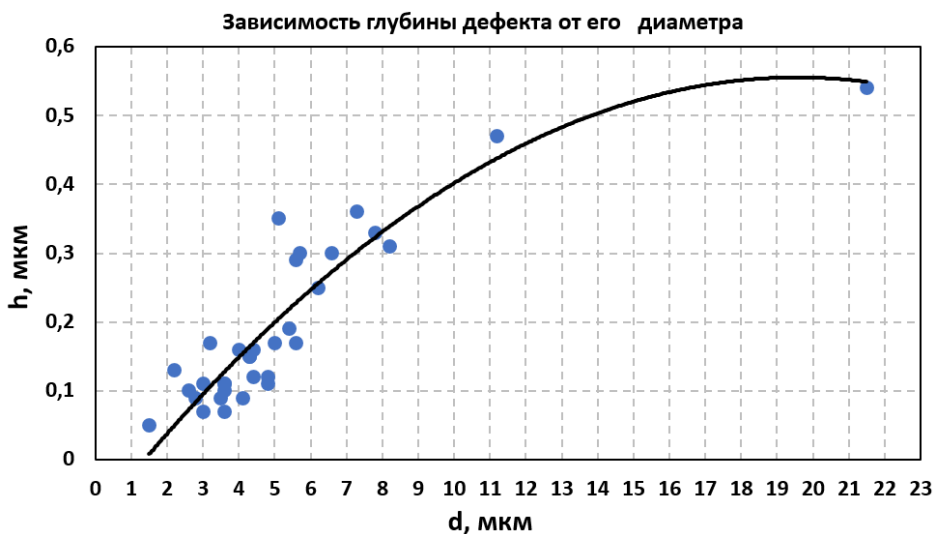


Рис. 1.

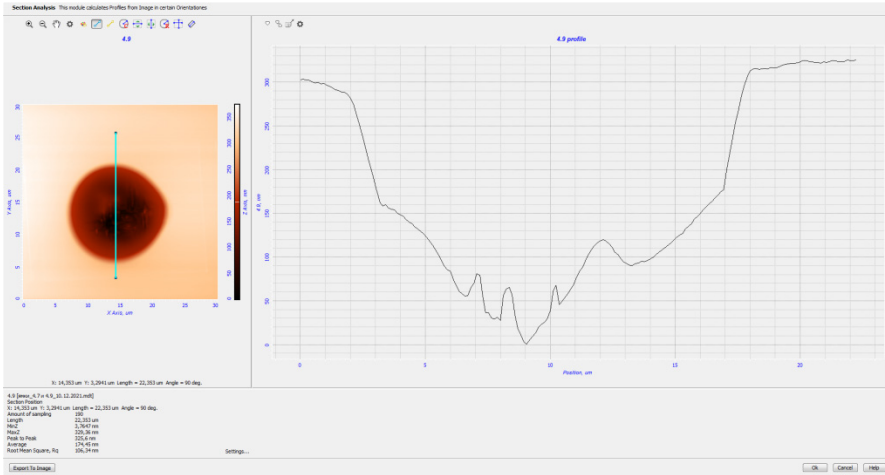


Рис. 2.

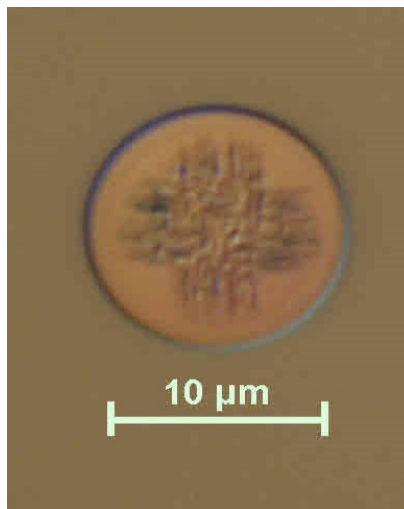


Рис. 3.

Анализ результатов показывает, что вероятным механизмом образования дефектов является проплавление слоя окисла жидким при температуре диффузии фосфорно-силикатным стеклом с формированием на дне ямки кристаллической фазы, обогащенной кремнием.

C17 Исследование краевой металлизации оптически прозрачных окон, формируемого методом магнетронного напыления

Трухачев А.В.¹, Седнев М.В.¹, Болтарь К.О.^{1,2}, Мансветов Н.Г.¹

¹*ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия. orionmoscow@mail.ru*
²*Московский физико-технический институт. Долгопрудный. МО. Россия*

Investigation of the edge metallization of optically transparent windows formed by vacuum deposition

Trukhachev A.V., Sednev M.V., Boltar K.O., Mansvetov N.G.
Orion R&P Association, JSC. Moscow. Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-293

The paper examines the process of formation of edge metallization on input windows (germanium, silicon and other disks) used to input the received light flux by a photodetector located in a protective sealed housing. The article presents the results of an experimental study of the dependence of the edge metallization profile of Ge disks formed by magnetron sputtering on the design parameters of the loading device. Design options for loading devices are presented. The influence of thickness on the profiles of edge metallization of structural elements of the loading device, masking the disks during deposition, has been experimentally shown.

Исследован процесс формирования краевой металлизации на входных окнах (германиевых, кремниевых и других дисках), используемых для ввода принимаемого светового потока фотоприемником, находящимся в защитном герметичном корпусе. В работе представлены результаты экспериментального исследования зависимости профиля краевой металлизации Ge дисков, формируемого магнетронным напылением, от конструктивных параметров грузочного устройства. Представлены варианты конструкций грузочных устройств. Экспериментально показано влияние толщины на профили краевой металлизации элементов конструкции грузочного устройства, маскирующих диски при напылении.

В конструкции корпуса фотоприемника функционально необходимо входное окно[1÷3], которое изготавливают из оптически прозрачных[4], в том числе в ИК диапазоне, материалов: германий, кремний, сапфир и др. Для уменьшения потерь на отражение принимаемого светового потока формируют напылением антиотражающее покрытие (АОП) с двух сторон входного окна в центральной области, размер которой определен оптической схемой использования фотоприемника.

Необходимость защиты поверхности антиотражающего покрытия в процессе напыления краевой металлизации вынуждает использовать в конструкции загрузочного устройства маскирующий элемент, касающийся поверхности оптически прозрачного элемента с АОП. Высота этого элемента может существенно влиять на толщину краевой металлизации.

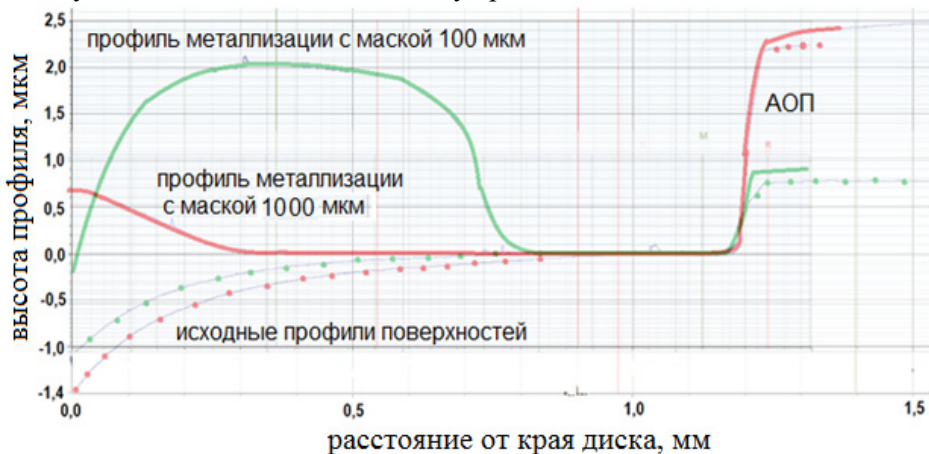


Рис. 1. Совмещённые профили поверхности края Ge диска до и после напыления металлизации в загрузочных устройствах с маскирующими элементами толщиной 100 и 1000 мкм.

Процесс формирования краевой металлизации осуществляли на установке магнетронного распыления. В исследовании использовали один из возможных вариантов металлизации из молибдена, никеля и золота (Mo/Ni/Au). Эта комбинация материалов обеспечивает высокую адгезию с поверхностью диска, достаточную толщину и пассивацию никеля слоем золота на время межоперационного хранения перед пайкой.

Для выявления зависимости профиля краевой металлизации Ge дисков от геометрии загрузочного устройства при проведении работ было использовано два вида загрузочных устройства.

Габаритами элементов конструкций, в том числе высотой маскирующего элемента, можно управлять распределением толщины напыляемого слоя на краю пластин (смотри рис. 2). Использование загрузочного устройства с маскирующим элементом, касающимся поверхности оптически прозрачного элемента с АОП, высотой 100 мкм и игольчатым сепаратором позволяет сместить профиль краевой металлизации на 0,5 мм в направлении АОП (смотри рис. 1). Такое поведение профилей металлизации можно объяснить, особенностями процесса магнетронного распыления мишени на плоскую пластину через маски различной высоты.

На рис. 2 представлен фрагмент металлического корпуса фотоприемника

с входным окном из германия, впаянным оловянно-свинцовым припоем. Смачивание припоем германиевого окна происходит однородно по всей металлизированной поверхности.

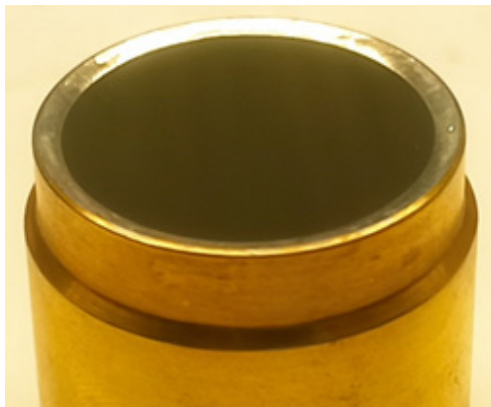


Рис. 2. Фрагмент металлического корпуса фотоприемника с впаянным входным окном.

Литература

1. Diamond Materials GmbH, Freiburg, Germany www.diamond-materials.com
2. C. Damerow and W. Erley A simple and versatile ultrahigh vacuum leaktight infrared window assembly. Citation: Journal of Vacuum Science & Technology A 5, 2974 (1987); doi: 10.1116/1.574236
3. K. Zilic, A. Aboobaker, F. Aubin, et al. A double vacuum window mechanism for space-borne applications. Cite as: Rev. Sci. Instrum. 88, 045112 (2017); <https://doi.org/10.1063/1.4981814>. Submitted: 06 February 2017 • Accepted: 09 April 2017 • Published Online: 25 April 2017
4. Vanessa Stenchly, Fabian Lofink, Wolfgang Reinert. AR-concepts for hermetic wafer level packaging of uncooled FIR bolometer arrays Fraunhofer Institute for Silicon Technology Fraunhoferstr.1, 25524 Itzehoe, Germany Vanessa.stenchly@isit.fraunhofer.de, +49 4821-171494
5. К.О. Болтарь, М.В. Седнев, Е. Коротаев. Способ герметизации вакуумных металлических конструкций с оптически-прозрачными элементами, Заявка №2022133766 от 20.12.2022., решение о выдаче патента №2022133766/05(073519) от 14.09.2023
6. К.О. Болтарь, М.В. Седнев, А.В. Трухачев, Способ формирования краевой металлизации оптически-прозрачных элементов для герметизации пайкой вакуумных металлических конструкций. Заявка №2022133838 от 12.12.2022., решение о выдаче патента №2022133838/05(073519) от 02.10.2023

C18 Импульсное реактивное магнетронное распыление как метод нанесения термочувствительных пленок оксида ванадия для микроболометров

Занько А.И., Соловьев Я.А., Колос В.В., Ковальчук Н.С.

*ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». Минск.
Беларусь. zanko.andrei@inbox.ru*

Pulsed reactive magnetron sputtering as a method of applying thermosensitive vanadium oxide films for microbolometers

Zanka A.I., Solovjov J.A., Kolos V.V., Kovalchuk N.S.

*JSC "INTEGRAL" - manager holding company «INTEGRAL». Minsk. Republic of
Belarus*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-296

Vanadium oxide films were deposited by pulsed reactive magnetron sputtering for their application in microbolometers. The films with a hysteresis dependence of resistivity on temperature due to the high content of the VO₂ phase exhibit the highest temperature coefficient of resistivity of 3-3.2%/°C. The temperature coefficient of resistivity of films with a non-hysteresis dependence of resistivity on temperature reaches 2,3-2,5%/°C.

Микроболометр – это прибор, регистрирующий инфракрасное излучение (ИК). ИК-излучение, попадающее на термочувствительный элемент микроболометра, изменяет его электрическое сопротивление, которое впоследствии регистрируется измерительной системой. Для наиболее значительного изменения электрического сопротивления термочувствительный элемент—должен обладать высоким температурным коэффициентом электрического сопротивления (ТКС). В современных микроболометрах, в качестве термочувствительного элемента используют аморфный кремний (α -Si) и оксид ванадия (VOx) [1]. Большинство производителей микроболометров используют пленки VOx [2] в основном из-за меньшего удельного электрического сопротивления чем α -Si. Пленки VOx могут иметь высокий отрицательный ТКС, более – 2 %/°C и приемлемым удельным сопротивлением от 0,1 до 10 Ом·см при комнатной температуре. Импульсным реактивным магнетронным распылением можно получить пленки VOx с необходимыми электрическими параметрами и использовать их в технологическом процессе изготовления микроболометров. Все процессы реактивного магнетронного распыления подвержены гистерезисному поведению разрядных параметров от количества реактивного газа. Что может

приводить к значительным нестабильностям технологического процесса. Импульсный режим распыления позволяет получить более стабильный процесс нанесения пленок VO_x , чем при постоянном токе. Дополнительным фактором для стабилизации процесса является снятие заряда с мишени магнетрона при положительном потенциале. При этом гистерезисный характер разрядных параметров сохраняется. На рисунке 1 показана типичная гистерезисная зависимость тока разряда (I_p) магнетрона от расхода кислорода (Q_{O_2}) при постоянном общем расходе аргона и кислорода, мощности распыления и рабочего давления.

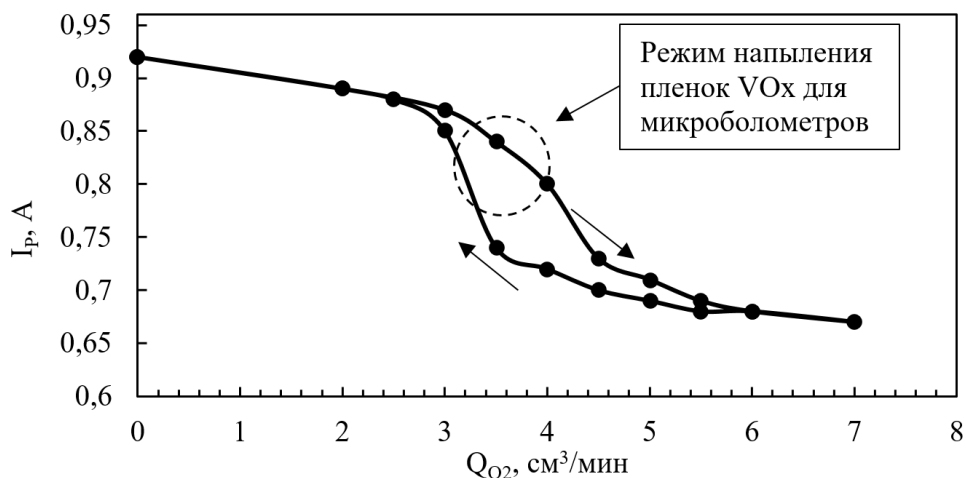


Рис. 1. Зависимость тока разряда магнетрона от расхода кислорода при постоянном расходе смеси газов аргона и кислорода

Основной проблемой при магнетронном распылении пленок VO_x с необходимыми электрическими параметрами является узкий рабочий диапазон расхода кислорода, который порой находится в диапазоне менее $1 \text{ см}^3/\text{мин}$. Расход кислорода для нанесения пленок VO_x с высоким ТКС находится в гистерезисной области разрядных параметров магнетронного распыления.

В ОАО «Интеграл» разработаны процессы импульсного реактивного магнетронного распыления пленок VO_x для применения их в микроболометрах. На рисунке 2 представлена сводная информация о зависимости ТКС пленок VO_x при 25°C от их удельного электрического сопротивления, полученных в ОАО «Интеграл».

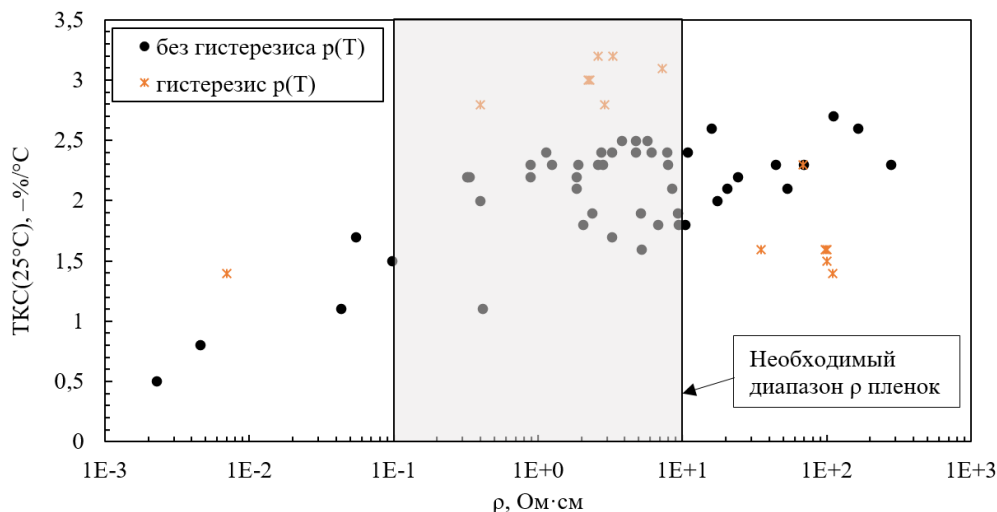


Рис. 2. Зависимость ТКС пленок VOx от их удельного электрического сопротивления

Полученные нами пленки VOx можно разделить на две группы. К первой группе относятся пленки VOx с безгистерезисной зависимостью удельного сопротивления от температуры. Наиболее высокий ТКС от $-2,3$ до $-2,5$ $\%/^{\circ}\text{C}$ получен при удельном электрическом сопротивлении 3-6 Ом·см. Такие пленки являются преимущественно аморфными со смешанным фазовым составом. Ко второй группе относятся пленки с гистерезисом удельного сопротивления от температуры, с резким изменением электропроводности на 2-3 порядка при температуре около 65°C . Зависимостью удельного сопротивления от температуры проводилось в диапазоне $25-85^{\circ}\text{C}$. Пленки VOx с гистерезисом в необходимом диапазоне удельного электрического сопротивления имеют самый высокий ТКС, который достигает от -3 до $-3,2$ $\%/^{\circ}\text{C}$. Структура таких пленок поликристаллическая со смешанным фазовым составом, и более высоким содержанием фазы VO₂ чем в безгистерезисных пленках.

Для неохлаждаемых микроболометров можно использовать пленки VOx с высоким ТКС и гистерезисом удельного сопротивления, но иметь ограничение в рабочем диапазоне микроболометров до температур $55-60^{\circ}\text{C}$. Или использовать пленки VOx с умеренным ТКС, без гистерезиса удельного сопротивления, но в более широком рабочем диапазоне температур микроболометров.

1. Uncooled infrared imaging: higher performance, lower costs; Application Note Ref: An ISO 9001 Certified Company, Sofradir EC, Inc.

2. Niklaus F., Vieider C., Jakobsen H. MEMS-based uncooled infrared bolometer arrays: a review / F. Niklaus, C. Vieider, H. Jakobsen // Proc. SPIE 6836, MEMS/MOEMS Technologies and Applications III, 68360D (2008).

C19 p-n-переход на коллоидных квантовых точках

Гусев В.И.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. Санкт-Петербург. Россия. vlad_suns@mail.ru

Colloidal quantum dot p-n junction

Gusev Vladislav I.

Ioffe Institute, Saint Petersburg, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-299

This work presents a simple theoretical model of the p-n junction in an array of doped colloidal quantum dots (CQDs). Using computer simulations we have obtained energy diagrams of the p-n junction based on CQDs and the dependence of the space charge region thickness on dopant concentration. The analysis shows that the results are consistent with the standard theory describing a semiconductor P-N junction in the case of low dopant concentration. At high dopant concentrations, the density of states reveals the presence of a Coulomb gap resulting from disorder in the distribution of dopants according to the Efros-Shklovskii criterion.

Одним из направлений в разработке эффективных и доступных по стоимости фоточувствительных устройств является создание фоточувствительного элемента базирующимся на p-n-переходе, состоящим из коллоидных квантовых точек (ККТ), т.е. контакте слоев p- и n-легированных ККТ [1-3]. Такие точки, созданы из полупроводниковых материалов (к примеру, HgTe или CdSe) и имеют характерные размеры от 3 до 10 нм. Однако на текущий момент отсутствует общая теория, способная описать поведение подобных систем в зависимости от уровня легирования, размера, диэлектрической проницаемости и других параметров квантовых точек.

В данной работе представлена простая теоретическая модель, описывающая p-n-переход в массиве легированных квантовых точек. С помощью компьютерной симуляции были получены зависимость толщины области пространственного заряда от концентрации легирующих примесей (Рис. 1) и энергетические диаграммы p-n-перехода (Рис. 2). Анализ показывает, что в случае низкой концентрации примесей результаты согласуются со стандартной теорией полупроводникового p-n-перехода. При больших концентрациях примесей, в плотности состояний присутствует кулоновская щель, являющаяся результатом беспорядка в распределении примесей в соответствии с критерием Эфроса-Шкловского [4].

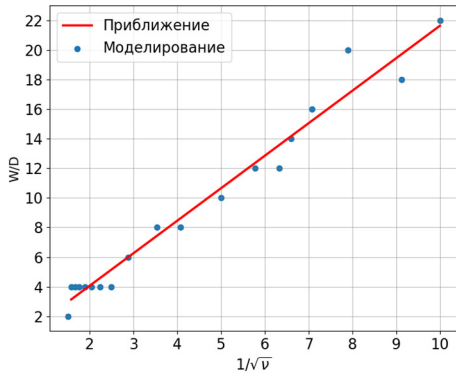


Рис.1. Пример зависимости толщины области пространственного заряда W в ед. диаметра D квантовой точки от среднего числа легирующих примесей на одной точке v

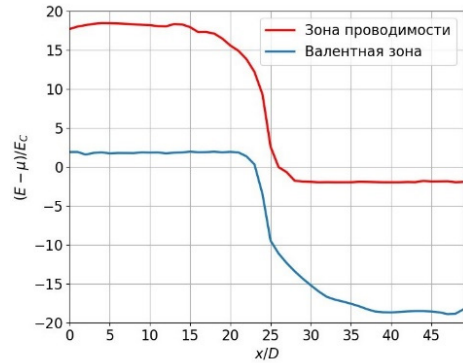


Рис.2. Пример энергетической диаграммы р-n-перехода. Энергия отсчитывается от уровня Ферми μ в ед. $E_C = e^2/\kappa D$ – энергии, необходимой для изменения заряда квантовой точки, где κ – диэлектрическая проницаемость всего массива ККТ.

1. Jiang Tang et al in Nano Letters vol. 12(9) pp. 4889-4894 (2012)
2. Yuljae Cho et al in ACS Energy Letters vol. 3(4) pp. 1036-1043 (2018)
3. В. С. Попов и др., Доклады Российской Академии Наук. Физика, Технические Науки, 2023, том 511, с. 78–82
4. L. Efros and B. I. Shklovskii, Electronic Properties of Doped Semiconductors (Springer-Verlag, New York, 1984).

C20 Фотолуминесцентные свойства перовскитных НК $Cs_xPb_yBr_z$ в зависимости от условий синтеза

Королева Т.В., Мурадова А.Г., Степанова У.А.

*Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева.
Москва, Россия. TasyaKoroleva@gmail.com*

Photoluminescent properties of perovskite NC $Cs_xPb_yBr_z$ depending on synthesis conditions

Koroleva Taisiya Viktorovna, Muradova A.G., Stepanova U.A.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-301

Changing the synthesis parameters allows fine-tuning the properties of perovskite nanocrystals. In this work, perovskite lead bromide nanocrystals of various sizes were obtained using the hot injection method.

Среди перовскитных структур наиболее изученными на данный момент являются перовскитные неорганические нанокристаллы (НК) бромида свинца $Cs_xPb_yBr_z$, отличающиеся устойчивостью к дефектам и высокой интенсивностью фотолуминесценции [1]. Использование метода горячей инъекции для синтеза перовскитных НК позволяет получить НК различной структуры. Так, варьируя соотношения прекурсоров, можно получать как трёхмерные (3D) НК $CsPbBr_3$, так и низкоразмерные формы перовскита: 2D НК $CsPb_2Br_5$ и 0D НК Cs_4PbBr_6 .

Целью данной работы является исследование фотолуминесцентных свойств перовскитных НК бромида свинца в зависимости от условий синтеза.

Перовскитные НК были получены методом горячей инъекции. Оптические свойства исследовались с помощью люминесцентного спектрометра Perkin Elmer LS 55. Фазовый состав был исследован с помощью рентгенофазового анализа на дифрактометре D8 ADVANCE.

Была исследована зависимость оптических и структурных свойств перовскитных НК в зависимости от температуры, времени синтеза и соотношения прекурсоров. (рис. 1). Пики поглощения для 3D и 2D НК располагались в зеленой области спектра на длинах волн 507 нм и 457 нм соответственно, в то время как для 0D НК пик поглощения располагался в синей области спектра на 308 нм. Для спектров фотолуминесценции (ФЛ) наблюдалась та же зависимость. Спектры ФЛ были расположены на 524, 512 и 431 нм для 3D, 2D и 0D НК соответственно. Средний размер частиц составил 7 нм для 3D НК, 80 нм для 2D НК и 46 нм для 0D НК. Таким образом,

изменение условий синтеза метода горячей инъекции позволяет получать перовскитные НК различной размерности.

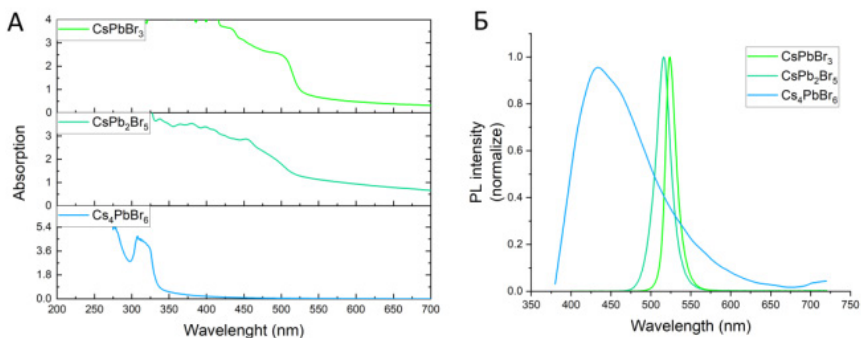


Рис. 1. Спектры поглощения (А) и спектры ФЛ перовскитных НК (Б)

1. Aldakov D., Reiss P. Safer-by-design fluorescent nanocrystals: Metal halide perovskites vs semiconductor quantum dots // The Journal of Physical Chemistry C. 2019. Т. 123. №. 20. С. 12527-12541.

C21 Влияние комбинации добавок $K_2Cr_2O_7$ ($KMnO_4$) и NH_4I на фоточувствительные свойства пленок PbS

Бельцева А.В.¹, Сальникова У.Н.¹, Макарук К.С.², Ельцов О.С.¹

¹*Уральский Федеральный Университет им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина. Екатеринбург. Россия. avbeltseva@mail.ru*

²*Национальный исследовательский университет «МЭИ». Москва. Россия*

Influence of a combination of additives $K_2Cr_2O_7$ ($KMnO_4$) and NH_4I on the photosensitive properties of PbS films

Beltseva A.V.¹, Salnikova U.N.¹, Makaruk K.S.², Eltsov O.S.¹

¹*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Yekaterinburg, Russia,*

e-mail: avbeltseva@mail.ru

²*National Research University "MPEI", Moscow, Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-303

Films of PbS, PbS(NH_4I), PbS($KMnO_4$, NH_4I) and PbS($K_2Cr_2O_7$, NH_4I) with good adhesion to a glass substrate with a thickness of 250 to 490 nm were obtained by chemical deposition. A synergistic effect was revealed to increase the photoresponse of PbS films synthesized in the presence of a combination of $K_2Cr_2O_7$ ($KMnO_4$) and NH_4I additives, which is due to the formation of an optically active phase of diiodine pentoxide I_2O_5 on the surface of crystallites.

Являясь одними из наиболее фоточувствительных материалов в видимом и ближнем ИК–диапазоне спектра (0.4–3.0 мкм), тонкие пленки сульфида свинца находят широкое применение в опто- и нанoeлектронике. Перспективным способом их получения является химическое осаждение из водных растворов благодаря своей технологической простоте, управляемости и адаптации к производственным условиям. Оптимизацию фотоэлектрических характеристик PbS обычно проводят либо отжигом в кислородсодержащей атмосфере, либо введением в реакционную ванну окислителей, в частности, H_2O_2 , Na_2SO_3 , смеси $K_2S_2O_8$ и H_2O_2 , $NH_2OH \cdot HCl$), либо восстановителей в виде галогенидов аммония. В настоящей работе проведено сравнительное исследование фотоэлектрических свойств пленок PbS, химически осажденных в присутствии соединений, обладающих различными окислительно-восстановительными свойствами, в частности, NH_4I , а также NH_4I в сочетании с $K_2Cr_2O_7$ либо с $KMnO_4$ (рис. 1).

Как видно из рисунка, в ряду пленок $PbS \rightarrow PbS(NH_4I) \rightarrow PbS(KMnO_4, NH_4I) \rightarrow$ в ряду пленок $PbS \rightarrow PbS(NH_4I) \rightarrow PbS(KMnO_4, NH_4I) \rightarrow PbS(K_2Cr_2O_7, NH_4I)$ наблюдается значительное увеличение вольтовой чувствительности от 30 до 1000, 1700 и 2500 мкВ.

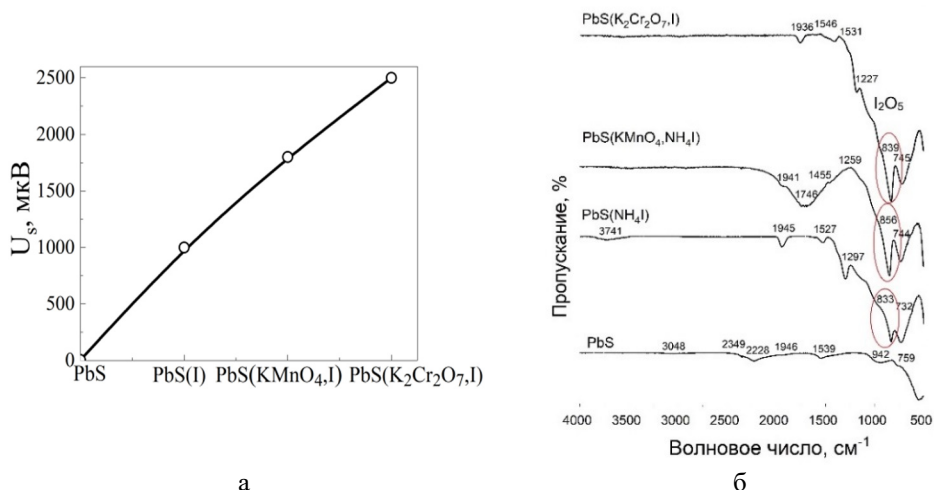
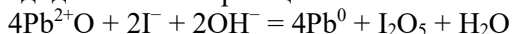
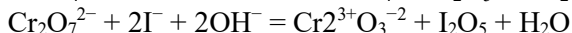
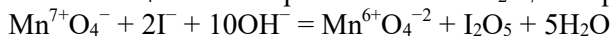


Рис. 1. Зависимость вольтовой чувствительности U_s элементов (5×5) мм² на основе пленок PbS, PbS(NH₄I), PbS(KMnO₄, NH₄I), PbS(K₂Cr₂O₇, NH₄I) (а) и их ИК-спектры (б). Фаза I₂O₅ отмечена на ИК спектрах красным цветом

В ИК спектрах обсуждаемых пленок, за исключением PbS, обнаружена полоса поглощения на частоте колебаний 833 cm^{-1} , характерная светочувствительной фазе пентаоксида диioda I₂O₅, обязанная появлению примесной фазы PbO ($732\text{-}759 \text{ cm}^{-1}$), которая в щелочной среде выступает в качестве окислителя йодид ионов Γ^- по реакции



Исследования показали, что дополнительное введение в реактор помимо йодида аммония еще и окислителя в виде KMnO₄ либо K₂Cr₂O₇ сопровождается сдвигом полосы поглощения с 833 cm^{-1} в высокочастотную область до 856 и 839 cm^{-1} и повышением ее интенсивности. Это можно интерпретировать как повышение содержания I₂O₅ на поверхности пленок PbS(KMnO₄, NH₄I) и PbS(K₂Cr₂O₇, NH₄I) за счет дополнительного окисления йодид-ионов Γ^- перманганат-ионами MnO₄⁻ либо бихромат-ионами Cr₂O₇²⁻ по реакциям:



Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что при введении в реакционную смесь комбинированной добавки окислителя KMnO₄(K₂Cr₂O₇) и восстановителя NH₄I возникает синергетический эффект их действия, связанный с более интенсивным образованием оптически активной фазы I₂O₅. Это, вероятно, является одной из главных причин увеличения вольтовой чувствительности осаждаемых пленок PbS(KMnO₄, NH₄I) и PbS(K₂Cr₂O₇, NH₄I) по сравнению с PbS(NH₄I).

C22 Оптические свойства нестехиометрических оксидов титана

Герасимова А.К.¹, Алиев В.Ш.^{1,2}, Калмыков Д.А.¹, Воронковский В.А.¹

¹*ИФП СО РАН. Новосибирск. Россия. gerasimova@isp.nsc.ru*

²*НГТУ. Новосибирск. Россия*

Optical properties of non-stoichiometric titanium oxides

Gerasimova Alina Konstantinovna¹, Aliev V.Sh.^{1,2}, Kalmykov D.A.¹,
Voronkovskii V.A.¹

¹*ISP SB RAS, Novosibirsk, Russia. gerasimova@isp.nsc.ru*

²*NSTU, Novosibirsk, Russia.*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-305

A thin amorphous non-stoichiometric TiO_{2-δ} films synthesis technology with precise composition control using the ion beam sputtering deposition has been developed. It was found that annealing of these films leads to a significant change in their optical and electrical properties due to structural transformations. The appearance of Magneli phases in TiO_{2-δ} films was shown to cause an increase in the absorption coefficient in the infrared spectra. Based on the results obtained, the prospects of using non-stoichiometric titanium oxides as a functional material for thermal radiation detectors are discussed.

Оксиды титана давно привлекают внимание исследователей как интересный объект кристаллографии, и как функциональный материал для множества применений [1,2]. Электрофизические свойства тонких плёнок оксидов титана радикально зависят от метода их синтеза и последующих обработок. Это связано со структурным многообразием оксидов титана, которое влечёт за собой и многообразие электронной структуры.

Интерес к оксидам титана нестехиометрического состава обусловлен тем, что при их частичной или полной кристаллизации возможно образование фаз Магнели. Важным свойством фаз Магнели является их высокая электропроводность по сравнению с высшим оксидом TiO₂. В результате низкотемпературного отжига аморфные плёнки TiO_{2-δ} (δ<2) превращаются в композитный материал: металлические кластеры (фазы Магнели) заключённые в диэлектрическую матрицу. Полученная структура может представлять собой периодически чередующиеся плоскости, которые могут эффективно поглощать излучение в инфракрасной области спектра, и исследование оптической свойств такой системы представляет практический интерес в связи с возможностью их использования в фотоэлектронике.

Нами была разработана технология синтеза тонких аморфных плёнок

нестехиометрических оксидов титана $TiO_{2-\delta}$ с прецизионным контролем состава в широком диапазоне ($\delta=0.0\div 1.5$). Для синтеза использовался метод ионно-лучевого распыления (Ion Beam Sputtering Deposition) [3]. Величина отклонения от стехиометрии δ задавалась во время роста варьированием потока кислорода. Состав полученных плёнок контролировался методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии.

Исследовано влияние термических отжигов на структуру аморфных нестехиометрических оксидов титана различного состава. Установлено, что в плёнках с большой величиной отклонения от стехиометрии при температурах $< 600^\circ C$ наблюдается образование нанокристаллов пластинчатой и игольчатой формы. Эллипсометрическим методом было определено, что при этом происходит изменение толщины тонких плёнок.

Обнаружено, что изменение структуры нестехиометрических оксидов титана после отжига существенно влияет на их оптические и электрофизические свойства. Определена взаимосвязь между параметром нестехиометрии и оптическими константами (коэффициентом поглощения и показателем преломления) в видимом и инфракрасном диапазоне длин волн ($\lambda=0.35\mu m \div 20\mu m$). Увеличение коэффициента поглощения в ИК области спектра после отжига может быть объяснено появлением в плёнке $TiO_{2-\delta}$ фаз Магнели, наличие которых было подтверждено методом просвечивающей электронной микроскопии. Необходимо отметить, что полученные значения ТКС для этих плёнок оказались сравнимыми с таковым для аморфных плёнок оксидов ванадия, широко используемых в качестве чувствительного слоя для микроболометрических матриц.

На основании полученных результатов обсуждается перспективность использования нестехиометрических оксидов титана в качестве функционального материала тепловых приёмников ИК излучения.

Работа была поддержана грантом РНФ № 24-29-00344.

1. Ashok Kumar Reddy Y. et al. Enhanced bolometric properties of TiO_{2-x} thin films by thermal annealing //Applied Physics Letters. – 2015. – Т. 107. – №. 2.

2. Гаврилов С. А. и др. Пути повышения эффективности солнечных элементов с экстремально тонкими поглощающими слоями //Российские нанотехнологии. – 2009. – Т. 4. – №. 3-4. – С. 123-129.

3. Атучин, В. В., Кручинин, В. Н., Калинин, А. В., Алиев, В. Ш., Рыхлицкий, С. В., Швец, В. А., Слесивцев, Е. В. Оптические свойства плёнок $HfO_{2-x}N_x$ И $TiO_{2-x}N_x$, полученных методом ионно-лучевого распыления //Оптика и спектроскопия. – 2009. – Т. 106. – №. 1. – С. 77-82.

С23 Фотомемристивные переключения в кристаллах селенида висмута

Зотов А.В.¹, Панин Г.Н.¹, Тулина Н.А.², Борисенко Д.Н.², Колесников Н.Н.².

¹ *ИПТМ РАН. Черноголовка. МО. Россия. taba@iptm.ru*

² *ИФТТ РАН. Черноголовка. МО. Россия*

Photomemristive switching in bismuth selenide crystals.

Aleksandr Vladimirovich Zotov¹, G.N. Panin¹, N.A. Tulina², D.N. Borisenko²,
N.N. Kolesnikov²

¹ *IMT RAS, Chernogolovka. Russia*

² *ISSP RAS, Chernogolovka. Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-307

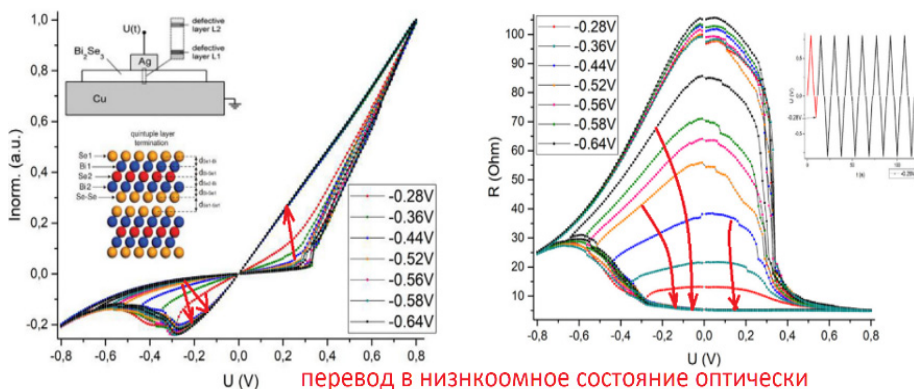
In our previous work [6,7] we have demonstrated electric field stimulated change of memristive states of bismuth selenide crystals. Here we explore optic response of same devices. We observe optic stimulated memristive switches and try to explain it based on our previous research.

Непревзойдённая на сегодняшний день энергоэффективность биологических “вычислительных и детектирующих систем” в сравнении с вычислительными и детектирующими устройствами, построенными человеком, стимулирует огромный интерес к биологическим системам, их устройству и организации работы. На сегодняшний день детектирование и обработка сигнала, вычисления производятся на машинах, построенных на основе дискретной логики транзисторов и сенсорах, требующих преобразование оптического сигнала в электрический, передачу его в вычислитель и обратно. Алгоритмы машинного обучения на таких системах реализуются на уровне программного обеспечения, что, несомненно, ухудшает качество решения задачи и энергозатраты. Разработка и внедрение “аналоговых” искусственных синапсов и нейронов представляет собой чрезвычайно важную задачу для улучшения энергоэффективности и скорости обработки оптических сигналов сенсором [1-5].

Искусственный синапс или мемристор представляет собой устройство, резистивное состояние которого зависит от предыстории протекания заряда. Ранее была продемонстрирована возможность мемристивных переключений в кристаллах селенида висмута ($E_g = 0.3-0.8$ eV) [6, 7]. Была показана возможность программирования сопротивления селенида висмута в электрическом поле, подобно состояниям биологического синапса.

В настоящей работе исследована возможность контроля мемристивных

состояний в селениде висмута оптическим возбуждением носителей заряда через запрещенную зону кристалла.



На рис. показаны типичные ВАХ и зависимость $R(U)$ образцов при оптическом возбуждении. При возбуждении кристалла лазером 650 нм он переходил в низкоомное состояние, которое зависело от приложенного электрического поля и предыстории состояний кристалла, что позволяло “программировать” состояние образца оптически.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-49-00159).

1. G. N. Panin // Electronics 2022. V.11, P.619
2. W. Wang et al. // Sci. Rep. 2016. V.6, 31224.
3. X. Fu et al. // Small 2019. 1903809.
4. X. Fu et al. // Light Sci. Appl. 2023. V.12, P.39.
5. J.Yin et al //Nature Communications 2018. 9:3311
6. A.V. Zotov et al. // Chaos, Solitons & Fractals 2021. V141, 110542
7. V.V. Sirotkin // Russian Microelectronics. 2023. V52, P. 363

C24 Структурные и оптические свойства твердых растворов InAs_{1-x}Sb_x для средневолновых и длинноволновых инфракрасных фотодетекторов

Кривобок В.С.^{1,2}, Пашкеев Д.А.¹, Клековкин А.В.¹, Минаев И.И.¹, Савин К.А.¹,
Ерошенко Г.Н.¹, Гончаров А.Е.^{1,2}, Николаев С.Н.¹

¹*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН. Москва. Россия.
klekovkinav@lebedev.ru*

²*ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия*

Structural and optical properties of InAs_{1-x}Sb_x solid alloys for mid-wave and long-wave infrared photodetectors.

Krivobok V.S.^{1,2}, Pashkeev D.A.¹, Klekovkin A.V.¹, Minaev I.I.¹, Savin K.A.¹,
Eroshenko G.N.¹, Goncharov A.E.^{1,2}, Nikolaev S.N.¹

¹*Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Orion R&P Association Inc. Moscow, Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-309

In this account, a series of heterostructures containing InAs_{1-x}Sb_x solid alloys with different antimony contents were grown on GaSb (100) substrates by molecular beam epitaxy. Studies were carried out to evaluate the influence of growth parameters on the processes of Sb incorporation and on the quality of InAs_{1-x}Sb_x layers. The structural and optical properties of the grown heterostructures were investigated by X-ray diffractometry, Raman scattering, atomic force microscopy and photoluminescence. The data obtained in the course of the research indicate acceptable quality of the grown InAs_{1-x}Sb_x solid alloy for the manufacture of photosensitive elements based on them.

В последние годы детекторы на основе сверхрешеток InAs/GaSb называются потенциальной альтернативой детекторам на основе HgCdTe (КРТ), работающим в средневолновом и длинноволновом инфракрасном диапазоне (5-12 мкм). Но, несмотря на целый ряд преимуществ данной системы по сравнению с КРТ детекторами, дефекты в слоях GaSb, возникающие в процессе роста, приводят к более высокому темновому току, что значительно ограничивает производительность детекторов [1,2].

Альтернативой для сверхрешеток InAs/GaSb являются твердые растворы InAs_{1-x}Sb_x, не содержащие Ga. Данный материал обладает высокой подвижностью электронов и дырок, высокой механической прочностью, высокой химической стабильностью и относительно низкой стоимостью. Энергия запрещенной зоны твердого раствора InAs_{1-x}Sb_x является квадратичной функцией его состава и показывает слабую зависимость края зоны от состава по сравнению с HgCdTe. Это делает твердые растворы InAs_{1-x}Sb_x наиболее перспективным кандидатом на роль материала для

средневолновых и длинноволновых инфракрасных фотодетекторов [3,4].

В этой работе были проведены эксперименты по выращиванию методом молекулярно-лучевой эпитаксии твердых растворов $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ с различной концентрацией сурьмы x . Все структуры были выращены на подложках GaSb (100), а для получения твердых растворов $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ с большой концентрацией использовался ступенчатый метаморфный буферный слой. Были проведены эксперименты, в которых варьировались температуры роста, соотношения потоков Sb и As, а также соотношения потоков материалов III и V группы. Это позволило оценить влияние условий роста на структурные и оптические свойства выращенных слоев $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$.

Структурные свойства эпитаксиальных слоев $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ исследовались методами рентгеновской дифрактометрии, комбинационного рассеяния света и атомно-силовой микроскопии. Было установлено, что более высокие температуры роста способствуют сегрегации сурьмы и её дальнейшей десорбции с поверхности, что ведет к обеднению Sb слоя $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$. А изменение соотношения потоков материалов V и III группы, в свою очередь, не оказывает существенного влияния на состав выращенных $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ слоев. Однако, стоит отметить, что уменьшение соотношения потоков материалов V и III группы способствует формированию волнообразной поверхности, и существенному увеличению её шероховатости.

Оптические свойства твердых растворов $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ исследовались при помощи измерений низкотемпературной фотолюминесценции. Спектр излучения твердых растворов характеризуются высокой интенсивностью линии рекомбинационного излучения вблизи края фундаментального поглощения. Анализ формы этой линии указывает на доминирующую роль собственного излучения, и позволяет определить значение ширины запрещенной зоны и ее дисперсию, которая может быть вызвана флуктуациями состава в твердых растворах $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$.

Совокупность полученных данных указывает на приемлемое качество полученных твердых растворов $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ для изготовления на их основе фоточувствительных элементов.

1. Satpati B. et al. Interface analysis of InAs/GaSb superlattice grown by MBE //Journal of Crystal Growth. – 2007. – Т. 301. – С. 889-892.

2. Klin O. et al. A study of MBE growth-related defects in InAs/GaSb type-II superlattices for long wavelength infrared detectors //Journal of Crystal Growth. – 2015. – Т. 425. – С. 54-59.

3. Kim J. D. et al. Long-wavelength InAsSb photoconductors operated at near room temperatures (200–300 K) //Applied physics letters. – 1996. – Т. 68. – №. 1. – С. 99-101.

4. Dixit V. K. et al. Studies on high resolution x-ray diffraction, optical and transport properties of $\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x}/\text{GaAs}$ ($x \leq 0.06$) heterostructure grown using liquid phase epitaxy //Journal of applied physics. – 2004. – Т. 96. – №. 9. – С. 4989-4997.

**C25 Использование in-situ измерений низкотемпературной
микрофотолюминесценции для наблюдения перестройки
примесно-дефектной системы кубических полупроводников под
воздействием лазерного гиперзвука**

Кривобок В.С.^{1,2}, Усманов И.И.¹, Ченцов С.И.^{1,2}, Клоков А.Ю.¹, Шарков С.И.¹,
Фролов Н.Ю.¹

¹*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН. Москва. Россия.
krivobokvs@lebedev.ru*

²*ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия*

**Use of in-situ measurements of low-temperature
microphotoluminescence to observe rearrangements of an impurity-defect
system of cubic semiconductors under the influence of laser hypersound**

Krivobok V.S.^{1,2}, Usmanov I.I.¹, Chentsov S.I.^{1,2}, Klokov A. Yu.¹,
Sharkov A.I.¹, Frolov N. Yu.¹

¹*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia krivobokvs@lebedev.ru*

²*Orion R&P Association Inc. Moscow, Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-311

The effect of subnanosecond laser pulses on the structure and electronic subsystem of extended defects in cubic semiconductors was studied using cadmium telluride (CdTe) as an example. A CdTe epitaxial film containing threading dislocations was exposed to pulsed laser emission at helium temperatures. This exposure led to a local rearrangement of dislocation, while the properties of the crystal lattice remained undisturbed. The rearrangement was visualized in situ via an observation of the single luminescent centers associated with the partial dislocation cores. We associated the corresponding mechanism with Peierls's gliding of dislocation under the impact of laser-induced hypersonic surface waves. The results we obtained are of interest in the development of all-optical methods for the local laser processing of extended defects in CdTe and subsequent expansion those methods to other A2B6 cubic semiconductors.

В данной работе на примере теллурида кадмия (CdTe) обсуждается перестройка примесно-дефектной системы под действием сфокусированных лазерных импульсов, реализуемая в полностью оптическом эксперименте при гелиевых температурах. Использование низких температур позволяет in-situ контролировать свойства одиночных люминесцентных центров, играющих роль своеобразного оптического зонда. Различные типы зондов позволяют контролировать перестройку различных типов дефектов как в объемных

полупроводниках, так и в полупроводниковых гетероструктурах.

Для анализа воздействия на протяженные дефекты мы используем люминесцентные центры, формируемые с участием 90° частичных дислокаций [1-3]. Наряду с определенным спектральным положением, линии излучения данных центров имеют предельно малую ширину, определенную степень линейной поляризации и значение фактора Хуанга-Рис. Это позволяет уверенно выделять их на фоне остальных механизмов излучательной рекомбинации. Локальное воздействие на дефекты осуществляется с помощью сфокусированного излучения импульсного лазера, которое поглощается в приповерхностном слое объемного полупроводника или полупроводниковой гетероструктуры. Описанная постановка оптического эксперимента позволила реализовать режимы лазерного воздействия на CdTe, при которых, с одной стороны, происходит постепенная перестройка структурных дефектов, с другой стороны, свойства ненарушенной кристаллической решетки остаются неизменными.

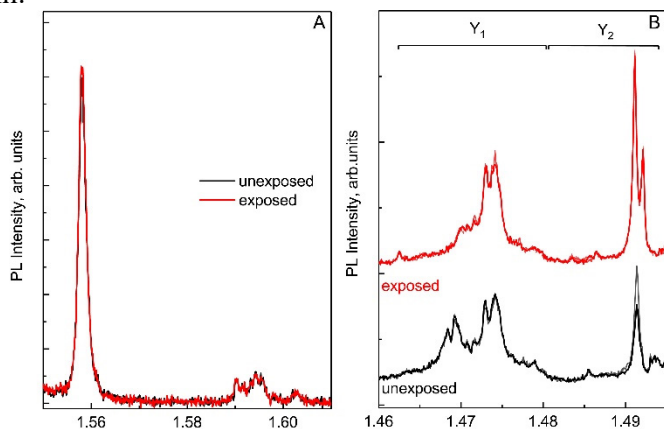


Рис. 1. Спектры низкотемпературной 5К микрофотолюминесценции вблизи дна экситонной зоны (слева) и в области дислокационного излучения (справа) до (черные кривые) и после (красные кривые) лазерного воздействия. Энергия воздействующих импульсов 0.16 мкДж, длительность – 0.5 нс, количество импульсов - 10^5 . Для измерения фотолюминесценции используется стационарный лазер с длиной волны 532 нм. Температура 5 К, анализируемая область – 1×1 мкм.

Из сопоставления картины изменений дефектов в центре лазерного пятна и на различном удалении от него нами была выявлена доминирующая роль нетеплового и относительно дальнедействующего механизма воздействия. Совокупность полученных экспериментальных данных указывает на то что, этим механизмом является воздействие гиперзвуковых поверхностных волн (когерентных фононов) индуцированных лазерным импульсом. Наиболее яркие и воспроизводимые явления были обнаружены применительно к скользящим дислокациям. В частности, было зарегистрировано

пайерлосовское скопление частичных дислокаций, вызванное воздействием поверхностных волн гиперзвука. Так как данные волны допускают гибкие механизмы управления волновым фронтом, в частности, его фокусировкой [4], полученные результаты представляют интерес для разработки полностью оптических методов локального лазерного управления дефектами в полупроводниковых материалах с кубической структурой.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант №19-79-30086)

1. Krivobok V. S., Chentsov S. I., Nikolaev S. N., Chernopititsky M. A., Onishchenko E. E., Pruchkina A. A., Martovitskiy V. P., Bagaev V. S., Ikuov D. G., Marin D. V., Mikhailov N. N., Yakushev M. V. Optical probing of extended defects in CdTe virtual substrates via isolated emitters produced by weakly perturbed fragments of partial dislocations //Applied Physics Letters. – 2019. – Т. 115. – №. 232102.

2. Krivobok V. S., Nikolaev S. N., Klokov A. Yu., Sharkov A. I., Chentsov S. I., Usmanov I. I., Mironchuk E. S. The laser-induced rearrangement of extended defects in crystalline CdTe at a low temperature //Journal of Applied Physics. – 2023. – Т. 134. – №. 175705.

3. Krivobok V. S., Nikolaev S. N., Onishchenko E. E., Pruchkina A. A., Chentsov S. I., Klokov A. Yu., Sorokin S. V., Sedov I. V. Probing of single acceptors in a wide ZnSe-based quantum well via optical spectroscopy //Journal of Luminescence. – 2019. – Т. 213. – С. 273-277.

4. Klokov A. Y., Krivobok V. S., Sharkov A. I., Frolov N. Y. Optical excitation of converging surface acoustic waves in the gigahertz range on silicon //Sensors. – 2022. – Т. 22. – №. 3. – С. 870.

C26 Оптические и электрофизические свойства барьерно-диодной гетероструктуры на основе InSb

Савин К.А.¹, Минаев И.И.¹, Клековкин А.В.¹, Ерошенко Г.Н.¹, Николаев С.Н.¹,
Гончаров А.Е.²

¹*Физический институт им П. Н. Лебедева РАН. Москва. Россия.
savinkonstantin93@gmail.com*

²*ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия*

Optical and electrical properties of a barrier-diode heterostructure based on InSb

Savin Konstantin A.¹, Minaev I.I.¹, Klekovkin A.V.¹, Eroshenko G.N.¹,
Nikolaev S.N.¹, Goncharov A.E.²

¹*P.N. Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia*

²*Orion R&P Association Inc. Moscow. Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-314

Using the molecular beam epitaxy method, an nBn structure based on InSb was obtained for use in IR photodetectors. The barrier layer of the structure is made of In_{0.8}Al_{0.2}Sb 70 nm thick, the sensitive layer is InSb 1 μm thick with a charge carrier concentration of 10¹⁵ cm⁻³, the contact layer is InSb 200 nm thick with a charge carrier concentration of 4·10¹⁸ cm⁻³. X-ray diffraction analysis, atomic force microscopy and photoluminescence spectroscopy show high quality and low concentration of defects in the resulting structures. Also, studies of electrical properties using the Hall effect and the current spreading technique showed acceptable results for the use of the resulting structures in IR photodetectors.

Барьерно-диодные структуры (XBn) нашли широкое распространение в ИК фотодетекторах на основе In(As)Sb [1], сверхрешеток InAs/GaSb [2] и сверхрешеток InAs/InAsSb [3]. Данная структура была разработана, чтобы устранить объемные токи генерации-рекомбинации Шокли-Рида-Холла, тем самым увеличив рабочую температуру прибора. nBn структура, являющаяся частным случаем XBn архитектуры, состоит из активного слоя n-типа, широкозонного барьерного слоя и контакта n-типа. Барьерный слой блокирует транспорт основных носителей (электронов), в то время, как неосновные носители (дырки), создаваемые при поглощении ИК излучения, могут свободно перемещаться через устройство.

В настоящей работе методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке InSb была выращена nBn структура, активным слоем в которой выступает эпитаксиальный слой InSb толщиной 1 мкм, барьерным – слой

In_{0.8}Al_{0.2}Sb толщиной 70 нм, а контактным слоем – легированный InSb толщиной 200 нм. Поверхность получаемых слоев была изучена с помощью атомно-силового микроскопа. Средняя шероховатость поверхности слоев не превышала 250 пкм, что существенно ниже одного монослоя. Рентгеновская дифрактометрия показала высокое структурное совершенство полученных образцов.

Результаты спектроскопии комбинационного рассеяния света и фотOLUMИнесцентной спектроскопии показали малую дефектность активного слоя, отсутствие глубоких ловушек, а также концентрацию мелких акцепторных центров не более 10^{16} см^{-3} . Полученная концентрация фоновых акцепторов является приемлемой для корректной работы детекторной структуры.

Измерения типа носителей и их концентрации с помощью эффекта Холла показало, что концентрация носителей заряда n-типа в активном слое составляет порядка 10^{15} см^{-3} , а в контактном слое – $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а методика растекания тока показала высокое сопротивление барьерного слоя структуры. Таким образом полученная nBn структура может быть использована в ИК фотоприемных устройствах.

1. Klipstein P. et al. ‘MWIR InAsSb XBn detectors for high operating temperatures’. Proc. Of SPIE, Baltimore, MD, USA, May 2010, vol. 7660, pp. 76602Y-1–76602Y-9

2. Ting, D.Z.Y. et al. ‘Antimonide superlattice complementary barrier infrared detector (CBIRD)’, Inf. Phys. Technol., 2011, 54, pp. 267–272

3. Kim, H.S. et al. ‘Long-wave infrared nBn photodetectors based on InAs/InAsSb type-II superlattice’, Appl. Phys. Lett., 2012, 101, pp. 161114-1–161114-3

C27 Ближнепольная оптическая микроскопия квантовых точек InSb/GaSb полученных методом МЛЭ

Минаев И.И.¹, Казанцев Д.В.^{1,3}, Клековкин А.В.¹, Кривобок В.С.^{1,2},
Николаев С.Н.¹

¹ *Физический Институт им. П.Н. Лебедева РАН. Москва. Россия.
i.minaev@lebedev.ru*

² *ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия.*

³ *Высшая Школа Экономики. Москва. Россия*

Near-field optical microscopy of InSb/GaSb quantum dots obtained by MBE
Minaev I.I.¹, Kazantsev D.V.^{1,3}, Klekovkin A.V.¹, Krivobok V.S.^{1,2}, Nikolaev S.N.¹

¹ *P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences Moscow,
Russia*

² *Orion R&P Association Inc. Moscow, Russia*

³ *Higher School of Economy (HSE), Moscow, Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-316

The InSb quantum dots (QDs) on a GaSb (100) substrate were obtained using the molecular beam epitaxy method. The size and shape were controlled by AFM. Using ASNOM, an increase in the signal amplitude near the QD perimeter was detected, associated with the localization of 2D electron gas in this InSb/GaSb material system.

Локализация вырожденного электронного газа в In(Ga)Sb квантовых точках (КТ) большого размера (~100-200 нм) размещённых в обедненных слоях GaSb может представлять интерес для нужд наноплазмоники среднего и дальнего ИК диапазонов. В данной работе отработан рост таких квантовых точек методом МЛЭ и проведена визуализация формируемых ими ближних полей ИК диапазона с помощью оптического безапертурного микроскопа (ASNOM).

Рост квантовых точек InSb был осуществлен на установке молекулярно-лучевой эпитаксии Compact-21t фирмы RIBER. Для этого использовались еpi-ready подложки GaSb(100). Для данной системы материалов характерен механизм Странского-Крастанова [1], за счет чего и формируется КТ. После предварительной подготовки поверхности выращивался буферной слой GaSb толщиной 250 нм при температуре 500±10°C. Температура роста InSb составляла 300°C. Время роста КТ составило 60-80 с при скорости роста 0.013 МС/с.

Так как латеральный размер полученных КТ на порядок больше

вертикального, данную систему можно локально считать квантовой ямой первого типа. Свободные носители с одной стороны ограничиваются слоем GaSb, с другой стороны - уровнем вакуума.

Для измерения был использован ASНОМ собранный по традиционной схеме [2]. Прибор изготовлен фирмой NT-MDT, сканирование производится в TappingMode зондом FMG01/Pt, с резонансной частотой кантилевера ~60-80 кГц. В качестве источника когерентного света, использовался CO₂ лазер Merit-G производства Laser Access. Собранное излучение детектировалось КРТ фотоприемнику, который охлаждался до азотной температуры.

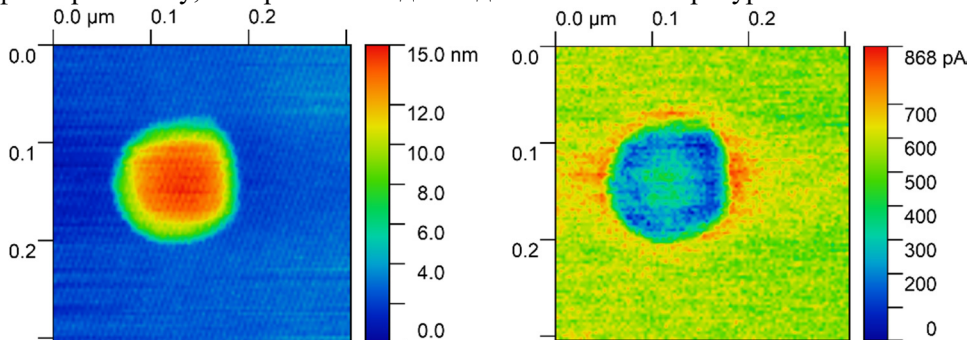


Рис. 1. Изображение КТ InSb выращенных на GaSb с помощью АСМ и безапертурной ближнеполюсной микроскопии.

Сигнал с ASНОМ представляет из себя ореол повышенной амплитуды по периметру КТ (рис. 1). При этом на границе ореола край топографического профиля КТ и край области, в которой наблюдался резкий рост амплитуды ASНОМ сигнала, заметно смещены друг относительно друга. Скачок ASНОМ амплитуды, возникает за 10-15 нм до изменения топографической амплитуды, и таким образом, не связан с морфологией КТ.

Обнаруженное изменение поляризуемости иглы вблизи КТ мы связываем с присутствием свободных носителей в материале GaSb. Потенциал, вызывающий возникновение несвязанных носителей в окрестности КТ, обусловлен особенностями положения уровня Ферми в InSb и GaSb: уровень зоны проводимости InSb, образующей яму для электронов, расположен ниже уровня Ферми в GaSb, что и приводит к аккумуляции заряда. В свою очередь, данный заряд неизбежно приведет к росту амплитуды ближнеполюсного сигнала, на некотором удалении от границы КТ. Так как соответствующий сигнала уменьшается при заметном удалении от КТ, можно утверждать, что плотный электронный газ формируется вблизи InSb/GaSb интерфейсов.

Таким образом апробирован и отработан рост КТ InSb/GaSb методом молекулярно-лучевой эпитаксии. С помощью безапертурного сканирующего микроскопа ближнего оптического поля, работающего на длине волны 10.7 мкм получены изображения, демонстрирующие резкий рост ASНОМ

сигнала на расстоянии 10-15 нм от границ КТ. Увеличение ближнего поля мы связываем с формированием 2D электронного газа на вблизи GaSb/InSb интерфейса. Полученные результаты наглядно демонстрирует роль носителей при формировании ближнего поля ИК диапазона для GaSb/InSb КТ большого размера.

1. B. R. Bennett, et al. Applied physics letters, 68(4) (1996), 505-507.
2. Sabry F. Holographie: Wie die Technologie funktioniert und Anwendungsfälle in der Industrie im wirklichen Leben. – One Billion Knowledgeable, 2022. – Т. 3.

C28 Нанокристаллы узкозонных полупроводников для однофотонной болометрии

Жуков Н.Д.

Саратов. Россия. hukov@rambler.ru

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-319

The principles of operation of a single-photon bolometer based on single-electron quantum conductivity in nanocrystals of narrow-gap semiconductors with the best size quantization parameters are formulated. The conditions for limiting the number of registered photons by reducing the duration of the voltage pulse on the nanocrystal are determined.

В работе [1] рассмотрено состояние терагерцовых наноболометров с горячими электронами (напо-НЕВ). При достигнутом шумовом эквиваленте пороговая мощность близка к 10^{-19} Вт/Гц^{1/2} и потенциально способна приближаться к пределу $\sim 10^{-20}$ Вт/Гц^{1/2}. Нано-НЕВ важны для космических астрофизических платформ со сверхнизким фоном субмиллиметрового излучения. В работе [2] представлены результаты исследований и разработок в области сверхпроводникового однофотонного детектора на горячих электронах (SSPD). В болометрах на холодных электронах (БХЭ) [3] сверхмалый размер абсорбера и принципиальная развязка между электронной и фононной подсистемами обеспечивают эффективное электронное охлаждение, уменьшение бездиссипативного двухэлектронного тока, основанного на так называемом андреевском отражении от границы сверхпроводника, и, благодаря этому, существенно снижаются собственные шумы и повышается чувствительность.

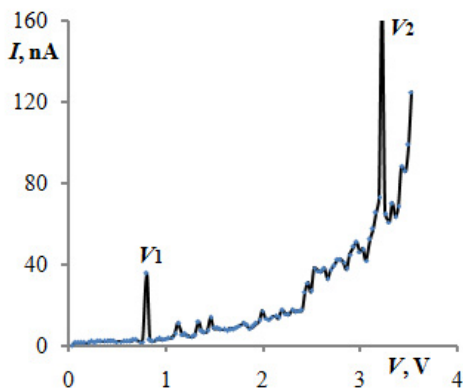
Одинаковым и принципиальным для всех указанных вариантов является использование в качестве активного элемента двухмерного сверхпроводника. Сверхпроводимость – сугубо квантовомеханическое явление, обусловленное волновым процессом движения электрона в кристаллической структуре. В этой связи принципиальное значение имеет взаимодействие электронов, то есть их волн, между собой и с кристаллической решёткой. При этом важным является число действующих электронов. Очевидно, что для рассматриваемого однофотонного процесса нужна одноэлектронная проводимость. Такая проводимость наблюдается и основана на свойствах квантоворазмерного нанокристалла – квантования в нём одноэлектронного движения [4, 5].

Движение электрона через нанокристалл описывается решением уравнения Шредингера и обусловлено дебройлевским волновым процессом.

В простом случае одномерного одноэлектронного процесса в глубокой прямоугольной протяжённой потенциальной яме на линейной дистанции a_n (одного из размеров нанокристалла) значения разрешённых уровней энергии электрона \tilde{E}_{qn} могут быть получены в следующем виде:

$$\tilde{E}_{qn} \sim h^2 q^2 (8ma_n^2)^{-1} \quad (1)$$

где: h – постоянная Планка, m и m_0 – эффективная масса и масса «покоя» электрона, q – квантовое число. Квантуемое движение электрона в нанокристалле выразится на вольтамперной характеристике (ВАХ) резонансными пиками, положение которых определяется значениями напряжения на нанокристалле, адекватного \tilde{E}_{qn} по формуле (1) для случаев $q=1$ (мода 1-го порядка) и $q=2$ (мода 2-го порядка). На рисунке отображена кривая ВАХ с характерными резонансными пиками тока (квантовой проводимости) в точках $V_1 \sim \tilde{E}_{q=1}$ и $V_2 \sim \tilde{E}_{q=2}$. (V_1 и V_2 обозначены как V_r)



Энергетический интервал межмодового перехода $\Delta\tilde{E}_{2-1} = (\tilde{E}_{q=2} - \tilde{E}_{q=1}) \sim 3h^2(8ma_n^2)^{-1}$. Число поглощаемых фотонов в их сумме энергии перекрытия будет $\Delta\tilde{E}/h\nu$, где $h\nu$ – энергия кванта поглощаемого излучения, а ν – частота

его электромагнитной волны.

Поглощение электроном фотона излучения частоты ν добавляет ему энергии $h\nu$. Это создаёт расстройку квантово-волнового резонанса и обнуление пика тока моды $q=1$, что можно использовать как индикатор наличия фотона. Дальнейшее последовательное пофотонное поглощение приведёт к переходу электрона в состояние моды $q=2$, для чего надо, чтобы электрон поглотил количество фотонов, равное $\Delta\tilde{E}_{2-1}/h\nu \sim 3h(8\nu ma_n^2)^{-1}$. Расчёт и экспериментальные данные (ВАХ типа на рисунке) показывают, что это – большой энергетический интервал, больше одного электронвольта. Для его перекрытия требуется много фотонов, энергия каждого из которых может быть существенно меньше одного электронвольта. Для однофотонного случая проведём ниже следующее рассмотрение.

Изменение энергии электрона в условиях размерного квантования можно найти дифференцированием формулы (1): $\Delta\tilde{E}_{qn} \sim 2h^2 q^2 (8ma_n^2)^{-1} (\Delta a_n/a_n) = 2\tilde{E}_{qn} (\Delta a_n/a_n) = 2Q\tilde{E}_{qn}$. При этом величина $Q = (\Delta a_n/a_n) = \Delta\tilde{E}_{qn}/\tilde{E}_{qn}$ обусловлена процессом расстройки волнового резонанса в зоне второй моды, которая по физике происходит путём отражения дебройлевской волны от кристаллографических плоскостей. Мы примем, что $\Delta\tilde{E}_{qn}/\tilde{E}_{qn} \sim \Delta V/V_r$, где ΔV – ширина токового пика в основании его импульса.

Тогда можно принять следующую обобщённую формулу для числа поглощённых фотонов: $\Delta\tilde{E}/h\nu \sim 2q^2h(8vma_n^2)^{-1}\Delta V/V_r$.

Ограничение числа поглощаемых фотонов происходит подачей напряжения определённого временного интервала – импульса длительностью t . Тогда в интервале этого времени число поглощаемых одиночных фотонов будет равно $vt = \Delta\tilde{E}/h\nu$, откуда следует формула ограничения снизу длительности импульса напряжения на нанокристалле последовательным вычислением t для межмодового энергетического интервала – $t \sim 2q^2h(8v^2ma_n^2)^{-1}\Delta V/V_r = 2q^2h(8c^2m_0)^{-1}(\lambda/a_n)^2(m/m_0)^{-1}\Delta V/V_r$:

$t \geq 10^{-2}(\lambda/a_n)^2(m/m_0)^{-1}\Delta V/V_r$, где: λ – длина волны излучения фотонов в микронах, a_n – в нанометрах, t – в пикосекундах. Верхнее значение границы длительности можно принять с неким запасом и установить приемлемый интервал изменений: $t \sim (10^{-2} \div 10^{-1})(\lambda/a_n)^2(m/m_0)^{-1}\Delta V/V_r$. Значения размера нанокристалла a_n находятся по формуле (1) в предположении, достаточном для оценок, что энергия электрона $\tilde{E}_{\text{qn}} \sim V_0$: $a_n \sim (2.7V_0m/m_0)^{-1/2}$, где V_0 – напряжение максимума резонансного пика на статической ВАХ.

Таким образом, сформулированы принципы действия однофотонного болометра на основе одноэлектронной квантовой проводимости в нанокристаллах узкозонных полупроводников, имеющих наилучшие параметры размерного квантования. Определены условия ограничения числа регистрируемых фотонов за счёт уменьшения длительности импульса напряжения на нанокристалле.

Литература

1. B.S. Karasik, A.V. Sergeev, D.E. Prober.
<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1208/1208.5803.pdf>
2. Korneev A.A. and others. JOURNAL OF RADIO ELECTRONICS, N5, 2013
3. E. A. Matrozoza and others// Superconductor Science and Technology. 2019. DOI: 10.1088/1361-6668/ab151d
4. 8. Н.Д. Жуков, М.В. Гавриков. Письма в ЖТФ, **48** (8), 18 (2022).
5. Н.Д. Жуков, М.В. Гавриков, С.Н. Штыков. ФТП, **56** (6), 552 (2022).

С29 Получение монокристаллов и подложек твёрдого раствора $\text{Cd}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{Te}$ для МЛЭ КРТ по методу Давыдова–Маркова

Жаворонков Н.В.¹, Капкин Д.В.¹, Чегнов В.П.¹, Трофимов А.А.²,
Гончаров А.Е.²

¹*АО «НИИМВ им. Ю.А. Малинина». Зеленоград. Россия*

²*ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия*

Development of monocrystals and substrates of $\text{Cd}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{Te}$ solid solution for MBE MCT by Davydov–Markov method

N.V. Zhavoronkov¹, D.V. Kapkin¹, V.P. Chegnov¹, A.A. Trofimov²,
A.E. Goncharov²

¹*NIIMV, JSC, Moscow, Zelenograd, Russia*

²*Orion R&P Association, JSC, Moscow, Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-322

To obtain HgCdTe by MBE, it is preferable to use isotype CdZnTe substrates. One of the methods for growing such monocrystals and substrates is the Davydov-Markov method. Such substrates are characterized by high uniformity of parameters and can be almost completely used for the manufacture of devices. As part of the joint work, the possibility of obtaining such CdZnTe monocrystals and the prospects for the development of this direction were shown.

Для того, чтобы параметры подложек кадмий-цинк-теллур (КЦТ) отвечали задачам нанесения слоев кадмий-ртуть-теллур (КРТ) методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) требуется получить достаточно высокое удельное электрическое сопротивление на минимально возможном уровне компенсации, необходимо минимизировать концентрацию структурных дефектов и обеспечить требуемые ориентацию и диаметр подложки. При выращивании монокристаллов твёрдых растворов $\text{Cd}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{Te}$ путём осаждения из паровой фазы по методу Давыдова–Маркова эти условия могут быть успешно реализованы вследствие нижеперечисленных особенностей метода:

- относительно низкая температура процесса (на 100°C ниже температуры плавления);
- отсутствие контакта кристалла с активными материалами технологической оснастки;
- равновесный характер кристаллизации;

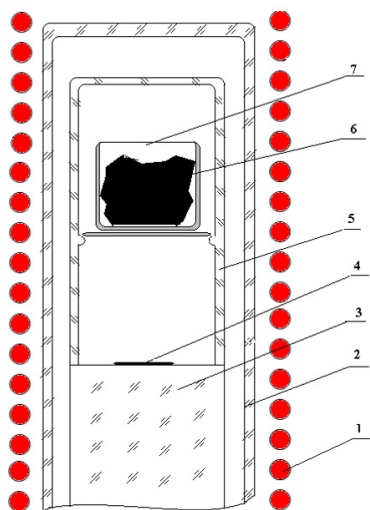


Рисунок 1. Схема метода выращивания монокристаллов твердых растворов $A^{II}B^{VI}$ осадением из равновесной паровой фазы.
1 - нагреватель, 2 - реактор, 3 - сапфировый световод, 4 - подложка, 5 - ростовая камера, 6 - поликристаллический источник, 7 - тигель

- дополнительная очистка материала в процессе пересублимации через паровую фазу.

Схема метода, разработанного сотрудниками НИИ Материаловедения (Зеленоград), приведена на рисунке 1. Процесс протекает в кварцевом реакторе (2) в открытой системе в атмосфере гелия. Перенос материала от поликристаллической загрузки (6) к затравке (4) происходит в пределах квазигерметичного объема ростовой камеры (5) при температуре 980-1050°C.

Использование оригинальной конструкции двухзонного нагревателя (1) и сапфирового световода (3) в качестве пьедестала под затравку позволяют создать условия, при которых за счёт излучения от нижней поверхности

кристалла происходит эффективный теплоотвод. Благодаря этому растущий в температурном градиенте монокристалл остаётся самым холодным элементом системы. Возможность нежелательного осаждения материала как на стенки ростовой камеры, так и на поверхность пьедестала полностью исключена. Регулировкой температурного профиля нагревателя по ходу процесса задаётся оптимальный режим разращивания кристалла до полного диаметра и его последующего нормального роста.

Со стороны нижнего торца световода можно наблюдать за разращиванием затравки. На рисунке 2 представлена серия фотографий, иллюстрирующая этот процесс. Конечный диаметр кристалла ограничен размером ростовой ячейки.

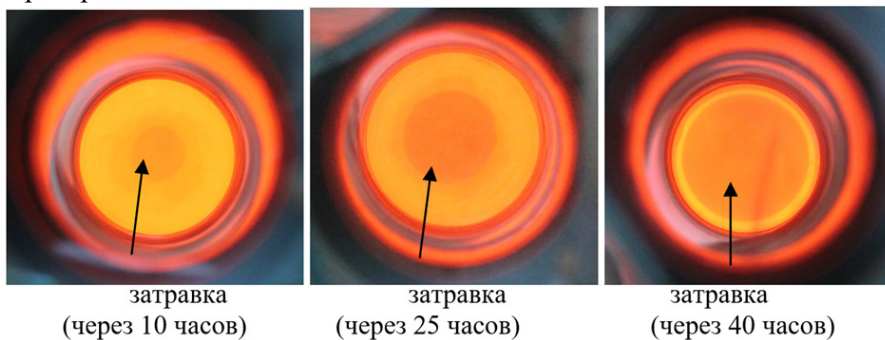


Рис. 2. Визуальное наблюдение за разращиванием затравки

В силу равновесного характера протекания процесса достигается высокое кристаллическое совершенство материала, отличающегося большой областью монокристалличности (более 95%) с заданной ориентацией поверхности и отсутствием микровключений второй фазы в объёме.

На рисунке 3 показан монокристалл КЦТ, полученный в результате 70 часового процесса. По причине низкой теплопроводности твёрдых растворов на основе теллурида кадмия, скорость их осаждения в значительной степени снижается по мере удаления поверхности кристаллизации от нижней излучающей поверхности. Для получения кристаллов высотой 10-12 мм необходимо около 250 часов. Дальнейшее наращивание нецелесообразно.



Рис. 3. Монокристалл твёрдого раствора КЦТ, выращенный в результате 70 часового процесса

Очевидно, что с точки зрения производительности, метод проигрывает традиционным способам выращивания из расплавов. Однако, полученные монокристаллы характеризуются высокой однородностью параметров и могут быть практически полностью использованы для изготовления приборов.

В парофазном процессе происходит эффективная очистка материала от всех примесей. При этом одни примеси покидают ростовую камеру через неплотности вместе с частью основного материала, другие накапливаются в тигельном остатке. Об этом свидетельствуют результаты масс-спектрального анализа образцов монокристаллического материала и тигельного остатка, взятых из одного процесса.

Поскольку в объёме кристаллов, полученных парофазным методом, не наблюдаются микровключения теллуровой фазы, структурный фактор пока не рассматривается как лимитирующий. В то же время, метод характеризуется хорошей воспроизводимостью результатов при стабилизации основных технологических параметров. Возможность выхода на следующий уровень приборных характеристик мы связываем с повышением чистоты исходных и снижением уровня неконтролируемого легирования [1].

Исследования выращенных в АО «НИИМВ им. Ю.А. Малинина» методом Давыдова-Маркова образцов КЦТ проводились в АО «НПО «Орион»

на рентгеновском дифрактометре высокого разрешения Bruker D8 Discover. Состав твердого раствора по Zn определяется на уровне 3,1-4,0 %. Экспериментальная кривая качания показана на рисунке 4.

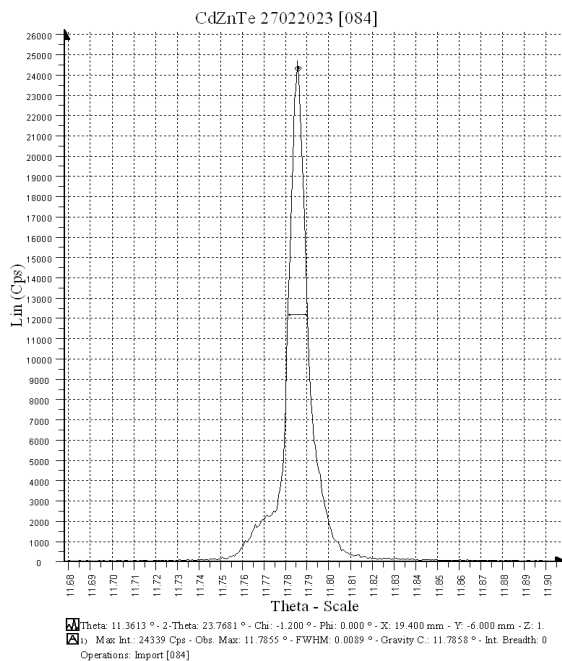


Рис. 4. Экспериментальная кривая (111) качания образца КЦТ

В результате проводимых работ, направленных на импортозамещение и обеспечение технологической независимости РФ в части стратегического материала твердотельной оптоэлектроники, показано, что выращивание монокристаллов и подложек твердого раствора КЦТ методом Давыдова-Маркова является перспективным направлением, имеющим прикладной характер, и позволяет при определенном развитии технологии получать подложечный материал для эпитаксиального выращивания КРТ методом МЛЭ не уступающий по своим характеристикам материалу КЦТ, получаемому методом Бриджмена.

1. Е.В.Марков, А.А.Давыдов. Изв. АН СССР. Неорг.м-лы, 11, 1755, 1975
2. Avetisov I.Ch., Mozhevitina E.N., Khomyakov A.V., Avetisov R.I., Davidov A.A., Chegnov V.P., Chegnova O.I., Zavoronkov N.V., - Homogeneity limits and nonstoichiometry of vapor growth ZnTe and CdTe crystals.- Cryst.Eng.Commun., 2015, v.17,p.561-568

С30 Характеристики МДП-систем на основе HgCdTe со сверхрешеткой в барьерной области

Войцеховский А.В.¹, Дзядух С.М.¹, Горн Д.И.¹, Дворецкий С.А.^{1,2},
Михайлов Н.Н.^{1,2}, Сидоров Г.Ю.^{1,2}, Якушев М.В.²

¹ *Томский государственный университет. Томск. Россия. vav43@mail.tsu.ru*

² *ИФП СО РАН. Новосибирск. Россия*

Characteristics of MIS- systems based on HgCdTe with a superlattice in the barrier region

Voitsekhovskii Alexander V.¹, Dzyadukh S.M.¹, Gorn D.I.¹, Dvoretiskii S.A.^{1,2},
Mikhailov N.N.^{1,2}, Sidorov G.Yu.^{1,2}, Yakushev M.V.²

¹ *National Research Tomsk State University. Tomsk. Russia*

² *Institute of Semiconductor Physics SB RAS. Novosibirsk. Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-326

The results of a study of the admittance of a MIS system created on the basis of an nBn structure with a superlattice in the barrier region, obtained in a wide temperature range, are presented. The studies were carried out under conditions of shielding from optical radiation and under the influence of constant IR illumination through the substrate. Using the equivalent circuit method, an analysis of the effect of illumination on various structural elements was carried out.

Важной проблемой, сдерживающей развитие технологии униполярных барьерных фоточувствительных nBn-структур на основе HgCdTe, является доминирование токов поверхностной утечки, что затрудняет практическую реализацию и проведение экспериментальных измерений характеристик таких структур.

В данной работе представлены результаты исследования структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) на основе n-HgCdTe nBn-структуры со сверхрешеткой в барьерной области [1]. Исследования проводились методом спектроскопии адмиттанса (комплексной проводимости) [2], который позволяет определять широкий спектр свойств полупроводниковых структур – от параметров границы раздела полупроводник / диэлектрическое покрытие до выявления положения энергетических зон различных слоев гетероструктуры со сверхрешеткой в качестве барьера nBn-системы.

Образцы, изготовленные для проведения исследования являются МДП-системами, в качестве полупроводникового слоя в которых используются nBn-структуры, созданные на основе эпитаксиальных слоев КРТ со сверхрешеткой в барьерной области. Выращивание эпитаксиальных пленок

и формирование структур производилось в Новосибирске в Институте физики полупроводников СО РАН. В процессе роста эпитаксиальные пленки преднамеренно не легировались. Состав X_{CdTe} эпитаксиальной пленки HgCdTe в поглощающем слое равен 0.32, а в контактном 0.30. Сформированная сверхрешетка представляет собой чередующиеся между собой 15 ям толщиной 1.6 нм, и 16 барьеров толщиной 3 нм с содержанием $X_{\text{CdTe}}=0.5$. После выращивания эпитаксиальной пленки, на ее поверхности травлением через маску проводилось формирование рассредоточенных по площади пленки $n\text{Вп}$ -структур различного диаметра. Для этого глубина травления, строго соответствовала глубине залегания границы раздела, поглощающего и барьерного слоев. В качестве функционального диэлектрического слоя в МДП-структуре использовалась пленка Al_2O_3 , наносимая методом атомного слоевого осаждения на поверхность, неся при этом и пассивирующую функцию боковых стенок структур. После нанесения диэлектрического покрытия, напылением индия через маску проводилось создание полевых электродов.

В широком диапазоне температур в условиях экранирования от оптического излучения и при воздействии постоянной ИК-подсветки проведены исследования адмиттанса структур. На рисунках 1 и 2 приведены зависимости от напряжения емкости и нормированной проводимости для структуры диаметром 0.5 мм при температуре 77 К на различных частотах. Видно, что воздействие подсветки при данной температуре приводит к увеличению емкости и проводимости в режиме сильной инверсии, а в режиме обогащения к снижению. Определенная по наклону зависимости $1/C^2$ от напряжения в режиме обеднения концентрация основных носителей заряда на частоте 1 МГц в диапазоне температур от 12 К до 60 К изменялась в небольших пределах и составляла примерно $7.5 \cdot 10^{20} \text{ М}^{-3}$.

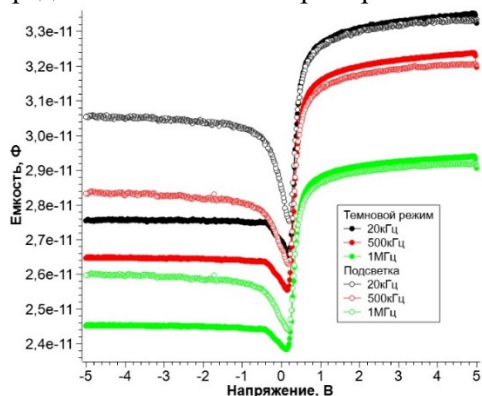


Рис. 1. ВФХ при температуре 77 К в темноте и при освещении. Обратная развертка

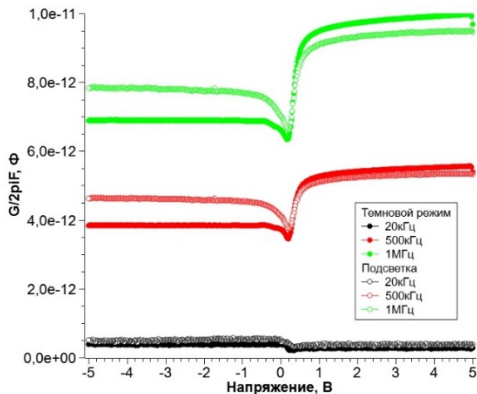


Рис. 2. Зависимость проводимости от напряжения при температуре 77 К в темноте и при освещении. Обратная развертка

В результате проделанной работы проведены исследования адмиттанса МДП- системы на основе nВn- структуры со сверхрешеткой в барьерной области в широком диапазоне температур в темноте и при освещении ИК-излучением через подложку. Определена зависимость концентрации основных носителей заряда от температуры. Методом эквивалентных схем проведен анализ влияния подсветки на различные элементы структуры.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-62-10021

1. Burlakov I.D., Kulchitsky N.A., Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., Gorn D.I. Unipolar Semiconductor Barrier Structures for Infrared Photodetector Arrays (Review) // Journal of Communications Technology and Electronics. 2021. V. 66. № 9. P. 1084-1091.

2. Izhnin I.I., Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., Dzyadukh S.M., Dvoretzky S.A., Mikhailov N.N., Sidorov G.Y., Yakushev M.V. Admittance of barrier nanostructures based on MBE HgCdTe // Applied Nanoscience. 2020. № 12. P. 403-

С31 Механизмы формирования тока в nВn-структурах на основе HgCdTe со сверхрешеткой в барьерной области

Войцеховский А.В.¹, Дзядух С.М.¹, Горн Д.И.¹, Дворецкий С.А.^{1,2},
Михайлов Н.Н.^{1,2}, Сидоров Г.Ю.^{1,2}, Якушев М.В.²

¹ *Томский государственный университет. Томск. Россия. vav43@mail.tsu.ru*

² *Институт физики полупроводников СО РАН им. А.В. Ржанова.
Новосибирск. Россия*

Mechanisms of current formation in nBn- structures based on HgCdTe with a superlattice in the barrier region

Voitsekhovskii Alexander V.¹, Dzyadukh S.M.¹, Gorn D.I.¹, Dvoretzskii S.A.^{1,2},
Mikhailov N.N.^{1,2}, Sidorov G.Yu.^{1,2}, Yakushev M.V.²

¹ *National Research Tomsk State University. Tomsk. Russia*

² *Institute of Semiconductor Physics SB RAS. Novosibirsk. Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-329

The paper presents the results of a study of dark currents in nBn-structures based on HgCdTe with a superlattice in the barrier region. The studies were carried out in a wide temperature range for structures with different diameters. From the total current density, the volumetric component of the current density and the surface leakage current density were separated. Their contribution is analyzed depending on the applied voltage and temperature.

Актуальной и критически важной задачей при разработке униполярных фоточувствительных барьерных nВn структур на основе МЛЭ n-HgCdTe для целей фотоприёма в средней (3-5 мкм) и дальней (8-14 мкм) областях ИК-спектра является формирование эффективного барьера для основных носителей заряда в зоне проводимости для снижения темновых токов и одновременное устранение энергетического барьера в валентной зоне для повышения квантовой эффективности и чувствительности [1]. В настоящее время с учётом потенциала и возможностей технологии молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) наиболее перспективной конфигурацией барьера является барьер в виде сверхрешёточной (СР) структуры [2, 3].

Успешная реализация задачи создания эффективного селективного барьера в nВn фоточувствительных структур напрямую связана с анализом каналов протекания электрического тока в структурах подобного типа. Данная работа посвящена такому анализу в nВn-структурах на основе HgCdTe со сверхрешеткой в барьерной области.

Исследованные образцы представляли собой nВn-структуры на основе

эпитаксиальных слоев КРТ. Выращивание эпитаксиальной пленки производилось в Новосибирске в Институте физики полупроводников СО РАН на установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Обь-М». После выращивания эпитаксиальной пленки, производилось ее травление через специальную маску на глубину, соответствующую положению границы раздела, поглощающего и барьерного слоев. В результате на поверхности пленки были сформированы отдельно стоящие nVn -структуры различного диаметра. После этого, методом атомного слоевого осаждения производилась пассивация всей поверхности эпитаксиальной пленки слоем Al_2O_3 , в котором производилось вскрытие окон над nVn -структурами, что давало возможность последующим напылением индия создавать надежные контакты. Для создания сверхрешетки формировались 15 ям толщиной 1.6 нм, и 16 барьеров толщиной 3 нм с содержанием $X_{CdTe}=0.5$. Состав X_{CdTe} в поглощающем слое равен 0.32, а в контактном 0.30.

Исследования проводились в широком диапазоне температур, в качестве источника напряжения и измерителя тока использовался пикоамперметр Keithley 6487. На рисунке 1 приведены ВАХ для структуры диаметром 0.3 мм при четырех температурах в диапазоне от 150 К до 300 К. Видно, что плотность тока при напряжении смещения -0.5 В при охлаждении до 150 К снижается более чем на 4 порядка, а при +0.5 В более чем на 5.

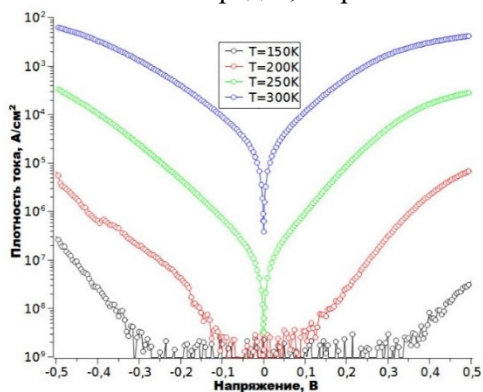


Рис. 1. Зависимость плотности тока от напряжения для структуры диаметром 0.3 мм при различных температурах

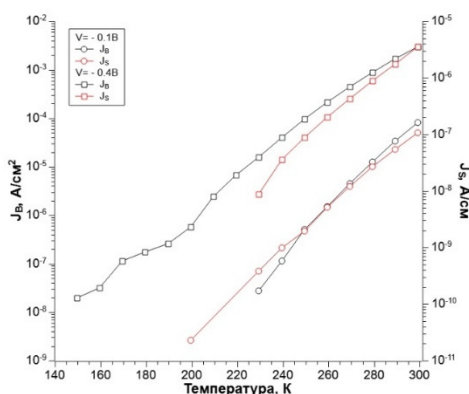


Рис. 2. Температурная зависимость объемной компоненты тока J_B и тока поверхностной утечки J_S

Исследования ВАХ в широком диапазоне температур для структур с различными диаметрами, при использовании методики построения зависимости плотности тока от отношения периметра структуры к ее площади позволили произвести выделение из общей плотности компонент объемного тока и тока поверхностной утечки, а также проанализировать их зависимость от напряжения смещения и температуры (Рисунок 2). Асимметрия зависимости

тока поверхностной утечки от напряжения, позволила сделать вывод о наименьшем вкладе поверхностной компоненты при отрицательных напряжениях.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-62-10021.

Voitsekhovskii A.V., Nsmelov S.N., Dzyadukh S.M., Gorn D.I., Dvoretzky S.A., Mikhailov N.N., Sidorov G.Y. Ch. 6, II-VI Semiconductor-Based Unipolar Barrier Structures for Infrared Photodetector Arrays in Handbook of II-VI Semiconductor-Based Sensors and Radiation Detectors. Cham: Springer, 2023. P. 135-154.

Михайлов Н.Н., Варавин В.С., Дворецкий С.А., Менщиков Р.В., Ремесник В.Г., Ужаков И.Н. Рост и характеристика nВn-структур на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ для фотоприёмников спектрального диапазона 3-5 мкм // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 2. С. 76-87.

Войцеховский А.В., Дзядух С.М., Горн Д.И., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Сидоров Г.Ю., Якушев М.В. Униполярные барьерные структуры на основе n-HgCdTe со сверхрешётками в качестве барьера. Обзор // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 2. С. 6-22.

C32 Расчет характеристик лавинных фотодиодов Ge/Si для атмосферного канала связи

Коханенко А.П., Диб Х., Лозовой К.А., Коротаев А.Г.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет.
Томск. Россия. kokh@mail.tsu.ru*

Calculation of characteristics of Ge/Si avalanche photodiodes for the atmospheric communication channel

Kokhanenko A.P., Deeb H., Lozovoy K.A., Korotaev A.G.

National Research Tomsk State University. Tomsk. Russia. kokh@mail.tsu.ru

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-332

This work evaluates the gain, bandwidth, and absorption efficiency of Ge/Si avalanche photodiodes (Ge/Si APDs) with nanoholes for photon trapping at 850 nm. The proposed design of a Ge/Si avalanche photodiode with photon traps allows for significant increases in gain, bandwidth, and absorption efficiency. It has been demonstrated that it is possible to improve the absorption efficiency of the photodetector without compromising the gain and speed of the device. The results of the work can be used to design Ge/Si avalanche photodiodes using trap structures with high gain, speed and absorption efficiency in advanced technologies, such as fluorescence lifetime imaging microscopy, positron emission tomography, quantum communication systems, lidar technologies and 3D visualization systems.

Лавинные фотодетекторы представляют собой полупроводниковые устройства с внутренним усилением, что делает их основным решением для достижения высоких соотношений сигнал/шум в фотоприемных модулях. Эти устройства играют важную роль в различных областях применения, таких как волоконная связь, спектроскопия и системы визуализации. Компромисс между откликом и полосой пропускания, известный как произведение усиления и полосы пропускания (GBP), является ключевым аспектом при проектировании лавинных фотодетекторов.

В данной работе были изучены возможности улучшения поглощения оптической мощности с использованием наноструктур для захвата фотонов на длине волны 850 нм. Наноструктуры для захвата фотонов в лавинных фотодиодах Ge/Si позволяют улучшить процесс лавинообразного умножения электронов, достигать более высоких значений коэффициента умножения и сокращать время отклика на световой импульс. Структуры для захвата фотонов были введены в лавинные фотодиоды Ge/Si внутри слоя поглощения из германия. Было изучено их влияние на поглощение, усиление и полосу пропускания. Ожидается, что поиск оптимальной комбинации этих

характеристик будет способствовать разработке сверхбыстрых фотодетекторов с высоким усилением и эффективностью поглощения, открывая возможность создания высокочувствительных устройств, способных достигать чувствительности на уровне одного фотона, что является необходимым для квантовых и биомедицинских применений [1].

Для анализа взаимодействия между падающей электромагнитной волной и структурой устройства использовался метод конечных разностей во временной области (FDTD). Влияние внедрения массива нанотверстий для захвата фотонов и оптимизированного профиля поглощения на параметры лавинного фотодетектора было изучено путем моделирования электрических характеристик с использованием программного обеспечения для автоматизированного проектирования (TCAD) Synopsys Sentaurus Technology.

Была продемонстрирована возможность оптимизации как коэффициента усиления, так и произведения коэффициента усиления и пропускной способности в фотодетекторах на основе германия и кремния с использованием нанотверстий для захвата фотонов. Эти нанотверстия эффективно уменьшают поглощение фотонов с длиной волны 850 нм на поверхности устройства, предотвращая потерю носителей заряда из-за рекомбинации или их медленного транспорта за счет диффузии. Внедрение нанотверстий для захвата фотонов значительно улучшает эффективность поглощения (с 43% до 61.8%). Кроме того, наблюдается заметное увеличение коэффициента усиления и полосы пропускания. В предложенной структуре ЛФД Ge/Si продемонстрировано достижение величины произведения коэффициента усиления и полосы пропускания в 1494 ГГц, что свидетельствует о существенном прогрессе по сравнению с современными устройствами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-10031.

1. K.A. Lozovoy, et al. *Nanomaterials*, vol. 13, p. 3078, doi: 10.3390/nano13233078

С33 Электрофизические характеристики МЛЭ пленок КРТ после имплантации ионов As

Коротаев А.Г.¹, Войцеховский А.В.¹, Дворецкий С.А.², Варавин В.С.²,
Якушев М.В.²

¹*Национальный исследовательский Томский государственный университет.
Томск. Россия. kor@mail.tsu.ru*
²*ИФП СО РАН. Новосибирск. Россия*

Electrical characteristics of epitaxial CMT after As⁺ implantation

A.G. Korotaev¹, A.V. Voitsekhovskii¹, S.A. Dvoretiskii², Varavin V.S.²,
Yakushev M.V.²

¹*National Research Tomsk State University. Tomsk. Russia. kor@mail.tsu.ru*
²*A.V. Rzhhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian
Academy of Sciences. Novosibirsk. Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-334

In this work we studied the characteristics of MBE MCT films after the introduction of different energies As⁺ with different doses of irradiation. Some of the samples was subjected to post-implantation annealing. Electrical characteristics of the samples were determined from Hall measurements. Voltage-current characteristics of the structures were measured also. Activation As and modification of the characteristics of CMT outside the implanted layer after annealing have been detected. Also we found differences in the p-n junction depths and electrically active defects profiles.

Молекулярно-лучевые эпитаксиальные (МЛЭ) слои твердых растворов кадмий-ртуть-теллур (КРТ) широко используются для создания фотонных приемников оптического излучения. В настоящее время основная технология создания фотодиодов на этом материале – формирование слоя n-типа на р-материале при помощи ионной имплантации. По ряду причин представляется более выгодным изготавливать фотодиодные структуры типа «р на п» [1].

В данной работе проведено комплексное исследование электрофизических характеристик МЛЭ КРТ после имплантации ионов мышьяка и проведения постимплантационного отжига, определены профили радиационных дефектов и определена глубина залегания p-n перехода.

В работе исследовались пленки КРТ, полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии в ИФП СО РАН г. Новосибирска. Особенностью части эпитаксиальных пленок являлось наличие варизонных широкозонных слоев на границе пленка – буферный слой и в приповерхностной области материала. У

другой части образцов верхний варизонный слой у них был стравлен. Часть образцов была выращена на подложках из GaAs, часть на подложках из Si

Имплантация ионов мышьяка с энергиями $E_1=190$ и $E_2=350$ кэВ проводилась при комнатной температуре в диапазоне доз 10^{13} - 10^{15} см⁻². После имплантации ряд образцов был повергнут двухстадийному активационному отжигу.

Измерения электрофизических параметров проводилось методом дифференциальных Холловских измерений. А для измерения ВАХ использовалась автоматизированная установка спектроскопии адмиттанса наногетероструктур. Для этой цели были выбраны образцы, облученные дозой 10^{14} см⁻².

Измерение дозовых зависимостей для образцов, имеющих варизонный слой на поверхности, показало классическую картину ионной имплантации в КРТ – с ростом дозы ионов растет концентрация и подвижность носителей заряда. При больших дозах облучения на образцах с удаленным варизонным слоем наблюдается уменьшение слоевой концентрации. Этот спад можно объяснить большей разупорядоченностью имплантированного слоя за счет применения более высокоэнергетических и более тяжелых (в 1.9 раза по сравнению с ионами аргона) ионов мышьяка.

Измерение профилей распределения электрически активных дефектов также показало классическую картину. Для образцов, выращенных на кремниевых подложках глубина залегания профиля существенно превышает R_p имплантированных ионов, а с ростом дозы облучения профили сдвигаются вглубь образца. Следует отметить, что профили для образцов без варизонного слоя залегают несколько глубже, чем для образцов с варизонным слоем. При измерении электрических профилей в образцах, выращенных на подложках из GaAs, наблюдалась похожая картина, но профили электрически активных радиационных дефектов залегают на 0,4-0,5 мкм глубже, что может быть объяснено влиянием структуры исходных дефектов на процесс диффузии междоузельной ртути, определяющей формирование слоя n-типа после ионной имплантации.

Нелинейная вольтамперная характеристика появляется на глубине, соответствующей глубине залегания профиля мышьяка после имплантации и постимплантационного отжига, т.е. формирование p-n перехода можно отнести к активации мышьяка в процессе отжига. При этом глубина формирования p-n перехода не зависит от энергии ионов в диапазоне 190-350 кэВ.

1. Gravrand O. et al. *Journal of electronic material*, 2009, vol. 13, p. 3078

С34 Влияние длины оптического поглощения света в абсорбере на частотно-контрастную характеристику КРТ-матриц

Стучинский В.А., Вишняков А.В., Васильев В.В.

ИФП СО РАН. Новосибирск. Россия. stuchin@isp.nsc.ru

Effect of optical absorption length in the absorber material on the modulation transfer function of MCT-based two-dimensional focal plane arrays

Stuchinsky Victor A., Vishnyakov A.V., Vasiliev V.V.

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS. Novosibirsk. Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-336

In the present work, the influence of optical absorption length in the absorber material on the modulation transfer function (MTF) of MCT-based focal plane arrays (FPAs) was numerically studied. For this purpose, the Monte Carlo method was used to simulate the lateral spreading of photogenerated charge carriers (PCCs) from a linear illumination spot at different positions of the latter relative to the FPA diodes. The line spread function (LSF) of the FPA was calculated, from which the MTF was then inferred by finding the normalized Fourier transform of LSF. Two cases were considered, differing in the value of the optical absorption length in the absorber, a long and a short one. It was found that the spatial resolution of FPAs increases yet insignificantly upon the transition from the case of optical generation concentrated at the boundary with the substrate to the case of optical generation approximately uniform across the absorber layer.

Параметрические исследования показателей качества фотоприемных структур фокальной плоскости важны для оптимизации характеристик соответствующих фотоприемников. Так, в работах [1, 2] изучалась зависимость пространственного разрешения фотоприемных матриц (ФПМ) на основе материала кадмий-ртуть-теллур (КРТ) от размера диодов и толщины слоя абсорбера. Настоящая работа была посвящена изучению влияния распределенной генерации носителей заряда (НЗ) на частотно-контрастную характеристику (ЧКХ) освещаемых со стороны подложки КРТ-матриц.

С этой целью методом Монте-Карло моделировалось латеральное растекание фотогенерированных НЗ (ФНЗ) из линейного пятна засветки при разном положении пятна относительно диодов матрицы. Вычислялась функция рассеяния линии (ФРЛ) матриц, из которой в дальнейшем посредством нахождения нормированного Фурье-образа вычислялась диффузионная ЧКХ матриц. Предполагалось, что пятно засветки проецируется на ФПМ при помощи длиннофокусного объектива, так что схождением светового пучка после объектива можно было пренебречь. Также в модельных расчетах

пренебрегалось толщиной n -области диодов (в матрицах со структурой n -на- p) и, соответственно, её влиянием на ЧКХ. Этот подход делал необязательным рассмотрение таких параметров задачи, как длина диффузии ФНЗ в n -областях диодов, скорость рекомбинации НЗ на границах n -областей и т.п.

Рассматривались два случая, различающихся длиной поглощения света в абсорбере: $l_{opt}=2$ мкм, что соответствовало оптическому возбуждению ФНЗ, локализованному у границы абсорбера с подложкой и величине пропускания $\sim 5\%$ (при толщине слоя абсорбера 6 мкм), и $l_{opt}=57$ мкм, что соответствовало близкой к равномерной генерации ФНЗ по толщине слоя абсорбера и пропусканию регистрируемого излучения, примерно равному 90 %. Остальные параметры задачи в обоих случаях были одинаковы и составляли: период матрицы – 15 мкм, размер диодов – 9×9 мкм, длина объёмной диффузии ФНЗ в материале абсорбера – $L_{dif}=20$ мкм. Отражением света от границ пренебрегалось. В каждой точке вычисляемых профилей сканирования статистика набиралась до генерации в абсорбере ста тысяч частиц. Шаг расчетной сетки составлял 0.25 мкм.

На рис. 1 показаны рассчитанные профили сканирования пятна засветки для случаев $l_{opt}=2$ мкм и $l_{opt}=57$ мкм (кривые 1 и 2 соответственно). Здесь N_p – количество частиц, стекших на сканирующий диод, а x – координата центра диода. Большее значение числа поглощенных диодом частиц в максимуме профиля для $l_{opt}=57$ мкм объясняется тем обстоятельством, что в этом случае места генерации ФНЗ в среднем располагались ближе к n -областям диодов, в результате чего меньшее количество ФНЗ тратилось на рекомбинацию в объёме абсорбера. Соответственно, в этом случае также наблюдается более быстрое затухание ФНЗ при их латеральном распространении в направлении, перпендикулярном пятну, в результате чего пространственное разрешение ФПМ несколько возрастает (рис. 2, кривые 1 и 2 соответствуют случаям $l_{opt}=2$ мкм и $l_{opt}=57$ мкм). Изменение составляет 1.6 штр/мм на уровне ~ 24 штр/мм (разрешение в штрихах на миллиметр подсчитано для уровня ЧКХ=0.5) и является незначительным.

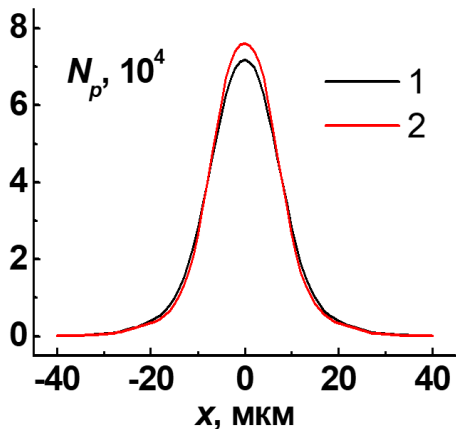


Рис. 1

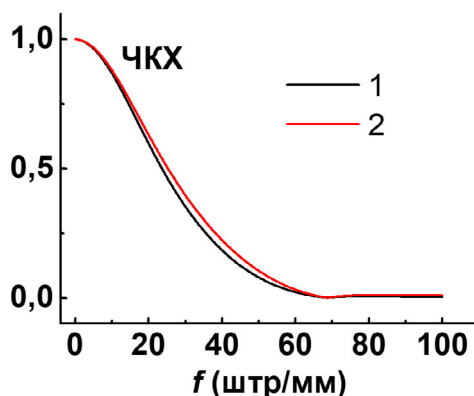


Рис. 2

Литература

1. I.I. Lee, V.G. Polovinkin, Dependence of the modulation transfer function on the material and design parameters of HgCdTe IR FPAs, IEEE Transactions on Electron. Devices, 2020, Vol. 67, No. 8, P. 3175-3179.

2. V.A. Stuchinsky, A.V. Vishnyakov, V.V. Vasiliev, Modulation transfer function and effective diffusion length of photogenerated charge carriers in mercury-cadmium-telluride focal-plane diode arrays with different values of geometric parameters [In Russian] // Opticheskiy Zhurnal, 2024, Vol. 91, No. 2, P. 59–56. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-59-66>.

C35 Дефектообразование в структурах узкозонный полупроводник – поверхностный окисел мягким рентгеновским излучением

Средин В.Г.¹, Войцеховский А.В.², Степанченко А.В.³, Мелехов А.П.³,
Рамакоти Р.Ш.³

¹*Военная академия РВСН им. Петра Великого. Балашиха. МО. Россия.
sredinvg@rambler.ru*

²*Томский национальный исследовательский государственный университет.
Томск. Россия*

³*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ. Москва.
Россия*

Defect formation in structures of narrow-band semiconductor - surface oxide by soft X-ray radiation

Sredin V.G.¹, Voitsekhovskii A.V.², Stepanchenko A.V.³, Melekhov A.P.³,
Ramakoti R.S.³

*1. Peter the Great Military Academy of the Strategic Missile Forces, Balashikha,
Russian Federation*

2. Tomsk National Research State University, Tomsk, Russian Federation

3. National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russian Federation

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-339

The nature of defect formation by soft X-ray laser plasma radiation in narrow-band semiconductor - surface oxide structures is discussed

Генерация дефектов рентгеновским излучением (РИ) является одним из наименее изученных процессов дефектообразования в кристаллах. Предполагается, что они возникают вследствие распада электронных возбуждений, вызванных РИ [1]. При этом предполагается, что дефект возникает в результате кулоновского отталкивания в локально сосредоточенной группе одноименно заряженных ионов, приобретающих в возбужденном состоянии дополнительный заряд за счет поглощения кванта РИ [2]. Модель применялась для интерпретации результатов экспериментов, как в полупроводниках, так и диэлектриках.

Нами была проведена серия экспериментов по облучению мягким рентгеновским излучением (МРИ) лазерной плазмы узкозонных полупроводниковых материалов $Cd_xHg_{1-x}Te$ [3] и $InSb$ [4], причем облучались как поверхность кристаллов и эпитаксиальных слоев, так и структур полупроводник- окисный слой этих материалов. Энергии кванта МРИ (0,4 – 10 кэВ) достаточно для ионизации L , M , N оболочек ионного остова исследуемых кристаллов. МРИ поглощается тонким поверхностным слоем материалов причем атомами, расположенными как узлах кристаллической решетки, так и межузельными атомами, что может привести к образованию

точечных дефектов различных типов. В наших экспериментах обнаружено, что при облучении монокристаллов $Cd_xHg_{1-x}Te$ с $x \approx 0.23$ возникают дефекты как при непосредственном воздействии МРИ на поверхность, так и при облучении образца, покрытого окисным слоем. Генерация дефектов в этом материале связывается с появлением вакансий ртути в приповерхностной области кристалла из-за ряда обстоятельств: энергия связи ионов Hg–Te для рассматриваемого состава твердого раствора составляет 0.048 эВ, при этом энергия связи Cd–Te – 0.94 эВ [5], кроме того количество ионов Hg для этого состава твердого раствора в 4 раза больше, чем ионов Cd. Кроме того, вероятность возбуждения МРИ именно ионов Hg выше, чем ионов Cd и Te из-за спектрального состава излучения. При этом, не исключается также образование радиационных дефектов или перезарядка существующих центров и в окисных слоях.

В случае антимонида индия энергия связи In–Sb по нашим расчетам [4] составляет 3.4 эВ, что ниже значений, приведенных, например, в [1] – порядка 6 эВ. В наших расчетах ион In размещался в центр тетраэдра с длиной стороны, соответствующей параметрам решетки антимонида индия, в вершинах которого находились ионы сурьмы. Энергию связи оценивали по глубине потенциальной ямы. Аналогичные расчеты для $Cd_xHg_{1-x}Te$ также дают результаты в разумном соответствии с приведенными выше. В рамках рассматриваемых моделей образованию точечного дефекта соответствует выход иона из соответствующей потенциальной ямы. Ему может способствовать включение электрического поля. На рис. 1 представлены результаты расчета распределения потенциальной энергии взаимодействия ионов в InSb при включении внешнего электрического поля в плоскости $z = 0$ при $E = 3$ ГВ/м, контурными линиями представлены собственные уровни энергии. Видно, что для включенного поля существуют области минимума потенциальной энергии, отвечающие устойчивым положениям иона индия внутри элементарной ячейки. При включении поля $E = 15$ ГВ/м, области локальных минимумов потенциальной энергии иона In отсутствуют, что говорит о формировании условий для эффективного выхода частицы из элементарной ячейки.

Возникновение таких полей в антимониде индия под действием МРИ за счет фотоионизации ионов представляется маловероятной с учетом данных по внешнему фотоэффекту [3], в то время как в узкозонных составах твердого раствора $Cd_xHg_{1-x}Te$ она существенно выше по указанным выше причинам и более высокой интенсивности внешнего фотоэффекта по сравнению с InSb. В этом материале по-видимому облучение МРИ приводит к зарядке центров в слое окисла и (или) на границе раздела окисел – полупроводник за счет захвата ими электронов, которые образуются при поглощении квантов МРИ поверхностью кристалла.

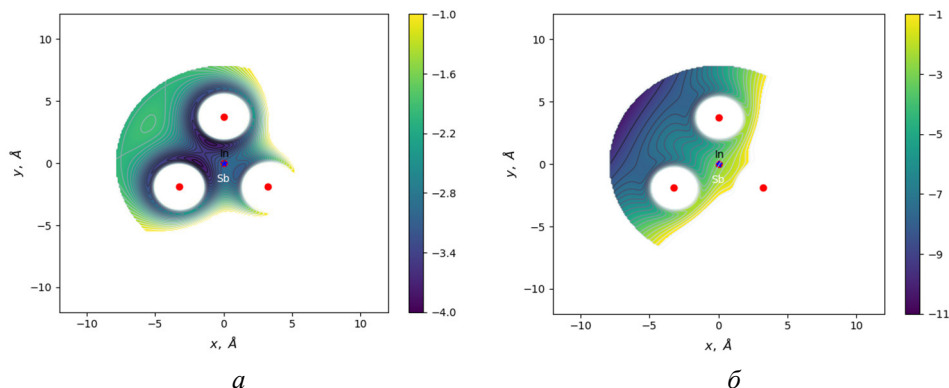


Рис. 1. Распределение потенциальной энергии взаимодействия иона индия с ионами сурьмы в элементарной ячейке в плоскости $z = 0$ при включении электрического поля $E = 3$ ГВ/м (а), 15 ГВ/м (б), направленного по нормали к грани элементарной ячейки.

Контурные линии обозначают собственные уровни энергии иона индия в элементарной ячейке.

Отметим, что эффекты, подобные тем, которые наблюдались нами при облучении структур на основе InSb МПИ, отмечены на фотодиодных структурах на основе того же материала при освещении их излучением с длиной волны менее 1 мкм [6]. Авторы [6] также связывают наблюдаемые деградационные процессы при освещении с генерацией фотоэлектронов с последующим смещением их к границе раздела.

Литература

1. Вавилов В. С. // УФН. 1997. Т. 167. № 4. С. 407-417.
2. Клиньгер М.И., Лущик Ч.Б., Машовец Т.В. и др. // УФН. 1987. Т. 147. № 3. С. 523-558.
3. Средин В.Г., Войцеховский А.В., Ананьин О.Б., Мелехов А.П., Несмелов С.Н., Дзядух С.М. // Прикладная физика. 2018. №4. С. 54 – 60.
4. Средин В.Г., Войцеховский А.В., Степаненко А.А., Мелехов А.П., Рамакоти Р.Ш., Юрчак, В.А., Дзядух С.М., Андрейчиков К.С.В сборнике: Актуальные проблемы радиофизики АПР-2023. Сборник трудов X Международной научно-практической конференции. Томск, 2023. С. 296-297
5. J.Chen, A.Sher, W.E.Spicer, Shin C-K // J .Vac. Sci. Technol. 1985, A3, №3. P.105-111.
6. Андрейчиков К.С., Астахов В.П., Соловьева Г.С., Чеканова Г.С. Тезисы докладов XXVI международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Москва ФГУП «НПО «Орион». 2022г. С.318-319.

С36 Спектроскопические исследования однородности состава монокристаллов твердых растворов $Cd_xHg_{1-x}Te$

Средин В.Г.¹, Федоров Д.Л.²

¹*Военная академия РВСН им. Петра Великого. Балашиха. МО. Россия.
sredinvg@rambler.ru*

²*Балтийский государственный технический университет «Военмех». Санкт
Петербург. Россия*

Spectroscopic studies of the composition homogeneity of $Cd_xHg_{1-x}Te$ solid solutions single crystals

Sredin V.G.¹, Fedorov D.L.²

¹*Peter the Great Military Academy of the Strategic Missile Forces. Balashikha.
Russia*

²*Baltic State Technical University "Voennmeh". Saint Petersburg. Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-342

Одной из главных проблем, возникающих при использовании монокристаллов или слоев полупроводниковых твердых растворов, является проблема однородности их состава, нарушение которой представляет собой нарушение кристаллической структуры, возникновение беспорядка. В первом приближении беспорядок может быть разделен на композиционный и топологический [1]. Под последним понимается любое нарушение трансляционной симметрии кристалла: точечные и более сложные дефекты структуры, включения, дислокации и т.д. Композиционный беспорядок в этом приближении можно представить как следствие хаотического заполнения регулярных узлов топологически совершенной решетки атомами различных сортов, в результате чего атом А занимает позицию атома В и наоборот в соединении с формулой АВ. В тройных твердых растворах с изовалентным замещением $A_xB_{1-x}C$ со структурой сфалерита выделяют анионный и катионный беспорядок в материалах с катионным и анионным замещением, соответственно. В реальной ситуации существование одного типа беспорядка не исключает наличие другого. В связи с тем, что однородность состава в ряде случаев критическим образом влияет на рабочие характеристики полупроводниковых приборов, она исследуется различными методами: рентгеновскими, в первую очередь, но для этих целей также широко применяются различные спектроскопические методы [2-5].

В настоящей работе исследовались спектры фотолюминесценции монокристаллов $Cd_xHg_{1-x}Te$ с составом $x \approx 0.7$. Этот материал в настоящее время недостаточно изучен в первую очередь из-за неочевидности области его

применения и технологических сложностей, связанных с его получением. Исследуемые монокристаллы были выращены методом твердотельной кристаллизации с подпиткой из твердой фазы, исследуемые пластины имели толщину порядка 1 мм и площадь поверхности около 1 см². Методика спектральных исследований описана в [4,5].

На рис.1 представлены спектры люминесценции кристалла с составом $x = 0.672$, определенному по данным рентгеноструктурного анализа. Спектры возбуждались в трех различных точках, отстоящих друг от друга на 7-10 мм (на рисунке обозначенные Point 1, 2 и 3). Спектры при температурах регистрации состоят из линии по форме близкой лоренцевой, хотя для области измерения Point 2 при 103К имеет более сложную структуру. Видно, что спектральное положение максимумов для всех трех участков кристалла не совпадает между собой. По положению максимума линий по аналогии с [4,5] можно предположить, что состав в точках измерения составляет $x = 0.625$ (Point 1), $x = 0.649$ (Point 2) и $x = 0.638$ (Point 3). Как видно, неоднородность состава материала достаточно значительна, причем состав материала, определенный по спектрам фотолюминесценции, существенно отличается от определенного при рентгеновском анализе. При измерениях при комнатной температуре оценка состава твердого раствора по спектральному положению линий излучения не изменяется.

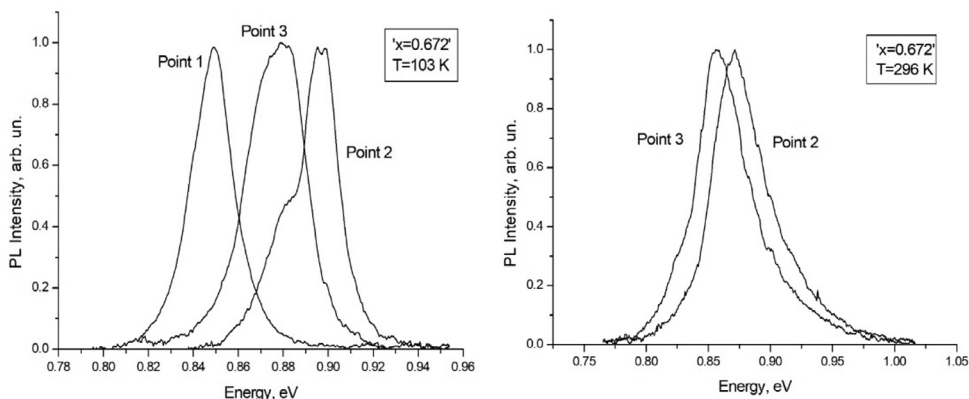


Рис.1. Спектры фотолюминесценции кристаллов Cd_{0.672}Hg_{0.328}Te при температурах 103К и 300К

Следует отметить также значительное уширение линии излучения: ее полуширина составляет 21.5 мэВ для Point 1, 24.4 мэВ для Point 2 и 29.4 мэВ для Point 3. Эти значения существенно превышают аналогичные результаты, полученные при изучении спектров люминесценции близких составов Cd_xHg_{1-x}Te, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии и жидкофазной эпитаксии [4,5]. Можно предположить, что эффект уширения линий излучения связан со значительным уровнем дефектности исследуемого

материала, возникающей в процессе кристаллизации из расплава. Известно, что в этих условиях существуют предпосылки возникновения отдельных монокристаллических блоков, которые могут отличаться как по составу, так и по взаимной ориентации. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о наличии значительного композиционного и топологического беспорядка в объемных кристаллах твердого раствора $Cd_xHg_{1-x}Te$ с составами $x \geq 0.6$, превышающем уровень беспорядка этого же материала, полученного эпитаксиальными методами.

Отметим, что ранее при исследовании наночастиц $Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$, полученных методом шарового помола из кристаллов твердого раствора, выращенных по той же технологии, что и исследуемые в настоящей работе образцы, методами рентгеноструктурного анализа было обнаружено присутствие фракций наночастиц $HgTe$ и твердого раствора с составом $x \approx 0.5$ наряду с наночастицами с $x \approx 0.2$ [6]. Размеры указанных наночастиц составляли 2-4 нм. Возможно аналогичные фракции присутствовали и в частицах большего размера, которые возникли в процессе дробления кристалла, однако они в указанной работе не исследовались. Эти результаты находятся в согласии с изложенными выше и представляют собой прямое подтверждение существования и возможные формы проявления композиционного беспорядка в твердых растворах полупроводников.

Авторы выражают искреннюю признательность К.Д. Мынбаеву, Н.Л. Баженову и М.С. Ружевику за предоставленные результаты спектральных исследований и обсуждение результатов работы.

Литература

1. Дж.Киттель. Модели беспорядка. – М.: Мир.1982.-591с.
2. Магунов А.Н. Лазерная термометрия твердых тел. – М.: ФИЗМАТГИЗ. 2001.- 224с.
3. Средин В.Г., Укроженко В.М. Физика и техника полупроводников. 1989. Т.23.№10.С.1762-1766
4. Ружевич М.С., Мынбаев К.Д., Баженов Н.Л., Дорогов М.В, Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Ремесник В.Г., Ужаков И.Н. Физика твердого тела. 2023.Т.65.№3,С.411-414
5. Мынбаев К.Д., Баженов Н.Л., Смирнов А.М., Михайлов Н.Н., Ремесник В.Г., Якушев М.В. Физика и техника полупроводников. 2020. Т.54. №12. С.1302-1307
6. Средин В.Г., Никифоров В.Н., Загарских В.И. ПЖТФ, 2017, т.43, № 23, с.17

С37 Выращивание гетероструктур CdHgTe/CdZnTe MOCVD-методом

Чилясов А.В.¹, Моисеев А.Н.¹, Евстигнеев В.С.¹, Костюнин М.В.¹,
Трофимов А.А.², Денисов И.А.³

¹*Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятых РАН. Нижний
Новгород. Россия. chil@ihps-nnov.ru*

²*ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия*

³*АО «Гиредмет». Москва. Россия*

MOCVD growth of CdHgTe/CdZnTe heterostructures

Chilyasov A.V.¹, Moiseev A.N.¹, Evstigneev V.S.¹, Kostunin M.V.¹,
Trofimov A.A.², Denisov I.A.³

¹*G.G. Devyatykh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the Russian
Academy of Sciences, Nizhny Novgorod. Russia*

²*ORION R&P Association. Moscow. Russia*

³*GIREDMET R&P Association. Moscow. Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-345

The results of investigation of CdHgTe layers grown on isotypic CdZnTe substrates by the MOCVD-IMP method in a vertical quartz reactor at a low pressure are presented. High-purity dimethylcadmium, diethyltellurium, diisopropyltellurium and metallic mercury were used as volatile precursors. Mirror-like CdHgTe layers ($x=0,26-0,32$) with a thickness of 6-8 microns and the number of growth defects of 200–400 cm⁻² under selected growth conditions were obtained. The concentration and mobility of charge carriers in the layers was $p=(1-5) \cdot 10^{16}$ cm⁻³ and 200–400 cm²/V·s at 77 K, respectively. The FWHM value of the best CdHgTe samples was 50-60 arcsec, which is comparable to the FWHM of the CdZnTe substrates (30-40 arcsec).

Современные охлаждаемые многоэлементные фотоприемные устройства (ФПУ) изготавливаются из эпитаксиальных слоев кадмий-ртуть-теллур (КРТ), получаемых различными методами. Лучшее кристаллическое совершенство и электрофизические параметры слоев КРТ обеспечивают изотипные подложки CdZnTe (3-5% мол. ZnTe). На подложках из этого материала благодаря высокому соответствию параметров решеток (расхождение менее 0,1%) удается выращивать слои КРТ с плотностью дислокаций $\sim (5-10) \cdot 10^4$ см⁻². Низкая плотность дислокаций в слоях КРТ позволяет уменьшить темновые токи и заметно повысить качество ФПУ, повысить их рабочую температуру,

выход годных пикселей ($\geq 99,9\%$). Преимущества метода химического осаждения из паров металлоорганических соединений (MOCVD) – производительность, технологическая гибкость, возможность получения сложных многослойных структур высокого качества с умеренной стоимостью – позволяют некоторым зарубежным фирмам использовать этот метод для серийного производства ФПУ (к примеру «Leonardo MW Limited»). Однако, в литературе работы, посвященные использованию MOCVD-метода для получения слоев КРТ на подложках CdZnTe, встречаются достаточно редко. В настоящей работе представлены первые результаты по особенностям выращивания эпитаксиальных слоев КРТ MOCVD-методом на изотипных подложках CdZnTe.

Химико-механически полированные подложки CdZnTe(211)B (3-5 % мол. ZnTe) диаметром 20-50 мм были получены в АО «НПО «Орион» совместно с АО «Гиредмет». Осаждение эпитаксиальных слоев КРТ проводили методом MOCVD-IMP в потоке водорода в вертикальном кварцевом реакторе при давлении 20 кПа. В качестве летучих компонентов использовали высокочистые диметилкадмий, диэтилтеллур, диизопропилтеллур и металлическую ртуть. Методика осаждения и исследования слоев описана в [1]. Исследовали влияние предэпитаксиального травления подложек в $\text{Br}_2\text{-CH}_3\text{OH}$, температуры отжига подложек, температуры осаждения и предраспада МОС, кристаллографической ориентации подложки (А и В) на морфологию поверхности слоев КРТ и их кристаллическое совершенство. Кристаллическое совершенство слоев оценивали по величине полуширины кривой качания рентгеновской дифракции (FWHM). Исследование морфологии поверхности и определение концентрации ростовых дефектов проводили на оптическом микроскопе AXIO IMAGER M2m. Электрофизические параметры слоев КРТ определяли из измерений эффекта Холла.

В подобранных условиях были получены зеркальные слои КРТ с $x=0,26\text{-}0,32$, толщиной 6-8 мкм, количеством ростовых дефектов $200\text{-}400\text{ см}^{-2}$, концентрацией и подвижностью основных носителей заряда при 77 К (без дополнительного отжига в парах ртути) $p=(1\text{-}5)10^{16}\text{ см}^{-3}$ и $200\text{-}400\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, соответственно. Величина FWHM в лучших образцах КРТ составляла 50-60 угл.с, что сравнимо с FWHM использованных подложек CdZnTe (30-40 угл.с).

1. Каракозов Ю.С., Болтарь К.О., Моисеев А.Н., Чиясов А.В., Степанов Б.С. Характеристики матриц фотодиодов коротковолнового ИК-диапазона на основе MOCVD-эпитаксиальных слоев КРТ // Успехи прикладной физики. – 2013. – Т.1 – №5. – С. 601-605.

С38 Влияние условий осаждения из паров диметилкадмия и метилаллилтеллура на морфологию поверхности, кристаллическое совершенство и концентрацию ростовых дефектов в эпитаксиальных слоях CdTe

Евстигнеев В.С., Моисеев А.Н., Чилиясов А.В., Костюнин М.В.

Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых РАН. Нижний Новгород. Россия. evstigneev@ihps-nnov.ru

Influence of growth conditions on the surface morphology, crystalline quality and concentration of growth defects in CdTe layers by deposition from dimethylcadmium and methylallyltellurium

Evstigneev V.S., Moiseev A.N., Chilyasov A.V., Kostunin M.V.

G.G. Devyatikh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-347

We have studied the influence of deposition conditions on the surface morphology, crystalline quality and concentration of growth defects in CdTe epitaxial layers grown on GaAs (310), (100), (111)B substrates by MOCVD with dimethylcadmium and methylallyltellurium. The smoothest surface of the CdTe(100) and (111)B layers was obtained at substrate temperature of 330 and 370°C, respectively. The ratio of DM Cd and MATe significantly affects the surface morphology and crystalline quality of CdTe layers. The surface morphology and concentration of growth defects of CdTe(100) layers has a complex dependence on the temperature of the pre-decomposition zone of DM Cd and MATe. The initial injection of DM Cd leads to the formation of CdTe layers with a smooth and specular surface, while the initial injection of MATe promotes of a rougher surface.

Теллурид кадмия широко используется как буферный слой и подслой при гетероэпитаксии HgCdTe MOCVD-IMP методом [1]. Одной из основных проблем MOCVD эпитаксии CdTe на GaAs является образование большого числа ростовых дефектов в виде пирамидальных холмиков («хиллоков»). Попадание «хиллока» на фоточувствительный элемент матрицы приводит к частичной или полной потере его работоспособности. Поэтому определение основных факторов, влияющих на возникновение таких дефектов и уменьшение их концентрации на поверхности слоев CdTe и HgCdTe является актуальной задачей. По литературным данным [2] использование метилаллилтеллура (MAT) позволяет снизить температуру роста CdTe и заметно уменьшить количество «хиллоков» в нем и в слое HgCdTe.

В работе исследовано влияние температуры подложки ($T_{\text{рост}}$), соотношения металлорганических соединений (МОС)-диметилкадмия (ДМК) и MAT, температуры зоны предраспада МОС ($T_{\text{кон}}$) и порядка напуска МОС на

морфологию поверхности, кристаллическое совершенство и концентрацию ростовых дефектов в слоях CdTe.

Осаждение эпитаксиальных слоев CdTe проводили на подложках GaAs (310), (100), (111)В методом МOCVD в потоке водорода в вертикальном кварцевом реакторе при давлении 20 кПа. Соотношение МАТ/ДМК изменяли в диапазоне 0.5–2, а $T_{\text{рост}}$ и $T_{\text{кон}}$ в диапазоне 300–370°C и 270–310°C соответственно. Методика осаждения описана в [3]. Кристаллическое совершенство слоев оценивали по величине полуширины кривой качания рентгеновской дифракции (FWHM). Исследование морфологии поверхности и определение концентрации ростовых дефектов проводили на оптическом микроскопе AXIO IMAGER M2m.

Показано, что при $T_{\text{рост}}=300\text{--}370^\circ\text{C}$ наилучшим кристаллическим совершенством (8–9 угл. мин.) при толщине слоя 1,5–3 мкм обладают слои CdTe(100), а наихудшим (14–19 угл. мин.) слои CdTe(310). Наиболее гладкой поверхностью обладали слои CdTe(100) и (111)В, выращенные при 330 и 370°C, соответственно. Установлено, что изменение соотношения ДМК и МАТ существенно влияет на морфологию и кристаллическое совершенство слоев CdTe. Наиболее гладкая поверхность слоев CdTe(100) с наименьшей концентрацией дефектов наблюдалась при ДМК/МАТ=1 или в небольшом (до 2) избытке ДМК.

Установлено, что морфология поверхности и концентрация ростовых дефектов слоев CdTe(100) имеют сложную зависимость от температуры зоны предраспада МОС ($T_{\text{кон}}=270\text{--}300^\circ\text{C}$). Наиболее зеркальная, гладкая поверхность с концентрацией ростовых дефектов $\sim 150\text{ см}^{-2}$ получена при $T_{\text{кон}}=290^\circ\text{C}$. Кристаллическое совершенство слоев практически не зависело от $T_{\text{кон}}$ и лежало в диапазоне 8.1–9.7 угл. мин.

В исследованных условиях осаждения кристаллографическая ориентация, концентрация дефектов и кристаллическое совершенство слоев не зависели от порядка напуска ДМК и МАТ. Однако, напуск ДМК первым приводил к получению слоев CdTe с более гладкой и зеркальной поверхностью.

1. Евстигнеев В.С., Чилиясов А.В., Моисеев А.Н., Костюнин М.В. Получение легированных мышьяком эпитаксиальных слоев $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с $x\sim 0.4$ МOCVD-методом // Неорганические материалы. 2019. Т. 55. №. 10. С. 1040–1045.

2. Maxey C.D., Camplin J.P., Guilfov I.T, et al. Metal-organic vapor-phase epitaxial growth of HgCdTe device heterostructures on tree-inch-diameter substrates // J. Electron. Mater. 2003.V.32. N.7. P.656-660

3. Chilyasov A. V., Moiseev A.N., Evstigneev V. S. et al. Growth of arsenic-doped cadmium telluride epilayers by metalorganic chemical vapor deposition //Inorganic Materials. 2016. V. 52. №. 12. P. 1210-1214.

С39 Оптимальное время охлаждения GaAs приборных пластин после технологического отжига

Алдохин П.А.¹, Новоселов А.Р.¹, Михайлов Н.Н.², Менщиков Р.В.²,
Маточкин А.Е.³

¹*Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ». Новосибирск. Россия. aldoshapavel79@yandex.ru*

²*ИФП СО РАН. Новосибирск. Россия*

³*ИАиЭ СО РАН. Новосибирск. Россия*

Optimal cooling time of GaAs instrument plates after technological annealing

P.A. Aldokhin¹, A.R. Novoselov¹, N.N. Mikhailov², R.V. Menshchikov²,
A.E. Matochkin³

¹*Branch of IPP SB RAS "KTIPM". Novosibirsk. Russia*

²*ISP SB RAS. Novosibirsk. Russia.*

³*IA&E. Novosibirsk. Russia*

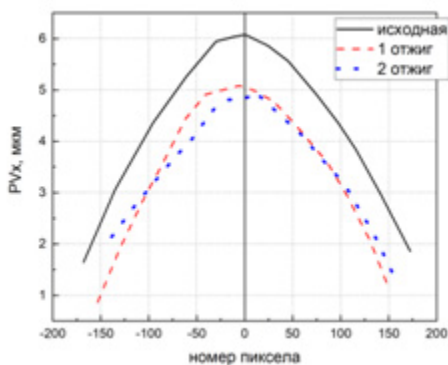
DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-349

A technological solution for the partial restoration of the flat shape of the instrument panels is proposed.

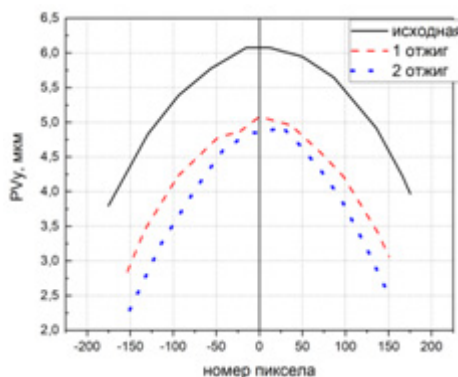
Для создания многоэлементных фотоприёмников среднего и дальнего ИК диапазонов используются сложные гетероэпитаксиальные структуры на основе твердых растворов теллурида кадмия и ртути различного состава (КРТ), выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs с буферными слоями ZnTe и CdTe для согласования параметров решеток и уменьшения плотности прорастающих дислокаций. Автоколлимационным и интерференционным методами исследованы поверхности приборных пластин (ПП), микросхем и гибридных сборок из них (флип-чип технология) [1]. Все исследованные образцы не являются плоскими. Уровень искривления гибридных ИК фотоприёмников влияет на количество циклов их охладений до частичного разрушения индиевых столбов связи [2]. Таким образом, не плоские формы поверхности ИК гибридных фотоприёмников существенно ограничивают их эксплуатационные характеристики. Основной причиной искривления ПП является возникновение не скомпенсированных упругих напряжений в приповерхностных областях [3]. Цель работы является определение технологических этапов возникновения максимальной неплоскостности приборных пластин и демонстрация технологического решения частичного восстановления плоской формы.

Исследование формы поверхности ПП осуществлено с помощью интерферометра «ФТИ-100 PS» (Россия), с применением юстируемого поворотного зеркала, позволяющего исследовать форму поверхности свободно лежащей ПП с точностью ≤ 1 мкм. По двум взаимно перпендикулярным направлениям (по линиям проходящих через центр области исследования) измерялись текущие значения высот образца в условных единицах в зависимости от номера пиксела регистрирующей камеры и вычислялись действительные значения PV_x , PV_y ПП относительно поверхности, на которой она находилась.

Были исследованы стадии предэпитаксиальной подготовки (термический отжиг в сверхвысоком вакууме) GaAs, стадия роста буферных слоев ZnTe, стадия роста буферных слоев CdTe. Установлено, что наибольшее влияние на увеличение неплоскостности ПП оказывает стадия предэпитаксиальной подготовки подложек GaAs, которая состоит из следующих этапов: линейный нагрев от комнатной температуры до ~ 325 °C со скоростью 1,5-1,6 град/с; выдержка 30 мин при этой температуре. Далее нагрев с той же скоростью до температуры ~ 560 -580°C и выдержка 5-10 мин при этой температуре в потоке мышьяка. Затем, следует радиационное охлаждение в сверхвысоком вакууме до температуры ~ 200 °C в течение 25-30 мин. Форма поверхности ПП на рис. называется исходная. После этого дополнительно после нагрева была изменена стадия остывания – медленное со скоростью 0,5 град/мин, время охлаждения до 11 часов – кривая 2. Повторное нагревание и медленное остывание – кривая 3 на рис.



Координата X



Координата Y

Показано, что медленное охлаждение позволяет снизить изгиб поверхности более чем 1 мкм. Последующие отжиг не изменяет форму поверхности. Следовательно, выбранные параметры отжига достаточны для устранения упругих напряжений в ПП.

Литература

1 А.Р. Новоселов, П.А. Алдохин, А.Е. Маточкин, П.П. Добровольский, К.П. Шатунов. Оперативные методы контроля формы поверхностей компонент фотоприёмников flip-chip ИК диапазона. *Автометрия*. Т. 55, №2, 2019, С. 70-80 DOI: [10.15372/AUT20190208](https://doi.org/10.15372/AUT20190208).

2 А.Р. Новоселов, П.А. Алдохин, П.П. Добровольский, А.Е. Маточкин. Исследование разрушения гибридных фотоприемников инфракрасного диапазона при многократных циклах охлаждения до температуры жидкого азота интерференционным методом. *ОПТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ*. В 1, Т 88, 2021, С. 69-75. DOI: [10.17586/1023-5086-2021-88-01-69-75](https://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-01-69-75).

3 А. В.Радьков, А. А. Малаханов, О. Г. Казаков. Влияние механической прочности и остаточных напряжений на качество пластин кремния. Журнал «Young Scientist», г. Казань ООО «Издательство Молодой ученый». № 17 (203), 2018, С. 73-77.

С40 О возможности использования поликремниевых слоев в качестве оптических фильтров

Гаврушко В.В., Кадриев О.Р., Ласткин В.А., Телина И.С., Петров А.В.

*Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого.
Великий Новгород. Россия.*

About the possibility of using polysilicon layers as optical filters.

Gavrushko V.V., Kadriev O.R., Laskin V.A., Telina I.S., Petrov A.V.

Novgorod State University named after Yaroslav the Wise.

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-352

The transmission spectra of polycrystalline silicon layers on sapphire in the region of strong absorption have been studied. The dependence of the spectral transmission limit of the filter at the level of 0.1 on the film thickness is shown. The possibility of using polysilicon layers as absorption optical filters for the spectral range 0.42 - 0.56 microns has been demonstrated.

Слои поликристаллического кремния широко применяются в технологии полупроводниковых приборов. Кроме традиционного использования может представлять интерес их применение в качестве оптических элементов, например, как интегральных фильтров фотоприемников. Учитывая чувствительность свойств нано- и поликристаллического кремния к технологии их получения, нами было исследовано влияние толщины осажденной пленки поликремния на величину коэффициента оптического поглощения для наиболее часто используемого в технологии полупроводниковых приборов метода пиролитического осаждения кремния в диапазоне толщин от 0,1 до 0,8 мкм. В качестве подложек были использованы сапфировые пластины, обладающие хорошей прозрачностью в исследуемом спектральном диапазоне. Осаждение поликремния осуществлялось путём пиролиза моносилана при температуре 630°C в реакторе с пониженным давлением (10^{-2} мм.рт.ст.). В технологическом процессе использовалась смесь моносилана с аргоном (5% SiH₄ / Ar). Измерение спектров пропускания производилось на спектрофотометре V670 УФ-ВИД-БЛИК JASCO. Микроскопические исследования показали, что полученные пленки достаточно однородны. Величина шероховатости поверхности и её стандартное отклонение не превышали нескольких процентов по сравнению с толщиной пленки. На рисунке 1 приведены коэффициенты пропускания пленок в области сильного поглощения, где можно было не учитывать интерференционные явления.

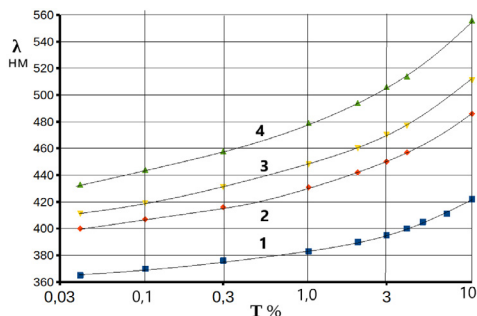


Рис. 1. Спектральная зависимость коэффициентов пропускания пленок толщиной 1 - 0,103 мкм, 2 - 0,33 мкм, 3 - 0,464 мкм, 4 - 0,794 мкм.

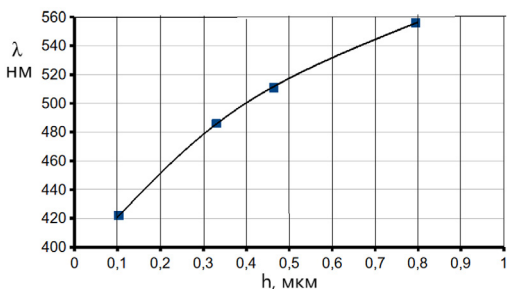


Рис. 2. Зависимость спектральной границы пропускания по уровню 0,1 от толщины фильтра.

Как видно, для неизменного коэффициента пропускания наблюдалось существенное различие спектральной границы для пленок разной толщины. В качестве примера на рисунке 2 приведена зависимость от толщины пленки положения спектральной границы пропускания фильтра по уровню 0,1. При использовании таких пленок следует обратить внимание на высокое значение коэффициента преломления поликремния ($n \approx 3,5$), что может приводить к заметным интерференционным эффектам. Однако, при нанесении покрытия непосредственно на поверхность, например, кремниевых фотоприемников эти эффекты не должны заметно сказываться в связи с близкими значениями коэффициентов преломления. Таким образом, пиролитические слои поликремния могут быть использованы в качестве абсорбционных оптических фильтров для спектрального диапазона 0,42 — 0,56 мкм.

Литература.

1. Gavrushko V.V., Ionov A.S., Lastkin V.A., Telina I.S. On refractive index of optical radiation of polycrystalline silicon films. //Journal of Physics: Conference Series. 2. ISPCMMRAM 2020" p. 012-016.

C41 Сенсорные свойства полупроводниковых плёнок $Cd_xPb_{1-x}S$, химически осаждённых с использованием ацетата кадмия

Селянина А.Д.¹, Дёмина Д.А.¹, Маскаева Л.Н.^{1,2}, Марков В.Ф.^{1,2}

¹*Уральский Федеральный Университет им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина. Екатеринбург. Россия. dyominadar@mail.ru*
²*Уральский институт ГПС МЧС России. Екатеринбург*

Sensing properties of $Cd_xPb_{1-x}S$ films chemically deposited using cadmium acetate

Selyanina A.D.¹, Dyomina D.A.¹, Maskaeva L.N.^{1,2}, Markov V.F.^{1,2}

¹*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Yekaterinburg, Russia, e-mail: dyominadar@mail.ru*

²*Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Yekaterinburg, Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-354

Методом химического осаждения из ванн, содержащих ацетат кадмия $Cd(CH_3COO)_2$, получены полупроводниковые слои твердых растворов замещения $Cd_xPb_{1-x}S$. Исследованы их фоточувствительные свойства и изменение сопротивления в присутствии диоксида азота NO_2 в воздушной среде.

Сульфид свинца и твердые растворы на его основе являются классическими материалами оптоэлектроники, работающей в ближнем ИК и видимом диапазоне. Возможность варьирования функциональных свойств химически осаждённых слоёв на основе $CdS-PbS$ в зависимости от состава, морфологии и их кристаллического строения открывает перед исследователями возможность направленного синтеза материалов для конкретной задачи. Кроме того, поликристаллические плёнки $Cd_xPb_{1-x}S$ обладают развитой морфологией благодаря образованию на их поверхности различных дефектов (динамических и статических), что позволяет создавать на их основе чувствительные к токсичным газам датчики, работающие при комнатной температуре (20-25 °C).

Важной характеристикой фоторезистивных материалов является вольтовая U_S чувствительность. Для измерения данного параметра были созданы сенсорные элементы на основе синтезированных слоёв $Cd_xPb_{1-x}S$ с никелевыми контактами и чувствительной площадкой 5×5 мм².

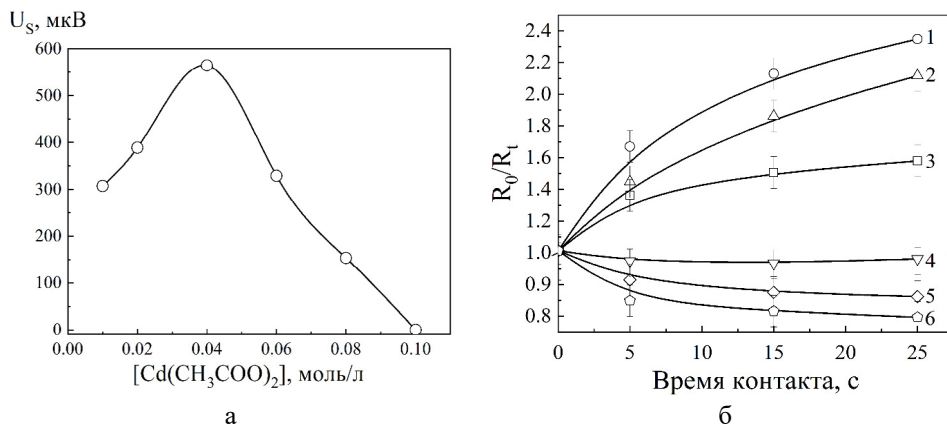


Рис. Зависимость вольтовой чувствительности U_s (а) и изменения относительного сопротивления R_0/R_t сенсорных элементов (б) размером 5×5 мм², полученных из реакционной смеси, содержащей $Cd(CH_3COO)_2$, моль/л: 0 (1); 0,01 (2); 0,02 (3); 0,04 (4); 0,08 (5); 0,1 (6).

Зависимость вольтовой фоточувствительности (рис. а) тонкопленочных твердых растворов $Cd_xPb_{1-x}S$, осажденных из реакционных ванн с использованием $Cd(CH_3COO)_2$, является немонотонной. Максимум U_s соответствует концентрации соли кадмия около 0.40 моль/л и составляет ~ 580 мкВ. Дальнейшее повышение концентрации ацетата кадмия до 0.08 моль/л в реакторе приводит к резкому падению вольтовой чувствительности изучаемых слоев в 2-3 раза и полному ее отсутствию у пленки, полученной при максимальном содержании соли кадмия (0.1 моль/л).

Также было обнаружено, что тонкие пленки твердых растворов $Cd_xPb_{1-x}S$, осаждённые в присутствии $Cd(CH_3COO)_2$, обладают достаточно высокой чувствительностью к присутствию в воздухе токсичных газов, в частности, диоксида азота. Измерение величины отклика сенсоров размером 5×5 мм² на основе синтезированных слоёв основывалось на изменении их омического сопротивления R_t при контакте с диоксидом азота по сравнению с его исходным значением R_0 на воздухе. Концентрация NO_2 в воздушной среде составляла 200 мг/м³, температура – 25 °С.

Анализ, представленных на рис. б кинетических зависимостей, показывает достаточно высокую скорость адсорбционного взаимодействия сенсорных элементов $Cd_xPb_{1-x}S$ с газом: уже в первые 5 с контакта с NO_2 , достигается изменение омического сопротивления (R_0/R_t) на 15-60% в зависимости от содержания кадмия в составе реакционной смеси. Наибольший отклик имеют сенсорные элементы, изготовленные на основе пленок, синтезированных при концентрациях соли кадмия в реакционной смеси 0.01 и 0.02 моль/л. При этом наблюдается рост сопротивления сенсоров в 2.3 и 2.1

раза по сравнению с первоначальным R_0 . В свою очередь, для сенсорных элементов на основе плёнок, синтезированных в присутствии 0.08 и 0.10 моль/л $\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, при контакте с NO_2 сопротивление снижается на 20 и 40% соответственно. Увеличение и уменьшение сопротивления сенсорного элемента при контакте с диоксидом азота связано с изменением типа проводимости плёнки $\text{Cd}_x\text{Pb}_{1-x}\text{S}$.

Важно отметить, что сопротивление сенсорных элементов после извлечения из измерительной ячейки с NO_2 и помещения в атмосферу чистого воздуха возвращается к своему исходному значению R_0 при комнатной температуре в течение 30 мин.

С42 Влияние йодида аммония на фоточувствительные свойства химически осажденных пленок PbSe(I)

Будкина В.А.¹, Бельцева А.В.¹, Маскаева Л.Н.^{1,2}

¹*Уральский Федеральный Университет им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина. Екатеринбург. Россия. vikbudkina@mail.ru*

²*Уральский институт ГПС МЧС России. Екатеринбург*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-357

Chemical deposition of lead selenide films with sodium selenosulfate from an ammonium citrate reaction mixture in the presence of ammonium iodide and subsequent heat treatment in the optimal mode (648 K) ensures a 9-fold increase in their photoresponse to IR radiation. The results of the study may be useful for the development of efficient photovoltaic devices based on PbSe(I) films.

Основной задачей в настоящей работе являлось исследование фотоэлектрических характеристик тонкопленочного селенида свинца PbSe(I), химически осажденного селеносульфатом натрия Na₂SeSO₃ (поставщика ионов Se²⁺) из аммиачно-цитратной реакционной смеси, содержащей ацетат свинца Pb(CH₃COO)₂, легирующую добавку в виде йодида аммония NH₄I, цитрат натрия (Na₃C₆H₅O₇) в качестве лиганда и гидроксид аммония NH₄OH для создания pH=11.5-12.8. Осаждение пленок PbSe(I) проводили на подложки из ситалла СТ-1-50 в течение 90 мин при 353 К в термостате марки ТС-ТБ-10. В результате получены пленки PbSe(I) толщиной (200-400) ± 20 нм, оцененные методом интерференционной микроскопии на микроинтерферометре Линника МИИ-4М.

Известно, что свежесаждаемые пленки селенида свинца не обладают фоточувствительностью к ИК-излучению, поэтому их подвергали термическому отжигу в воздушной среде в муфельной печи типа ПМ-1.0-7 в интервале температур 633-678 К с точностью поддержания температуры в зоне размещения слоев ±2 К.

Параметрами, количественно описывающими очувствление полупроводниковых пленок PbSe(I), являлись вольтовая чувствительность U_S и темновое сопротивление R_T, комбинация которых обеспечивает возможность изготовления на их основе детекторов для среднего спектрального ИК-диапазона. Измерение U_S и R_T пленок проводили на специализированном стенде К.54.410 с источником ИК-излучения в виде АЧТ с температурой 573 К при облученности чувствительного элемента 1·10⁻⁴ Вт/см², частоте модуляции излучения 800 Гц и напряжении смещения 20 В. Фотоотклик регистрировали в виде падения напряжения на согласованном нагрузочном сопротивлении.

Предварительные исследования по выбору температуры отжига синтезированных пленок PbSe(I) свидетельствуют о том, что зависимость

вольтовой чувствительности имеет экстремальный характер с максимумом в области 648 К. При повышенных температурах (653-678 К) происходит переокисление пленок, в результате которого резко повышается темновое сопротивление с одновременным снижением вольтовой чувствительности, а низкие температуры (633-643 К) недостаточны для обеспечения желаемых величин вольтовой чувствительности.

Важным является установление оптимальной концентрации легирующей примеси (NH_4I) в составе реакционной смеси для получения фоточувствительных пленок селенида свинца. Зависимости вольтовой чувствительности U_S и темнового сопротивления R_T чувствительных элементов размером $5 \times 5 \text{ мм}^2$, изготовленных на основе активированных при оптимальной температуре отжига (648 К) пленок PbSe(I) , от содержания легирующей примеси NH_4I в реакционной ванне при фиксированных концентрациях остальных прекурсоров, приведены на рисунке 1.

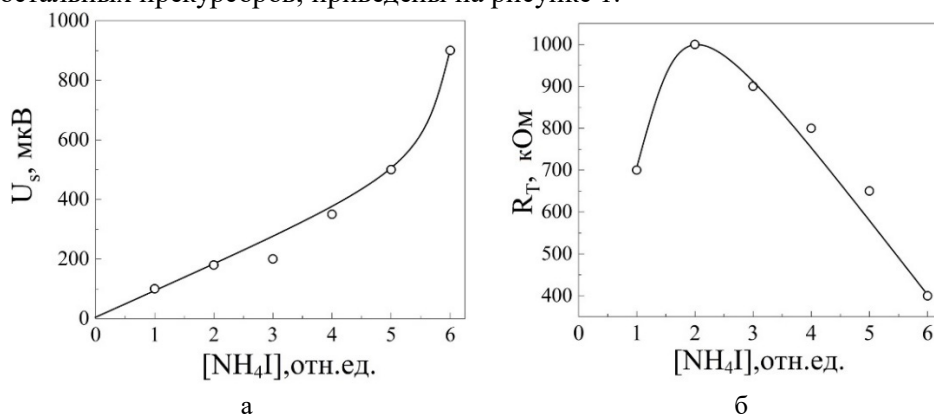


Рис. 1. Зависимости вольтовой чувствительности U_S (а) и темнового сопротивления R_T (б) от концентрации йодида аммония в реакционной смеси чувствительных элементов размером $5 \times 5 \text{ мм}^2$ на основе пленок PbSe(I) , активированных при температуре отжига, равной 648 К.

Повышение в реакционной ванне йодида аммония NH_4I в 6 раз при прочих равных условиях повышает вольтовую чувствительность пленок PbSe(I) в 9 раз, что, вероятно, связано с оптимизацией концентрации носителей в слое за счет легирующего действия йодид-ионов. Зависимость темнового сопротивления пленок PbSe от концентрации допанта носит экстремальный характер с максимумом в области 2 отн.ед. NH_4I с дальнейшим снижением с 1000 до 400 кОм.

Предполагается продолжить исследование дальнейшего увеличения концентрации йодида аммония NH_4I в реакционной смеси на фоточувствительные свойства и спектральную характеристику обсуждаемых пленок селенида свинца.

С43 Фотоэлектрические свойства пленок PbS(I), PbS(I, Co) и PbS(I, Ni)

Поздин А.В.¹, Рогозина Е.С.¹, Вармаховская Е.С.¹, Маскаева Л.Н.^{1,2}

¹*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Екатеринбург. Россия. andrej.pozdin@yandex.ru*

²*Уральский институт ГПС МЧС России. Екатеринбург*

Photoelectric properties of PbS(I), PbS(I, Co) и PbS(I, Ni) films

Pozdin A.V.¹, Rogozina E.S.¹, Varmakhovskaya E.S.¹, Maskaeva L.N.^{1,2}

¹*Ural Federal University named after the First President of Russia B.N.Yeltsin, Ekaterinburg, Russia, E-mail: andrej.pozdin@yandex.ru*

²*Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Yekaterinburg, Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-359

PbS films doped simultaneously with anion (Γ) and cation (Co^{2+} , Ni^{2+}) were obtained by chemical deposition from ammonia–citrate baths on slide substrates. Freshly deposited films do not require an additional photosensitization operation. According to the maximum volt sensitivity, the films can be arranged in a row $\text{PbS(I)} (1700 \mu\text{V}) \rightarrow \text{PbS(I, Co)} (2200 \mu\text{V}) \rightarrow \text{PbS(I, Ni)} (2700 \mu\text{V})$, and the dark resistance is 1400, 700 and 1600 k Ω , respectively.

Тонкопленочный PbS считается одним из востребованных полупроводников, который благодаря своим уникальным свойствам применяется для создания фотоприемников, солнечных батарей, химических сенсоров. Результаты предыдущих исследований показали, что вводимая легирующая добавка в виде йодистого аммония [1] или солей переходных металлов (Co, Ni) [2,3] оказывает активное влияние непосредственно на процесс химического осаждения пленок PbS и, следовательно, на их функциональные свойства. В связи с этим настоящее исследование посвящено изучению влияния совместного легирования анионом (Γ) и катионом Co^{2+} (Ni^{2+}) в процессе химического осаждения на фотоэлектрические свойства пленок сульфида свинца.

Пленки PbS(I) получены химическим осаждением из водных растворов, содержащих $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$, NH_4OH , NH_4I и $(\text{NH}_2)_2\text{CS}$. Легирование пленок PbS(I) ионами Co^{2+} или Ni^{2+} в процессе химического осаждения осуществляли путем дополнительного введения в реактор от 0.001 до 0.02 моль/л CoCl_2 или NiCl_2 . Все пленки осаждали на обезжиренные подложки из предметного стекла при 353 К в течение 90 минут.

Следует отметить, что полученные пленки обладают выраженной чувствительностью к излучению ближнего ИК-диапазона спектра без проведения дополнительных операций фотосенсибилизации. В качестве основных параметров, определяющих их практическое использование, являются вольтовая чувствительность U_s и темновое сопротивление R_d . Полученная нами ранее пленка PbS(I) имела вольтовую чувствительность, равную 1700 мкВ [1]. Зависимости U_s и R_d пленок PbS(I) от содержания легирующей добавки CoCl_2 (NiCl_2) в реакторе, приведенные на рисунке, имеют экстремальный характер. Повышение концентрации обсуждаемых солей в реакторе до 0.001 моль/л способствует росту вольтовой чувствительности с 1700 до ~2200 (кривая 1) и ~2700 (кривая 2) мкВ. Дальнейшее увеличение концентрации CoCl_2 или NiCl_2 до 0.02 моль/л сопровождается снижением вольтовой чувствительности до 500 и 600 мкВ соответственно. Что касается темнового сопротивления R_d (рисунок б), то его зависимость от содержания CoCl_2 или NiCl_2 в реакторе свидетельствует об отличающемся характере кривых. Так, добавление соли хлорида кобальта в реактор (кривая 1) способствует монотонному снижению темнового сопротивления с 1300 кОм до 400 кОм, а от содержания хлорида никеля имеет экстремальный характер: вначале наблюдается рост до 1600 кОм (кривая 2), а затем, начиная с 0.001 моль/л, R_d постепенно снижается до 1200 кОм.

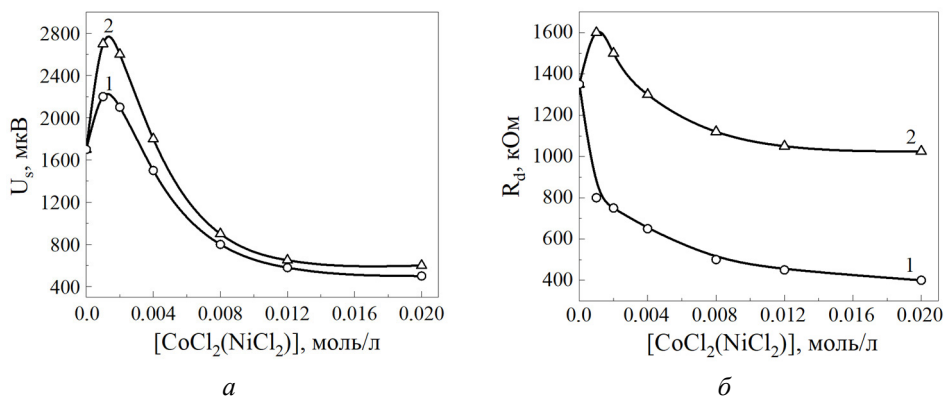


Рис. Зависимости вольтовой чувствительности $U_s(a)$ и темнового сопротивления $R_d(b)$ пленок PbS(I, Co), PbS(I, Ni) от концентрации $\text{CoCl}_2(1)$ и $\text{NiCl}_2(2)$ в реакционной смеси

Можно предположить, что обнаруженные особенности фотоэлектрических свойств пленок PbS(I), легированных кобальтом или никелем, связаны не только с особенностями эволюции их микроструктуры, но и изменениями концентрации, подвижности и времени жизни основных носителей заряда в полупроводниковых слоях.

1. Markov V.F. et al. The influence of iodide addition on the composition, morphology, crystal structure, and semiconductor and photoelectric properties of PbS films // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2022. – Vol. 24. – P. 16085-16100.
2. Horoz S., Ekinci A., Sahin O. Synthesis of PbS and Ni-doped PbS thin films by CBD method and investigation of their structural, optical and photovoltaic properties // J. ovonic res. – 2018. – Vol. 14. – P. 201-208.
3. Mora-Ramírez M. A. et al. Synthesis, characterization and optical properties of Co²⁺ doped PbS nanocrystals // Optik. – 2021. – Vol. 238. – P. 166629.

С44 Модификация метода гидрохимического осаждения сульфида свинца

Мирошников Б.Н.¹, Макарук К.С.¹, Маскаева Л.Н.^{2,3}, Мирошникова И.Н.¹

¹*Национальный исследовательский университет «МЭИ». Москва. Россия.
MiroshnikovaIN@mpei.ru*

²*Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина. Екатеринбург. Россия*

³*Уральский институт ГПС МЧС России. Екатеринбург*

Modification of the method of hydrochemical deposition of lead sulfide

Miroshnikov Boris Nikolaevich¹, Makaruk K.S.¹, Maskayeva L.N.^{2,3},
Miroshnikova I.N.¹

¹*National Research University MPEI, Moscow, Russia*

²*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Yekaterinburg, Russia*

³*Ural State Fire Service Institute of Emergency Ministry, Yekaterinburg, Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-362

The film structures of lead sulfide obtained by hydrochemical deposition with precursors of ammonium iodide (NH₄I) or potassium permanganate (KMnO₄) with different molar contents have been studied. The dependence of the photovoltaic parameters on the atomic concentration of the precursor is shown.

Пленочные структуры сульфида свинца (PbS) применяются в оптико-электронных системах с 30-40-х годов XX века в качестве фоточувствительных элементов ИК-области спектра. Области применения включают: обнаружение пламени, сигнализацию, мониторинг загрязнения окружающей среды и т.д.[1].

Для получения этих структур используют физические и химические методы. Однако гидрохимический синтез из водных растворов является наиболее перспективным для получения детекторов на основе PbS за счет отсутствия сложных инструментов, простоты контроля параметров осаждения и низкотемпературной обработки [2].

Объектом исследования являются две группы пленочных структур PbS, полученные гидрохимическим методом осаждения с добавлением в реакционную ванну йодида аммония (NH₄I) или перманганата калия (KMnO₄) с различным молярным содержанием. Добавление данных прекурсоров в реакционную ванну приводит к возможности варьирования фотоэлектрических параметров под определенную оптико-электронную систему.

Исследования образцов были проведены с использованием растрового электронного микроскопа VEGA II SBU фирмы Tescan (Чехия), снабженным энергодисперсионным спектрометром Inca x-Act (Oxford Instruments, Великобритания) для определения элементного состава тонкопленочных

образцов использовался. Фотоэлектрические параметры были исследованы на автоматизированной системе для измерения электрофизических параметров полупроводников АSEC-03Е (СКБ ИРЭ РАН, г. Фрязино) и стандартной установке К54.410. В ходе исследования была показана зависимость времени релаксации в структурах от атомарного содержания прекурсора. Известно, что при малой освещенности релаксация фоточувствительного элемента

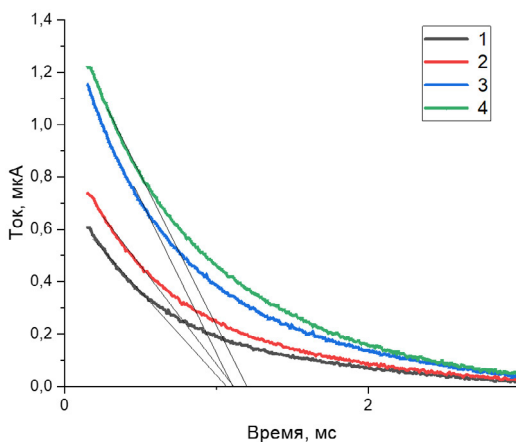


Рис. 1. Типичная кривая релаксации для образца с прекурсором NH₄I

определяется экспоненциальным законом. В первом приближении можно сказать, что время жизни основных носителей заряда совпадает с временем релаксации. На рисунке 1 представлены типичные кривые релаксации тока для образцов. Кривые 1-4 отличаются величиной потока излучения.

Так для первой группы образцов с увеличением содержанием йода по рентгеноспектральному микроанализу в пределах от $0,80 \pm 0,08$ ат.% до $2,04 \pm 0,21$ ат.%, было получено уменьшение времени релаксации с 2,11 мс до 0,82 мс.

Вторая группа образцов не выявила зависимость времени релаксации от концентрации прекурсора KMnO₄ в реакционной ванне, однако для всех образцов данной группы наблюдалось сильное снижение времени релаксации относительно классических показателей PbS.

Подводя итоги, можно отметить, классический метод гидрохимического осаждения сульфида свинца имеет большой потенциал для модификаций путем добавлений различных добавок, напрямую влияющих на характеристики итоговых пленок.

1. Quanjiang Lv. High Detectivity of PbS Films Deposited on Quartz Substrates: The Role of Enhanced Photogenerated Carrier Separation / Quanjiang Lv, Rongfan Li, Liangchao Fan at al. // Sensors 2023, 23, 8413. <https://doi.org/10.3390/s23208413>

2. Марков, В.Ф. Гидрохимическое осаждение пленок сульфидов металлов: моделирование и эксперимент / В.Ф. Марков, Л.Н. Маскаева, П.Н. Иванов. — Екатеринбург: УрО РАН, 2006. — 218 с.

C45 О моделировании диффузии неравновесных неосновных носителей заряда, генерированных электронным зондом в полупроводнике

Серегина Е.В.¹, Степович М.А.², Филиппов М.Н.³

¹*МГТУ им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет),
Калужский филиал. Калуга. Россия. evfs@yandex.ru*

²*Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского. Калуга.
Россия. m.stepovich@mail.ru*

³*Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН. Москва.
Россия. mn@filippov.org.ru*

**On modeling the diffusion of nonequilibrium minority charge carriers
generated by an electron probe in a semiconductor**

Seregina E.V.¹, Stepovich M.A.², Filippov M.N.³

¹*Bauman Moscow State Technical University (National Research University),
Kaluga Branch. Kaluga. Russia. evfs@yandex.ru*

²*Tsiolkovsky Kaluga State University. Kaluga. Russia. m.stepovich@mail.ru*

³*Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry Russian Academy of
Sciences. Moscow. Russia. mn@filippov.org.ru*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-364

Some possibilities for modeling diffusion processes caused by the interaction of kilovolt electrons with a semiconductor target in the presence of several recombination channels are considered. Model calculations were carried out for parameters characteristic of single-crystal gallium nitride. Some possibilities for taking into account the dependence of semiconductor parameters on temperature are considered.

Имеющиеся экспериментальные данные [1-3] позволяют говорить о возможности построения математической модели диффузии и рекомбинации неравновесных носителей заряда после прекращения их генерации внешним источником при наличии нескольких каналов рекомбинации. Так, в работе [4] процесс диффузии экситонов в монокристаллическом нитриде галлия после выключения электронного зонда описан для двух каналов рекомбинации посредством введения переменного эффективного времени жизни экситонов $\tau_{эф}(t)$. В общем случае в цилиндрической системе координат зависимость от времени и координаты концентрации экситонов запишется в виде

$$\begin{pmatrix} c(r, t) \\ \tilde{c}(r, t) \end{pmatrix} = \frac{1}{2Dt} \begin{pmatrix} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \\ \exp\left(-\int_0^t \frac{dt}{\tau_{эф}(t)}\right) \end{pmatrix} \int_0^{+\infty} \exp\left(-\frac{r^2 + \xi^2}{4Dt}\right) I_0\left(\frac{r\xi}{2Dt}\right) n(\xi) \xi d\xi.$$

Здесь $c(r, t)$ и $\tilde{c}(r, t)$ – концентрации при одном и при нескольких каналах рекомбинации, соответственно, $I_0(x)$ - модифицированная функция Бесселя нулевого порядка первого рода. Эффективное время жизни экситонов при числе каналов рекомбинации, равном n , может быть записано в виде

$$\tau_{эф}(t) = -t \left\{ \ln \sum_{i=1}^n \alpha_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right\}^{-1},$$

где постоянные α_i $i = \overline{1, n}$ характеризуют эффективные времена жизни экситонов для каждого канала рекомбинации. Аппроксимация экспериментальных зависимостей времени жизни экситонов от температуры позволила при расчётах учесть и эту зависимость. Модельные расчёты проведены для параметров полупроводника, характерных для 5 К и 300 К.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Правительства Калужской области № 23-21-10069, <https://rscf.ru/project/23-21-10069/>, <https://rscf.ru/en/project/23-21-10069/>.

1. Noltemeyer M., Bertram F., Hempel T. et al. // J. Mater. Research. 2012. Vol. 27. Issue 17. Pp. 2225-2231. DOI: <https://doi.org/10.1557/jmr.2012.139>

2. Поляков А.Н., Noltemeyer M., Hempel T. и др. // Прикладная физика. 2012. № 6. С. 41-46.

3. Поляков А.Н., Noltemeyer M., Hempel T. и др. // Прикладная физика. 2015. № 4. С. 11-15.

4. Серегина Е.В., Степович М.А., Филиппов М.Н. // Поверхность. Рентген-, синхротрон. и нейтрон. исслед. 2023. № 3. С. 74-78. DOI: 10.31857/S1028096023030159. EDN: LMVMMK (Seregina E.V., Stepovich M.A., Filippov M.N. // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2023. Vol. 17. No. 2. Pp. 376-380. DOI: 10.1134/S1027451023020155)

C46 Исследование дизайна и характеристик фоточувствительных элементов на основе твердых растворов CdHgTe

Яковлева Н.И.

ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия. orion@orion-ir.ru

Research of the design and characteristics of CdHgTe photosensitive elements

N.I. Iakovleva

Orion R&P Association Inc. Moscow. Russia. orion@orion-ir.ru

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-366

The ternary solution of cadmium-mercury telluride (MCT, CdHgTe) is unique semiconductor material used to FPA design with high performance. The performance of photosensitive elements based on different structures, such as: p^+/n , $p^+/\nu(\pi)/n^+$ and nBn with low dark currents have been analyzed in this work. The dark current decrease was achieved by usage of crystalline perfect absorbing layers in two-layer, three-layer or barrier structures with specified zone diagrams in which the thermal generation-recombination processes were reduced. The simulated characteristics of promising CdHgTe structures with absorbing n -layer detecting in the medium-wave IR range have been confirmed the possibility of high-temperature operation mode.

Матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) на основе тройного соединения кадмий-ртуть-теллур (CdHgTe) средневолнового (3 – 5 мкм, MWIR) и длинноволнового (8 – 12 мкм, LWIR) инфракрасных (ИК) диапазонов, как правило, охлаждаются до температуры жидкого азота. Необходимость достижения криогенных температур приводит к увеличению стоимости и усложнению режимов эксплуатации, поэтому совершенствование конструкции ФЧЭ на основе CdHgTe имеет большое значение при разработке фотоприемных устройств (ФПУ) [1, 2].

В квазинейтральных областях обычного фотодиода возникают темновые токи диффузии, связанные с излучательной рекомбинацией и Оже-процессами генерации-рекомбинации, при этом ток диффузии можно представить зависимостью $I_{\text{dif}} = eG_{\text{dif}}V_{\text{dif}}$, где G_{dif} - скорость тепловой генерации-рекомбинации вследствие диффузионных процессов в объеме V_{dif} . Процессы в области пространственного заряда включают генерацию-рекомбинацию через центры Шокли-Рида-Холла (ШРХ) и характеризуются темновым током $I_{\text{g-r}} = eG_{\text{dep}}V_{\text{dep}}$, где G_{dep} - скорость термической генерации-рекомбинации в области пространственного заряда (ОПЗ) объемом V_{dep} .

Соотношение диффузионного и генерационно-рекомбинационного ШРХ токов [3, 4] показывает, что преобладание той или иной составляющей

темнового тока зависит от параметров слоев, входящих в состав фоточувствительной структуры и от ее кристаллического совершенства. Для уменьшения плотности центров генерации-рекомбинации ШРХ необходима высокая однородность кристаллической структуры материала КРТ, что приводит к увеличению времени жизни носителей заряда, а, следовательно, к повышению параметров приборов. Значение концентрации основных носителей заряда в области поглощения выбирается близким к собственному значению, что позволяет уменьшить тепловые процессы в ОПЗ, а также токи туннелирования.

Принципы построения матриц фоточувствительных элементов из тройных растворов CdHgTe основаны на выборе конструкции ФЧЭ, обеспечивающей высокую чувствительность и минимальные темновые токи, что позволяет улучшить выходные фотоэлектрические параметры ФПУ или повысить рабочую температуру. В данной работе проведен анализ различных структур, в том числе: p^+/n^- , $p^+/v/n^-$ и $n/V/n$ -структур ФЧЭ с поглощающим слоем CdHgTe n -типа проводимости.

Наиболее часто используются матрицы на основе p^+/n -фотодиодов из CdHgTe, которые формируются в широкозонных областях структуры, в то время как поглощение осуществляется в узкозонных областях, поэтому при высокой чувствительности темновые токи, а, следовательно, шумы ФПУ существенно уменьшаются [5].

Разработчиками анонсирован новый класс приборов [6, 7], использующих $p^+/v/n^+(n^+/\pi/p^+)$ -структуры на основе CdHgTe с полностью обедненной областью поглощения. Работы по совершенствованию $p^+/v/n^+(n^+/\pi/p^+)$ -структур продолжаются на более современном уровне [8-10]. Конечной целью разработок является высокие параметры при НКУ, а также повышение рабочей температуры, что увеличивает срок службы и надежность эксплуатации.

Не менее перспективными считаются униполярные nVn -структуры ФЧЭ на основе CdHgTe или бариоды [11], включающие в состав три области n -типа: две относительно узкозонные: коллектора и поглощения (n), между которыми располагается широкозонный барьерный слой (V). Основным преимуществом таких структур считается полное отсутствие слоев p -типа проводимости, которое гарантирует получение кристаллически совершенных и однородных по параметрам матриц фоточувствительных элементов.

Целью работы являлось исследование перспективных конструкций МФЧЭ, гарантирующих уменьшенные темновые токи и высокую чувствительность, что достигается как за счет выбора зонной диаграммы слоев, так и за счет уменьшения процессов тепловой генерации-рекомбинации.

Ожидается, что преимущества и параметры ФПУ, использующих конструкции с пониженным темновым током, изменят соотношение производственных затрат между CdHgTe и материалами группы A_3B_5 (InSb) в

пользу КРТ. Фотоприемные устройства, ограниченные только фоновым излучением и механизмом излучательной рекомбинации, а не дефектами структуры, будут иметь низкую себестоимость за счет использования перспективных конструкций, дешевых систем охлаждения и простой электроники обработки.

Литература

1. Rogalski, A., Infrared Detectors for the Future [Text] / Rogalski, A. // Acta Physica Polonica. – 2009. - Vol. 116. - № 3. - P. 389-406.
2. Яковлева, Н.И. Влияние механизмов генерации-рекомбинации неосновных носителей заряда на темновой ток фотодиодов на основе HgCdTe [Текст] / Яковлева, Н.И. // Успехи прикладной физики. – 2018. - том 6. - № 3. - С. 231-241.
3. Яковлева, Н.И. Исследование темновых токов фотодиодов на основе гетероструктур КРТ [Текст] / Яковлева, Н.И. // Прикладная физика. – 2019. - № 5. - С. 27-36.
4. Kinch, M.A., High operating temperature MWIR detectors, / Kinch, M. A., Schaafe, H. F., Strong, R. L., Liao, P. K., Ohlson, M. J., Jacques, J., Wan, C-F, Chandra, D., Burford, R. D., and Schaake, C. A., // Proc. of SPIE. – 2010. – Vol. 7660. - 76602V- P.1-13.
5. Gravrand, O., Lobre, C.; Sentailler, J.L., Baier, N.; Rabaud, W.; Kerlain, A.; Sam-Giao, D.; Leboterf, P.; Cornus, B.; Rubaldo, L., Design of a small pitch (7.5 μ m) MWIR HgCdTe array operating at high temperature (130K) with high imaging performances // Proc. SPIE Infrared Technology and Applications XLVIII. – 12107. – 2022. - 121070U.
6. Emelie, P.Y. Modeling of LWIR HgCdTe Auger-Suppressed Infrared Photodiodes under Nonequilibrium Operation [Text] / Emelie, P.Y., Velicu, S., Grein, C.H., Phillips, J.D., Wijewarnasuriya P.S., and Dhar N.K. // Journal of Electronic Materials. – 2008. - Vol. 37. - No. 9. – P. 1362–1368.
7. Emelie, P.Y. Parameter extraction of HgCdTe infrared photodiodes exhibiting Auger suppression [Text] / Emelie, P.Y., Phillips, J.D., Velicu, S. and Wijewarnasuriya, P.S. // J. Phys. D. - Appl. Phys. – 2009. -No. 42 – 234003. – P. 1-8.
8. Martyniuk P. et al., Theoretical utmost performance of the (100) long-wave HgCdTe Auger suppressed photodetectors grown on GaAs // Infrared Phys. Technol. (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.infrared.2017.02.004>.
9. Jozwikowsky K. and Jozwikowska A., Enhanced Numerical Modeling of HgCdTe Long Wavelength Infrared Radiation High Operating Temperature Non-equilibrium P+v(π)N+ Photodiodes // Journal of ELECTRONIC MATERIALS. - Vol. 48. - No. 10. – 2019. - P. 1-10.
10. Kopytko, M.; Rogalski, A., New insights into the ultimate performance of HgCdTe photodiodes // Sensors & Actuators: A. Physical 339. – 2022. – 113511. – p. 1-8.
11. Яковлева, Н.И., Униполярная nВn-структура на основе CdHgTe средневолнового ИК-диапазона спектра [Текст] / Яковлева, Н.И. // Прикладная физика. - 2019. - № 3. - С. 53-60.

S47 Исследования отношения сигнал/шум и темновых токов гетероструктур на основе соединений сурьмы

Яковлева Н.И.¹, Ковшов В.С.^{1,2}

¹ ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия

² Московский физико-технический институт. Долгопрудный. МО. Россия

Studies of the signal-to-noise ratio and dark currents in heterostructures based on antimony compounds

N.I. Iakovleva¹, V.S. Kovshov^{1,2}

*Orion R&P Association Inc.¹, Moscow, Russia, e-mail: orion@orion-ir.ru
Moscow Institute of Physics and Technology², Dolgoprudny, Moscow Region,
Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-369

The possibilities of high performance achieving in antimonide-based, low-dimensional barrier and photodiode structures using MWIR $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ and $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Sb}$ absorbing layers have been considered in this work. Lifetime and dark current temperature dependences in ternary antimonide alloys have been calculated. The signal-to-noise ratio has been determined in the operating temperature range. It was received, that for photodiodes based on $\text{InAs}_{0.8}\text{Sb}_{0.2}$, the expected detectivity will be $D^* \approx 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{Hz}^{1/2}$ at $T = 100 \text{ K}$ and for photodiodes based on $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{Sb}$ the expected detectivity will be $D^* \approx 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{Hz}^{1/2}$ at $T = 100 \text{ K}$.

Целью разработчиков фотоэлектроники является создание высокочувствительных и относительно недорогих фотоприемных устройств (ФПУ) большого формата. В связи с этим в отечественной фотоэлектронике и за рубежом проводятся разработки, направленные на совершенствование дизайна структур, содержащих двойные, тройные и многокомпонентные соединения на основе сурьмы, с целью создания ФПУ средневолнового ИК диапазонов спектра [1, 2]. Рассматриваемые в работе тройные растворы $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ и $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Sb}$ обладают полным набором свойств, необходимых для использования в перспективных изделиях фотоэлектроники, к которым относятся: высокая подвижность электронов, высокий коэффициент поглощения, малая скорость тепловой генерации, алмазоподобная кристаллическая решетка и зонная структура, позволяющая конструировать сложные конфигурации с заданными свойствами. Поэтому исследование рекомбинационных и токовых механизмов в поглощающих слоях $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ и $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Sb}$, используемых в фотодиодных и барьерных устройствах, является актуальной задачей [3-5].

При всех положительных свойствах материалов на основе сурьмы имеется и ряд недостатков, одним из которых выступает повышенный темновой ток Шокли-Рида-Холла (ШРХ) в фотодиодных структурах и напряженных сверхрешетках второго типа (T2SL) [6]. Причиной повышенного темнового тока считается малое время жизни неосновных носителей заряда по механизму ШРХ [7]. Однако, в последнее время, благодаря совершенствованию методов выращивания и созданию барьерных ФПУ на основе тройных растворов InAsSb и InGaSb, влияние рекомбинационных процессов удалось существенно уменьшить [8-13].

В данной работе исследуются свойства и характеристики тройных растворов $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ и $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Sb}$, представлен расчет температурных зависимостей времени жизни, темнового тока отношения сигнал/шум, что позволяет прогнозировать фотоэлектрические параметры будущих приборов для создания инфракрасных формирователей изображения средневолнового диапазона спектра.

Литература

1. Razeghi, M., Overview of antimonide based III-V semiconductor epitaxial layers and their applications at the center for quantum devices» // Eur. Phys. J. AP. – 2003. – N.23. – pp. 149–205.
2. Бакаров А.К., Гутаковский А.К., Журавлев, К.С., Ковчавцев А.П., Торопов А.И., Бурлаков И.Д., Болтарь К.О., Власов П.В., Лопухин А.А., Матричные фотоприемные устройства на основе слоев InSb, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Журнал технической физики. – 2017. -том 87, вып. 6. – сс. 900-904.
3. Rogalski, A., Antoszewski, J., Faraone, L., Third-generation infrared photodetector arrays // J. Appl. Phys., 105, 091101 (2009).
4. Rogalski A., Next Decade in Infrared Detectors // Proc. SPIE 10433. – 2017. - 104330L.
5. Philip Klipstein, Eran Armon, Eran Avnon, Yael Benny, Maya Brumer, et al. HOT MWIR technology at SCD / Infrared Technology and Applications XLVIII // Proc. SPIE 12107. - 2022. 121070Q. –p.1-9.
6. Lackner, D.; Pitts, O.J.; Steger, M.; Yang, A.; Thewalt, M.L.W.; Watkins, S.P. Strain balanced InAs/InAsSb superlattice structures with optical emission to 10 μm . // Appl. Phys. Lett. – 2009. – 95. - 81906.
7. Steenbergen, E.H.; Connelly, B.C.; Metcalfe, G.D.; Shen, H.; Wraback, M.; Lubyshev, D.I.; Qiu, Y.; Fastenau, J.M.; Liu, A.W.K.; Elhamri, S.; et al., Significantly improved minority carrier lifetime observed in a long-wavelength infrared III-V type-II superlattice comprised of InAs/InAsSb // Appl. Phys. Lett. – 2011. – 99. 251110.
8. Rogalski, A. InAs_{1-x}Sb_x infrared detectors. // Prog. Quantum Electron. - 1989. – 13. – p/ 191–231.

9. Steenbergen, E.H. InAsSb-Based Photodetectors/- Elsevier BV: Amsterdam, The Netherlands: 2020. - pp. 415–453.

10. David Ting, Anita Fisher, Brian Pepper, Cory Hill, Sam Keo, et al., Progress in InAs/InAsSb superlattice barrier infrared detectors / Infrared Technology and Applications XLVIII // Proc. SPIE 12107. – 2022. 121070O. – p. 1-9.

11. Ковшов В. С., Никонов А. В., Пашкеев Д. А., Лопатина Е. А., Современное состояние разработок и исследований сверхрешеток II типа для приборов ИК-фотоэлектроники (обзор) // Успехи прикладной физики. – 2021.- том 9, № 2. – с. 97-111.

12. Суханов М.А., Бакаров А.К., Журавлёв К.С., AlSb/InAs-гетероструктуры для СВЧ-транзисторов // Письма в ЖТФ. – 2021. - том 47, вып. 3. - с.37 – 39.

13. Кривобок В.С., Николаев С.Н., Пашкеев Д.А., Минаев И.И., Савин К.А., Ерошенко Г.Н., Клековкин А.В., Получение XVn -структур на основе InSb методом молекулярно-лучевой эпитаксии – Москва: ФИАН им. П. Н. Лебедева РАН. Сборник тезисов Школы молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике» (БПИО-2023). – 2023. - с.33-37.

C48 Исследование зависимости эмпирических значений ширины запрещенной зоны CdHgTe от метода эпитаксиального роста

Никонов А.В.^{1,2}, Яковлева Н.И.¹, Болтарь К.О.^{1,2}

¹ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия. *post@avnikonov.ru*

²Московский физико-технический институт. Долгопрудный. МО. Россия

Dependence of empirical values of CdHgTe band gap energy on the epitaxial growth method

Nikonov Anton V., Iakovleva N.I., Boltar K.O.

Orion R&P Association Inc., Moscow, Russia

MIPT, Moscow, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-372

In this research we analyzed the dependence of the long-wavelength sensitivity limit of MCT-based photodiodes and the associated band gap energy on the method of epitaxial growth of heteroepitaxial MCT structures. The methods of molecular beam epitaxy and liquid phase epitaxy are taken into account. The results of spectral sensitivity measurements of photodiodes manufactured at Orion R&P Association Inc. were used. The results from this research are useful for improving the quality of the technological cycle of IR-sensitive photodiodes manufacturing.

Результаты контроля спектральных характеристик чувствительности фотодиодов на основе тройных твердых растворов теллурида кадмия-ртути (КРТ) показывают существенные отличия в значениях длинноволновой границы чувствительности для одного и того же состава $Cd_xHg_{1-x}Te$ при применении гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) на основе КРТ, выращенных методами молекулярно-лучевой (МЛЭ) и жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) [1-5]. Такие различия связаны с уникальностью технологических процессов формирования полупроводниковых структур, включая многослойные, при разных методах эпитаксиального роста, что необходимо учитывать для точного контроля на разных этапах производства матричных фотоприемников, работающих в ИК-диапазоне.

Ключевая причина разнообразия спектральных свойств фоточувствительных слоев, выращенных с помощью МЛЭ и ЖФЭ, заключается в отличиях распределения состава соединения и вакансий ртути по толщине эпитаксиального слоя. В частности, при жидкофазной эпитаксии происходит заметная вариация состава соединения в процессе роста эпитаксиальных слоев из растворов-расплавов на основе теллура.

В ходе данного исследования разработаны эмпирические формулы для определения эффективной ширины запрещенной зоны КРТ, адаптированные к специфике каждого метода эпитаксиального роста. Для анализа использовались результаты измерений спектральных характеристик

чувствительности фотомодулей на базе КРТ, изготовленных в ГНЦ РФ АО «НПО «Орион».

За основу теоретической расчетной модели взята зависимость длинноволновой границы чувствительности от состава тройного соединения КРТ и рабочей температуры измерений, полученная из наиболее применимой эмпирической модельной формулы ширины запрещенной зоны [6]:

$$\lambda_{cp} = \left(-0,244(1-x) + 1,295x - 0,106x(1-x) + \frac{5,081(1-x) - 2,621x - 4,774x(1-x)}{11(1-x) + 78,7x + T} \cdot 10^{-4} T^2 \right)^{-1}.$$

В качестве статистической базы в рамках исследования применялись результаты контроля спектральных характеристик чувствительности более чем 75 фотомодулей на основе КРТ, выращенных методами молекулярно-лучевой и жидкофазной эпитаксии.

В результате проведенного исследования получены расчетные формулы эффективной ширины запрещенной зоны КРТ, уникальные для методов МЛЭ и ЖФЭ. С учетом полученных зависимостей ширины запрещенной зоны от состава соединения и рабочей температуры в ходе исследования проведен анализ температурной зависимости длинноволновой границы чувствительности фотомодулей на основе КРТ для МЛЭ и ЖФЭ.

Полученные результаты способствуют совершенствованию методов контроля значений длинноволновой границы чувствительности фотомодулей на основе КРТ, выращенных различными методами: применение расчетных формул эффективной ширины запрещенной зоны КРТ в методиках входного и межоперационного контроля в рамках технологии изготовления фотоприемных устройств, чувствительных в ИК-диапазоне, способствует её совершенствованию и повышению сквозного процента выхода годных изделий.

Литература

1. Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Твердотельная фотозлектроника. Фоторезисторы и фотоприемные устройства / М.: Физматкнига. 2012. 368 с.
2. Пономаренко В.П. Квантовая фотосенсорика (лекции) / Москва: Орион, 2018. 647 с.
3. Бурлаков И.Д., Кульчицкий Н.А. и др. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 6. С. 547-559.
4. Стафеев В.И., Болтарь К.О. и др. // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39. № 10. С. 1257-1265.
5. Болтарь К.О., Яковлева Н.И., Никонов А.В. // Прикладная физика. 2011. № 5. С. 100-106.
6. Laurenti J.P., Camassel J. et al. // J. Appl. Phys. 1990. Vol. 67. № 10. P. 6454-6460.

С49 Моделирование оптических характеристик микроболометрического пикселя в САПР «COMSOL Multiphysics»

Левчук Д.С., Колос В.В., Соловьёв Я.А.

*ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». Минск.
Беларусь. DLevchuk@integral.by*

Modeling of optical characteristics of a microbolometric pixel in the CAD «COMSOL Multiphysics».

Levchuk Dzmitriy S., Kolos V.V., Solovjov Y.A.
JSC "INTEGRAL" - manager holding company "INTEGRAL" Minsk. Belarus.

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-374

The materials of the thesis consider the results of calculations and subsequent verification of the results by computer modeling of the absorption spectrum of a microbolometric structure based on a thermosensitive vanadium oxide film. The thermosensitive pixel of the microbolometer is a complex multilayer structure. Due to a very large number of influencing factors, achieving acceptable pixel parameters experimentally requires very large time and financial costs. Thus, the purpose of the research is to determine the values of the design parameters of a microbolometer formed on the basis of a thermosensitive VOx film, which allow for the highest absorption of IR radiation in the LWIR range, the studied structure of the microbolometer. The calculations were carried out in the CAD "COMSOL Multiphysics".

Моделирование проводилось при помощи модулей «Electromagnetic Waves, Frequency Domain». Для структуры микроболометрического пикселя представленной на рисунке 1 было проведено моделирование для диапазона волн 8 – 12 мкм. Основным аспектом создания достоверной модели было уточнение коэффициентов n и k на Фурье спектрометре и последующим уточнение итерационным методом Ньютона-Рафсона.

Для уточнения модели были проведены эксперименты по определению оптических характеристик каждой плёнки, входящей в структуру микроболометрического пикселя, применительно к используемым методам формирования.

Для верификации модели были изготовлены экспериментальные образцы, где вместо вакуумного зазора был использован несущий диэлектрик, имеющий минимальное поглощение и минимальное изменение преломления ИК излучения. Коэффициент поглощения микроболометрической структуры и результаты измерений на Фурье-спектрометре представлены на рисунке 2.

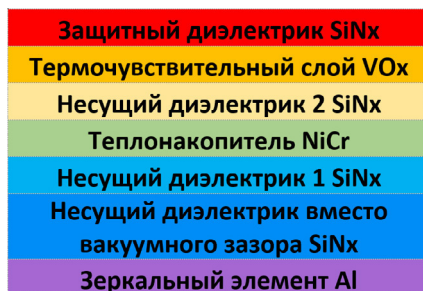


Рис. 1. Последовательность конструктивных слоёв микроболометрического пикселя.

Из полученных результатов видно, что отклонение экспериментальных значений от кривого моделирования в диапазоне длин волн от 8 до 12 мкм составляет не более 10 %.

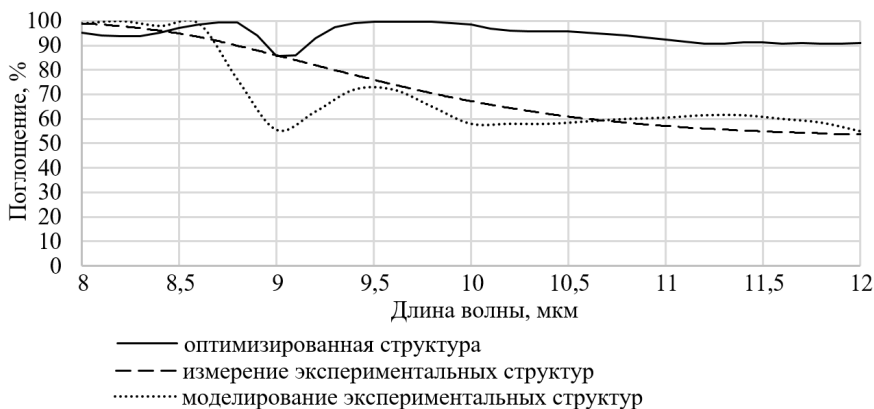


Рис. 2. Результаты моделирования и верификации микрометрической структуры

Исходя из результатов сравнения измеренных и рассчитанных значений коэффициента поглощения многослойных структур можно сделать вывод о возможности проведения в достаточной степени достоверных расчётов коэффициентов поглощения структур термочувствительной ячейки микроболометрического пикселя в САПР «COMSOL Multiphysics». На основе результатов был промоделирован коэффициент поглощения оптимизированной структуры микроболометрического пикселя.

Литература

1. Reflectance Calculator // Filmetrics A KLA Company [Electronic resource]. – 2023. – Mode of access: <https://www.filmetrics.com/reflectance-calculator> – Date of access: 23.01.2023.
2. Micromachined infrared bolometers on flexible polyimide substrates // Shadi A. Dayeh, Donald P. Butler*, Zeynep C, Celik-Butler // Electrical Engineering // 2004 – P. 49-56.
3. Полное поглощение инфракрасного излучения в тонких слоях металлической черни / Бланк Л.Я., Касумов Ф.К., Шаршанов А.Я. Физика низких температур. – 1992. – Т. 18, №9.
4. Размерная зависимость коэффициента пропускания нанометровых металлических пленок в инфракрасном диапазоне / В.П. Курбацкий, А.В. Коротун, В.В. Погосов и др. – 2008. – 288 с.

C50 Моделирование деформаций микроболометрического пикселя в САПР «COMSOL Multiphysics»

Левчук Д.С., Колос В.В. Соловьёв Я.А.

*ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». Минск.
Беларусь. DLevchuk@integral.by*

Simulation of mechanical deviations of a microbolometric pixel in the CAD «COMSOL Multiphysics».

Levchuk Dzmitriy S., Kolos V.V., Solovjov J.A.
JSC "INTEGRAL" - manager holding company "INTEGRAL" Minsk. Belarus.

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-376

The materials of the thesis consider the modeling of the mechanical characteristics of a microbolometric pixel for deviation from flatness. This simulation was carried out using the CAD "COMSOL Multiphysics". The thermosensitive pixel of the microbolometer is a complex multi-layered structure. Due to the small thicknesses of the main structural layers, the structure is sensitive to various mechanical deformations. Due to the very large number of influencing factors, achieving acceptable pixel parameters experimentally requires very large time and financial costs. The aim of the work is to build a model and refine mechanical deviations by computer modeling to minimize deformation after removal of the sacrificial layer [1, 2].

Расчёт механических деформаций в микроболометрическом пикселе размером 25 * 25 мкм, проведён с использованием встроенных модулей в САПР «Solid Mechanics, Heat Transfer in Solids». Характеристики материалов, используемых в программном комплексе, уточнялись экспериментальным путём или брались из литературных источников [3, 4]. Пример результатов моделирования показан на рисунке 1 (а).

Для верификации модели, деформационные отклонения по оси Z микроболометрических пикселей экспериментальных образцов измерялись на установке FRT micro-Prof 200. Результаты представлены на рисунке 1 (б).

Анализ сходимости результатов деформационных отклонений экспериментального образца с результатами компьютерного моделирования представлен на рисунке 2.

Из результатов сравнения рассчитанных и измеренных значений деформаций трёхмерных структур термочувствительного пикселя микроболометрической матрицы, можно сделать вывод о возможности проведения в достаточной степени достоверных расчётов пикселя в САПР

«COMSOL Multiphysics». Модель прогнозирует деформации
микроболометрического пикселя с точностью до 100 нм.

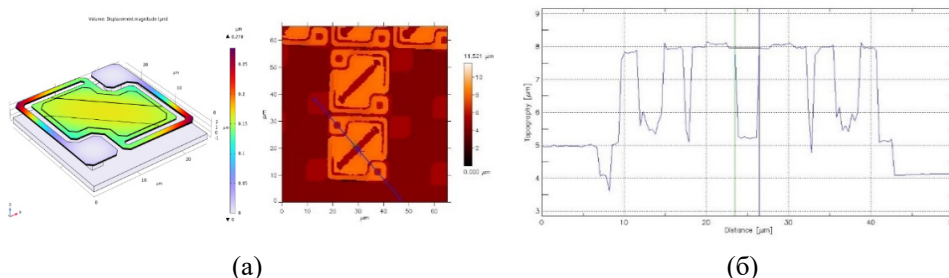


Рис. 1. Деформации микроболометрического пикселя (а) модель в САПР "COMSOL Multiphysics", (б) профиль отклонения экспериментального образца, полученный с помощью FRT micro-Prof 200.

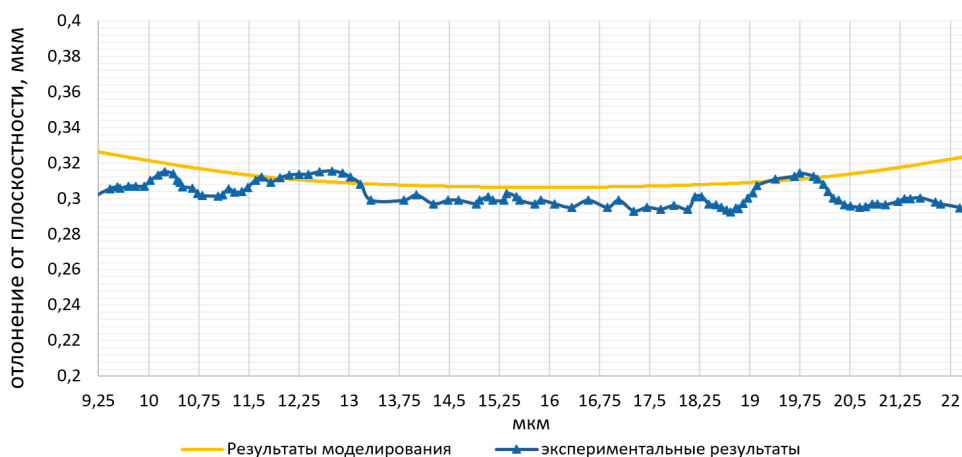


Рис. 2. Сходимость результатов моделирования и механического изгиба экспериментального образца

Литература

1. Abdel-Rahman M., Fabrication and design of vanadium oxide microbolometer / M. Abdel-Rahman, N. Al-Khalli, M. F. Zia, [et al.] // APMAS 2016. – 2017. – Vol. 1809, no. 1, – pp. 1-12.
2. X. Gu, G. Karunasiri, J. Yu, G. Chen, U. Sridhar, and W. J. Zeng, "On-chip compensation of self-heating effects in microbolometer infrared detector arrays," Sensors and Actuators A: Physical, vol. 69, no. 1, pp. 92–96, 1998.
3. COMSOL Multiphysics Reference Manual.
4. R. K. Bhan, R. S. Saxena, C. R. Jalwania, and S. K. Lomash, "Uncooled infrared microbolometer arrays and their characterization techniques," Defence Science Journal, vol. 59, no. 6, pp. 580–589, 2009.

C51 Переход от многоконтурных систем адаптивной оптики для солнечных телескопов к мультисопряженным

Лукин В.П.¹, Коняев П.А.¹, Больбасова Л.А.¹, Борзилов А.Г.¹, Колобов Д.Ю.²,
Ковадло П.Г.², Шиховцев А.Ю.²

¹ *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. Томск. Россия*

² *Институт солнечно-земной физики СО РАН. Иркутск. Россия*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-378

Техника ЛОЗ применяется для борьбы с проявлением действия атмосферной турбулентности на качество оптических изображений, формируемых в астрономических телескопах. Известно, что применение сигнала от ЛОЗ позволяет системам адаптивной оптики (АО) получать практически дифракционные изображения космических объектов в телескопах наземного базирования. Однако при применении этой техники возникает целый ряд проблем.

Известно, что атмосферная турбулентность ограничивает разрешение наземных телескопов оптического диапазона, вызывает дрожание и мерцание изображений. Для повышения качества изображений наземные солнечные телескопы оснащаются системами АО. В классических системах АО используется один корректор наклонов и одно деформируемое зеркало, сопряженное с плоскостью апертуры телескопа, а также датчик волнового фронта. Поэтому достижения дифракционно-ограниченных изображений с использованием первого поколения систем АО для крупноапертурных телескопов оказалось практически невозможным, в результате в настоящее время получают развитие АО системы следующего поколения, где используются несколько деформируемых зеркал и/или датчиков волнового фронта – мультисопряженная адаптивная оптическая система. В системах АО для солнечных телескопов используют мультисопряженную адаптивную оптическую систему, в которой каждое деформируемое зеркало корректирует свой сопряженный слой в атмосфере. В результате каждое зеркало оптически сопряжено с разной высотой, а именно с той, где возникает фазовое искажение.

Изучение мировой литературы позволяет сделать вывод, что авторы самых современных разработок по системам АО склоняются к тому, что к построению многозеркальной системы можно подходить только после тщательного анализа вертикального профиля уровня турбулентности, т.к. корректоры волнового фронта должны устанавливаться в плоскостях, сопряженных с наиболее сильными слоями атмосферной турбулентности. Эта информация может быть получена только на основе прямых наблюдений в точке стояния телескопа. Для крупнейшего в России солнечного телескопа

БСВТ были разработаны подходы к определению характеристик турбулентности в разных слоях тропосферы - нижней стратосферы. Результаты измерений показали, что энергетика турбулентности в верхних слоях атмосферы прямо влияет на астроклиматические параметры конкретных мест наблюдений и определяет их сезонность. В настоящее время большинство мультисопряженных систем представляют собой развитие односопряженных систем, поэтому необходимо проектировать схему ввода системы АО в оптический тракт телескопа таким образом, чтобы имелась возможность наращивать число корректоров постепенно, переходя от многокаскадной схеме к мультисопряженной.

Коллектив исполнителей проекта РНФ №42-23-00023 уже второй год решает эту сложную задачу. Иностранцами партнерами в этом проекте выступают специалисты из Института оптики и электроники Китайской академии наук (IOE), которые развивают мультисопряженную систему АО для крупнейшего в Китае солнечного телескопа NSVT.

**C52 Расчет исходных данных для контроля центрирования
компонентов оптико-электронных систем с использованием
макроса программы ZEMAX**

Ильинский Р.Е.

*АО «Лыткаринский завод оптического стекла» (АО ЛЗОС). Лыткарино. МО.
Россия. ilinsky_r@mail.ru*

**Calculation of initial data for monitoring the alignment of components of
optical-electronic systems using the ZEMAX program macro**

R. Ilinsky

JSC "Lytkarino Optical Glass Factory" (LZOS), Lytkarino, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-380

To generate initial data when monitoring the centering of components of optical-electronic systems using the atocollimation method, a Zemax program macro has been developed. The calculation results are presented in text and graphic form. The macro can be used both when specifying tolerances for surface alignment according to GOST 2.412-81 and ISO 10110-6.

Для формирования исходных данных при контроле центрирования компонентов оптико-электронных систем атоколлимационным методом разработан макрос программы Zemax. Результаты расчетов представляются в текстовом и графическом виде. Макрос можно использовать как при указании допусков на центрировку поверхностей по ГОСТ 2.412-81, так и по ISO 10110-6.

Нарушение центрирования компонентов оптико-электронной системы способно привести к резкому ухудшению параметров оптико-электронной системы [1, 2]. Поэтому контроль центрирования компонентов является одной из важнейших операций при сборке оптико-электронных систем. Очень часто контроль центрирования осуществляется автоколлимационным методом [1]. Однако при использовании этого метода необходимо заранее подготовить набор исходных данных.

Одной из наиболее популярных и широко распространенных программ в РФ стал Zemax [3]. Значительно расширить возможности программы Zemax позволяет язык макросов [3,4,5]. Благодаря этому расчет исходных данных для контроля центрирования компонентов оптико-электронных систем может осуществляться с использованием специального написанного макроса программы Zemax. В отличие от макроса, который был описан в [5], при создании нового макроса было решено отказаться от «оборачивания» всей или части оптической системы с последующим расчетом через нее лучей в параксиальном приближении (т.н. «обратный» ход). Для расчета лучей в параксиальном приближении были использованы стандартные алгоритмы

программы Zemax. Это позволило максимально упростить сам макрос и гарантировать работоспособность макроса в тех случаях, когда тип одной или нескольких поверхностей отличается от «STANDARD» (например, в оптической системе присутствуют голографические элементы). Результаты расчетов представляются в текстовом (формат файла HTML) и графическом (формат файла DXF) виде, что существенно облегчает подготовку конструкторской и технологической документации. Макрос можно использовать как при указании допусков на центрировку поверхностей по ГОСТ 2.412-81, так и по ISO 10110-6. На рис. 1 показана схема расположения автоколлимационных точек, которая была получена с использованием макроса.

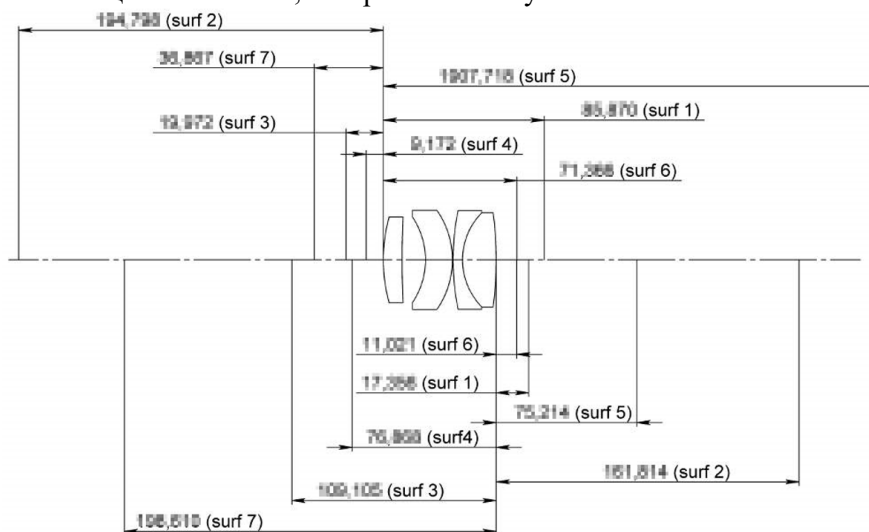


Рис.1. Схема расположения автоколлимационных точек

Литература

1. Сокольский М.Н. Допуски и качество оптического изображения – Ленинград: Машиностроение, 1989. – 221 с.
2. Латышев С.М., Тимошук И.Н. Инженерная методика расчёта допусков на первичные погрешности центрировки линзовых объективов // Оптический журнал. 2016. № 12. с. 41-47, 83.
3. Наджип А.Э. Руководство пользователя пакетом программ ZEMAX: пер. с англ. - М.:, 2010. – 986 с.
4. Заварзин В.И., Батиев В.И., Польщикова О.В. Компьютерные технологии и моделирование в оптотехнике: учебное пособие.- М.: изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 37 с.
5. Малькин А.А. Использование макросов при проектировании центральных оптических систем в программе Zemax // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 3. С. 45-47.

C53 Изготовление микролинз и пленок методом горячего прессования из халькогенидного стекла ИКС25

Самигуллин М.Э.¹, Михайлов М.Д.^{1,2}, Белых А.В.², Ременный М.А.³

¹*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
Санкт-Петербург. Россия. samigullin18@yandex.ru*

²*НПО Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова.
Санкт-Петербург. Россия*

³*ООО «ИоффеЛЕД». Санкт-Петербург. Россия*

Production of microlenses and films by hot pressing from IRG25 chalcogenide glass

Samigullin Marsel Eduardovich¹, Mikhailov M.D.^{1,2}, Belykh A.V.²,
Remennyi M.A.³

¹*Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia.*

²*S.I. Vavilov's State Optical Institute, Saint-Petersburg, Russia*

³*IoffeLED Ltd, Saint-Petersburg, Russia.*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-382

The IRG25 glasses were synthesized by vacuum melting. All glasses are transparent from 1.3 to 12 μm . Films and microlenses were obtained in an oxygen atmosphere. Hot precision pressing has been done at viscosity from 10^6 to 10^8 Pa·s and pressure 22-90 kPa. Lenses with diameter from 3 to 5 mm and films with thickness from 120 μm were obtained

Халькогенидные стекла — это стекла, содержащие халькогены – серу (S), селен (Se) или теллур (Te) и добавки германия, мышьяка, сурьмы и других элементов для повышения стабильности стекла. Они обладают низкими оптическими потерями в ИК-области от 0,7 до 17 мкм, высокими значениями нелинейного показателя преломления, химической стабильностью. Одним из достоинств халькогенидных стекол является их легкоплавкость. Она позволяет изготавливать из стекол готовые оптические элементы (линзы, призмы, окна, световоды, пленки) методом горячего прецизионного прессования.

Целью исследования является получение микролинз и пленок из халькогенидного стекла ИКС25.

Перед синтезом исходные реагенты помещали в кварцевые ампулы с последующим вакуумированием и прогревом шихты. Стекла синтезировались при максимальной температуре синтеза 850 °С, с закалкой расплава на воздухе. Спектры ИК пропускания регистрировали на Фурье-спектрометре ФСМ-1201.

Пленки и образцы микролинз из стекла ИКС25 были получены при вязкости 10^6 – 10^8 Па·с в атмосфере воздуха с максимальной нагрузкой 22-90 кПа при длительности нагрузки от 60 до 1200 с и закалкой на воздухе до температуры стеклования.

Для наглядности образцы линз представлены на рис. 1 в сравнении с линейкой.

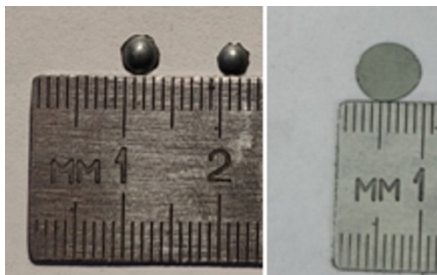


Рис. 1. Линзы диаметром 3 и 4 мм и пленка толщиной менее 0,2 мм из стекла ИКС25

ИК спектры поглощения стекол приведены на рис. 2 в сравнении с плоскопараллельным образцом стекла ИКС25 толщиной 10 мм, полученным стандартной механической обработкой на станке. Полосы поглощения в области длин волн от 11 до 17 мкм, обусловленные примесями оксида мышьяка в форме As-O-As (15.4 мкм), не проявляются в спектре пропускания пленки из-за ее малой толщины. В спектрах пропускания тонких пленок толщиной 120 мкм, полученных прецизионным прессованием, наблюдается интерференция (рис. 2в), что позволяет контролировать показатель преломления стекла после прессования.

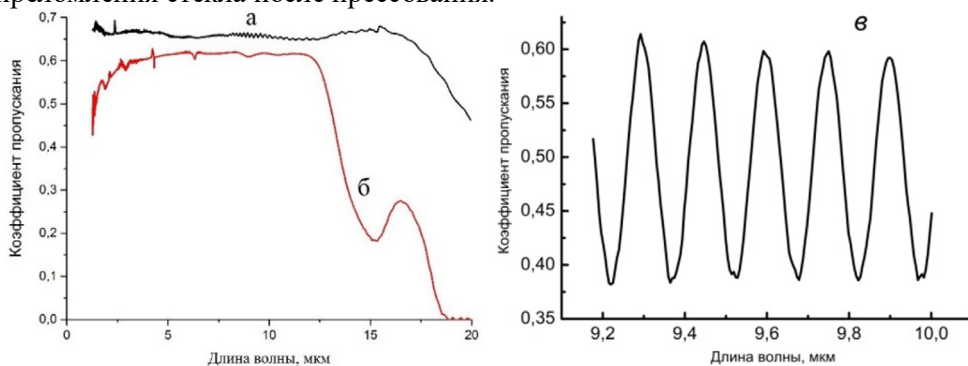


Рис. 2. ИК-спектры поглощения стекол:

- а) пленка, полученная прессованием, б) плоскопараллельный образец толщиной 1 см,
- в) фрагмент спектра пропускания тонкой пленки, полученной горячим прессованием

Стекла типа ИКС25 перспективны для применения в качестве материала для получения методом прецизионного прессования линз для тепловизионных приборов.

C54 Создание и применение полимерного оптического материала на основе эпоксидной смолы

Агринский М.В.¹, Откупман Д.Г.², Попов В.К.¹

¹ АО «ОКБ «АСТРОН». Лыткарино. МО. Россия. *magr829@yandex.ru*

²Московский государственный университет геодезии и картографии
(МИИГАиК). Москва. Россия. *odvk@ya.ru*

Creation and application of polymer optical material based on epoxy resin

Agrinsky M.V.¹, Otkupman D.G.², Popov V.K.¹

¹*Experimental Design Bureau "ASTROHN", JSC, Lytkarino, Moscow region,
Russia*

²*Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Moscow,
Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-384

An optical material – polymer based on epoxy resin – has been created. Application of the created polymer in a lens with high image quality, including chromatic aberration correction, is shown.

Качество изображения линзовых оптических систем, работающих в широком спектральном диапазоне, в значительной степени обусловлено остаточными хроматическими аберрациями. Для построения качественного изображения необходимо исправить в системе не только первичный хроматизм, но и вторичный спектр, наличие которого накладывает ограничение на предельно достижимые технические характеристики системы, в частности, на возможность развития относительного отверстия. Для эффективной коррекции вторичного спектра необходимы материалы с заданным ходом дисперсионной кривой, характеризуемой такими параметрами, как относительная частная дисперсия P_{FD} и коэффициент дисперсии ν_D .

Для расширения каталога полимерных оптических материалов [1] с целью проектирования объективов ахроматов был создан полимерный оптический материал ПОЭ (полимер оптический эпоксидный), содержащий в составе эпоксидную смолу, декалит 6, дибутиловый эфир себациновой кислоты, оксибензофенон, низкомолекулярный полиамид, 1-йоднафталин 10. Измеренные показатели преломления: $n_{F'} = 1,56662$; $n_e = 1,55852$; $n_D = 1,55491$; $n_C = 1,55148$. Внешний вид созданного материала и его область прозрачности показаны на рисунке 1.

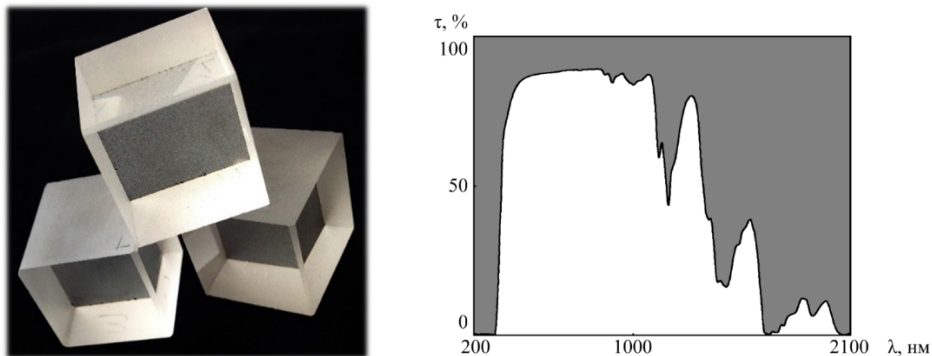


Рис. 1. Внешний вид заготовок ПОЭ и его спектральное пропускание, где τ - коэффициент пропускания; λ - длина волны излучения

Проведён расчет объектива-ахромата. Параксиальные характеристики следующие: $f' = 100$ мм; размер изображения $2y' = 12,8$ мм; диафрагменное число $F/\# = 5$. На рисунке 2 представлено схемное изображение объектива.

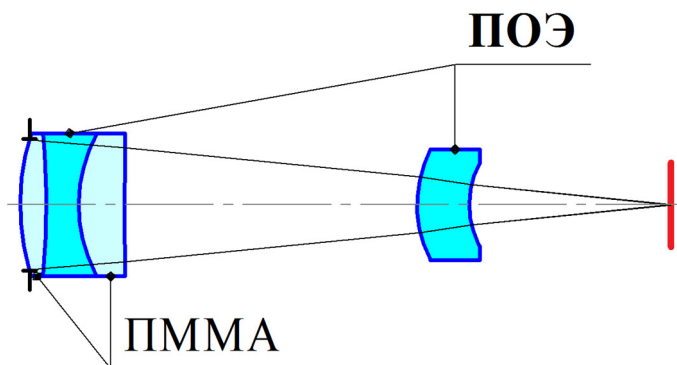


Рис. 2. Объектив, состоящий из ПММА (полиметилметакрилат) и ПОЭ

Работа проводилась при поддержке «Фонда содействия инновациям».

1. Оптические и другие материалы на основе прозрачных полимеров: монография / В.Н. Серова // Федер. агентство по образованию, Казан. гос. технол. ун-т. – Казань: КГТУ, 2010. – 540 с.

**C55 Разработка иммерсионного материала из стекол по разрезу
 $As_2Se_3 - SSe_2$ для изучения включений в алмазах**

Маннатхоко Н., Семенча А.В., Кононов Н.А.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
Санкт-Петербург. Россия. mannathoko.n@spbstu.ru*

**Development of material from the $As_2Se_3 - SSe_2$ section for the study of
inclusions in diamonds**

Mannathoko N., Semencha A.V., Kononov N.A.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Peterburg, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-386

The present study aims to create new material that can be used as an immersion prepate for studying the inclusions of diamonds. This includes studying the mechanical and optical properties of the $As_2Se_3 - SSe_2$ section, properties are as microhardness (HV), density (ρ), transmission (T), glass formation temperature (T_g), press-formation temperature and bandwidth (E_g) were obtained. The development of the immersion material was guided by such as low glass formation temperature, high value hardness, chemical resistance to hydrofluoric acid, low softening temperature and refraction index similar to that of diamond.

1. Введение

Исследование алмазных включений - необходимый процесс при создании бриллиантов и оценке алмазов, как необработанных, так и ограненных [1]. Этот процесс можно проводить с помощью иммерсионной вязкой жидкости: это вещество, которое имеет такой же коэффициент преломления, как и алмаз, и при погружении алмаза в него, просвечивая определенной длиной волны, легко увидеть дефекты алмазов, смоделировать и оценить их координаты [2]. В данной работе показаны новые материалы из халькогенидных стекол на основе раздела $As_2Se_3 - SSe_2$, которые имеют показатель преломления, схожий с алмазом и могут служить вязкой иммерсионной жидкостью.

2. Метод

Для изготовления стекол использовали мышьяк чистотой 99,999 %, дистиллированные селен и сера марок ОСЧ 17-3. Серия из 13 стекол различного состава в заданном разрезе $As_2Se_3 - SSe_2$ (рис. 1) была синтезирована в вакуумных запаянных (10^{-2} мм.рт.ст.) ампулах из кварцевого стекла с использованием качающейся печи. Для исследования

термомеханических и оптических свойств стекла использовали следующие методы: микротвердость измеряли методом изучения твердости по Виккерсу (HV) [3], плотность (ρ) изучали методом гидростатического взвешивания с помощью аналитических многоцелевых весов Vibra серии НТ, а температуру стеклообразования (T_g) изучали методом ДТА, пропускание (Т) стекло изучали на приборе для Фурье-спектроскопии ФСМ 1201.

3. Результаты

Плотность стекол по разрезу $As_2Se_3 - SSe_2$ меняется от 3,55 г/см³ у М10 до 3,66 г/см³ у М34, что соответствует молекулярному объемам 18,33 и 17,92 см³/моль соответственно. Это означает, что более высокая концентрация SSe_2 приводит к более рыхлой упаковке молекул. Наблюдается линейная зависимость уменьшения молекулярного объема с уменьшением содержания SSe_2 . Вместе эти результаты приводят к аналогичной линейной зависимости микротвердости от состава и пропорционально связаны с плотностью стекла. Зависимость представляет собой линейное увеличение значений HV с уменьшением молярного объема, в результате чего максимальна микротвёрдость наблюдается у составов М42 и М40, которые по составу приближаются к составу As_2Se_3 (рис. 1), и имеют значения микротвёрдости 139,57 и 125,63 HV_{0,1} соответственно, а М10 и М34 - 10,78 и 38,13 HV_{0,1}. Температура стеклования стекол растет линейно с ростом содержания As_2Se_3 . Минимальная температура стеклования составляет 10,5°С у М10, а максимальная 141,9°С у М42. Все стекла прозрачны в ближнем инфракрасном диапазоне от 650 до 850 нм при толщине стекла 1 мм. Прозрачность уменьшается с уменьшением содержания SSe_2 и увеличением содержания As_2Se_3 .

Таблица 1. – Значений плотности, пропускания, молярного объема, температуры стеклования и микротвердости стекол, синтезированных в разделе $As_2Se_3 - SSe_2$

Маркировка стекла	T (%)	ρ (г/см ³)	V_m	HV _{0,1}	T _g (°C)
	650нм - 850нм	опытная	(см ³ /мол)		
М10	65,87 - 70,76	3,55	18,33	10,78	10,5
М11	52,28-56, 54	3,59	18,13	15,10	15,8
М12	55,89 - 61,35	3,60	18,09	23,03	25,8
М33	37,18 - 45,12	3,61	18,22	10,18	20,6
М34	57,62 - 62,05	3,66	17,92	38,13	30,1
М35	65,36 - 71,52	3,79	17,80	52,88	50,4
М36	56,75 - 61,14	3,86	17,92	69,20	65,6
М37	59,21- 63, 69	3,95	17,90	88,65	75,5
М38	52,49 - 57,91	4,20	17,18	98,63	88,8
М39	58,82 - 64,50	4,21	17,42	107,70	98,2
М40	35,07 - 44,56	4,29	17,37	125,63	115,6
М41	34,53 - 40,88	4,42	17,10	129,67	124,7
М42	14,07 - 22,07	4,47	17,12	139,57	141,9

Литература

1. Блинов Л. Н. Халькогенидные стеклообразные материалы в Политехническом: монография / Л. Н. Блинов, А. В. Семенча. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – 280 с
2. Kurushkin, M.V., Markov, V.A., Semencha, A.V., Mikhailov, M.D., Tverjanovich, A.S. Shakhmin, A.L., & Andreeva, V.D. (2018). Determination of As SI-Sb SI glasses short-range structure via Raman spectroscopy, XPS and XRD. *International Journal of Applied Glass Science*, 9(1), 85-89
3. Тюриков К.С., Тюрикова И.А. Практикум по методам измерения свойств материалов микросистемной техники: учебно-методическое пособие. – 202

С56 Низкоуровневые камеры и их применения в приборах наблюдения

Сафонов В.В., Свибович И.В.

*Унитарное предприятие «НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО». Минск. Беларусь.
safonov@lemt.by*

Low-level cameras and their applications in surveillance devices Safonau U., Svibovich I.

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-389

Low-level television (TV) cameras are being considered to support security services. Their capabilities are shown and technical parameters are described. Purpose of the work: to show the use of low-level TV cameras of various types to ensure security. Methods used: comparative scientific and technical analysis of the capabilities of TV cameras and issues of their use in security systems.

В настоящее время большой интерес проявляется к созданию низкоуровневых телевизионных (ТВ) камер для специальной техники [1-5]. На основе таких ТВ камер созданы высокоэффективные низкоуровневые телевизионные системы [1-3]. Они предназначены для широкого применения в службах обеспечения безопасности: охрана объектов методом патрулирования или стационарным методом, обеспечения работы пограничных, таможенных служб, служб МВД и МЧС, для работы бойцов спецподразделений, разведки.

На унитарном предприятии «НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО» успешно разрабатываются многоканальные наблюдательные комплексы для охраны периметра. Обычно эти комплексы включают в себя тепловизионный, телевизионный (дневной), дальномерный каналы. Однако с появлением и развитием низкоуровневых камер стал вопрос о целесообразности их применения в подобных комплексах. С целью ответа на эти вопросы были проведены испытания (лабораторные и полевые) низкоуровневых камер. Краткие результаты полевых испытаний приведены на изображениях ниже.

Испытания проводились безлунной ночью (освещенность 0,001-0,002 Лк). В испытаниях участвовали камеры нескольких производителей. Заявленные параметры минимальной рабочей освещенности камер были одинаковы и составляли RGB: 0.001Lux Mono: 0.0001Lux.

Полевые испытания показали:

– только одна из испытываемых камер соответствует заявленным характеристикам (камера 1) и может быть применена в многоканальных наблюдательных комплексах. При этом сохраняется плавность изображения в 25 Гц.

– к выбору низкоуровневых камер следует подходить особо внимательно ввиду большого их количества и зачастую плохого качества (заявленные параметры зачастую всегда намного хуже реальных). Допустимо применение только проверенных в реальных условиях камер;

– оптимальным решением для наблюдения за местностью в условиях низкой освещенности будет комбинированное изображение с низкоуровневой камеры и с тепловизионной камеры в режиме оконтуривания изображения (так называемый FUSION).

Исследования и испытания, описанные в данных тезисах доклада, выполнены в рамках гранта Президента Республики Беларусь.

Литература

1. Волков В. Г. Сверхвысококочувствительные телевизионные системы // Специальная техника. 2002. № 4. С. 2-11.
2. Волков В. Г. Телевизионные камеры для спецтехники // Спецтехника и связь. 2009. № 1. С. 2-11.
3. Волков В. Г. Цифровые приборы ночного видения // Спецтехника и связь. 2013. № 3. С. 13.
4. Гейхман И. Л., Волков В. Г. Видение и безопасность. – М.: Новости. 2009. – 840 с.
5. Волков В. Г., Гиндин П. Д. Техническое зрение. Инновации. – М.: Техносфера, 2014. – 840 с.

С57 Двухканальный монокуляр с призмой Пехана

Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А.

АО «Московский завод «САПФИР». Москва. Россия. volkvik2009@yandex.ru

Two-channel monocular with pehan prism

Volkov V.G., Gindin P.D., Karpov V.V., Kuznetsov S.A.

Joint Stock Company "Moscow Plant "SAPPHIRE", Moscow, Russia

E-mail: volkvik2009@yandex.ru.

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-392

A two-channel monocular with a Pehan prism is considered, coupled with a digital photo or video camera, containing thermal imaging and television channels that provide night surveillance, as well as photo and video shooting.

В современной технике видения широко используются дневные монокуляры [1]. Они не обладают возможностью работы ночью, а также фото- и видеосъемки наблюдаемых объектов. Для устранения этих недостатков предлагается новый двухканальный монокуляр с призмой Пехана, блок-схема которого представлена на рис.1 [2].

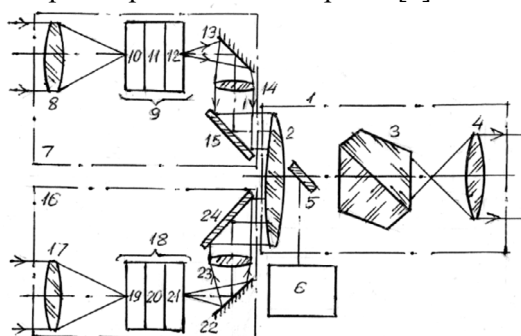


Рис.1. Блок-схема монокуляра

Монокуляр - дневная зрительная труба 1 состоит из дневного объектива 2, призмы Пехана 3 и окуляра 4. На выходе центральной части дневного объектива 2 установлено 1-е дихроичное плоское зеркало (ДПЗ) 5, оптически сопрягающее центральную часть объектива 2 с цифровой фото- или видеокамерой 6. Устройство содержит тепловизионный (ТВП) канал 7, состоящий из инфракрасного (ИК) объектива 8, ТВП модуля 9, содержащего микроболометрическую матрицу (МБМ) фотодетекторов 10, электронный блок 11 и 1-й OLED дисплей 12, 1-го плоского зеркала (ПЗ) 13 и 1-го проекционного объектива 14, оптически сопрягающего экран 1-го OLED дисплея 12 через 1-е ПЗ 13 и 2-е ДПЗ 15 с правой периферической частью объектива 2. Устройство содержит также низкоуровневый телевизионный (ТВ) канал 16. Он состоит из ТВ объектива 17, ТВ модуля 18, содержащего матрицу ПЗС 19, видеосуилитель 20 и 2-й OLED дисплей 21, 2-го ПЗ 22 и 2-го

проекционного объектива 23, оптически сопрягающего экран 2-го OLED дисплея 21 через 2-е ПЗ 22 и 3-е ДПЗ 24 с левой периферической частью объектива 2.

1-е ДПЗ 5 пропускает в области спектра 0,38 – 0,78 мкм и отражает в области спектра 0,79 – 1,1 мкм (рабочая область спектра цифровой фото- или видеокамеры). 2-е 15 и 3-е 24 ДПЗ пропускают в области спектра 0,38 – 0,78 мкм и отражают в области спектра 0,53 – 0,56 мкм. ИК объектив 8 и МБМ фотодетекторов 9 работают в области спектра 8 – 12 мкм. ТВ объектив 17 и матрица ПЗС 19 работают в области спектра 0,4 – 1,1 мкм. Монокуляр 1 работает в области спектра 0,38 – 0,78 мкм. Экраны 1-го 12 и 2-го 21 OLED дисплеев работают в области спектра 0,53 – 0,56 мкм.

При работе днем свет Солнца, отраженный от объекта наблюдения и окружающего его фона, приходит в объектив 2 монокуляра 1. Объектив 2 создает перевернутое изображение объекта и фона. Изображение с помощью призмы Пехана 3 оборачивается на 180°, становится прямым и переносится в окуляр 4. Оператор наблюдает через него изображение. Одновременно центральная часть объектива 2 создает изображение с помощью ПЗ 5 на матрице ПЗС (или КМОП) цифровой фото- или видеокамеры 6. Она обеспечивает фото- или видеосъемку регистрируемого изображения.

При работе ночью в условиях нормальной прозрачности атмосферы и нормированного уровня естественной ночной освещенности $E_{НО} \geq 3 \times 10^{-3}$ лк функционирует низкоуровневый ТВ канал 16. Излучение звезд и Луны, определяющее уровень $E_{НО}$, отражается от объекта, фона и приходит в ТВ объектив 17. Он создает изображение объекта и фона на матрице ПЗС 19 ТВ модуля 18. Изображение преобразуется в матрице ПЗС 19 в видеосигнал, который передается в видеоусилитель 20, где усиливается и обрабатывается в реальном масштабе времени. Видеосигнал с выхода видеоусилителя 20 передается во 2-й OLED дисплей 21. На его экране создается видимое изображение. Оно с помощью 2-го ПЗ 22 передается во 2-й проекционный объектив 23, который через 3-е ДПЗ 24 передает изображение на вход левой периферической части дневного объектива 2. При этом зрительная труба 1 создает изображение, наблюдаемое оператором через окуляр 4.

При работе ночью в условиях пониженной прозрачности атмосферы (дымка, туман, дождь, снегопад и др.) и при пониженном уровне $E_{НО} < 3 \times 10^{-3}$ лк функционирует ТВП канал 7. Собственное тепловое излучение объекта и фона приходит в ИК объектив 8. Он создает тепловое изображение объекта и фона на МБМ фотодетекторов 10 ТВП модуля 9. МБМ фотодетекторов 10 преобразует изображение в видеосигнал. Он поступает в электронный блок 11, где усиливается и обрабатывается в реальном масштабе времени, а затем передается в 1-ый OLED дисплей 12. На его экране создается видимое изображение. Оно с помощью 1-го ПЗ 13 передается в 1-ый проекционный объектив 14. Он через 2-е ДПЗ 15 передает изображение на вход

правой периферической части объектива 2. При этом монокуляр создает изображение, наблюдаемое оператором через окуляр 4.

Литература

1. Волков В.Г., Гиндин П.Д. Техническое зрение. Инновации. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2014. – 840 с.

2. Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А. Монокуляр. Патент на полезную модель №203794 по заявке №2021101185 с приоритетом от 21.01.2021 г.

С58 Дневно-ночной бинокль с зеркально-линзовым объективом

Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А.

АО «Московский завод «САПФИР». Москва, Россия. volkvik2009@yandex.ru

Day-night binoculars with a mirror lens

Volkov V.G., Gindin P.D., Karpov V.V., Kuznetsov S.A.

Joint Stock Company "Moscow Plant "SAPPHIRE", Moscow, Russia

E-mail: volkvik2009@yandex.ru.

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-395

The day-night binoculars made on the basis of a mirror-lens lens and containing a day binocular, a night channel based on an image intensifier, a thermal imaging channel and an OLED display connected to a radio transmitter with a pin antenna are considered. Binoculars provide all-weather and round-the-clock operation, as well as prompt receipt of service information.

Современные псевдобинокулярные ночные бинокли (НБ) [1] не обеспечивают работу днем, ночью при пониженном уровне естественной ночной освещенности (ЕНО) и при пониженной прозрачности атмосферы, не обеспечивают получение служебной информации. Для устранения этих недостатков предлагается дневно-ночной бинокль, блок-схема которого представлена рис.1 [2].

Фотокатод электронно-оптического преобразователя (ЭОП) 2 работает в области спектра 0,4 – 0,9 мкм, а экран ЭОП 2 – 0,53 – 0,56 мкм. 1-е правое дихроичное плоское зеркало (ДПЗ) 17 и 1-е левое ДПЗ 18 пропускают 50% в области 0,38 – 0,78 мкм и отражают 50% в области 0,53 – 0,56 мкм. 2-е правое 33 и 2-е левое 34 ДПЗ пропускают 50% в области 0,38 – 0,78 мкм и в ней

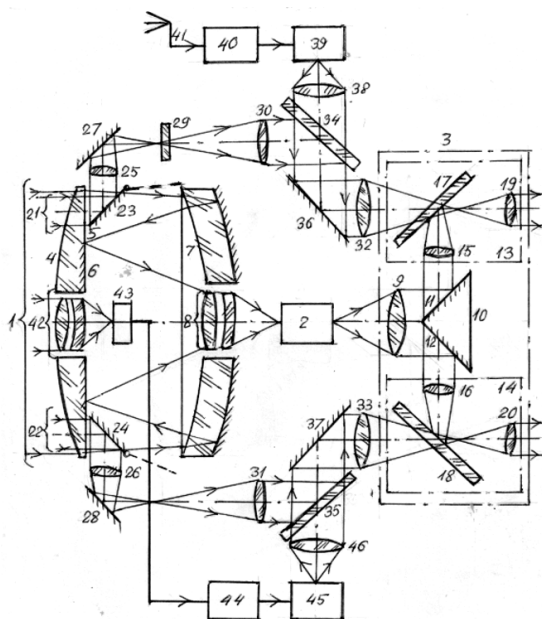


Рис.1. Блок-схема дневно-ночного бинокля

отражают 50%. ИК объектив 42 и микроболометрическая матрица (МБМ) фотодетекторов 43 работают в области спектра 8 – 12 мкм.

При работе днем свет от Солнца, отразившись от объекта наблюдения и окружающего его фона, приходит в правый и левый дневные каналы. 1-е элементы 21 (22) дневного линзового объектива совместно со 2-ми элементами 25 (26) этого объектива создают в перевернутое изображение объекта и фона. При этом свет отражается от 1-го откидного плоского зеркала (ПЗ) 23 (24), установленного в ходе лучей, и 2-го ПЗ 27 (28). 1-й компонент 30 (31) оборачивающей системы совместно со 2-м ее компонентом 32 (33) создает прямое изображение. При этом свет отражается от 2-го ДПЗ 34 (35), 3-го ПЗ 36 (37) и проходит через 1-е ДПЗ 17 (18). Правый дневной канал выполнен под правый глаз, а левый дневной канал – под левый глаз оператора. Он наблюдает стереоскопическое изображение объекта и фона, обнаруживает объект и распознает его, а также наблюдает сетку 29, с помощью которой он визирует на объект и грубо измеряет дальность до него методом «с базой на цели».

При работе ночью в условиях нормированного уровня ЕНО $\geq 3 \times 10^{-3}$ лк и при нормальной прозрачности атмосферы функционирует ночной канал. Излучение звезд и Луны, определяющее уровень ЕНО, отражается от объекта, фона и передается в ночной канал. Его зеркально-линзовый объектив 1 создает изображение на фотокатоде ЭОП 2. Откидные ПЗ 23 и 24 откинута и выведены из хода лучей. Излучение проходит при этом через линзу-зеркало 4, отражается от зеркала Манжена 7, зеркально отражающей поверхности 6 и проходит через линзовый компенсатор полевых аберраций 8, который создает изображение на фотокатод ЭОП 2. Он преобразует изображение в видимое и усиливает его по яркости. Изображение с экрана ЭОП 2 передается в псевдобинокулярную окулярную систему 3 (1-й проекционный объектив 9, зеркальные грани 11 и 12 призмы 10, правая 13 и левая 14 окулярные ветви, правый 15 и левый 16 промежуточные объективы, правый 19 и левый 20 окуляры). При этом излучение отражается от 1-х ДПЗ 17 и 18 соответственно. Оператор осуществляет поиск, обнаружение и распознавание объекта наблюдения.

При падении ЕНО ниже ЕНО $< 3 \times 10^{-3}$ лк и (или) при пониженной прозрачности атмосферы работает тепловизионный канал. Собственное тепловое излучение объекта и фона приходит в ИК объектив 42. Он создает тепловое изображение на МБМ фотодетекторов 43. Видеосигнал с ее выхода усиливается и обрабатывается в реальном масштабе времени в электронном блоке 44 и передается во 2-й OLED- дисплей 45. 3-й проекционный объектив 46 передает изображение с экрана OLED- дисплея 45 через левое 1-е ДПЗ 35 и 3-е ПЗ 37 во 2-й компонент 33. Он передает изображение через левое ДПЗ 18 в левый окуляра 20. Оператор, осуществляя поиск, обнаружение и распознавание объекта.

Для получения служебной информации используется радиоприемное устройство (РПУ) 40. Его штыревая антенна 41 воспринимает радиоволновые

сигналы, посылаемые с диспетчерского пункта и содержащие служебную информацию. РПУ 40 преобразует радиоволновое излучение в видеосигнал, передаваемый в 1-й OLED- дисплей 39, на экране которого формируется изображение служебной информации. Оно с помощью 1-го проекционного объектива 38 передается через 1-е ДПЗ 17, 3-е ПЗ 36 и 2-й линзовый компонент 32 в окуляр 19. Через него оператор считывает служебную информацию.

Литература

1. Волков В.Г., Гиндин П.Д. Техническое зрение. Инновации. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2014. – 840 с.
2. Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А. Дневно-ночной бинокль с зеркально-линзовым объективом. Патент на полезную модель №206707 по заявке №2021119679 с приоритетом от 06.07.21 г.

С59 Дневно-ночной бинокль

Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А.

АО «Московский завод «САПФИР». Москва, Россия. volkvik2009@yandex.ru

Day-night binoculars

Volkov V.G., Gindin P.D., Karpov V.V., Kuznetsov S.A.

Joint Stock Company "Moscow Plant "SAPPHIRE", Moscow, Russia,
volkvik2009@yandex.ru.

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-398

Day-night binoculars are considered, in which, due to the use of active-pulse and thermal imaging channels, operation is ensured both during the day and at night under unfavorable vision conditions.

Дневно-ночные бинокли могут работать как днем, так и ночью [1]. Но они неработоспособны при неблагоприятных условиях видения (дымка, туман, дождь, снегопад, воздействие мощных световых помех и др.). Для устранения этих недостатков предлагается дневно-ночной бинокль, блок-схема которого представлена на рис. 1 [2].

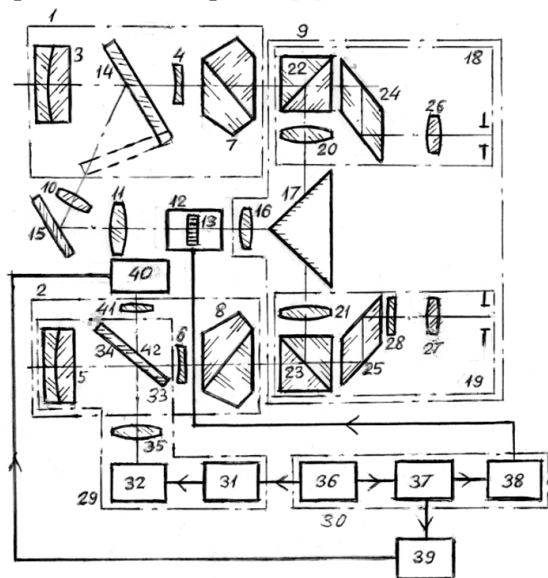


Рис.1. Блок-схема дневно-ночного бинокля

Фотокатод электронно-оптического преобразователя (ЭОП) 12 работает в области спектра 0,4 – 0,9 мкм, а его экран – в области 0,53 – 0,56 мкм. Импульсный лазерный полупроводниковый излучатель (ИЛПИ) 32 работает на длине волны 0,85 мкм. Дихроичное плоское зеркало (ДФЗ) 33 пропускает в области 0,38 – 0,78 мкм, отражает на длине волны 0,85 мкм от своей 1-й оптической поверхности 34, а также отражает излучение цифрового дисплея (ЦД) 40 на длине волны 0,63 мкм от своей 2-й оптической поверхности 42.

При работе днем функционируют дневные каналы 1 и 2. Свет Солнца, отраженный от объекта

наблюдения и окружающего его фона, приходит в объектив 3, 4 (5, 6) дневных каналов 1 (2). Эти объективы создают перевернутое изображение объекта и фона. Оно оборачивается на 180° с помощью призмы Пехана 7 (8), становится прямым и передается в псевдобинокулярную окулярную систему 9. С помощью проекционного объектива 16, двугранной зеркальной призмы 17, промежуточных объективов 20 (21), куб-призмы 22 (23) и ромб-призмы 24 (25) изображение передается в окуляр 26 (27). При этом откидное плоское зеркало (ПЗ) 14 выведено из хода лучей в положение «пунктир». За счет наличия в фокальной плоскости окуляра 27 сетки 28 оператор может грубо измерять дальность методом «с базой на цели».

При работе бинокля ночью в пассивном режиме излучение звезд и Луны, определяющее уровень естественной ночной освещенности, отражается от объекта наблюдения и окружающего его фона, приходит в трехкомпонентный ночной объектив 3, 10, 11, затем отражается от откидного плоского зеркала 14, которое введено в ход лучей (сплошная линия), потом отражается от ПЗ 15, и на фотокатоде ЭОП 12 с помощью объектива 3, 10, 11 создается изображение объекта и фона. ЭОП 12 преобразует изображение в видимое и усиливает его по яркости с помощью микроканальной пластины (МКП) 13. Изображение с экрана ЭОП 12 с помощью проекционного объектива 16 передается в окулярную систему 9. При работе на сравнительно малых дальностях оператор обнаруживает и распознает объект, а при работе на повышенных дальностях осуществляет только его поиск и обнаружение.

В последнем случае для распознавания объекта бинокль переключается в активно-импульсный (АИ) режим работы. При этом работает импульсный лазерный осветитель (ИЛО) 29 и блок стробирования (БС) 30, задающий генератор импульсов (ЗГИ) 36, блок накачки 31, ИЛПИ 32, объектив формирования излучения (ОФИ) (элементы 35, 34, 5), ночной объектив (элементы 3, 14, 10, 15, 11), ЭОП 12, МКП 13, формирователь стробирующих импульсов (ФСИ) 38, блок регулируемой задержки (БРЗ) 37. В нем формируется плавно регулируемая задержка синхроимпульсов со второго выхода ЗГИ 36 по отношению к синхроимпульсам с первого выхода ЗГИ 36. Сигнал с выхода БРЗ 37 подается в ФСИ 38. Он управляет МКП 13. ЭОП 12 преобразует изображение в видимое и усиливает его по яркости с помощью МКП 13. Более подробно работа бинокля в АИ режиме изложена в работе [2]. Далее изображение наблюдается оператором через псевдобинокулярную окулярную систему 9 так, как это было описано выше. Оператор распознает изображение объекта и измеряет дальность до него за счет подачи со 2-го выхода БРЗ 37 задержки, соответствующей дальности до объекта, на измеритель временных интервалов (ИВИ 39). Он измеряет времени задержки и преобразует этот временной интервал в цифровой сигнал, который поступает в ЦД 40. На своем табло он показывает значение дальности до объекта. Изображение с экрана ЦД 40 с помощью вспомогательного линзового

компонента 41 передается через 2-ю отражающую поверхность 42 ДПЗ 33 на 2-й компонент 6 объектива дневного канала (элементы 5, 6) и далее через призму вторую призму Пехана 8, куб-призму 23, ромб-призму 25, сетку 28 и окуляр 27 в глаз оператора, считывающего значение дальности до объекта.

Литература

1. Волков В.Г., Гиндин П.Д. Техническое зрение. Инновации. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2014. – 840 с.

2. Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А. Дневно-ночной бинокль с зеркально-линзовым объективом. Патент на полезную модель №214062 по заявке №2022121702 с приоритетом от 10.08.22 г.

С60 Дневно-ночной бинокль-дальномер

Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А.

АО «Московский завод «САПФИР». Москва. Россия. volkvik2009@yandex.ru

Day-night binoculars-rangefinder

Volkov V.G., Gindin P.D., Karpov V.V., Kuznetsov S.A.

Joint Stock Company "Moscow Plant "SAPPHIRE", Moscow, Russia,
volkvik2009@yandex.ru.

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-401

Day-night binoculars are a rangefinder containing two identical daytime, night TV and laser rangefinder channels. Binoculars provide day and night operation and accurate measurement of the distance to the object of observation.

Существующие дневные бинокли [1] не обеспечивают возможность работы ночью и точного измерения дальности до объекта наблюдения. Для устранения этих недостатков предлагается новый дневно-ночной бинокль-дальномер, блок-схема которого представлена на рис.1 [2].

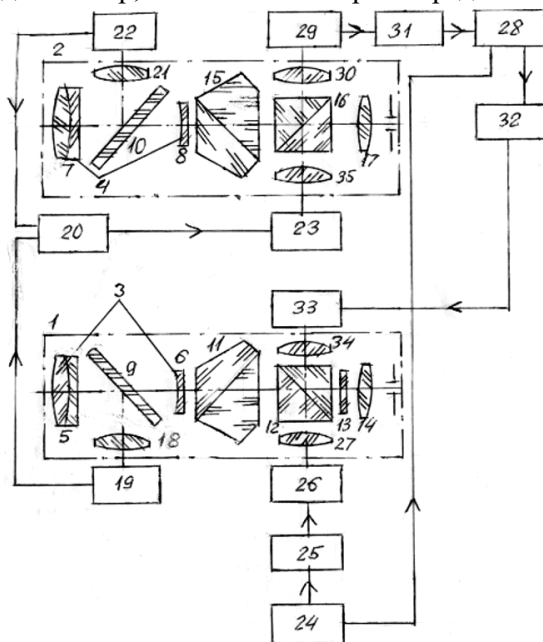


Рис.1. Блок-схема дневно-ночного бинокля-дальномера

фона и приходит в каждый из ДК 1 и 2. Двухкомпонентный объектив 3 1-го ДК

Бинокль состоит из двух идентичных дневных каналов (ДК) 1 и 2, ночного ТВ канала (НТВК) и лазерно-дальномерного канала (ЛДК). 1-е дихроичное плоское зеркало (ДПЗ) 9 пропускает в области спектра $0,38 - 0,78$ мкм и на длине волны $1,55$ мкм, но отражает в области спектра $0,9 - 1,7$ мкм, 2-е ДПЗ 10 пропускает в области спектра $0,38 - 0,78$ мкм и на длине волны $1,55$ мкм, но отражает в области $0,8 - 1,1$ мкм. 1-я ТВ камера 19 работает в области $0,8 - 1,7$ мкм, а 2-я ТВ камера 22 – в области $0,8 - 1,1$ мкм.

При работе днем свет от Солнца отражается от объекта наблюдения, окружающего его

1 (компоненты 5, 6) создает перевернутое изображение, которое оборачивается на 180° с помощью 1-й призмы Пехана 11, становится прямым и переносится через 1-ю куб-призму 12 в 1-й окуляр 14. Аналогичным образом двухкомпонентный объектив 4 ДК 2 (компоненты 7 и 8) создает перевернутое изображение. Оно оборачивается на 180° с помощью 2-й призмы Пехана 15 и становится прямым. Изображение через 2-ю куб-призму 16 передается во 2-й окуляр 17. Оператор наблюдает через ДК 1 и 2 изображение объекта и фона, а также изображение сетки, по которой можно грубо определить дальность до объекта.

При работе ЛДК с 1-го выхода задающего генератора импульсов (ЗГИ) 24 подается запускающий синхроимпульс на вход блока накачки 25. Он возбуждает (ИЛПИ) 26, генерирующий импульсы излучения на длине волны 1,55 мкм. Оно передается во 3-й компонент 27, затем отражается от гипотенузной грани 1-й куб-призмы 12, проходит через 1-ю призму Пехана 11 и коллимируется объективом 3 совместно с 3-м компонентом 27, создавая на объекте «точечное» пятно подсвета. Импульсы излучения, отраженные от объекта, приходят во 2-й объектив 4 (компоненты 7, 8), проходят через 2-ю призму Пехана 15, отражаются от гипотенузной грани 2-й куб-призмы 16 и концентрируются с помощью 2-го объектива 4 и 4-го компонента 30 на фотоприемном устройстве (ФПУ 29). Электрические сигналы с его выхода усиливаются в усилителе 31 и поступают на 2-й вход схемы сравнения 28. На ее 1-й вход одновременно с подачей синхроимпульсов с 1-го выхода ЗГИ 24 приходят синхроимпульсы со 2-го его выхода. В схеме сравнения 28 формируется разность между этими синхроимпульсами. Она пропорциональна дальности до объекта. Сигнал от схемы сравнения 28 поступает в измеритель временных интервалов (ИВИ) 32, где измеряется и преобразуется в цифровую форму. Этот сигнал поступает в цифровой светодиодный дисплей (ЦСД) 33, где преобразуется в цифровое значение дальности. Оно с табло ЦСД 33 с помощью 5-го компонента 34 передается в 1-ю куб-призму 12, отражается от ее гипотенузной грани и переносится в 1-й окуляр 14.

При работе ночью работает ночной ТВ канал. Излучение от звезд и Луны отражается от объекта и фона и приходит в 1-й объектив 3. Его 1-й линзовый компонент 5 передает излучение на 1-е ДПЗ 9, отражается от него и с помощью 1-го линзового компонента 18 создает изображение объекта и фона на матрице фотодетекторов на основе соединения InGaAs 1-й ТВ камеры 19, работающей в области спектра 0,9 – 1,7 мкм и допускающей наблюдение при пониженной прозрачности атмосферы (дымка, туман, дождь, снегопад и др.). Видеосигнал с 1-й ТВ камеры 19 поступает на 1-й вход блока электронной обработки (БЭО) 20. Видеосигнал со 2-й ТВ камеры 22 приходит на 2-й вход БЭО 20. Он с помощью встроенного микропроцессора обрабатывает изображение с обеих ТВ камер 19 и 22 и создает единое интегрированное изображение. Оно передается в OLED дисплей 23 с выхода БЭО 20. Экран OLED дисплея 23

оптически сопряжен со 2-м окуляром 17, через который оператор наблюдает изображение. Экран OLED дисплея 23 работает в области спектра 0,53 – 0,56 мкм, цифровой светодиодный дисплей 33 – в области спектра 0,63 – 0,69 мкм, а гипотенузная грань 1-й куб-призмы 12 пропускает излучение в области спектра 0,38 – 0,78 мкм, отражает излучение в области 0,63 – 0,69 мкм и на длине волны 1,55 мкм. Гипотенузная грань 2-й куб-призмы 16 пропускает излучение в области спектра 0,38 – 0,78 мкм, отражает в области 0,53 – 0,56 мкм и на длине волны 1,55 мкм.

Литература

1. Волков В.Г., Гиндин П.Д. Техническое зрение. Инновации. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2014. – 840 с.
2. Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А. Дневно-ночной бинокль - дальномер. Патент на полезную модель №192268 по заявке №2019120238 с приоритетом от 28.06.2019 г.

С61 Комбинированный бинокль

Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А.

АО «Московский завод «САПФИР». Москва. Россия. volkvik2009@yandex.ru

Combined binoculars

Volkov V.G., Gindin P.D., Karpov V.V., Kuznetsov S.A.

Joint Stock Company "Moscow Plant "SAPPHIRE", Moscow, Russia,
volkvik2009@yandex.ru.

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-404

The combined binoculars providing round-the-clock and all-weather surveillance are considered due to the presence of daytime, thermal imaging and television channels.

Современные дневные и ночные бинокли не обеспечивает видение ночью как при нормальной, так и при пониженной прозрачности атмосферы [1]. Для устранения этого недостатка предложен новый комбинированный бинокль (КБ), блок-схеме которого представлена на рис. 1 [2].

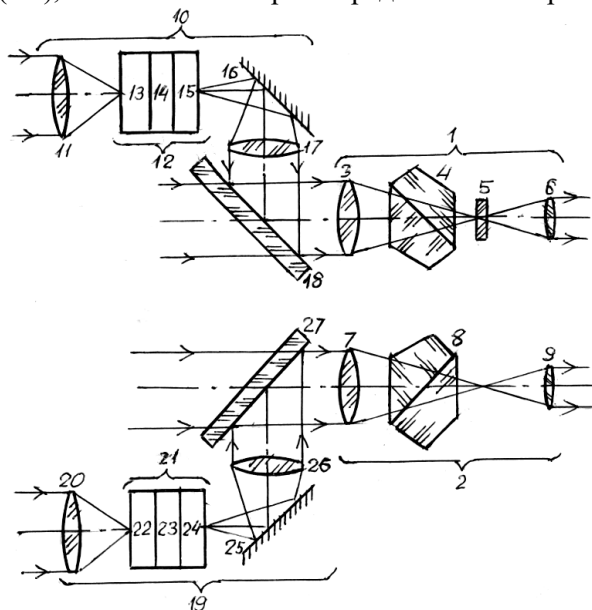


Рис. 1. Блок-схема КБ

КБ содержит первый 1 и второй 2 дневные каналы. Все оптические элементы 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 пропускают в области спектра 0,38 – 0,78 мкм, ИК объектив 11 пропускает в области спектра 8 – 12 мкм, в которой работает микроболومترная матрица (МБМ) фотодетекторов (ТВП) модуля 12, экраны первого 15 и второго 24 OLED-дисплеев работают в области 0,53 – 0,56 мкм, телевизионный объектив 20 пропускает в области 0,4 – 1,1 мкм, в которой работает

матрица ПЗС 22. 1-е дихроичное плоское зеркало (ДПЗ) 18 и 2-е ДПЗ 27 пропускают в области 0,38 – 0,78 мкм и отражают в области 0,53 – 0,56 мкм.

При работе днем солнечный свет, отраженный от объекта наблюдения, окружающего его фона, проходит через 1-е ДПЗ 18 и приходит в 1-й дневной объектив 3. Он создает перевернутое изображение объекта и фона. Оно переносится через 1-ю призму Пехана 4, которая оборачивает изображение на 180° , в 1-й окуляр 6, через который изображение наблюдается правым глазом. Сетка 5 позволяет точно визировать оптическую ось на объект наблюдения и грубо измерить дальность до объекта.

Одновременно солнечный свет, отраженный от объекта наблюдения и окружающего его фона, проходит через 2-е ДПЗ 27 и приходит в 2-й дневной объектив 7. Он создает перевернутое изображение объекта и фона. Оно переносится через 2-ю призму Пехана 8, которая оборачивает изображение на 180° , во 2-й окуляр 9, через который изображение наблюдается левым глазом. В результате оператор наблюдает двумя глазами стереоскопическое изображение.

При работе ночью в условиях нормальной прозрачности атмосферы и при нормированном уровне естественной ночной освещенности $E_{НО} \geq 3 \times 10^{-3}$ лк работает ТВ канал 19. Излучение звезд и Луны, определяющее уровень ЕНО, отражается от объекта, фона и приходит в ТВ объектив 20. Он создает изображение на матрице ПЗС 22 ТВ модуля 21. Матрица ПЗС 22 преобразует изображение в видеосигнал. Он поступает в видеосуилитель 23, где усиливается и обрабатывается. С его выхода видеосигнал передается во 2-й OLED-дисплей 24. Изображение с его экрана через 2-е плоское зеркало 25 и 2-й проекционный объектив 26 передается на 2-е ДПЗ 27, отражается от него и приходит во 2-й дневной объектив 7, который совместно со 2-м проекционным объективом 26 переносит изображение во 2-й дневной объектив 7. Далее устройство работает так, как это было описано выше.

При работе ночью в условиях пониженной прозрачности атмосферы (дымка, туман, дождь, снегопад и др.) и при пониженном уровне $E_{НО} \leq 3 \times 10^{-3}$ лк работает ТВП канал 10. Собственное тепловое излучение объекта и фона приходит в ИК объектив 11. Он создает тепловое изображение объекта и фона на МБМ фотодетекторов 13 ТВП модуля 12. МБМ фотодетекторов 13 преобразует изображение в видеосигнал. Он поступает в электронный блок 14, где усиливается и обрабатывается. С его выхода видеосигнал поступает в 1-й OLED-дисплей 15. Изображение с его экрана через 1-е плоское зеркало 16 и 1-й проекционный объектив 17 передается на 1-е ДПЗ 18, отражается от него и приходит в 1-й дневной объектив 3, который совместно с первым проекционным объективом 17 переносит изображение в объектив 3. Далее устройство работает так, как это было описано выше.

Таким образом, за счет дополнительного введенного ТВП и ТВ каналов обеспечивается видение ночью как при нормальной, так и при пониженной прозрачности атмосферы.

Литература

1. Волков В.Г., Гиндин П.Д. Техническое зрение. Инновации. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2014. – 840 с.
2. Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А. Комбинированный бинокль. Патент на полезную модель №212412 по заявке №2022113709 с приоритетом от 23.05.22 г.

С62 Многоспектральный импульсный лазерный осветитель

Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А.

АО «Московский завод «САПФИР». Москва, Россия. volkvik2009@yandex.ru

Multispectral pulsed laser illuminator

Volkov V.G., Gindin P.D., Karpov V.V., Kuznetsov S.A.

Joint Stock Company "Moscow Plant "SAPPHIRE", Moscow, Russia,

E-mail: volkvik2009@yandex.ru.

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-407

A multispectral pulsed laser illuminator with advanced functionality for operation at 4 wavelengths in terrestrial and underwater conditions is considered. The illuminator is made on the basis of semiconductor laser emitters and a solid-state lasers.

В технике ночного видения применяют импульсные лазерные осветители (ИЛО) [1]. ИЛО излучают на одной или 2-х длинах волн - 0,85 мкм и (или) 0,9 мкм. Но для работы ИЛО под водой и в наземных условиях при сильно пониженной прозрачности атмосферы (туман, дождь и др.) необходимы длины волн соответственно 0,53 мкм и 1,55 мкм. Для генерации излучения на 4-х длинах волн предложен ИЛО, блок-схема которого представлена на рис.1 [2].

В 1-м оптико-электронном канале (ОЭК) 1-й импульсный лазерный полупроводниковый излучатель (ИЛПИ) 3 излучает на длине волны 1,0 мкм, а 1-я активная среда (ИАГ:Но) 8 – на 1,7 мкм. 1-й нелинейный удвоитель частоты (НУЧ) 9 преобразует 1,7 мкм в 0,85 мкм. 2-й ИЛПИ 18 излучает на 1,55 мкм. 1-е дихроичное плоское зеркало (ДПЗ) 16 пропускает на 0,85 мкм и отражает на 1,55 мкм. Во 2-м ОЭК 2 3-й ИЛПИ 20

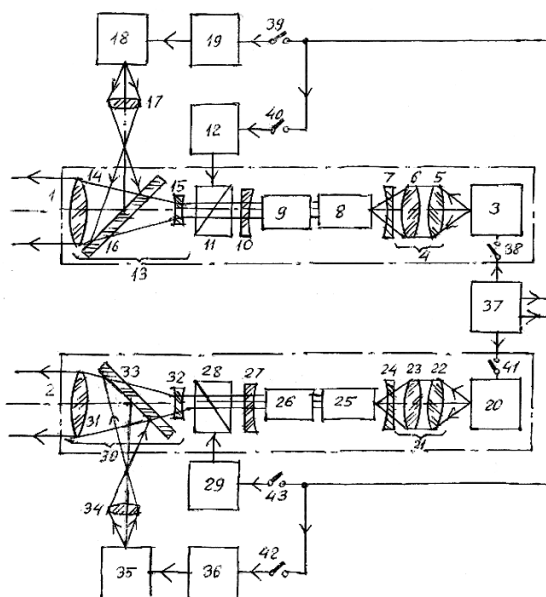


Рис.1. Блок-схема ИЛО

излучает на длине волны 1,0 мкм, а 1-я активная среда (ИАГ:Но) 8 – на 1,7 мкм. 1-й нелинейный удвоитель частоты (НУЧ) 9 преобразует 1,7 мкм в 0,85 мкм. 2-й ИЛПИ 18 излучает на 1,55 мкм. 1-е дихроичное плоское зеркало (ДПЗ) 16 пропускает на 0,85 мкм и отражает на 1,55 мкм. Во 2-м ОЭК 2 3-й ИЛПИ 20

излучает на 0,82 мкм, 2-я активная среда 25 (ИАГ:Nd³⁺) - на 1,06 мкм. 2-й НУЧ 26 преобразует 1,06 мкм в 0,53 мкм. 4-й ИЛПИ 35 излучает на 0,9 мкм. 2-е ДПЗ 33 пропускает 0,53 мкм и отражает на 0,9 мкм.

При работе ИЛО в наземных условиях и при нормальной прозрачности атмосферы включается блок накачки 37. Через 5-й выключатель 42 на 2-й умножитель частоты (УЧ) 36 подается ток накачки с частотой 50 Гц и длительностью 100 нс. 2-й УЧ 36 преобразует частоту 50 Гц в частоту 5 КГц. Она подается на 4-й ИЛПИ 35, излучающий импульсы на 0,9 мкм и с длительностью 100 нс. Они направляются 2-м промежуточным объективом (ПО) 34 на 2-е ДПЗ 33, отражаются от него, а элемент 31 создает на объекте пятно подсвета.

Для работы при пониженной прозрачности атмосферы выключатели 38, 40 – 43 выключены. Через 2-й выключатель 39 включается 2-й ИЛПИ 18. На него подается ток накачки с УЧ 19, который преобразует частоту 50 Гц в частоту 5 кГц. 2-й ИЛПИ 18 излучает на 1,55 мкм. 1-й ПО 17 направляет их излучение на 1-е ДПЗ 16, от него они отражаются, а 1-й элемент 14 создает пятно подсвета.

При работе в тех же условиях и при воздействии мощных световых помех замыкается 1-й выключатель 38 (выключатели 39, 41 – 43 выключены) включается 1-й ИЛПИ 3 и работает от тока накачки, подаваемого с 1-го выхода блока накачки 37. 1-й ИЛПИ 3 генерирует 1,0 мкм. Оно через 1-ю оптику переноса (ОП) 4 (линзовые компоненты 5 и 6) передается через 1-е зеркало резонатора 7 на входной торец 1-й активной среды 8, генерирующей излучение 1,7 мкм. Оно подается на 1-й НУЧ 9, где 1,7 мкм преобразуется в 0,85 мкм. Далее излучение поступает через 1-е выходное зеркало резонатора 10 в 1-й модулятор добротности 11. При этом с блока накачки 37 через 3-й выключатель 40 (выключатели 39, 42 выключены) поступает излучение свободной генерации с частотой 50 Гц на вход 1-го блока управления модулятора добротности 12. Он генерирует импульсы напряжения, подаваемые на вход 1-го модулятора добротности 11. Он преобразует излучение в импульсы модулированной добротности с частотой 50 Гц и длительностью 20 нс. При этом скважность работы лазерного осветителя становится равной 10⁶, в то время как у 1-го ИЛПИ 3 и 2-го ИЛПИ 18 она равна лишь 2x10³. В такое же число крат ослабляется мощность световой помехи. Далее излучение с помощью 1-й обращенной телескопической системы (ОТС) Галилея 13 (ее 1-го элемента 14 и 2-го элемента 15) создает на объекте пятно подсвета.

При работе в подводных условиях на длине волны 0,53 мкм с 3-го выхода блока накачки 37 через замкнутый 4-й выключатель 41 (выключатели 39, 40, 42, 43 выключены) подается импульсный ток накачки на 3-й ИЛПИ 20, генерирующий излучение на длине волны 0,82 мкм. Оно чрез 2-ю оптику переноса 21 (блоки 22 и 23) передается через 2-е входное зеркало 24 на входной торец 2-й активной среды 25, излучающей на длине волны 1,06 мкм с передачей

на 2-й НУЧ 26, где длина волны 1,06 мкм преобразуется в 0,53 мкм. Далее излучение проходит через 2-е зеркало резонатора 27 во 2-й модулятор добротности 28. Далее устройство работает так, как это было описано выше.

Литература

1. Волков В.Г., Гиндин П.Д. Техническое зрение. Инновации. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2014. – 840 с.

2. Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А. Многоспектральный импульсный лазерный осветитель. Патент на полезную модель №212132 по заявке №2022109488 с приоритетом от 11.04.2022 г.

С63 Многофункциональный бинокль дневного и ночного видения

Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А.

АО «Московский завод «САПФИР». Москва. Россия. volkvik2009@yandex.ru

Multifunctional day and night vision binoculars

Volkov V.G., Gindin P.D., Karpov V.V., Kuznetsov S.A.

Joint Stock Company "Moscow Plant "SAPPHIRE", Moscow, Russia,
volkvik2009@yandex.ru.

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-410

A multifunctional day and night vision binoculars is considered, providing round-the-clock and all-weather surveillance with a range measurement function.

Известны псевдобинокулярные бинокли ночного видения (БНВ) [1]. В частности, тепловизионный (ТВП) псевдобинокулярный БНВ состоит из инфракрасного (ИК) объектива, ТВП модуля, содержащего матрицу микроболометров (МБМ), электронный блок (ЭБ) и OLED дисплей, псевдобинокулярной окулярной системы. ТВП БНВ обеспечивает круглосуточное и всепогодное наблюдение, но имеет недостаточно высокое качество изображения и не обеспечивает точного измерения дальности. Для устранения этих недостатков предложен многофункциональный бинокль дневного и ночного видения [2]. Его блок-схема представлена на рис.1.

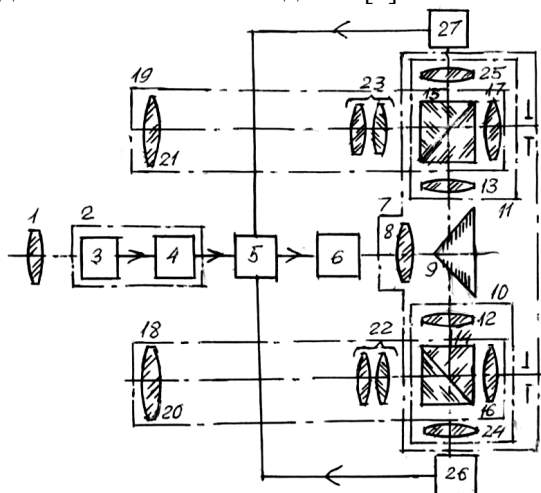


Рис.1. Блок-схема БНВ

Здесь 1 - ИК объектив, 2 - ТВП модуль, 3 - МБМ, 4 - ЭБ, 5 - блок электронной обработки (БЭО), 6 - OLED дисплей, 7 - псевдобинокулярная окулярная система, 8 - 1-й проекционный объектив, 9 - зеркальная двугранная призма, 10 - левая, 11 - правая окулярные ветви, 12, 13 - промежуточные объективы (ПО), 14 - 1-я куб-призма, 15 - 2-я куб-призмы, 16, 17 - окуляры, 18 - левый, 19 - правый дневные каналы (ДК), 20 - 1-й, 21 - 2-й дневные объективы, 22 - 1-я, 23 - 2-я линзовые

оборачивающие системы. Гипотенузная грань каждой куб-призмы 14 и 15

выполнена дихроичной.

МБМ 3 работает в области спектра 8 – 12 мкм, экран OLED дисплея 6 – в области 0,53 – 0,56 мкм, матрица фотоприемников на основе InGaAs 1-й ТВ камеры 26 – в области 0,8 – 1,7 мкм, матрица ПЗС на базе Si 2-й ТВ камеры 27 – в области 0,8 – 1,1 мкм. Гипотенузная грань 1-й куб-призмы 14 пропускает в области 0,38 – 0,78 мкм, отражает в области 0,53 – 0,56 мкм и в области 0,8 – 1,7 мкм. Гипотенузная грань 2-й куб-призмы 15 пропускает в области 0,38 – 0,78 мкм, отражает в области 0,8 – 1,1 мкм и в области 0,53 – 0,56 мкм.

При работе днем в условиях нормальной прозрачности атмосферы работают дневные каналы 18 и 19. Солнечный свет, отраженный от объекта наблюдения и окружающего его фона, приходит в 1-й объектив 20 и во 2-й объектив 21. Они создают перевернутое изображение объекта и фона. 1-я 22 и 2-я 23 линзовые оборачивающие системы (ОС) передают изображение объекта и фона через 1-ю куб-призму 14 и через 2-ю куб-призму 15 в 1-й окуляр 16 и 2-й окуляр 17, создавая прямое изображение.

При работе ночью в условиях любой прозрачности атмосферы излучение звезд и Луны, отражаясь от объекта и фона, приходит в ДК 18 и 19. Их 1-й 20 и 2-й 21 объективы создают перевернутое изображение. Оно передается в 1-ю 22 и во 2-ю 23 линзовые ОС, создающие прямое изображение, передаваемое через отражающую гипотенузную грань 1-й куб-призмы 14 и 2-й куб-призмы 15 в предметную плоскость 2-го 24 и 3-го 25 проекционного объектива, совпадающей для 2-го 24 объектива с матрицей фотоприемников на базе InGaAs 1-й ТВ камеры 26. При этом излучение в области 0,8 - 1,7 мкм отражается от гипотенузной грани первой куб-призмы 14. Видеосигнал с выхода 1-й ТВ камеры 26 поступает на 2-й вход БЭО 5. 3-й объектив 25 сфокусирован на матрицу ПЗС 2-й ТВ камеры 27. Видеосигнал с ее выхода поступает на 3-й вход БЭО 5, создающий с помощью встроенного микропроцессора единое интегрированное изображение из изображений 1-й ТВ камеры 26 и 2-й ТВ камеры 27, которое наблюдается с экрана OLED дисплея 6 через окулярную систему 7.

При работе ночью в условиях пониженной прозрачности атмосферы тепловое излучение объекта и фона поступает в ИК объектив 1. Он создает ИК изображение объекта и фона на МБМ 3. Видеосигнал с ее выхода обрабатывается и усиливается в ЭБ 4. Сигнал с его выхода поступает на 1-й вход БЭО 5. В нем с помощью микропроцессора суммируются видеосигналы с выходов БЭ 4, 1-й ТВ камеры 26 и 2-й ТВ камеры 27 в единое интегрированное изображение на экране OLED дисплея 6 и наблюдается с него через окулярную систему 7. При этом 1-й ПО 8 передает изображение с экрана OLED дисплея 6 на зеркальные грани призмы 9. Она разделяет изображение, поступающие соответственно на ПО 12 и 13. Они передают изображение в окуляры 16 и 17. При этом излучение отражается от гипотенузных граней куб-призмы 14 и 15. Изображение наблюдается через окулярную систему 7.

Литература

1. Волков В.Г., Гиндин П.Д. Техническое зрение. Инновации. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2014. – 840 с.
2. Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А. Многофункциональный бинокль дневного и ночного видения. Патент на полезную модель №219322 по заявке №2023106169 с приоритетом от 16.03.2023 г.

С64 Многофункциональный ночной бинокль

Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А.

АО «Московский завод «САПФИР». Москва. Россия. volkvik2009@yandex.ru

Multifunctional night binoculars

Volkov V.G., Gindin P.D., Karpov V.V., Kuznetsov S.A.
*Joint Stock Company "Moscow Plant "SAPPHIRE", Moscow, Russia,
volkvik2009@yandex.ru.*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-413

A multifunctional night binoculars (MNB) containing a thermal imaging channel, a night channel based on an image intensifier, and a night SWIR channel are considered. The MNB works at any level of natural illumination and atmospheric transparency, and also transmits the image remotely.

Современные ночные бинокли (НБ), например, НБ F11TS 14 фирмы ПТТ (США) [1], состоят из тепловизионного (ТВП) канала и ночного канала (НК) на базе электронно-оптического преобразователя (ЭОП). В ТВП канал можно было наблюдать изображение объекта наблюдения при низких уровнях естественной ночной освещенности (ЕНО) и в известной степени при пониженной прозрачности атмосферы, а в НК – линию горизонта и фон, окружающий объект, которые плохо видны в ТВП канал. Недостатками НБ является его неспособность работать в УФ области спектра, ограниченность возможностей ТВП канала при пониженной прозрачности атмосферы, а также неспособность передать изображение дистанционно. Для устранения этих недостатков предложен многофункциональный ночной бинокль (МНБ) [2]. Его блок-схема которого дана на рис. 1.

При работе НК при нормальной прозрачности атмосферы и нормированном уровне естественной ночной освещенности $E_{НО} \geq 3 \times 10^{-3}$ лк, определяемом излучением звезд и Луны, это излучение отражается от объекта наблюдения, фона и приходит в объектив 1, создающий изображение на фотокатоде ЭОП 2. Он преобразует изображение в видимое и усиливает его по яркости. Изображение с экрана ЭОП 2 передается через 1-ю куб-призму 3 в 1-й окуляр 4.

При необходимости наблюдения люминесцентного свечения в атмосфере в УФ области спектра из-за радиоактивного заражения местности и для наблюдения видимого в УФ области спектра коронного разряда ЛЭП работает УФ канал. Его УФ объектив 5 создает изображение источника УФ излучения на фотокатоде ЭОП 6. Он преобразует изображение в видимое и

усиливает его по яркости. Оно с помощью 1-й оптики переноса (ОП) 7 (ее 1-го 8 и 2-го 10 компонентов) передается в окуляр 4.

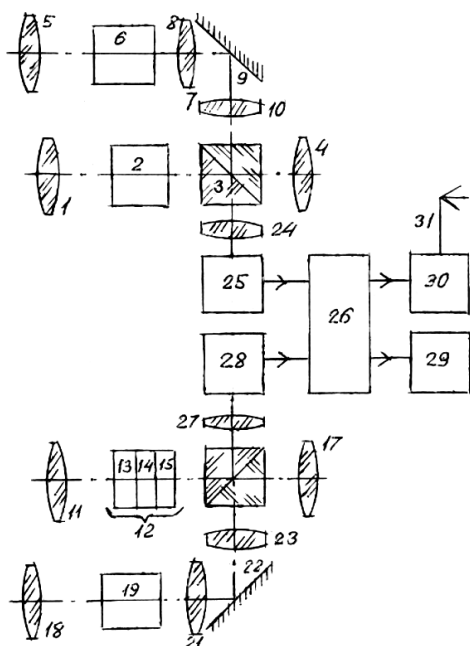


Рис.1. Блок-схема МНБ

объектив 11 создает тепловое изображение на микроболومترической матрице (МБМ) 13 фотодетекторов ТВП модуля 12. Видеосигнал с выхода МБМ 13 поступает в электронный блок (ЭБ) 14, где видеосигнал обрабатывается и усиливается. Он поступает в OLED дисплей 15. Изображение с экрана OLED дисплея 15 передается через 2-ю куб-призму 16 во 2-й окуляр 17. Поскольку ТВП канал сравнительно плохо создает изображение фона и линии горизонта, то работает и SWIR (Shot Wave InfraRed) канал при пониженной прозрачности атмосферы, когда ТВП канал мало эффективен, а также при пониженном уровне ЕНО. SWIR объектив 18 SWIR канала создает изображение на InGaAs фотокатоде SWIR ЭОП 19. Он преобразует изображение в видимое и усиливает его по яркости. Изображение с экрана SWIR ЭОП 19 с помощью 2-ой ОП 20 (ее 1-го 21 и 2-го 23 компонентов) передается во 2-й окуляр 17, отражается от 2-го ПЗ 22 и гипотенузной грани куб-призмы 16. Т.к. экран OLED дисплея 15 излучает в области спектра 0,53 – 0,56 мкм, а экран SWIR ЭОП 19 - в области 0,63 – 0,69 мкм, то гипотенузная грань 2-й куб-призмы 16 имеет дихроичное покрытие, пропускающее в области 0,53 – 0,56 мкм и отражающее в области 0,63 – 0,69 мкм. Оба изображения накладываются одно на другое, а мозг суммирует изображения, создавая единую картинку. Для повышения качества

Излучение отражается от 1-го плоского зеркала (ПЗ) 9, гипотенузной грани 1-й куб-призмы 3 и передается в 1-й окуляр 4. Оба изображения накладываются одно на другое. Это позволяет определить, где находится зараженный участок местности. Т.к. экран ЭОП 2 излучает в области спектра 0,53 – 0,56 мкм, а экран ЭОП 6 – в области 0,63 – 0,69 мкм, то гипотенузная грань первой куб-призмы 3 имеет дихроичное покрытие, пропускающее в области 0,53 - 0,56 мкм и отражающее в области 0,63 – 0,69 мкм.

При пониженной прозрачности атмосферы и низком уровне ЕНО $< 3 \times 10^{-3}$ лк работает ТВП канал в области спектра 8 – 12 мкм. В его ИК объектив 11 приходит тепловое излучение объекта и фона. ИК

изображения с экранов ЭОП 2 и ЭОП 6 с помощью 1-го проекционного объектива (ПО) 24 оно передаются в 1-ю ТВ камеру 25. Ее видеосигнал передается на 1-й вход блока электронной обработки (БЭО) 26. Изображения с экрана OLED дисплея 15 и с экрана SWIR ЭОП 19 с помощью 2-го ПО 27 передается во 2-ю ТВ камеру 28. Ее видеосигнал с передается на 2-й вход БЭО 26. Он с помощью микропроцессора формирует единое интегрированное изображение. Оно с 1-го выхода БЭО 26 поступает в ЖК дисплей 29. Видеосигнал со 2-го выхода БЭО 26 поступает в радиопередатчик 30. Он дистанционно передает изображение с помощью штыревой антенны 31.

Литература

1. Волков В.Г., Гиндин П.Д. Техническое зрение. Инновации. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2014. – 840 с.

2. Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А. Многофункциональный ночной бинокль. Патент на полезную модель №217677 по заявке №2023104262 с приоритетом от 27.02.2023 г.

С65 Прибор наблюдения-дальномер

Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А.

АО «Московский завод «САПФИР». Москва. Россия. volkvik2009@yandex.ru

Surveillance device-rangefinder

Volkov V.G., Gindin P.D., Karpov V.V., Kuznetsov S.A.

Joint Stock Company "Moscow Plant "SAPPHIRE", Moscow, Russia,
volkvik2009@yandex.ru

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-416

An observation device is considered-a rangefinder with two interchangeable magnifications, containing a day, night and laser rangefinder channel with the ability to accurately measure the range.

Дневно-ночные приборы наблюдения, как правило, не обеспечивают сменного увеличения и точного измерения дальности до объекта наблюдения [1]. Для устранения этих недостатков предлагается прибор-наблюдения-дальномер (ПНД) с блок-схемой по рис.1 [2].

1-е дихроичное плоское зеркало (ДПЗ) 13 пропускает на длине волны 1,55 мкм, отражает в области спектра 1,2 – 1,7 мкм и 0,38 – 0,78 мкм. 2-е ДПЗ 16 пропускает в области 0,8 – 1,1 мкм, отражает на длине волны 1,55 мкм и в области 1,2 – 1,7 мкм. 3-е ДПЗ 20 пропускает в 0,8 – 1,1 мкм и отражает на

1,55 мкм. Длиннофокусный объектив 12 работает в 0,38 – 0,78 мкм. Дневной объектив 4 работает в 1,2 – 1,7 мкм и 0,38 – 0,78 мкм. Гипотенузная грань куб-призмы 5 пропускает 50% в 0,8 – 1,7 мкм, отражает 50% и пропускает 50% в

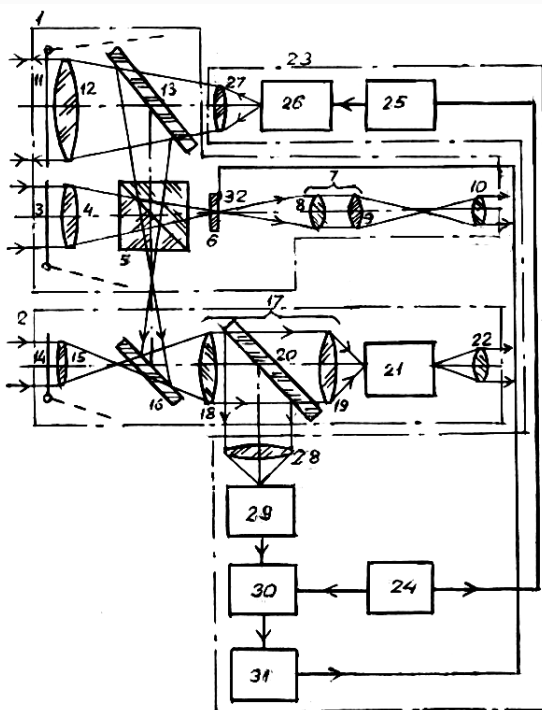


Рис.1. Блок-схема ПНД

0,38 – 0,78 мкм, а также отражает на 1,55 мкм. 3-е ДПЗ 20 пропускает в 0,8 – 1,7 мкм и отражает на 1,55 мкм. Ночной объектив 15 пропускает в 0,8 – 1,1 мкм. Фотокатод электронно-оптического преобразователя (ЭОП) 21 работает в 0,8 – 1,7 мкм, а его экран – 0,53 – 0,56 мкм. Импульсный лазерный полупроводниковый излучатель (ИЛПИ) 25 излучает на 1,55 мкм. Фотоприемное устройство (ФПУ) 29 работает в 0,8 – 1,7 мкм. Светодиодный индикатор дальности (СИД) излучает на длине волны 0,63 мкм. При работе днем свет Солнца отражается от объекта наблюдения, фона и приходит в дневной объектив 4. При этом 1-я откидная заслонка 3 откинута, а 2-я откидная заслонка 11 введена в ход лучей. Объектив 4 создает перевернутое изображение на сетке 6. Оно проходит через куб-призму 5 в 1-ю оборачивающей системы (ОС) 7 (в ее 8 и 9 компоненты), становится прямым и передается в 1-й окуляр 10 для поиска и обнаружения объекта. Сетка 6 служит для визирования на объект. Т.к. объектив 4 - короткофокусный и широкоугольный, то и дневной канал 1 с этим объективом 4 имеет небольшое увеличение, но зато большой угол поля зрения. Это повышает улучшает поиск и обнаружение объекта. Для его распознавания заслонка 3 введена в ход лучей, а заслонка 11 - выведена. При этом вместо объектива 4 работает длиннофокусный объектив 12. Он создает изображение на сетке 6, отражающееся от 1-го ДПЗ 13 и гипотенузной грани куб-призмы 5. Далее ПНД работает так, как это было описано выше. Объектив 12 имеет большее увеличение, чем объектив 4, и это улучшает распознавание объекта. При работе ПНД ночью с целью поиска и обнаружения объекта излучение звезд и Луны отражается от объекта, фона и приходит в ночной объектив 15. Заслонки 3 и 1 введены в ход лучей, а заслонка 14 - выведена. Объектив 15 создает изображение объекта и фона, передаваемое в 1-й элемент 18 2-й ОС 17. Оно проходит через 2-е ДПЗ 16, через элемент 18, ДПЗ 20. Затем 2-й элемент 19 создает изображение на фотокатод ЭОП 21. Он преобразует изображение в видимое и усиливает его по яркости. Ночной объектив 15 - короткофокусный и широкоугольный. Поэтому ночной канал 2 с ним имеет малое увеличение, но большой угол поля зрения для улучшения поиска и обнаружения объекта. При работе ПНД ночью работает объектив 12. Заслонка 11 открыта, а заслонки 3 и 14 введены в ход лучей. Объектив 12 создает изображение, передаваемое в элемент 18 2-й ОС 17, отражается от 1-го ДПЗ 13, проходит через куб-призму 5 и отражается от 2-го ДПЗ 16. Далее ПНД работает так, как это было описано выше. Поскольку объектив 12 имеет большее увеличение, объектив 15, то это улучшает распознавание объекта. При работе лазерно-дальномерного канала 23 заслонка 3 введена в ход лучей, а заслонка 14 - выведена. С 1-го выхода задающего генератора импульсов (ЗГИ) 24 синхриимпульсы поступают в блок накачки 25. С его выхода импульсы тока накачки, подаются на ИЛПИ 26, излучающий на 1,55 мкм. На выходе 1-го проекционного объектива (ПО) 27 излучение проходит через 1-е ДПЗ 13 в объектив 12, создает на объекте пятно подсвета, отражается от него и черз

ночной объектив 15 приходит в 1-й элемент 18, 2-е ДПЗ 16, 2-й элемент 19, 3-е ДПЗ 20, отражается от него и приходит через 2-й ПО 28 на ФПУ 29. Электрические импульсы с его выхода подаются на 2-й вход схемы сравнения (СС) 30. ЗГИ 24 также подает синхроимпульсы на 1-й вход СС 30. В ней сравнивается время прихода синхроимпульсов со 2-го выхода ЗГИ 24 и время прихода импульсов с ФПУ 29. Измеренный интервал передается в измеритель временных интервалов (ИВИ) 31, измеряется и оцифруется. Сигнал с выхода ИВИ 31 передается в СИД 32, где отображается значение дальности, считываемое через 1-й окуляр 10.

Литература

1. Волков В.Г., Гиндин П.Д. Техническое зрение. Инновации. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2014. – 840 с.
2. Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А. Комбинированный бинокль. Патент на полезную модель №214061 по заявке №2022117712 с приоритетом от 30.06.22 г.

**С66 Исследование конгруэнтности базовых элементов
фотоприемников сверхвысокой размерности и микротепловизоров
для широкого спектрального диапазона. Обзор.**

Козлов А.И., Латорцева Л.А.

Сибирское отделение РАН. Новосибирск. Россия. aikozlov13@mail.ru

**Research congruence of base elements UHD FPAs and microthermal
imagers**

for wide spectral range. Review

Kozlov A.I., Latortzeva L.A.

ISP, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-419

Reviewed and basis researched the congruence of base elements ultra-high-dimension (UHD) focal-plane arrays (FPAs) and microthermal imagers for wide spectral range. Microthermo imagers protected two private patents and 28-ht original monographs. Authors: Dr. A.I. Kozlov, Dr., proff Kharlamov. Reviewed and research three variant of microthermo imagers. The mosaic UHD FPAs protected also the one private patent. All it used on advanced IT-productions and in perspective scientific studies.

Фундаментальные исследования обеспечивают создание принципиально новых прорывных технологий, а в перспективе и лидирующее положение Российской Федерации в будущем мире [1-6]. Козлов Александр Иванович, к.т.н., и Харламов Алексей Георгиевич, к.ф.-м.н., проводят самостоятельные фундаментальные исследования по наиболее перспективным направлениям, определяемым внутренней логикой развития науки и потребностью генерации новых научных знаний. Указанные исследования обладают расширяющейся индустриальной сферой применения в передовых IT-производствах и перспективных научных исследованиях [1]. Фундаментальные результаты могут быть применены для создания многоспектральных фотоприемников сверхвысокой размерности и мозаичных излучателей, а также микротепловизоров [1-6]. Однако на начальном этапе конкретные изделия и приборы не прогнозируют. Тепловизоры и микротепловизоры защищены двумя частными патентами на изобретения и 28 оригинальными монографиями, авторы: Козлов А.И. и Харламов А.Г.; 2022-23 гг. Козлов Александр Иванович – к.т.н., с.н.с., эксперт РАН, автор монографий, дизайнер, издатель, научный руководитель; Харламов Алексей Георгиевич – к.ф.-м.н., с.н.с., эксперт РАН, доцент ННГУ, соавтор, соруководитель и научный

редактор монографий [1-6].

Тепловизионное динамическое видеозеркало.

Микротепловизор выполняется на одном кристалле монолитного фотоприемника с оптическим выходом, состоящем из бескорпусного монолитного фотоприемника в виде одного бескорпусного кристалла мультиплексора с дополнительно интегрированным на него массивом фотодетекторов и излучателей (рисунок 1) [1-6].

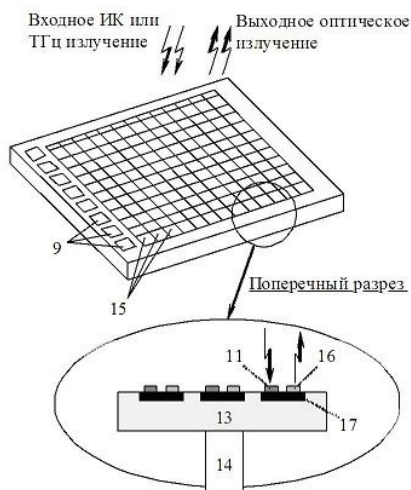


Рис. 1 Общий вид и поперечный разрез микротепловизора с оптическим выходом на одном кристалле монолитного фотоприемника, состоящего из матрицы фотодетекторов и излучателей на кристалле мультиплексора: 9 – контактные площадки, 15 – фотодетекторы, излучатели и ячейки считывания, 11 – ИК или ТГц фотодетектор, 16 – излучатель, 17 – ячейка считывания и излучения, 13 – мультиплексор, 14 – блок охлаждения [3].

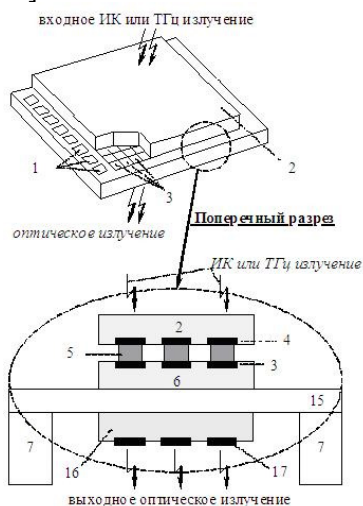


Рис. 2. Общий вид и поперечный разрез тепловизора с оптическим выходом на основе гибридного фотоприемника в виде гибридной микросборки двух кристаллов: матрицы фотодетекторов и кристалла мультиплексора с дополнительным, 3-им кристаллом массива излучателей: 1 – контактные площадки, 2 – кристалл матрицы фотодетекторов, 3 – ячейки считывания, 4 – ИК или ТГц фотодетектор, 5 – индиевые микростолбы, 6 – кристалл мультиплексора, 7 – блок охлаждения, 15 – хладопровод, например, из меди, 16 – дополнительный кристалл массива излучателей, 17 – излучатель [4].

Тепловизионный динамический преобразователь спектра сигнала.

Микротепловизор выполняется на основе бескорпусного гибридного фотоприемника с оптическим выходом в виде бескорпусной гибридной

микросборки двух кристаллов: кристалла матрицы фотодетекторов и кристалла мультиплексора и с дополнительным (третьим) кристаллом массива излучателей; кристалл матрицы фотодетекторов и третий дополнительный кристалл массива излучателей содержат матрицы $n \times m$ фотодетекторов и излучателей (рисунок 2) [1-6].

Литература

1. А. И. Козлов, М. А. Демьяненко, В. Н. Овсяк и др. Мозаичный фотоприемник с предельной эффективностью преобразования изображений: конструкции и способы его изготовления (варианты) // Патент РФ №2731460. Оpubл. 03.09.2020г., Бюл. №25.

2. A.I. Kozlov, A.G. Kharlamov. Matching of NETD and congruence of UHD FPAs based on QWIP. Publ. 19th, reproc. - NSK. Publ.: A.I. Kozlov, 2023. - Eng. - 78p., il., ISBN: 978-5-6048119-8-6.

3. Козлов А. И. Тепловизионное динамическое видеозеркало // Патент РФ № RU2765883C1. Оpubл. 04.02.2022 г. Бюл. № 4.

4. Козлов А. И. Тепловизионный динамический преобразователь спектра сигнала // Патент РФ № RU2766053C1. Оpubл. 07.02.2022г. Бюл. № 4.

5. Козлов А. И., Харламов А. Г. Обзор-исследование: Искусство нано- и микрофотоэлектроники для конгруэнтности базовых элементов при создании фотоприемников сверхвысокой размерности и микротепловизоров в разных спектральных диапазонах. Монография. Изд.: 3-е, дополн. и перераб. – Новосибирск. Изд.: "Козлов Александр Иванович". 2023. – 180 с., ил., ISBN: 978-5-6049312-1-9.

6. Козлов А. И., Харламов А. Г. Искусство нано- и микроэлектроники в фотоприемниках / микротепловизорах. Конгруэнтность базовых элементов в фотоприемниках сверхвысокой размерности и микротепловизорах разных диапазонов. Обзор. Изд.: 4-е, дополн. и перераб. – Европейский союз. Республика Молдова. Кишинев. Изд. дом: "Lambert Academic Publishing". 2023. - 196 с., ил., ISBN: 978-620-6-79212-3.

С67 Способ деселекции элементных цепочек, максимально снижающих отношение сигнал/шум каналов инфракрасного фоточувствительного модуля с режимом временной задержки и накопления

Гапонов О.В., Бурлаков В.И., Савцов В.В., Соловьев Д.Г., Романов Е.К.

ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия. gapn@yandex.ru

A method for deselection of element circuits, which most decrease the signal-to-noise ratio in channels of an infrared focal plane array with time delay integration mode

Gaponov O.V., Burlakov V.I., Savtsov V.V., Solovyov D.G., Romanov E.K.

Orion R&P Association, JSC. Moscow. Russia. E-mail: gapn@yandex.ru

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-422

The claimed method relates to defect detection tool in infrared (IR) focal-plane array (FPA) with time delay integration mode. The method is used to detect and deselect defective components of the channels in the IR FPA – element circuits that most decrease the signal-to-noise ratio (SNR) of the channels in the IR FPA. This method increases the SNR in the channels of the IR FPA, which increases the ability of the IR FPA to detect low-power optical signals in the IR range. This result is ensured by the fact that the detection of defective element circuits is achieved by processing signals and noises of all element circuits using the criterion for detecting circuits that most reduce the SNR in the channels of an IR FPA. The main difference between the criterion used in the claimed method and the criterion used in the known methods [1-3] is that it is a more general rule for detecting defective circuits, since the criterion analyzes the effect of all circuits on the SNR in the channels of an IR FPA, including circuits of overly noisy elements.

Предлагаемый (заявляемый) в данной работе способ деселекции (отключения) элементных цепочек, максимально снижающих отношение сигнал/шум (ОСШ) каналов инфракрасного (ИК) фоточувствительного модуля (ФМ) произвольного формата $N \times M$ с режимом временной задержки и накопления (ВЗН), включает в себя:

- 1) установку абсолютно чёрного тела (АЧТ) на оптической оси с модулятором оптического излучения и ИК ФМ;
- 2) облучение ИК ФМ посредством АЧТ;
- 3) многократные прямые измерения напряжений сигналов и шумов цепочек каналов ИК ФМ;
- 4) расчёты средних арифметических значений напряжений сигналов и дисперсий напряжений шумов цепочек каналов ИК ФМ;
- 5) выявление (детектирование) цепочек каналов ИК ФМ, подлежащих

отключению;

б) отключение выявленных цепочек каналов ИК ФМ.

Предлагаемый способ деселекции отличается от известных способов [1-3] деселекции максимально шумящих цепочек каналов ИК ФМ с режимом ВЗН тем, что выявление цепочек каналов ИК ФМ, подлежащих отключению, осуществляют обработкой средних арифметических значений напряжений сигналов и дисперсий напряжений шумов цепочек каналов ИК ФМ с помощью критерия детектирования цепочек, максимально снижающих ОСШ каналов ИК ФМ произвольного формата $N \times M$ с режимом ВЗН. Указанный критерий является новым и записывается в виде соотношения (1):

$$\max_{1 \leq i \leq N} \left(\frac{\left(\sum_{i=1}^N (s_{i,j} - \sqrt{\sigma_{i,j}}) \right) - (s_{i,j} - \sqrt{\sigma_{i,j}})}{\left| \left(\sum_{i=1}^N \sigma_{i,j} \right) - \sigma_{i,j} \right|} \right) > \frac{\sum_{i=1}^N (s_{i,j} - \sqrt{\sigma_{i,j}})}{\left| \sum_{i=1}^N \sigma_{i,j} \right|}, \quad (1)$$

где i – целый положительный номер цепочки j -ого канала ИК ФМ, $1 \leq i \leq N$;

j – целый положительный номер канала ИК ФМ, $1 \leq j \leq M$;

N – целое положительное число цепочек в каждом канале ИК ФМ, $N \geq 2$;

M – целое положительное число каналов ИК ФМ;

$s_{i,j}$ – среднее арифметическое значение напряжения сигнала i -ой цепочки j -ого канала ИК ФМ;

$\sigma_{i,j}$ – дисперсия напряжения шума i -ой цепочки j -ого канала ИК ФМ.

Считается, что i -ая цепочка j -ого канала ИК ФМ максимально снижает ОСШ j -ого канала ИК ФМ, если левая часть соотношения (1) больше его правой части.

После обработки средних арифметических значений напряжений сигналов и дисперсий напряжений шумов всех цепочек каждого канала ИК ФМ произвольного формата $N \times M$ с режимом ВЗН детектируют и деселектируют цепочки, максимально снижающие ОСШ каналов ИК ФМ.

Сравнение предлагаемого способа деселекции с наиболее близким способом деселекции максимально шумящих цепочек [1] выполняется сопоставлением ОСШ после деселекции предлагаемым способом и ОСШ после деселекции наиболее близким способом [1]. Сопоставление проводилось экспериментальным оцениванием поканального распределения разницы между ОСШ после деселекции предлагаемым способом и ОСШ после деселекции наиболее близким способом [1]. Поканальное распределение разницы между ОСШ приведено на рис. 1. По горизонтальной оси отложены номера каналов, а по вертикальной оси отложены значения разницы между ОСШ после деселекции двумя способами в процентах от максимального значения ОСШ до

деселекции. Непрерывной линией (отмеченной цифрой 1 на рис. 1) обозначено поканальное распределение разницы между ОСШ после деселекции заявляемым способом и ОСШ после деселекции наиболее близким способом [1]. Пунктирной линией (отмеченной цифрой 2 на рис. 1) обозначено среднее арифметическое значение разницы между ОСШ после деселекции заявляемым способом и ОСШ после деселекции наиболее близким способом [1].

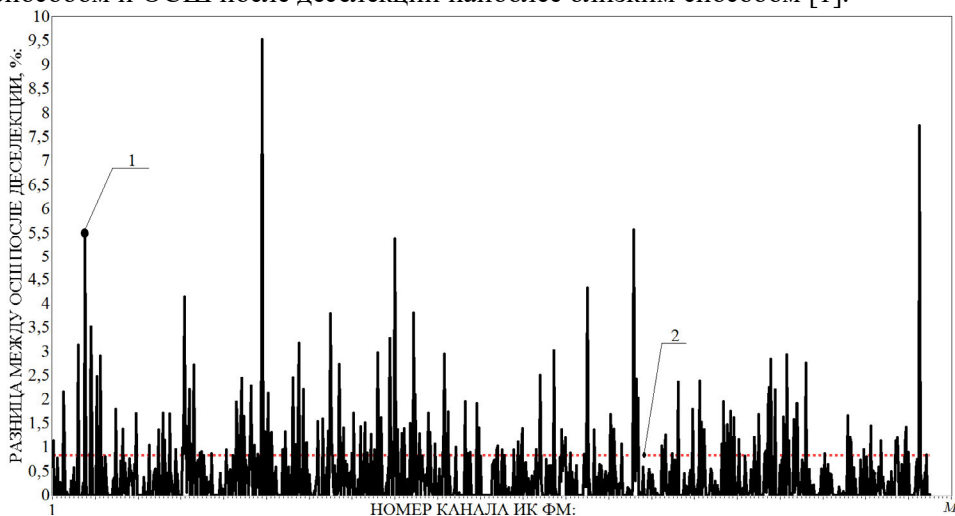


Рис. 1. Поканальное распределение разницы между ОСШ после деселекции заявляемым способом и ОСШ после деселекции наиболее близким способом

Из рис. 1 видно, что предлагаемый способ деселекции по сравнению с наиболее близким способом деселекции обеспечивает большее увеличение ОСШ каналов ИК ФМ. Данный результат достигнут за счёт применения критерия детектирования цепочек, максимально снижающих ОСШ каналов ИК ФМ. Основное отличие критерия заявляемого способа от критериев известных способов [1-3] – новый критерий оценивает влияние всех цепочек на ОСШ каналов ИК ФМ произвольного формата $N \times M$ с режимом ВЗН, а не только влияние максимально шумящих цепочек.

1. Гапонов О.В., Бурлаков В.И., Власова О.И. Способ деселекции последовательностей избыточно шумящих элементов в каналах инфракрасного фоточувствительного модуля с режимом временной задержки и накопления. Патент на изобретение № 2805779 (РФ). 2023

2. Балиев Д.Л., Болтарь К.О. // Прикладная физика. 2015. № 3. С. 57–60

3. Орлов Д.А. Программа для деселекции фоточувствительных элементов по среднеквадратическому отклонению. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019666689 (РФ). 2020

С68 Аппроксимация формы отклика многорядного фотоприёмника от малоразмерного объекта

Абилов В.В.², Громилилин Г.И.¹, Косых В.П.¹, Стрельцов В.А.², Яковенко Н.С.¹

¹*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН. Новосибирск. Россия.
Kosykh@iae.nsk.su*

²*ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Москва. Россия*

Approximation of the response shape of a multi-row photodetector from a small-sized object

Abilov V.V.², Gromilin G.I.¹, Kosykh Valery Petrovich¹, Streltsov V.A.²,
Yakovenko N.S.¹

¹*Institute of Automation and Electrometry SB RAS. Novosibirsk, Russia*

²*Orion R&P Association Inc. Moscow, Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-425

The paper discusses some parameters of models that describe scanning matrix photodetector response to the projection of a small-size hole. In image processing, the point spread function (PSF) at the input of a matrix photodetector is usually described by a Gaussian [1]. In optics, it is customary to represent a signal by the Bessel function, which describes diffraction rings [2]. To determine the coordinates of a star, astrophysicists use a generalized error distribution function with an exponent of 1.5 to approximate the signal [3]. The report compares various models from the point of view of the scatter in determining the coordinates of an object more precisely than the photodetector step and improve the signal amplitude depending on the position of the object relative to the center of the photodetector cell.

В работе рассматриваются параметры моделей, описывающих отклик сканирующего матричного фотоприёмника на проекцию отверстия малого диаметра. В области обработки изображений функция рассеяния точки (ФРТ) на входе матричного фотоприёмника описывается, как правило, гауссоидой [1]. В оптике принято представлять сигнал функцией Бесселя, которая описывает дифракционные кольца [2]. Астрофизики для более точного определения координат звезды для аппроксимации сигнала предлагают использовать обобщенную функцию распределения ошибок с показателем степени 1.5 [3]. В докладе сравниваются различные модели с точки зрения разброса определения координат объекта точнее шага фотоприёмника и выравнивания амплитуды сигнала в зависимости от положения объекта относительно центра ячейки фотоприёмника.

Сравнивались упоминаемые в литературе функции модели: Гаусса,

Бесселя, Sinc, обобщенной ошибки и их свёртки с прямоугольным окном, которое представляло бы форму ячейки [4]. С помощью функции оптимизации `fminsearch()` из пакета Matlab оценивались дробные координаты и значение максимума функции, её ширина вдоль и поперёк сканирования и постоянная времени τ дифференцирующего фильтра. Для функции обобщённой ошибки оценивался оптимальный показатель степени.

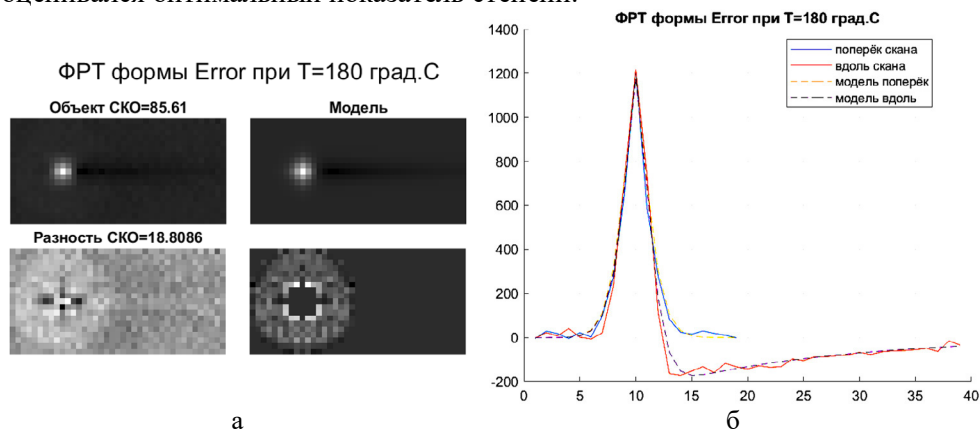


Рис. 1. Изображение (а) и профили (б) сигнала и модели обобщённой ошибки

Критерием служило среднеквадратичное отклонение модели от сигнала на фрагменте.

На рисунке 1 показаны изображения сигнала и модели для представления в виде обобщённой ошибки, а также их профили вдоль и поперёк сканирования. Оптимальный показатель степени функции колеблется в районе 1.5.

Поскольку датчик положения достаточно грубый, то за истинное положение принималось среднее значение из оценок, полученных с помощью всех моделей, и отбрасывались модели с большим отклонением от среднего. Наиболее близкие оценки координат показали модели с функциями Гаусса, Бесселя и обобщённой ошибки. Лучшее выравнивание амплитуды сигнала от положения объекта получилось у функции ошибки со свёрткой с прямоугольным окном. На рисунке 2 видно, что пеленгационная характеристика выровнялась, осталась плавная неравномерность по каналам, видимо, от неравномерной освещённости или чувствительности.

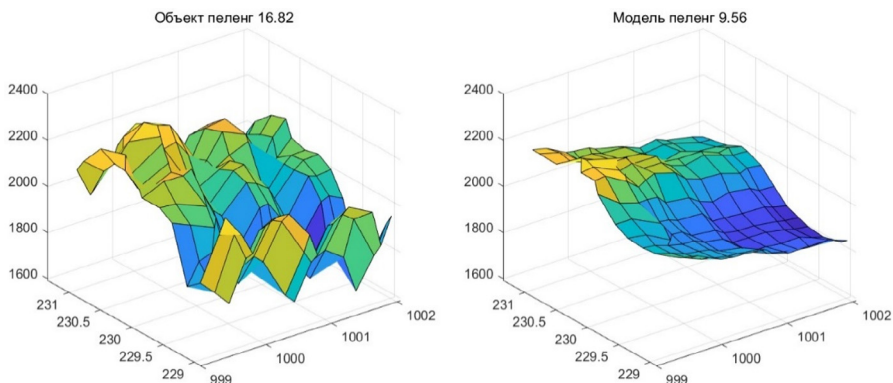


Рис. 2. Пеленгационная характеристика сигнала и модели Бесселя

Разброс координат центра модели меньше 0.06, что позволяет получать координаты объекта с дискретностью 0.1 пиксела. Неравномерность амплитуды сигнала не более 10%.

Литература

1. К. В. Козлов, А. И. Патрашин, В. А. Стрельцов. Математическая модель крупноформатного инфракрасного фотоприемного устройства при временной задержке и накоплении. *Успехи прикладной физики*, 2017, том 5, № 2.
2. М. Борн, Э. Вольф. *Основы оптики*. «Наука». Москва. 1973.
3. И. С. Осадчий. Метод субпиксельного измерения координат изображений звезд для приборов астроориентации космического базирования. *"Журнал радиоэлектроники"* № 5, 2015.
4. Ю. Люк. *Специальные математические функции и их аппроксимации*. Мир. Москва. 1980.

С69 Метод измерения расстояния оптическим дальномером

Попова И.В., Афонин А.В., Шулекин С.Ф.

АО «ГИРООПТИКА». Санкт-Петербург. Россия. shulekin@gyro.ru

Method for measuring distance with an optical rangefinder

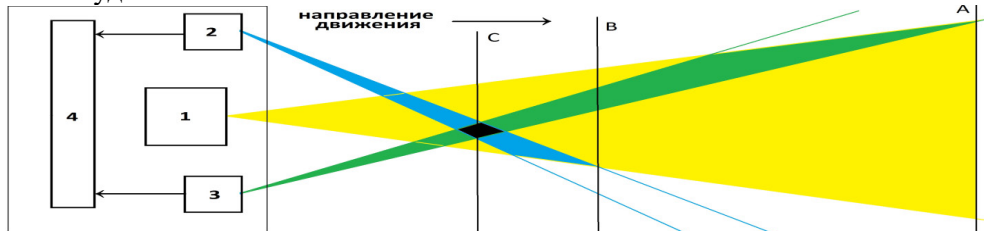
Popova Irina, Afonin Aleksandr, Shulekin Sergei

GSC «GIROOPTIKA». Saint Petersburg, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-428

The paper describes a method for measuring distance with an optical rangefinder. The method can be useful while constructing technical vision systems for self-moving objects, in order to prevent them from colliding with obstacles or other moving objects.

Задачей метода [1] является создание оптического дальномера (ОД), расположенного на движущихся беспилотных объектах с целью предупреждения столкновения их с препятствиями или другими движущимися объектами и работающего на коротких дистанциях до препятствия. Поставленная задача решается введением в ОД дополнительного фотоприемного канала. При этом оси фотоприемников (ФП) расположены под разными углами к оси источника оптического излучения. Дальность до препятствия вычисляется по совпадению амплитуд сигналов с обоих ФП.



ОД состоит из облучателя 1, двух идентичных ФП каналов (ФПК) 2 и 3, а также блока сравнения сигналов (БСС) с фотоприемников 4. Облучающее устройство 1 содержит источник оптического излучения, например, лазерный диод, и коллимирующую систему, формирующую необходимую для работы дальномера диаграмму облучения пространства перед движущимся объектом. Идентичные между собой ФПК 2 и 3 состоят из фокусирующей системы, формирующей необходимое поле зрения и линейки фотодиодов. Единичные фотодиоды линейки, при помощи системы выборки (на схеме не показана), попарно подключаются к БСС. При этом пары выбираются так, чтобы оси диаграмм мгновенных полей зрения единичных фотоприемников из линеек в ФПК 2 и 3 пересекались на расстоянии, заранее заданного значения срабатывания дальномера, находясь при этом в плоскости С, что обеспечивает обзор необходимого для безопасности пространства перед объектом. Дальность срабатывания ОД можно заранее выставить, меняя предварительные

углы установки между осями фотоприемников 2 и 3 и облучателя дальномера.

Рассмотрим работу ОД применительно к одной из пар ФП. Для других ФП пар дальномер работает аналогично. Источник генерирует оптическое излучение, которое проходя через коллимирующую систему, приобретает нужную диаграмму направленности и облучает пространство перед движущимся объектом. В случае появления на пути движения препятствия пучок оптического излучения попадает на препятствие и отражается от него в сторону ОД. Амплитуда отраженного от препятствия сигнала, при этом, зависит от коэффициента отражения препятствия, дальности до него и мощности излучателя. По мере приближения объекта к препятствию наступает момент, когда отраженный сигнал попадает в поле зрения ФП 3, что обозначено на рисунке, как расстояние А. Отраженное от препятствия излучение поступает в ФП 3, где преобразуется в электрический сигнал, который поступает в блок сравнения сигналов фотоприемных каналов 4. При дальнейшем приближении объекта к препятствию отраженное излучение попадает в ФП 2, продолжая оставаться в поле зрения первого ФП, что обозначено на рисунке, как расстояние В. При дальнейшем приближении объекта к препятствию наступает момент, когда сигналы первого и второго ФП, отраженного от препятствия сигнала, становятся одинаковыми по амплитуде. Этого обозначено на рисунке как расстояние С, которое и является минимально допустимым расстоянием от подвижного объекта до препятствия. Блок сравнения 4 определяет, что сигналы, поступающие с ФП 2 и ФП 3 равны, и выдает команду на торможение или изменение траектории движения подвижного объекта. Работа одновременно двумя ФП по одной области препятствия и сравнения их амплитуд позволяет исключить зависимость измеренной дальности от абсолютного значения отраженного от препятствия сигнала, зависящего от коэффициента отражения оптического излучения от поверхности объекта и мощности облучателя. Расстояние С можно изменять, меняя угол между осями диаграмм направленности облучателя и фотоприемников.

Таким образом, введение дополнительного ФПК, расположение осей ФПК под определенными углами относительно оси облучателя и выборка пар ФП образует локальную плоскость пересечения поля облучающего канала и полей зрения ФПК, расположенную на заданной для срабатывания ОД дальности до препятствия. Работа ФПК 2 и 3 по одной области препятствия и сравнение амплитуд сигналов позволяет исключить зависимость точности измерения дальности от коэффициента отражения света поверхностью препятствия и выходной мощности облучателя. Предлагаемый метод построения ОД позволяет отказаться от технически сложной, для работы на малых дистанциях, схемы измерения дальности путем измерения запаздывания отраженного от препятствия сигнала при сохранении необходимой точности измерений.

Попова И.В. Афонин А.В. Шулекин С.Ф. Патент RU 220 878 U1

C70 Модернизация систем ночного видения в обсерватории САО РАН

Комаров В.В., Шалдырван И.В.

*Специальная астрофизическая обсерватория РАН. пос. Нижний Архыз. КЧР.
Россия. komarov@sao.ru*

Modernization of night vision systems at the SAO RAS observatory

Komarov Vladimir V., Shaldyrvan I.V.

*Special Astrophysical Observatory of Russian Academy of Sciences (SAO RAS),
Nizhnij Arkhyz, Karachaevo-Cherkesia, Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-430

A large-scale modernization of night vision surveillance systems is being carried out at the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences. New complexes based on mass-produced special CMOS photodetectors are close in their characteristics to highly sensitive CCD matrices also mass-produced.

В Специальной Астрофизической Обсерватории САО РАН разрабатываются системы ночного видения для обеспечения наблюдений на оптических телескопах с фотометрическими и спектрополяриметрическими комплексами. За более чем двадцать лет, создано и внедрено в эксплуатацию не менее трёх десятков подсмотровых систем различных поколений фотоприёмных устройств [1]. Существующий цифровой телевизионный комплекс [2] в последнее время имеет в своём составе высокочувствительные подсмотровые и мониторинговые CCD системы, обеспечивающие сопровождение наблюдательного оборудования, как ночью, так и днём [3].

На сегодняшний день в САО РАН проводится масштабная модернизация систем ночного видения. Разрабатывается и уже внедряется в штатную эксплуатацию новое поколение камер круглосуточного мониторинга неба с использованием фотоприёмников массового производства. Новые типы CMOS матриц в настоящее время имеют характеристики, позволяющие получать изображения, удовлетворяющие требованиям работы подсмотров как в ночное, так и дневное время.

Как известно, долгое время Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS) - матрицы по светочувствительности и качеству получаемого изображения не могли конкурировать с Charge-Coupled Device (CCD) - матрицами, и их применение находилось в основном в области систем охранного видеонаблюдения. С 2008 года прогресс в исполнении CMOS-матриц шагнул далеко вперед, и на данный момент применяемые технологии при производстве CMOS-матриц позволяют конкурировать с CCD-матрицами

[4].

Вспомогательные сервисные системы, такие как подсмотры подкупольного пространства телескопов, мониторинг звёздного неба и окрестностей на предмет паразитной засветки уже полностью переведены на камеры с CMOS фотоприёмниками. Данные камеры позволяют уверенно наблюдать в мониторинговом режиме наблюдений ночное небо до 5 звездной величины. Видеть ночную облачность с минимальным уровнем фона (при отсутствии Луны). При этом данные системы работают в круглосуточном режиме. Динамический диапазон камер позволяет осуществлять мониторинг неба и окрестностей также и при ярком солнечном освещении.

Литература

1. Комаров В.В., Семенко Е.А. Исследование современных полупрофессиональных CCD-камер для работы на оптических телескопах среднего класса // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018, т.7 с.32-46.

2. V. V. Komarov, A. S. Moskvitin, V. D. Bychkov, et al., Zeiss-1000 SAO RAS: Instruments and Methods of Observation. // Astrophysical Bulletin, 2020, Vol.75 (4), pp.486-500.

3. Комаров В.В., Емельянов Э.В., Шергин В.С., Фокин М.Ю. Системы обзора ночного неба в окрестности крупнейшего российского телескопа БТА SAO РАН. // Тезисы докладов XXVI Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Москва. 2022. с.269-271.

4. Комаров В.В., Шалдырван И.В., Фокин М.Ю. Создание высокочувствительных IP камер на основе CMOS матриц для on-line мониторинга ночного неба. // Системный синтез и прикладная синергетика. Сборник научных работ XI Всероссийской научной конференции. Ростов-на-Дону – Таганрог, 2022. с.77-81.

С71 Влияние размеров объекта на пространственно-энергетический профиль зоны видимости активно-импульсных телевизионных измерительных систем

Кунцевич Б.Ф.

*ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника». Минск. Беларусь.
boris_kuntsevich@mail.ru*

The influence of object sizes on the spatial-energy profile of the visibility zone of active-pulse television measuring systems

Kuntsevich Boris

SSPA "Optics, Optoelectronics and Laser Technology". Minsk. Belarus

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-432

When studying the characteristics of the visibility zone of active-pulse television measuring systems, the ratio of the cross sections of the object and the laser beam of illumination in the plane of the object is taken into account for the first time. With typical parameters, such consideration leads to a reduction in the maximum operating range by 3...6 times.

Исследованию активно-импульсных телевизионных измерительных систем (АИТИС) уделяется большое внимание в связи с их применением для решения различных задач [1, 2]. В настоящем докладе впервые при численном моделировании учитывается соотношение поперечных сечений объекта наблюдения $A_{об}$ и лазерного пучка подсветки $A_{лаз}$ в плоскости расположения объекта. Для простоты объект и лазерный пучок моделируются соосными кругами с однородным распределением коэффициента отражения (объект) и плотности излучения (лазерный пучок), плоскости которых перпендикулярны оптической оси. В соответствии с [3] для учета размеров объекта в известное выражение [2] для регистрируемого АИТИС сигнала добавляется множитель $w = A_{об}/A_{лаз}$. Вводится понятие граничного расстояния $S_{гр}$, для которого $A_{об} = A_{лаз}$. При расчетах используется условие, что $w = 1$ при $S_{об} \leq S_{гр}$, либо $w = A_{об}/A_{лаз}$ при $S_{об} > S_{гр}$ [3]. В соответствии с [1] учитывается наличие в АИТИС энергии шумового порога $E_{шп}$. Это означает, что при расчетах величина регистрируемого сигнала E не может быть меньше $E_{шп}$. Для наглядной интерпретации результатов расчетов вводится понятие контраста сигнала: $K = (E - E_{шп})/(E - E_{шп})$.

Расчеты показывают, что в зависимости от параметров для АИТИС действительно можно выделить, во-первых, интервал малых дальностей (случай протяженного объекта), определяемый условием $S_{об} \leq S_{гр}$, в пределах которого $w = 1$. Все известные выполненные ранее для АИТИС расчеты

соответствуют этому случаю. Во-вторых, при $S_{об} > S_{гр}$ реализуется интервал больших дальностей (точечный объект), в пределах которого становится существенным влияние параметра $w < 1$ на характеристики пространственно-энергетического профиля (ПЭП) зоны видимости. Учет множителя w приводит к изменению формы ПЭП, максимальных значений сигнала и других характеристик, реализуемых в пределах зоны видимости (ЗВ). Обобщающим параметром, на практике характеризующим влияние множителя w (следовательно, и расстояния $S_{гр}$), является предельная дальность действия системы $S_{ПДД}$. Для использованных при расчетах параметров учет w привел к уменьшению $S_{ПДД}$ в 2,9...5,0 раз. При этом для определенности принято, что значение $S_{ПДД}$ вычисляется для расстояния, где отношение сигнала к шуму $E/E_{шп} = 7$. Рассмотрены основные механизмы влияния $S_{гр}$ на характеристики ПЭП. Подтверждено, что используемое ранее выражение для длины зоны видимости $\Delta S_{зв0} = c(\Delta t_{лаз} + \Delta t_{фп})$ (c – скорость света; $\Delta t_{лаз}$ и $\Delta t_{фп}$ – длительности прямоугольных импульсов лазерной подсветки объектов и включенного состояния фотоприемника) справедливо в диапазоне параметров, где значение максимального контраста сигнала $K_{макс}$, достигаемого в пределах ЗВ, близко к единице. Вне указанного диапазона учет энергии шумового порога ведет к уменьшению длины зоны видимости. Полученные сведения могут быть использованы для выбора оптимальных параметров при проведении экспериментов и интерпретации результатов.

Литература

1. Карасик В.Е., Орлов В.М. Лазерные системы видения. Москва. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2001.
2. Капустин В.В., Мовчан А.К., Зайцева Е.В., Курячий М.И. // Транспортные системы и технологии. – 2018. – Т. 4(1). – С. 68 - 83.
3. Малашин М.С., Каминский Р.П., Борисов Ю.Б.// Основы проектирования лазерных локационных систем. Москва. Высшая школа. 1983.

**C72 Обеспечение навигации транспорта в сложных метеоусловиях
с помощью активно-импульсных телевизионных измерительных
видеосистем**

Кунцевич Б.Ф.

*ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника». Минск. Беларусь.
boris_kuntsevich@mail.ru*

**Ensuring vehicle navigation in difficult weather conditions using active-pulse
television measurement videosystems**

Kuntsevich Boris

SSPA "Optics, Optoelectronics and Laser Technology", Minsk, Belarus

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-434

For the first time, when studying the possibility of implementing vehicle navigation in difficult weather conditions (haze, fog, etc.) using active-pulse television video measurement systems, a total spatial-energy profile E_{sum} of a set of visibility zones is constructed. There are driving modes with low beam (LB; range of illuminated space (2...50) m) and driving mode with high beam (HB; range of illuminated space (40...150) m). In LB mode, using 10 backlight zones is not enough for quasi-uniform illumination. At the same time, in HB mode, 9 zones are quite sufficient.

К настоящему времени выполнен ряд исследований, посвященных возможности реализации навигации транспорта в сложных метеоусловиях (дымка, туман, дождь и т.д.) с помощью активно-импульсных телевизионных измерительных видеосистем (АИТИС) [1, 2]. В настоящем докладе с целью приближения к реальности впервые делается попытка конкретизировать объект исследования. Для этого выделяются режим движения с ближним светом (ДБС; диапазон освещаемого пространства (2...50) м) и режим движения с дальним светом (ДДС; диапазон освещаемого пространства (40...150) м). Для выбора горизонтального угла подсветки принималось, что АИТИС должна освещать при ближнем свете фар на расстоянии $l = 50$ м три полосы движения, т.е. горизонтальную полосу, перпендикулярную осевой линии транспортного средства, длиной $h = 11,25$ м. При дальнем свете фар значение $h = 11,25$ м должно достигаться на расстоянии 100 м. Пример расчета приведен на рисунке. Предполагается, что результирующий сигнал $E_{\text{сум}}$ является суммой 10 (рисунок а) и 9 (рисунок б) зон видимости, расстояние до которых определяется расстоянием задержки $S_{\text{зад}}$. В подписях указаны расстояния $S_{\text{зад}}$

для каждой из зон и соответствующее число импульсов подсветки $N_{\text{имп}}$. Номера зон приведены в скобках. Из рисунка *а* видно, что в режиме ДБС использование 10 зон подсветки не достаточно для квазиравномерной освещенности. В тоже время в режиме ДДС (рисунок *б*) вполне достаточно 9 зон.

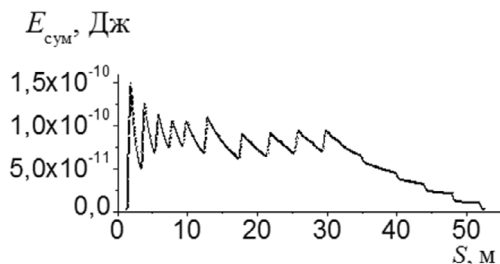


Рис. *а*. Пример возможной реализации квазиравномерной подсветки $E_{\text{сум}}$ дистанции в режиме ДБС; $S_{\text{зад}} = 2$ (1), 4 (2), 6 (3), 8 (4), 10 (5), 14 (6), 18 (7), 22 (8), 26 (9) и 30 м (10); $N_{\text{имп}} = 7$ (1), 17 (2), 25 (3), 32 (4), 45 (5), 98 (6), 130 (7), 180 (8), 130 (9) и 300 (10)

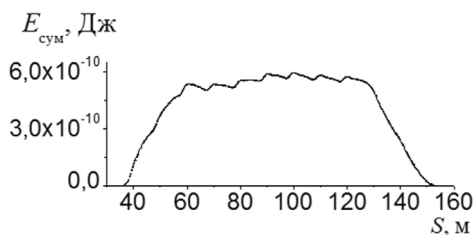


Рис. *б*. Пример возможной реализации квазиравномерной подсветки $E_{\text{сум}}$ дистанции в режиме ДДС; $S_{\text{зад}} = 50$ (1), 60 (2), 70 (3), 80 (4), 90 (5), 100 (6), 110 (7), 120 (8) и 130 м (9); $N_{\text{имп}} = 17$ (1), 23 (2), 30 (3), 42 (4), 57 (5), 68 (6), 80 (7), 94 (8) и 110 (9)

Литература

1. Карасик В.Е., Орлов В.М. Лазерные системы видения. Москва. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2001.
2. Капустин В.В., Мовчан А.К., Зайцева Е.В., Курячий М.И. // Транспортные системы и технологии. – 2018. – Т. 4(1). – С. 68 - 83.

С73 Границы диапазона измерения метеорологической оптической дальности трансмиссометрами в условиях естественного загрязнения

Назаренко П.Н.

*ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника». Минск. Беларусь.
npn05@mail.ru*

Limits of the range of measuring meteorological optical range with transmissometers in conditions of natural pollution

Nazarenko Pavel N.

SSPA "Optics, Optoelectronics and Laser Technology", Minsk, Belarus

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-436

In this work, we assessed the limits and accuracy of measuring meteorological optical range with optical transmissometers. The limits of the MOR measurement range are determined by both the length of the measuring base and the measurement accuracy. In this case, the relative error in measuring the MOR depends only on the measured transmittance of the atmosphere, the error in its measurement and does not depend on the length of the measuring base on which the measurements are carried out. The developed method for measuring the transmittance of protective glasses of transmissometers, based on the effect of total internal reflection, provides time control of the level of contamination of protective glasses on a real scale and correction of the measured transmittance coefficients of the atmosphere.

Методические погрешности измерения метеорологической оптической дальности (МОД) трансмиссометрами, в основе работы которых лежат фотометрические методы измерений, в основном определяются погрешностями наборов мер измерений спектральных коэффициентов направленного пропускания (СКНП), используемых при калибровке приборов. Методические погрешности могут значительно превышать инструментальные погрешности трансмиссометров, что необходимо учитывать при анализе технических характеристик, приводимых рядом производителей данных приборов.

В настоящей работе на основании решения уравнения Кошмидера [1] проведена оценка границ и точности измерения метеорологической оптической дальности оптическими трансмиссометрами. Границы диапазона измерения МОД определяются как длиной измерительной базы, так и точностью измерений. При этом относительная погрешность измерения МОД зависит

только от измеряемого коэффициента пропускания атмосферы, погрешности его измерения и не зависит от длины измерительной базы, на которой проводятся измерения. Предельно допустимый диапазон измерения коэффициента пропускания атмосферы, в котором возможно обеспечить точность измерения МОД не хуже $\pm 20\%$, для реальных приборов не превышает 1...95%. Данному диапазону соответствует диапазон измерения МОД 0,65...60 длин измерительных баз. При более жестких требованиях к точности измерения МОД диапазон измерения СКНП соответственно сужается.

Загрязнение защитных стекол приборов приводит к сужению диапазона измерения МОД, в котором обеспечивается требуемая точность измерения. Снижение СКНП защитного стекла только на 10% приводит к снижению верхней границы диапазона измеряемого коэффициента пропускания атмосферы до 82%, соответствующей МОД 1,5 км на измерительной базе 100 м. При уменьшении СКНП защитного стекла ниже 98% требуется коррекция измеряемого коэффициента пропускания атмосферы.

На основании экспериментальных исследований разработан метод измерения СКНП, основанный на эффекте полного внутреннего отражения от рабочих поверхностей защитных стекол зондирующего излучения. Данный метод позволяет осуществлять контроль в реальном масштабе времени уровня загрязнения защитных стекол и осуществлять коррекцию измеряемых коэффициентов пропускания атмосферы.

Литература

1. Волков О.А., Демин А.В., Константинов К.В. // Компьютерная оптика. 2018. Том 42. №1. С. 67-70.

C74 Автокоррекция амплитудных профилей обратного рассеяния зондирующего излучения в ближней зоне атмосферной трассы

Назаренко П.Н.

*ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника». Минск. Беларусь.
npr05@mail.ru*

Automatic correction of amplitude profiles of backscattering of probing radiation in the near zone of the atmospheric track

Nazarenko Pavel N.

SSPA "Optics, Optoelectronics and Laser Technology", Minsk, Belarus

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-438

The paper describes a method for correcting atmospheric profiles recorded by biaxial meteorological lidars. The use of the described method makes it possible to eliminate the influence on the recorded atmospheric profiles of such factors as the square of the distance, the zone of incomplete overlap of the laser beam and the field of view of the lidar receiving channel, the uncertainty of the reference height of the path, and other hardware amplitude and time parameters of the device. The results obtained are discussed.

Существующие методы аэрозольных лидарных измерений основаны на преобразовании регистрируемых амплитудных профилей эхосигнала в профили коэффициента обратного рассеяния по методу обращения лидарного уравнения [1] с предварительной обработкой полученного массива данных: вычитания фона, нормировки на квадрат расстояния, нормировании на геометрический фактор [2]. Неопределенность начала отсчета высоты трассы, связанная с продолжительностью оптического импульса (порядка 100 нс), зависимость от высоты неоднородности мощности в сечении зондирующего пучка, неопределенность геометрического фактора (отношения функции перекрытия поля зрения приемной системы и лазерного излучения к квадрату расстояния) могут приводить к достаточно большим систематическим ошибкам в измерении профилей обратного рассеяния аэрозолей в ближней зоне зондируемой трассы (области частичного перекрытия приемного и передающего каналов биаксиальных лидаров).

Для определения зависимости геометрического фактора от расстояния используются аналитические, трассировочные и экспериментальные методы [2]. Во всех перечисленных методах в предложенных математических моделях присутствует расстояние, что вследствие неопределенности начала отсчета высоты и несоосности приемного и передающего каналов приводит к

систематическим погрешностям измерения атмосферных профилей.

Предлагаемый метод коррекции профилей коэффициента обратного рассеяния основан на определении нормируемого профиля атмосферного обратного рассеяния как отношения амплитуд измеряемого и опорного профилей, регистрируемых на одинаковых высотах эхосигналов с учетом ослабления атмосферой зондирующего излучения лидара для измеряемого и опорного сигналов. В качестве опорного профиля используется профиль эхосигнала, полученный в условиях ясной атмосферы при отсутствии облачности и других атмосферных образований, и вертикальной видимости, превышающей 10 км.

Данный метод позволяет заменить нормирование амплитудных профилей на квадрат расстояния и геометрический фактор на нормирование на амплитудный профиль опорного сигнала. В этом случае уравнение профиля коэффициента обратного рассеяния $\beta_{\text{из}}(z)$ приобретает вид:

$$\beta_{\text{из}}(z) = \left[\frac{\alpha_0}{S_0} \cdot F(z) \right] / \left[\left(\exp[2\alpha_0 z] \right) \cdot \left(1 - 2\alpha_0 \frac{S_{\text{из}}}{S_0} \int_0^z (F(z) \exp[-2\alpha_0 z] dz) \right) \right] \quad (1)$$

где α_0 - коэффициент экстинкции опорной трассы;

$S_{\text{из}}(z)$ и $S_0(z)$ - лидарные отношения на высоте z измеряемой и опорной трассы;

z - высота;

$F(z)$ - относительная функция профиля мощности обратно рассеянного излучения. Описывается выражением:

$$F(z) = \frac{P_{\text{из}}(z) - P_{\text{физ}}}{P_0(z) - P_{\text{фо}}} \quad (2)$$

где $P_{\text{из}}(z)$ и $P_0(z)$ - мощности обратно рассеянного измеряемого и опорного излучения на высоте z , соответственно; $P_{\text{физ}}$ и $P_{\text{фо}}$ - мощности фоновой засветки на измеряемой и опорной трассах, соответственно.

В аналитическом уравнении (1), полученном из лидарного уравнения [1] в предположении неизменности коэффициента экстинкции атмосферы на всей длине трассы для опорного сигнала, отсутствуют такие факторы как квадрат расстояния, геометрический фактор, другие аппаратные амплитудные и временные параметры прибора. Для калибровки прибора требуются только предварительное измерение амплитудного опорного профиля и данные измерения метеорологической оптической дальности на момент измерения опорного и регистрируемых профилей.

Таким образом, предлагаемый метод коррекции профилей коэффициента обратного рассеяния существенно снижает систематические погрешности измерений за счет исключения факторов, дающих основной вклад в данные погрешности и перечисленных во введении.

Литература

1. *Klett J. D.* // Applied Optics. – 1981. - Vol. 20, no. 2. - P. 211-220.
2. *Joshua D. Vande Hey.* Design, Implementation and Characterisation of a Novel Lidar Ceilometer. A Doctoral Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Award of Doctor of Philosophy. Loughborough University Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering. 2013.

C75 Способ и устройство для контроля температуры мелких кристаллов в рентгеновской дифрактометрической системе SUPERNOVA

Пассет Р.С.^{1,2}, Бутвина Л.Н.³, Вакуленко А.Ф.⁴, Гаврилов Г.А.¹,
Капралов А.А.¹, Молоков А.Ю.¹, Сотникова Г.Ю.¹

¹*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН. Санкт-Петербург.
Россия. rostislav.passet@mail.ru*

²*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического
приборостроения. Санкт-Петербург. Россия*

³*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН. Научный центр
волоконной оптики им. Е.М. Дианова. Москва. Россия*

⁴*Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
им. Петра Великого. Санкт-Петербург. Россия*

Method and device for temperature control of the small-sized crystals in SUPER NOVA x-ray diffractometry system

Passet Rostislav S.^{1,2}, Butvina L.N.³, Vakulenko A.F.⁴, Gavrilo G.A.¹,
Kapralov A.A.¹, Molokov A.A.¹, Sotnikova G.Yu.¹

¹*Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia*

²*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

³*Prokhorov General Physics Institute of RAS, Dianov Fiber Optics Research
Center, Moscow, Russia*

⁴*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-441

The paper presents an original technique and measuring device developed for the SuperNova X-ray diffractometric system for controlling the temperature of small crystals up to 1 mm². The device is based on a MID-IR photodiode sensor (developed by the Ioffe Institute) sensitive in the region is 4,25±0,25 μm. The microstructured cladding optical fiber optimized for the IR spectral range 2-10 μm was used to deliver thermal radiation from the object. Based on the set of parameters (speed, accuracy, sensitivity, temperature measurement range), the device corresponds to the world level of development.

Методы и системы рентгеновской дифрактометрии широко используются для прецизионного исследования структуры функциональных материалов (монокристаллов, тонких пленок, растворов биологических материалов и т.п.). Методы терморентгенографии незаменимы для изучения фазовых переходов в твердых телах (полиморфные переходы, распад и образование химических

соединений и твердых растворов, аморфизация) и связанных с ними изменений их физических свойств. В зависимости от постановки задачи эксперимент может проводиться в различных средах: воздух, вакуум, азот, инертные газы. Размеры исследуемых объектов обычно не превышают 1 мм^3 .

Целью наших исследований являлось изучение электрокалорического эффекта (ECE), заключающегося в резком изменении температуры вещества при приложении электрического поля в сегнетоэлектрических кристаллах

Типичные значения величины ECE для материалов такого типа составляют доли градуса [1] и существенно зависят от температуры и внешних условий теплообмена. Как было показано ранее [2], достоверные количественные оценки ECE могут быть получены только при использовании быстродействующих бесконтактных безынерционных пирометрических методов измерения температуры.

Особенности проведения дифрактометрического эксперимента, связанные с защитой оператора от рентгеновского излучения, подвижностью гониометра с образцом для и отсутствием прямой видимости объекта, позволяют реализовать пирометрические методы измерений температуры только с использованием волоконной оптики (ОВ). Высокие требования по чувствительности и быстродействию при малых размерах излучающей поверхности в диапазоне температур до $200 \text{ }^\circ\text{C}$ не могут быть обеспечены пирометрами, доступными на отечественном и мировом рынках [3].

В работе представлено устройство контроля температуры мелких кристаллов, разработанное для рентгеновской дифрактометрической системы SuperNova. Устройство выполнено на основе фотодиодного пирометрического сенсора (www.ioffeled) чувствительного в области $4,25 \pm 0,25 \text{ }\mu\text{m}$. Для доставки теплового излучения от объекта использовались два отрезка микроструктурированного оболочечного оптоволокна (ОВ) на основе кристаллов галогенидов серебра с диаметром светопроводящей сердцевины $750 \text{ }\mu\text{m}$, оптимизированного для ИК-диапазона спектра $2\text{-}10 \text{ }\mu\text{m}$ [4]. Экспериментально измеренное значение коэффициента пропускания ОВ в области $4 \text{ }\mu\text{m}$ на длине 1 метр составило $\tau = 0,5$. ОВ имеет защитную оболочку, обеспечивающую его стабильную работу в условиях внешних температур от криогенных температур (4 K) до $\sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$. С обеих сторон отрезков ОВ кабеля, защищенного полимерной трубкой РЕЕК диаметром 2 мм, установлены разъемы типа SMA905, позволяющие осуществлять его согласование со входом пирометрического сенсора и стыковку отрезков на входе в дифракционную камеру системы SuperNova. Диаметр светопроводящей сердцевины $750 \text{ }\mu\text{m}$ при числовой апертуре $NA \sim 0,22$ позволяет бесконтактным образом собирать тепловое излучение от поверхности объектов с линейными размерами от $\sim 1 \text{ mm}$ в зависимости от расстояния $\Delta L[\text{mm}]$ между объектом и торцом ОВ: $\approx 2 \cdot NA \cdot \Delta L + 0,75$.

Уникальные измерительные возможности разработанного устройства обусловлены использованием современной отечественной элементной базы в области ИК-фотоники: квазимонохроматического ИК-фотодиода и микроструктурированного оболочечного световода на основе кристаллов галогенидов серебра, оптимизированного для ИК-диапазона спектра. Высокая достоверность, стабильность и воспроизводимость измерений обеспечивается алгоритмом предварительной калибровки температурного сенсора на реальный объект перед началом измерений [2].

Высокая чувствительность в температурном диапазоне 20-200 °С реализуется благодаря оригинальными алгоритмами детектирования и обработки сигнала пирометрического сенсора, в том числе, возможностью регулировки смещения в «онлайн» режиме во время проведения эксперимента. Это позволяет использовать стандартные многоканальные интерфейсные платы оцифровки и передачи сигналов, выполненные на основе 12-14 разрядных АЦП с диапазоном входных аналоговых сигналов до 2,5 В

Экспериментально подтвержденная точность измерения температуры в рассмотренной измерительной системе составляла 100 мК в диапазоне температур объекта порядка 20 °С, 50 мК при 100°С и 10 мК при температурах выше 200°С при быстродействии сенсора 10 ms.

В качестве примера, на Рис.1 приведены результаты эксперимента по регистрации ЕСЕ в кристалле PMN-PT размером 3x3 мм² в диапазоне температур 20-60 °С при его нагреве лазерным излучением с $\lambda=0,98 \mu\text{m}$.

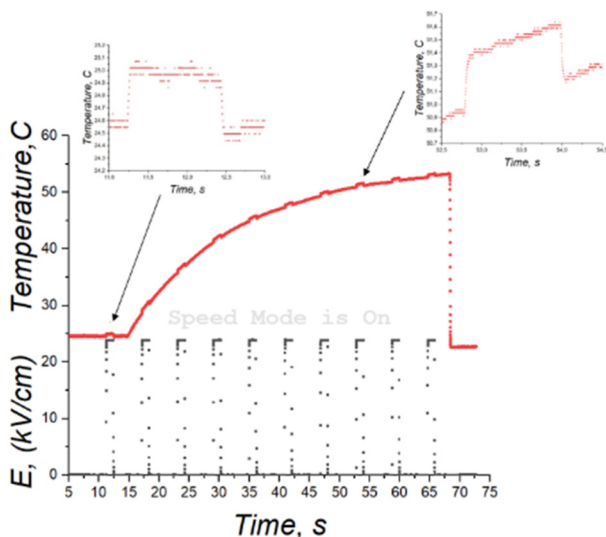


Рис. 1. Результаты эксперимента по регистрации ЕСЕ в кристалле PMN-PT

Литература

1. Liu Y., Scott J.F., Dkhil B. Direct and indirect measurements on electrocaloric effect: Recent developments and perspectives // *Appl. Phys. Rev.* 2016. V.3. No.33. P.031102(1–19). DOI:10.1063/1.4958327
2. Sotnikova G.Y.; Gavrilov G.A.; Kapralov A.A.; Muratkov K.L.; Smirnova E.P., Mid-infrared radiation technique for direct pyroelectric and electrocaloric measurements, *Rev. Sci. Instrum.*, Volume 91, Issue 1, p.015119, 2020. DOI: 10.1063/1.5108639
3. Сотникова Г.Ю., С.А. Александров, Гаврилов Г.А. Средневолновая ИК-пирометрия с использованием фотодиодов на основе InAs и InAsSb (обзор) // *Успехи прикладной физики.* 2022. т.10. №4. с.389-391 DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-4-389-403
4. Л.Н. Бутвина и др., Одномодовый микроструктурированный световод для среднего инфракрасного диапазона // *Квантовая электроника.* 2007. т. 37. № 4. с.385–387

C76 Гиперзвуковая микроскопия Ван-дер Ваальсовых слоистых гетероструктур на основе тонких слоев WSe₂

Фролов Н.Ю., Клоков А.Ю., Шарков А.И., Николаев С.Н., Ченцов С.И.,
Чернопицкий М.А., Пугачев М.В., Дулебо А.И., Шуплецов А.В.,
Кривобок В.С., Кунцевич А.Ю.

*Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН. Москва. Россия.
frolil199999@gmail.com.*

Hypersonic microscopy of Van-der Waals layered heterostructures based on thin layers of WSe₂

N.Yu. Frolov, A.Yu. Klokov, A.I. Sharkov, S.N. Nikolaev, S.I. Chentsov,
M.A. Chernopitsky, M.V. Pugachev, A.I. Dulebo, A.V. Shupletsov, V.S. Krivobok,
A.Yu. Kuntsevich

¹ *P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow,
Russia, frolil199999@gmail.com.*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-445

In this work we use the picosecond ultrasonic method to access the mechanical parameters of layered crystals within several layers. Using the interferometric method with spatial resolution, we have measured the time dependences of the change in the reflectance of an Al film covering hBN/WSe₂/hBN heterostructures on a sapphire substrate, excited by a femtosecond laser pulse. Using a multilayer model of the optical-acoustic response, we have estimated the mechanical parameters of this structure, in particular, the rigidity of the layer interfaces. The resulting Fourier response spectra made it possible to visualize regions with different compositions.

Механические и акустические свойства межслойных интерфейсов двумерных материалов во многом определяют их области применения. Например, дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) являются многообещающими материалами для использования их в качестве элемента гибкой оптоэлектроники и термоэлектрических генераторов. Важно отметить, что сборка Ван-дер-Ваальсовых (ВДВ) гетероструктур требует максимальной функциональности. Работоспособность подобных устройств зависит как от латеральной однородности, так и от качества границ раздела между слоями, которые могут существенно препятствовать транспорту носителей заряда и фононов. На сегодняшний день, механические свойства таких структур плохо изучены: несмотря на значительное количество работ, посвященных исследованию распространения когерентных фононов в таких системах [1],

силовое взаимодействие слоев практически не рассматривалось ранее.

В представленной работе исследовались акустические свойства слоев и интерфейсов таких гетероструктур методом гиперзвуковой микроскопии, основанном на методике пикосекундного ультразвука. Сам эксперимент состоял в возбуждении фемтосекундным оптическим лазерным импульсом ультракоротких упругих импульсов в образце с их последующей оптической регистрацией. Подробно он описан в работе [2].

Объектами исследования являлись слоистые структуры hBN/WSe₂/hBN, расположенные на подложке из сапфира и покрытые термически напыленной тонкой плёнкой алюминия толщиной ~30 нм, служащей эффективным генератором упругих импульсов. Получение гетероструктур осуществлялось методом отслаивания Ван-дер-Ваальсовых слоев с последующим их сухим горячим переносом на подложку в условиях окружающей среды. Толщины чешуек определялась с помощью атомно-силовой микроскопии.

В результате эксперимента были получены временные зависимости распространяющегося упругого импульса в различных областях структуры, по которым впоследствии были рассчитаны Фурье спектры, картографирование которых по поверхности образца позволило визуализировать акустические свойства структуры. Чувствительность метода оказалась достаточной, чтобы визуализировать монослой WSe₂, инкапсулированный в слои гексагонального нитрида бора с толщинами ~10 нм. Таким образом, пикосекундная акустика может быть использована для гиперзвуковой томографии гетероструктур с атомарно тонкими слоями. Также на основе моделирования временных зависимостей при помощи многослойной «пружинной» модели были уточнены акустические параметры слоев, а также константы связи.

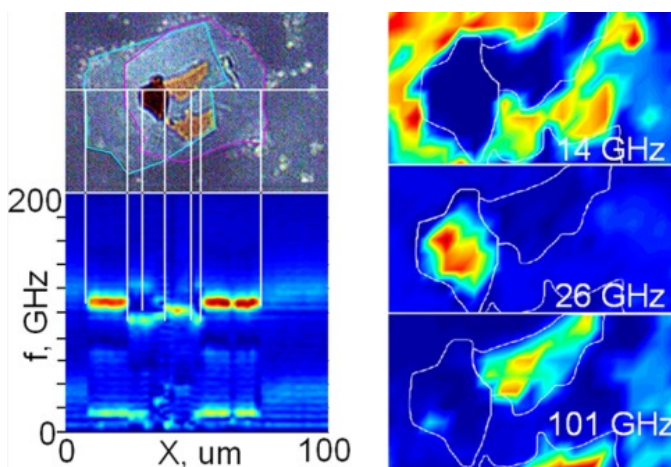


Рис. 1. а) Фотография образца (вверху) и развертка спектра пикоакустического отраженного сигнала в зависимости от положения вдоль линии (внизу); б) пространственные карты Фурье-компоненты на различных частотах.

*Материалы XXVII Международной научно-технической конференции
по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Москва, 29-31 мая 2024 г.*

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ № 075-15-2021-598 в ФИАН, и РФФИ № 19-02 00952а.

Литература

1. F. Vialla, N.D. Fatti, *Nanomaterials* 10, 2543 (2020).
2. Klovov A. Yu. et al., *Nano Letters* 22, 2070 (2022).

С77 Эллипсометр 2-мм-диапазона длин волн для диагностики оптически непрозрачных диэлектрических покрытий и материалов

Кузнецов С.А.^{1,2}, Федоринин В.Н.¹, Гельфанд А.В.¹

¹*Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ». Новосибирск. Россия. sakuznetsov@nsu.ru*

²*Новосибирский государственный университет. Новосибирск. Россия*

Ellipsometer of 2-mm wavelength range for diagnostics of optically opaque dielectric coatings and materials

Kuznetsov S.A.^{1,2}, Fedorinin V.N.¹, Gelfand A.V.¹

¹*Novosibirsk Branch of Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS*

“TDIAM”. Novosibirsk. Russia. sakuznetsov@nsu.ru

²*Novosibirsk State University. Novosibirsk. Russia*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-448

A prototype of an ellipsometer operating at the radiation frequency of 0.14 THz is described. The device employs a PCSA optical scheme and is implemented with original thin-film optical elements, which ensure the relative compactness of the device. It is experimentally demonstrated that sub-THz ellipsometry is a promising method for studying optically opaque dielectric materials and coatings, in particular, suitable for the non-contact diagnostics of carbon-fiber-based composites for aircrafts and heat-resistant ceramic coatings for gas turbines.

Эллипсометрия – неразрушающий бесконтактный метод исследования характеристик приповерхностного слоя материала, основанный на измерении изменений состояния поляризации электромагнитного излучения при отражении от исследуемой поверхности [1]. Цель данной работы состояла в адаптации и развитии метода эллипсометрии для диагностики приповерхностных слоёв оптически непрозрачных, а также рентгено-неконтрастных материалов и покрытий за счёт перехода в коротковолновую часть миллиметрового диапазона длин волн. В работе представлен изготовленный и апробированный впервые в РФ действующий макет эллипсометра на частоту излучения 0,14 ТГц ($\lambda=2,14$ мм), обеспечиваемой монохроматическим источником на основе IMPATT-диода с TTL-модуляцией с регистрацией сигнала пироэлектрическим детектором.

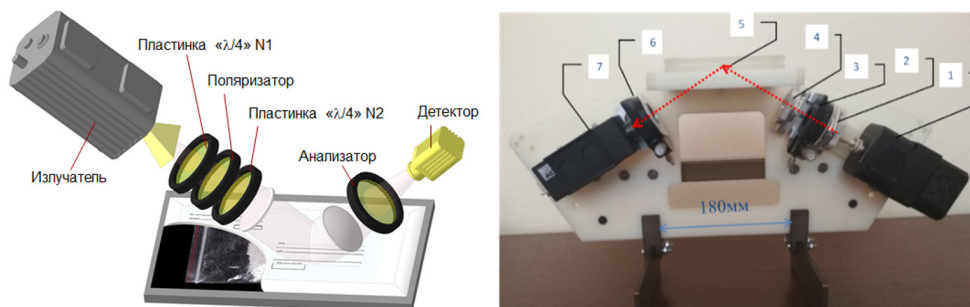


Рис. 1. Оптическая схема и фотография лабораторного макета эллипсометра.

Эллипсометр реализован по архитектуре PCSA и позволяет работать как по фотометрической схеме, так и по схеме нуль-эллипсометра [2]. Архитектура PCSA показана на Рис. 1, где Р и А – линейные поляризатор 3 и анализатор 6, соответственно; С – компенсатор 4 на основе кругового поляризатора (“четвертьволновой пластинки”); S – измеряемый образец 5, детектор излучения – 7. Круговой поляризатор 2 предназначен для формирования круговой поляризации из линейно-поляризованного излучения источника перед входом в измерительный тракт PCSA. В данной схеме измерение эллипсометрических углов Ψ и Δ исследуемой поверхности осуществляется установкой азимутов ориентации поляризатора Р и анализатора А в положение, при котором наблюдается минимальное значение сигнала (в идеале – полное гашение). Достоинством нуль-схемы является её нечувствительность к вариациям интенсивности излучения.

Ключевая особенность реализованного эллипсометра состоит в применении плоских тонкоплёночных квазиоптических элементов 2, 3, 4, 6 для преобразования поляризации излучения, которые реализованы на основе метаповерхностей – субволновых однослойных металлических микроструктур специального дизайна, изготовленных методом фотолитографии на поверхности несущих полипропиленовых плёнок толщиной 20 мкм, натянутых на кольцевые алюминиевые оправы [2]. Это позволило значительно уменьшить габариты прибора: длина рабочего хода излучения составила 250 мм при оптической апертуре 25 мм.

Разработанный эллипсометр использован для измерений оптических констант композиционных материалов на основе углеродных волокон (препрегов), предоставленных ФГУП «СибНИИ им. С.А. Чаплыгина» и применяемых в авиаиндустрии для создания несущих элементов (крыльев, фюзеляжа) легкомоторных летательных аппаратов. Экспериментально продемонстрирована возможность обнаружения расслоения в структуре композита (Рис. 2), что важно для выявления критически важных приповерхностных механических дефектов авиаконструкций на ранних стадиях их формирования при полётных нагрузках [2].

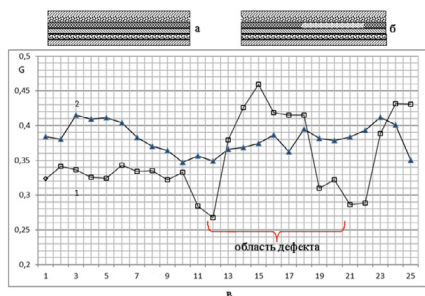


Рис. 2. Вариация эллипсометрического параметра G при сканировании вдоль поверхности для бездефектного образца из композиционного материала (а) и образца с подповерхностным дефектом (б).

Дополнительно, в кооперации с ИТПМ СО РАН созданный эллисометр успешно апробирован в актуальных задачах бесконтактного определения толщин и оптических констант жаропрочных керамических покрытий на основе диоксида циркония (ZrO_2), наносимых методами плазменного и детонационного напыления на лопатки газовых турбин для их антикоррозийной защиты (Рис. 3). Результаты эллипсометрических измерений демонстрируют возможность измерения толщины керамических покрытий с погрешностью 1-2 мкм. При этом для показателя преломления измерения дают возможность косвенно оценивать плотность наносимого покрытия.

1. Свиташев К. К., Семенов А. И., Семенов Л. И., Соколов В. К. Основы эллисометрии. Под ред. А.В. Ржанова. Новосибирск: Наука, 1979. – 422 с.

2. Федорин В. Н., Кузнецов С. А., Швец В. А., Аржанников А. В., Гельфанд А. В., Горшков А. Ю. Эллисометрия миллиметрового диапазона в задачах диагностики композиционных материалов. Изв. вузов. Приборостроение. 2023, Т. 66, № 6, С. 489–500.

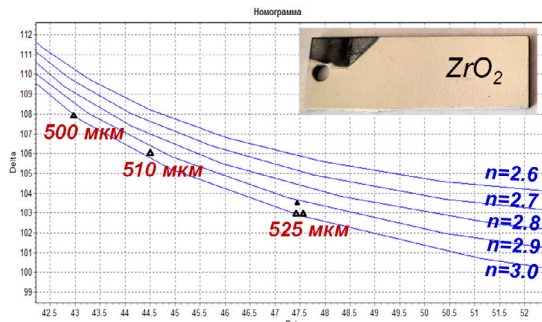


Рис. 3. Эллипсометрическая номограмма, экспериментальные точки на которой указывают локальную толщину и показатель преломления n керамического слоя ZrO_2 на металлической основе.

С78 Четырехволновой ТЕА лазер, генерирующий в двух спектральных диапазонах

Шавель С.С., Горобец В.А., Бушук С.Б.

*ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника». Минск. Беларусь.
shavel_s07@mail.ru*

Four wave TEA laser generating in two spectral ranges

Shavel Sergey S. (Postgraduate student), Gorobets V. A., Bushuk S. B.
*State Research and Production Association "Optics, optoelectronics and laser
technology", Minsk, Belarus*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-451

A multi-wavelength TEA laser has been created using a non-autocollimation cavity, which, through the use of a combined gas mixture, including xenon, generates simultaneously on several lasing lines belonging to different spectral ranges 1-4 and 9-11 μm . The laser can be used for spectroscopic studies and remote gas analysis under the conditions of a "frozen" atmosphere.

В настоящее время существует устойчивый интерес к разработке лазерных систем, обеспечивающих одновременную генерацию в двух спектральных областях ИК диапазона [1, 2]. Одним из путей решения этой проблемы может стать использование электронных переходов инертных газов (например Xe, Kr, Ar, Ne) в дополнение к генерации на колебательно-вращательных переходах молекул CO₂ [3]. Генерация одновременного излучения в указанных диапазонах с качеством, соответствующим газовым лазерам (высокая выходная мощность, низкая расходимость и спектрально узкие линии) позволяет создать источник лазерного излучения, для преобразования излучения в нелинейных кристаллах и прикладной спектроскопии, а также для применения в лидарной технике (выполнение условия «замороженной» атмосферы). В последнем случае необходимо наличие 2-х линий для каждого измеряемого в атмосфере газа. Если нужно измерять такие газы как аммиак и метан, то мы приходим к необходимости наличия одновременно 4-х линий (on и off линии в диапазонах 1-4 и 9-10 мкм), так как последовательная перестройка по линиям практически однозначно приводит к нарушению условия «замороженной» атмосферы, и большой ошибке в измерениях.

Конструкция основных узлов лазера (разрядная камера, электрический блок питания, элементы резонатора) аналогична созданному ранее ТЕА лазеру с комбинированной газовой смесью и неселективным резонатором [4]. Однако,

для получения конкретных линий генерации была применена оптическая схема резонатора, выполненная по неавтоколлимационной схеме с использованием дифракционной решетки и дополнительных зеркал (рисунок 1).

Как видно из оптической схемы лазера, генерация для каждой из 4-х линий формируется в своем резонаторе, а на выходе присутствует четырехволновое излучение. При необходимости можно организовать отдельный выход излучения для каждого из каналов через 00' порядки.

Газовая смесь, обычно используемая в ТЕА CO_2 -лазерах, похожа на смесь, применяемую для получения генерации в инертных газах в диапазоне 1 - 4 мкм, наличием большого количества гелия. Известно также, что присутствие небольшого количества инертных газов в рабочей смеси CO_2 -лазера только улучшает выходные параметры генерации за счет лучшего расселения нижнего лазерного уровня и смещения в оптимальную сторону параметра E/N [5]. Удаление из смеси азота, хотя и уменьшает выходные параметры (мощность и энергию импульсов), но часто используется на практике для уменьшения длительности импульсов за счет ликвидации так называемого «азотного хвоста» [6].

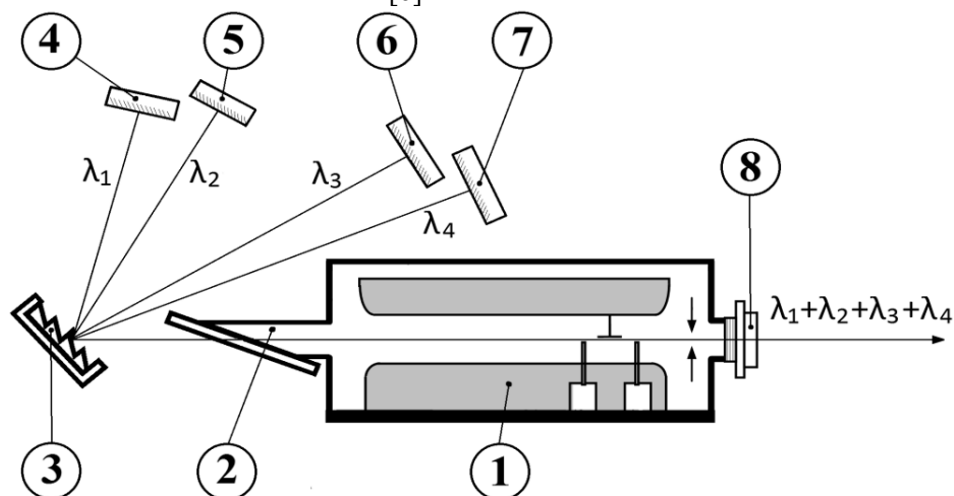


Рис. 1. Оптическая схема лазера

1 – разрядная камера; 2 – окно Брюстера; 3 – дифракционная решетка; 4, 5, 6, 7 – отражающие зеркала резонатора; 8 – выходное зеркало резонатора

Таким образом, становится вполне очевидной возможность получения одновременной генерации в двух спектральных диапазонах 1-4 и 9,2-10,8 мкм за счет использования комбинированной газовой смеси, включающей небольшое количество излучающих инертных газов и молекул углекислого газа и много гелия (например, $\text{Xe}:\text{CO}_2:\text{He} = 1:1:100$).

Указанная возможность была проверена экспериментально. При получении одновременной четырехволновой генерации в двух спектральных диапазонах выходные параметры импульсов в диапазоне 9-11 мкм значительно уменьшались по сравнению со стандартной смесью для CO₂-лазера, но при этом они были сравнимыми с параметрами генерации на инертных газах в диапазоне от 1 до 4 мкм.

Таким образом, применение выполненного по неавтоколлимационной схеме резонатора и комбинированной газовой смеси позволило создать многоволновой лазер, генерирующий одновременно на нескольких линиях генерации, принадлежащих к разным спектральным диапазонам. Лазер может использоваться для спектроскопических исследований и дистанционного газоанализа с выполнением условия «замороженной» атмосферы.

1. Д. Браун, А. Флорид, М. Сейнзбери, Спектроскопия органических веществ. М.: Мир, 1992.

2. Э. Преч, Ф. Бюльманн, К. Аффольтер. Определение строения органических соединений / Преч Э., Бюльманн Ф., Аффольтер К. – М.: Мир, 2006. – 439с.

3. Н.Г. Басов, В.В. Баранов, В.А. Данилычев и др. О влиянии E/N на энергетические характеристики лазеров высокого давления с накачкой электронным пучком на смесях He-Ar, Kr, Xe // Квантовая электроника, – 1986. – т.13., №3. – с.488-492

4. Шавель, С.С. ТЕА лазер, генерирующий в нескольких спектральных диапазонах / С. С. Шавель, В. А. Горобец, И.Н. Пучковский, С.Б. Бушук – Журнал прикладной спектроскопии. – 2023. – Т. 90, № 6. – С. 835-842.

5. Churakov .V.V, A. Gorobets and V.O.Petukhov, Effective oscillation of a CW CO₂ laser in the range of 11 μm (01¹1-11¹0 band) – V.V. Churakov, V.A. Gorobets and V.O. Petukhov – Infrared Physics, – 1989. – V.29, No 2-4. – P.339-341.

6. Андреев Ю.М., Воеводин В.Г., Гейко П.П., Горобец В.А., Ланская О.Г., Петухов В.О., Солдаткин Н.П., Тихомиров А.А. Лидарные системы и их оптико-электронные элементы / Под общей редакцией чл.-кор. РАН М.В. Кабанова. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2004. 526 с.

С79 Перспективы передачи энергии при помощи мощного лазерного излучения

Маричев А.Е., Эполетов В.С., Пушный Б.В.

ФТИ им. А.Ф.Иоффе. Санкт-Петербург. Россия. aemarichev@mail.ioffe.ru

Prospects for energy transfer using high-power laser radiation

Marichev Artem, Epoletov Vadim, Pushnyi Boris

Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-454

This paper presents the prospects for energy transfer systems using high-power lasers and design solutions for photodetectors of high-power laser radiation.

The peculiarities of this design of a photodetector for high-power laser radiation are: illumination from the substrate side, cascading and the use of microcrystallites in place of the tunnel p/n junction.

Системам беспроводной передачи энергии уделяется все большее внимание в космических программах США, Японии и стран Западной Европы. В начале 2009 года американская корпорация Solaren подписала с Калифорнийской энергетической компанией контракт о поставке 200 мегаватт (200 МВт — это примерно пятая часть мощности Нижнекамской ГЭС) электроэнергии космического производства с начала 2016 года. В том же 2009 году шестнадцать японских компаний, включая такого гиганта, как Mitsubishi, подписали соглашение о создании к 2030 году своей космической электростанции мощностью 1 ГВт.

Перспективы космической энергетики очевидны: такая энергия доступна круглосуточно, ее источник практически вечен, и она не загрязняет атмосферу, но существует проблема передачи электрической энергии из космоса на Землю. Также есть проблема передачи энергии между различными системами в космосе и на Земле., такие как дистанционное управление беспилотными аппаратами, бесконтактная зарядка аккумуляторов, и т.д. Особенно важное использование может быть в летательных объектах (самолеты и спутники), т.к. эти системы имеют малый вес и высокую помехозащищенность от электромагнитных полей (молнии и радары). Новое применение эти системы могут найти в подводном флоте для спецсвязи без возможности подслушивания.

Передача энергии этим способом включает преобразование генерируемой энергии в лазерное излучение с последующим улавливанием этого излучения фотоэлектрическими преобразователями (ФЭП) на потребителе. Передача энергии этим способом обладает рядом преимуществ:

- за счет малой расходимости пучка света лазера возможна передача по воздуху и в воде в пределах видимости;
- малые размеры и вес;

- отсутствие электромагнитных помех;
- отсутствие затрат на изготовление и монтаж систем проводной передачи энергии, особенно в местах сложного рельефа или водных пространствах;
- отсутствие электрических потерь энергии на сопротивление.

Как видно из вышесказанного, система состоит из двух элементов-лазера, преобразующего электрический ток в свет, и фотопреобразователя лазерного излучения в ток.

В настоящее время наиболее мощные лазеры генерируют свет с длиной волны 1.06 мкм, а наиболее подходящими для его преобразования могут быть ФЭП на основе твердых растворов InGaAsP/InP.

Теоретические оценки показывают, что максимальный КПД этих систем на основе полупроводниковых ФЭП может быть ~ 70% может быть получен с лазером $\lambda = 1060$ нм, при мощностях до 1000Вт/кв·см.

В настоящее время решена проблема изготовления лазеров как мощных для преобразования энергии, так и малой мощности для волоконной оптики(связь). Задача изготовления высокоэффективных ФЭП для мощных лазеров решена в лабораториях, но требуется организация их производства.

В отличие от традиционных «солнечных» элементов, фотоэлектрические преобразователи мощного лазерного излучения преобразует монохромное излучение большой мощности, а это налагает определённые требования к их конструкции: учет эффекта «насыщения» и низкое электрическое сопротивление прибора.

Наиболее подходящей длинной волны для таких систем в области пропускания Земной атмосферы является длинна волны 1.06 мкм.

Материал со стороны приема излучения должен иметь малое электрическое сопротивление для изготовления электрических контактов малой площади (минимальное затемнение).

В качестве примера фотоэлектрических преобразователей мощного лазерного излучения приводим перспективную конструкцию и технологию изготовления ФЭП на длину волны 1.06 мкм.

1) Освещение со стороны подложки это позволяет уменьшить площадь контактов.

2) Многокаскадный прибор для исключения эффекта «насыщения». Уменьшения емкости, что позволяет увеличить частоты многокаскадного фотоприемника.

3) В этой конструкции для соединения каскадов исключены туннельные переходы, а использованы слои микрокристаллитов. Это решение позволяет увеличить ток без ограничений, свойственных для туннельных переходов.

Данная конструкция опробована для фотоприемников с засветкой на длину волны 1.06 мкм с эффективностью более 36% и мощность облучения не менее 100 Вт/см². Данное решение защищено патентов РФ.

C80 Оптимизация подсветки гиперспектральных камер SWIR диапазона с помощью светодиодов

Кобзев Е.И.¹, Рабинович И.О.¹, Боричок В.В.², Савчук А.А.², Чельный А.А.²

¹*НИТУ МИСИС. Москва. Россия. rawork2008@mail.ru*

²*АО «Оптрон». Москва. Россия*

Optimization of hyper spectral SWIR cameras lighting based on LED

E.I. Kobzev¹, O.I. Rabinovich¹, V.V. Borichok², A.A. Savchuk², A.A. Chelnyy²

¹*MISIS, Moscow, Russia, rawork2008@mail.ru*

²*«Optron», Moscow, Russia, main@optron.ru*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-456

At the current stage of technology the hyperspectral SWIR cameras (Short Wavelength Infrared detector) are used in a wide range of sorting tasks. One of the most important factors for the correct machine vision system based on hyperspectral SWIR cameras usage is high-quality lighting in the working area for all spectral lines. For this, it is necessary to create a computer vision system using suitable cameras and sources for objects lighting [1].

На текущей стадии развития науки и техники гиперспектральных SWIR (Short Wavelength Infrared детекторы) камеры применяются в широком спектре задач сортировки. Одним из важнейших факторов для корректного функционирования системы машинного зрения на основе гиперспектральных SWIR камер – качественная подсветка рабочей области во всех спектральных линиях. Для этого необходимо создать систему машинного зрения с использованием подходящих камер и средств подсветки объектов [1].

Целью данной работы является определением оптимальный режим работы светодиода в качестве подсветки гиперспектральной SWIR камеры. Для этого, используя характеристики спектральной чувствительности, темнового тока, динамического диапазона, времени экспозиции и величины рабочего поля гиперспектральной камеры были рассчитаны минимальные значения необходимой плотности мощности на рабочей поверхности для каждой спектральной линии шириной в 10 нм в диапазоне от 900–1700 нм. При расчете минимального значения плотности мощности коэффициент отражения объектов был принят 0.1, а для расчёта максимального значения плотности мощности коэффициент отражение объектов был принят 1. Для построения диаграммы освещенности была создана программа, выполняющая расчет плотности мощности светодиодного излучения по характеристикам светодиодов для спектральных линий шириной 10 нм. В качестве источников излучения были взяты мощные светодиоды с пиками длин волн: 950 нм,

1050 нм, 1100 нм, 1150 нм, 1200 нм, 1300 нм, 1400 нм, 1450 нм, 1550 нм, 1650 нм, 1750 нм и расходимостью 20 градусов по ширине на полувысоте. Из светодиодов был сконфигурирован светильник, обеспечивающий засветку с требуемой плотностью мощности для каждой спектральной линии. Зная какой процент оптической мощности приходится на диапазоны по 10 нм, моделируем засветку для каждого диапазона длин волн. Расположение светодиодов в светильнике было найдено методом перебора возможных вариантов компоновки и выбора наиболее удачной по критерию равномерности. Светильник, состоящий из 15 светодиодов на высоте 80 см обеспечивает необходимое освещение для каждой длины волны (рис. 1).

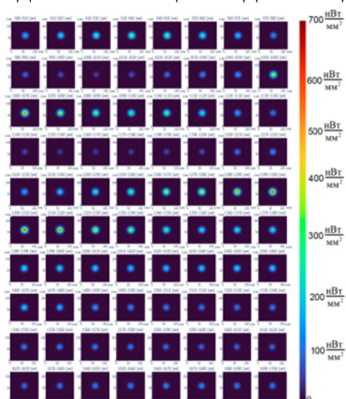


Рис. 1. Распределение в пространстве оптической мощности светодиодного излучения светильника для каждой спектральной линии

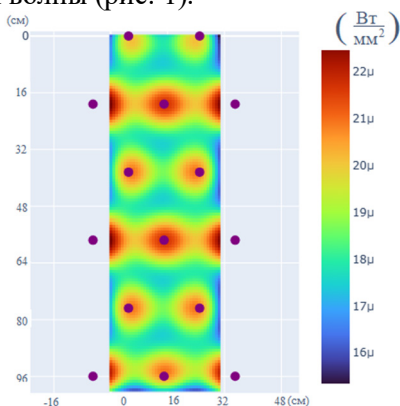


Рис. 2. Распределение плотности мощности осветительного устройства для засветки конвейерной ленты

На основании конфигурации светильника было разработано осветительное устройство для засветки конвейерной ленты шириной 1 м. На рисунке 2 представлено распределение плотности мощности осветительного устройства, состоящего из 15 светильников.

Цветом выделена область пространства, для которой в каждой спектральной линии плотность мощности лежит в требуемом диапазоне, фиолетовыми точками обозначено положение светильников.

В работе были исследованы особенности применения светодиодов для гиперспектральной подсветки в SWIR диапазоне, определены оптимальное количество и спектральный состав светодиодов, и их положение в пространстве для решения задачи подсветки конвейерной ленты.

1. Yunze He, et al., Infrared machine vision and infrared thermography with deep learning: A review, 103754 (2021).

С81 Метод подбора стекол для исправления хроматизма положения на пяти длинах волн для трехлинзового широкоспектрального объектива

Голицын Андрей Вячеславович, Сейфи Н.А., Голицын А.А.

Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ». Новосибирск. Россия. natalia_nsk@inbox.ru

Method for selecting glasses to chromatic focal shift correction at five wavelengths of three-lens wide-spectrum lens

Golitsyn A.V, Seyfi N.A., Golitsyn A.A.

Novosibirsk Branch of Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS
"TDIAM". Novosibirsk. Russia. natalia_nsk@inbox.ru

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-458

The components that are used in lenses contain up to 3 lenses, and the condition for ensuring a wide spectral range of 0.43-0.88 μm , with sufficient image quality, is to correct chromatism at at least 4 wavelengths. To find triplets of glasses that satisfy this condition, there was developed a 3D cube-diagram of partial dispersions and refractive indices. The combinations of glasses obtained with it provide correction of chromatism at 5 wavelengths with a sufficient difference in the refractive indices of the original pair.

Качество линзовых объективов, работающих в широком спектральном диапазоне, определяется степенью исправления хроматических aberrаций. Объективы, исправленные на четырех длинах волн, называются суперахроматами или четырехцветными апохроматами. В таких объективах используются тройки стекол, как и в апохроматах, но, за счет использования специальных методов выбора марок стекол, исправление на 4-ой длине волны происходит автоматически при обеспечении условия апохроматизации. Для синтеза таких объективов составляется система из 4 уравнений с тремя неизвестными оптическими силами отдельных тонких линз:

$$\begin{cases} \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = \varphi_{\text{общ}} \\ \frac{\varphi_1}{\nu_1} + \frac{\varphi_2}{\nu_2} + \frac{\varphi_{31}}{\nu_3} = 0 \\ \frac{\varphi_1}{\nu_1} p_1 + \frac{\varphi_2}{\nu_2} p_2 + \frac{\varphi_{31}}{\nu_3} p_3 = 0 \\ \frac{\varphi_1}{\nu_1} p'_1 + \frac{\varphi_2}{\nu_2} p'_2 + \frac{\varphi_{31}}{\nu_3} p'_3 = 0, \end{cases}$$

где φ_i – оптическая сила i -й линзы, v_i – число Аббе i -й линзы, p_i – частная дисперсия на третьей корректируемой длине волны, p'_i – частная дисперсия на четвертой корректируемой длине волны.

Частные дисперсии каждого стекла определяются как:

$$P = \frac{n_{\lambda_1} - n_{\lambda_3}}{n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}},$$
$$P' = \frac{n_{\lambda_1} - n_{\lambda_4}}{n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}}.$$

Первое уравнение задает общую оптическую силу тройки тонких линз, имеющих оптическую силу φ_i , второе и третье уравнения задают условие апохроматизации на трех длинах волн для стекол, имеющих коэффициент Аббе v_i и частную дисперсию для третьей корректируемой длины волны p_i , четвертое уравнение вводит условие исправления хроматизма на четвертой длине волны, для которой частная дисперсия равна p'_i . Поскольку общего решения системы 4 уравнений с 3 неизвестными не существует, Герцбергер в [1] предложил использование марок стекол, в которых отношения частных дисперсий 3-х стекол на двух длинах волн к коэффициенту Аббе связаны линейной зависимостью. В таком случае, четвертое уравнение становится линейно зависимым от третьего, и ранг системы уравнений понижается до 3-го, имеющего общее решение для 3 неизвестных.

Для отыскания троек стекол, удовлетворяющих условию, разработан объемный куб-диаграмма частных дисперсий и показателей преломления P_{435} - P_{900} - N_D (длины волн выбраны произвольно). Куб можно вращать вокруг 3 осей. Между координатами P_{435} - P_{900} - N_D двух выбранных марок стекол (в массив стекол входят каталоги производителей Schott, Sumita, Ohara, Hoya, Pilkington) проводится прямая, к которой выдается список прилегающих к ее проекции в плоскости P_{435} - P_{900} (с заданной точностью) марок стекол в формате: марка, N_D , число Аббе, расстояние до проекции линии. Отбор третьего стекла проводится не по мере удаленности его координат P_{435} , P_{900} , N_D от плоскости, параллельной оси N_D и проходящей через координаты выбранной пары стекол, а по мере удаленности координат третьего стекла от линии, проходящей через координаты выбранной пары стекол. Тем самым критерий отбора был ужесточен и неявно влечет условия ахроматизации на дополнительной, пятой длине волны.

Получаемые комбинации стекол обеспечивают исправление хроматизма на 5 длинах волн при достаточной разнице в показателях преломления исходной пары.

1. Herzberger M. The Design of Superachromatic Lenses / M. Herzberger, N. McClure // Applied Optics, 1963. – Vol. 2. – I. 6. – Pp. 553–560.

С82 Термоэлементы на основе твердого раствора $Pb_{0,75}Sn_{0,25}Te$ на уровень температуры ~ 300 К

Алиева Т.Д.¹, Абдинова Г.Д.¹, Ахундова Н.М.², Абдинов Д.Ш.¹

¹*Институт физики им.Г.М.Абдуллаева. Баку. Азербайджан.
tunzalaaliyeva@mail.ru*

²*Азербайджанский государственный экономический университет. Баку.
Азербайджан*

Termoelements based on $Pb_{0,75}Sn_{0,25}Te$ solid solutions a temperature level of ~ 300 K

Aliyeva T.D.¹, Abdinova G.D.¹, Akhundova N.M.², Abdinov D.Sh.¹

¹*Institute of Physics named after G.M. Abdullayev of the Ministry of Science
and Education of the Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan*

²*Azerbaijan State Economic University, Baku, Azerbaijan*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-460

Single crystals of the $Pb_{0,75}Sn_{0,25}Te$ solid solution with superstoichiometric lead up to 1,0 at.% were grown, thermoelements were manufactured on their basis, and their thermoelectric parameters were studied in the range of 90-300 K. It has been shown that crystals of this composition with 1,0 at.% excess lead have a thermoelectric efficiency $Z = (1,70-1,91) \cdot 10^{-3} K^{-1}$ at 250-300 K. The actual efficiency of thermoelements based on these crystals was equal to $Z_p = 0,81 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ at 300 K.

Твердые растворы $Pb_{0,75}Sn_{0,25}Te$ являются перспективными полупроводниковыми материалами для создания инфракрасных преобразователей и среднетемпературных термогенераторов [1, 2]. Термоэлектрическая добротность составов с $x = 0,25-0,30$ достигает $\sim 1,7 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ в области 500-600 К.

Выяснено, что введение в кристаллы $PbTe$ и $SnTe$ атомов Pb и Sn сверхстехиометрии удается варьировать их термоэлектрические параметры в достаточно широком интервале [3, 4]. Твердые растворы $Pb_{1-x}Sn_xTe$ с 25-30 мол.% $SnTe$ имеют кристаллическую структуру и структуру валентной зоны подобную $PbTe$. Поэтому подобное влияние избыточных атомов свинца можно ожидать и в данном твердом растворе. Исходя из этих соображений, в данной работе выращены монокристаллы твердого раствора $Pb_{0,75}Sn_{0,25}Te$ с 0; 0,01; 0,05; 0,1; 0,05 и 1,0 ат.% избыточного свинца, изготовлены на их основе термоэлементы и исследованы термоэлектрические параметры этих кристаллов и термоэлементов в интервале 90-300 К. В качестве

коммутационного припоя использовался сплав мас.% 95In+4Ag+1Au. Термоэлектрическая эффективность Z кристаллов рассчитана по выражению $Z = \alpha^2 \sigma / \chi$ - где α и χ -коэффициенты термоэдс и теплопроводности, σ -удельная электропроводность кристаллов $\text{Pb}_{0.75}\text{Sn}_{0.25}\text{Te}<\text{Pb}>$. Эффективность термоэлементов рассчитана по $Z_p = Z / (1 + 2\sigma / l)$, где l -высота термоэлементов, r_k - удельное контактное сопротивление.

Выяснено, что монокристаллы $\text{Pb}_{0.75}\text{Sn}_{0.25}\text{Te}$, прошедшие отжиг при 500°C в течение 120 часов обладают p -типом проводимости во всем интервале температур и максимальной термоэлектрической эффективностью $Z_p = 0,46 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ при 300 К. Эти же кристаллы с 1,0 ат.% избытком свинца, обладая n -типом проводимости, имеют эффективность $Z_n = 1,70 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ при 300 К (таблица). При этом максимальное значение Z_n этого образца наблюдается при ~ 250 К и равно $1,91 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$. Образцы с 1,0 ат.% избыточным свинцом имеют значительно меньшую решеточную ($1,04 \cdot 10^{-2} \text{Вт/см}\cdot\text{К}$) и общую ($1,57 \cdot 10^{-2} \text{Вт/см}\cdot\text{К}$) теплопроводности и высокую термоэдс ($160,1 \text{ мкВ/К}$) при 300 К, что обеспечивают их термоэлектрическую эффективность равную $(1,70-1,91) \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$.

Сверхстехиометричные атомы Pb, создавая в $\text{Pb}_{0.75}\text{Sn}_{0.25}\text{Te}$ донорные центры, увеличивают концентрацию свободных электронов, и рассеивают фононы. В результате этого меняется тип проводимости кристалла от p к n и уменьшается теплопроводность.

Таблица. Термоэлектрические параметры кристалла $\text{Pb}_{0.75}\text{Sn}_{0.25}\text{Te}<\text{Pb}>$ при 300 К

Содержание избыточного свинца в твердом растворе, ат.%	α , мкВ/К	σ , Ом ⁻¹ см ⁻¹	$\chi \cdot 10^2$, Вт/см·К	$r_k \cdot 10^3$, Ом·см ²	$Z_{p,n} \cdot 10^{-3}$, К ⁻¹
0	109,8	773,2	2,06	0,39	0,46
0,01	36,0	1210,9	2,56	0,24	
0,05	-13,1	1212,1	2,50	0,15	
0,5	-48,6	1123,6	3,37	0,46	
1,0	-160,1	1026,3	1,57	0,38	1,70

В рабочем режиме, когда через ветви или термоэлемент течет электрический ток, начинает сказываться влияние контактных электрических сопротивлений r_k и величина Z_T термоэлемента заметно уменьшается. Соответствующие расчеты показали, что в термоэлементах на основе ветвей p - $\text{Pb}_{0.75}\text{Sn}_{0.25}\text{Te}$ и n - $\text{Pb}_{0.75}\text{Sn}_{0.25}\text{Te}<\text{Pb}>$ без учета и с учетом r_k термоэлектрические эффективности соответственно равны $0,90 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ и $0,80 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$.

Изготовлен по конструкции, указанной в [5] термоэлемент на основе вышеприведенных n и p -типов материалов и экспериментально определена его

реальная термоэлектрическая эффективность $Z_p=2(T-T_{\text{оми}})/T_{\text{оми}}^2$ при 300 К. Получено значение $Z_p=0,81 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$, что хорошо согласуется с расчетным значением Z_t с учетом γ_k .

Литература

1. Успехи инфракрасной фотосенсорики. Сборник обзорных статей к 75-летию образования НПО «Орион». – М.: АО «НПО «Орион». 2021. – 480 с.
2. *Дмитриев А.В., Звягин И.П.* Современные тенденции развития физики термоэлектрических материалов // УФН. 2010. Т.180. № 8. С.821-838.
3. *Багиева Г.З., Муртузов Г.М., Абдинова Г.Д., Аллахвердиев Э.А., Абдинов Д.Ш.* Влияние структурных дефектов на теплопроводность поли- и монокристаллического РbTe // Неорганические материалы. 2012. Т.48. №8. С.901-904.
4. *Ахундова Н.М., Алиева Т.Д.* Электрические свойства монокристаллов SnTe с избытком олова и структур SnTe – металл // Известия высших учебных заведений. Физика. 2019. Т. 62. № 1. С. 100-103.
5. *Вайнер А.Л.* Каскадные термоэлектрические источники холода. – М.: Сов.радио.1976. 137 с.

C83 Рассеяние фононов в твердых растворах системы PbTe–MnTe

Юсифов В.В., Аллахвердиев Э.А.

*Институт физики им. Г.М. Абдуллаева. Баку. Азербайджан.
eynulla0104@gmail.com*

Phonon scattering in solid solutions of the PbTe – MnTe system

Yusifov V.V., Allahverdiyev E.A.

*Institute of Physics named after G.M. Abdullaev of the Ministry of Science
and Education of the Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-463

In n-type polycrystalline $Pb_{1-x}Mn_xTe$ samples that underwent heat treatment at a temperature of 780 K, the temperature dependences of the thermal conductivity coefficient in the range 80 – 300 K were studied. It was shown that with increasing MnTe content in PbTe, the thermal conductivity coefficient decreases. It was found that lattice thermal conductivity plays the main role in the process of heat transfer. The electronic component of thermal conductivity does not exceed ~1% of the total thermal conductivity.

Для того чтобы эффективность термоэлектрического преобразователя имел высокое значение, нужно чтобы материал каждый из ветвей *n*- и *p*-типа имели высокую добротность $zT = S^2\sigma T / (\chi_e + \chi_p)$, где T , S , σ , χ_e и χ_p – температура, коэффициент Зеебека, электропроводность, электронная и решеточная составляющие коэффициента теплопроводности соответственно. Теллурид свинца и твердые растворы на его основе являются перспективными материалами для создания термоэлектрических преобразователей работающих в средних температурах (400–800 К) [1]. На сегодняшний день термоэлектрические характеристики *n*-тип образцов PbTe хуже, чем в их *p*-тип аналогах [2].

Минимизация χ_p независимого от других параметров, является одной из стратегий приводящий к повышению zT материала. Введение примесей замещения в кристаллическую решетку приводит к усилению рассеяния фононов из-за различий в атомной массе и размере между атомами матрицы и примеси. Это особенно актуально для термоэлектрических материалов, поскольку атомы примеси рассеивают фононы в большей степени, чем электроны, что приводит к увеличению zT . В данной работе исследовалось теплопроводность поликристаллических образцов твердых растворов $Pb_{1-x}Mn_xTe$ *n*-типа с $x = 0,0; 0,0025; 0,005; 0,02; 0,04$ прошедшие

термообработку при температуре 780 К в течении 15 суток в среде спектрально чистого аргона.

Установлено, что общая теплопроводность ($\chi = \chi_p + \chi_e$) заметно снижается с ростом доли MnTe в PbTe: с 9,41 Вт/(м·К) для чистого PbTe до 3,68 Вт/(м·К) для $Pb_{0,96}Mn_{0,04}Te$ при 80 К и с 4,32 Вт/(м·К) до 2,47 Вт/(м·К) при 300 К. При этом снижение χ обусловлено в основном усилением рассеяние фононов на дефектах созданных атомами Mn.

Таблица. Термоэлектрические параметры поликристаллических образцов $Pb_{1-x}Mn_xTe$

x	α , мкВ/К		σ , Ом ⁻¹ см ⁻¹		χ , Вт/(м·К)		χ_p , Вт/(м·К)		z/z ₀	
	80 К	300 К	80 К	300 К	80 К	300 К	80 К	300 К	80 К	300 К
0,00	30,2	110,2	17390	2312,2	9,41	4,31	9,36	4,30	–	–
0,0025	54,4	145,1	13000	1364,4	6,43	2,77	6,41	2,76	3,5	1,6
0,005	49,3	145,6	12688	1336,3	6,45	2,91	6,37	2,89	2,9	1,5
0,01	46,1	154,2	12342	1608,1	6,42	3,17	6,39	3,16	2,4	1,9
0,02	43,2	148,5	5971	970,4	5,12	2,69	5,11	2,68	1,3	1,2
0,04	36,3	128,3	2254	538,4	3,69	2,47	3,68	2,47	0,5	0,5

Решетчатая теплопроводность χ_p определялся путем вычитания электронной теплопроводности χ_e из χ , где χ_e рассчитывался по закону Видемана-Франца как $\chi_e = L\sigma T$, а число Лоренца L определялось по экспериментальным значениям коэффициента Зеебека. Расчет проводился в рамках параболической зонной модели в предположении, что рассеяния носителей происходит на акустических колебаниях решетки.

Результаты работы (таблица) показывают, что в процессе переноса тепла в рассмотренных образцах основную роль играет решеточная теплопроводность. Электронная компонента теплопроводности при этом не превышает ~1% при 300 К. С ростом температуры решеточная теплопроводность уменьшается из-за возрастающей роли фонон-фононных взаимодействий, который усиливается с температурой.

При образовании твердого раствора системы PbTe–MnTe атомы Mn замещают атомы Pb и входят в решетку PbTe в состоянии Mn^{2+} , нейтральным относительно подрешетки свинца [3]. Различие в ионных радиусов Pb^{2+} и Mn^{2+} (1,2 и 0,92 Å соответственно) приводит к искажению периодической структуры кристаллической решетки.

Кроме того, атомы Mn имеющие относительно малые размеры могут втиснуться в различные междоузельные позиции. Междоузельные атомы Mn также вызывают статическое локальное искажение кристаллической решетки.

Детальный микроструктурный анализа показала, что в междоузельях кристаллической решетки $Pb_{1-x}Mn_xTe$ наблюдается высокая плотность кластеров размерами ~1–2 нм, образованные атомами Mn [4].

Все эти факты играют значительную роль в рассеянии фононов от коротких длин волн до средних. В итоге добротность z образцов $\text{Pb}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ по сравнению с чистым PbTe (z_0) возрастает, особенно в образцах с относительно низким содержанием атомов Mn.

Литература

1. *Дмитриев А.В., Звягин И.П.* Современные тенденции развития физики термоэлектрических материалов // УФН. 2010. Т. 180. №8. С. 821–838. DOI: [10.3367/UFNr.0180.201008b.0821](https://doi.org/10.3367/UFNr.0180.201008b.0821)
2. *Zhu C., Ming H., Jia H., Hu F., Chong F., Hu B., Chen T., Yang S., Qin X., Zhang J.* Decoupling thermoelectric parameters by the energy-dependent carrier and phonon scattering based on the nanostructuring interface design. // Scripta Materialia. 2024. 242, 115933. doi./10.1016/j.scriptamat.2023.115933
3. *Акимов Б.А., Никорич А.В., Рябова Л.И., Широкова Н.А.* Переход металл-диэлектрик в твердых растворах $\text{Pb}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}(\text{In})$ // ФТП. 1989. 23. С.1019-1024
4. *Xiao Y., Wu H., Cui J., Wang D., Fu L., Zhang Y., Chen Y., He J., Pennycook S. J., Zhao L.* Realizing high performance n-type PbTe by synergistically optimizing effective mass and carrier mobility and suppressing bipolar thermal conductivity // Energy Environ. Sci., 2018,11, p. 2486-2495. doi./10.1039/C8EE01151F

С84 Определение второго и третьего уровней примеси серебра в бинарных твердых растворах

Латифова С.С.¹, Салимова Вафа Вали¹, Назаров А.М.²

¹*Сумгаитский государственный университет. Сумгаит, Азербайджан*

²*Институт физики им. академика Г.М.Абдуллаева. Баку. Азербайджан.
afinnazarov@yahoo.com*

Determination of the second and third levels of silver in binary solid solutions

Latifova S.S.¹, Salimova Vafa Vali¹, Nazarov A.M.²

²*Institute of Physics named after academician G.M.Abdullayev, Baku, Azerbaijan,
afinnazarov@yahoo.com*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-466

The impurity states of the element 1B of the silver subgroup in the Ge-Si solid solution containing 18 at.% Si were studied. The donor level of Ag is found in crystals doubly doped with gallium and silver, and its first acceptor level is found in crystals doped only with silver. Single crystals were obtained by drawing from the melt using a feed ingot. Doping with gallium was ensured by introducing it into the feed ingot, and Ag was introduced into the crystals by the diffusion method. The depths of the donor level and the first acceptor level of Ag from the top of the valence band were determined, which turned out to be 0.06 and 0.29 eV, respectively.

Элемент 1В подгруппы Au в германии, являясь, в основном, примесью замещения, показывает амфотерное поведение и в запрещенной зоне кристалла создает один донорный и три акцепторных уровня. Другие элементы 1В подгруппы Ag и Cu в Ge также проявляет по три акцепторных уровня, в то же время у них донорный уровень не обнаружен. В Si все эти примесные элементы создают по одному донорному и акцепторному уровню. Идентичность конфигурации валентных электронов и кристаллической структуры дает основание считать, что названные примеси в Ge и Si должны вести себя одинаково. Исследование этих примесей в твердых растворах Ge-Si может проливать свет на наблюдаемые странности. Кроме того, глубокие примесные уровни, создаваемые этой группой примесей в Ge-Si, могут быть полезными для практического применения. С другой стороны, экспериментальный материал, накопленный относительно поведения глубоких примесей в зависимости от состава твердых растворов Ge-Si, может быть полезным для развития теории глубоких примесных уровней в полупроводниках [1-3].

Данная работа посвящена изучению поведения серебра в твердом растворе Ge-Si, содержащем 18 ат.% Si. Особые условия созданы для выявления донорного уровня Ag в кристалле.

Для исследования всех дискретных состояний амфотерных примесей подгруппы IV требуются особые условия легирования кристалла. Для выявления глубокого донорного уровня, расположенного в нижней половине запрещенной зоны, требуется наличие в кристалле дополнительно мелкой акцепторной примеси, уровень которой находится ниже него на расстоянии, превышающем kT (k -постоянная Больцмана, T -абсолютная температура). А для выявления глубокого акцепторного уровня, расположенного в верхней половине запрещенной зоны, требуется наличие в кристалле дополнительно мелкой донорной примеси, уровень которой находится выше него на расстоянии, превышающем kT .

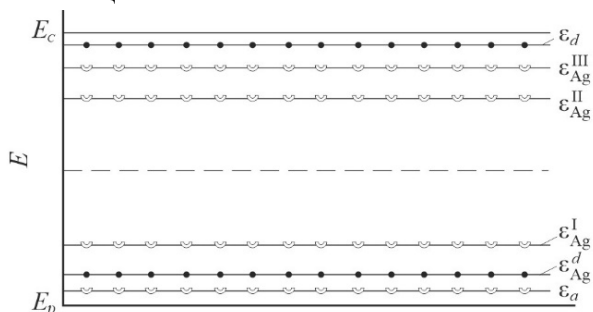


Рис.1. Схема примесных уровней в твердых растворах Ge-Si.

Мелкие уровни E_a – акцепторный и E_d – донорный.

Уровни серебра: акцепторные $E_{Ag}^I, E_{Ag}^{II}, E_{Ag}^{III}$ и донорный – E_{Ag}^d .

На рис.1 схематически показаны мелкие акцепторной и донорной уровни (E_a и E_d), донорный (E_{Ag}^d) и три акцепторных уровня ($E_{Ag}^I, E_{Ag}^{II}, E_{Ag}^{III}$) серебра в твердых растворах Ge-Si. Из схемы ясно, что в кристалле Ge-Si, легированном только серебром, невозможно обнаруживать его донорный уровень, ибо переходы из донорного уровня Ag в зону проводимости будут пренебрежимо малы по сравнению с собственными переходами. При двойном легировании кристалла серебром и мелкой акцепторной примесью донорный уровень Ag отдает свои электроны мелкому акцепторному уровню (его компенсирует), а сам при определенных температурных условиях действует как акцепторный уровень (псевдоакцепторный уровень). Первый акцепторный уровень Ag можно исследовать без дополнительного легирования кристалла. Вторым и третьим акцепторные уровни Ag могут быть исследованы, если в кристалл дополнительно вводить мелкую донорную примесь подбором соответствующего соотношения их концентраций.

1. *Бугай А.А., Косенко В.Е., Миселюк Е.Г.* Диффузия и растворимость серебра в Ge. ЖТФ 27, 1967,1957.
2. *Гарибов В.И.* Полупроводниковые твердые растворы германий-кремний. Баку: Элм, 1983.
3. *Бармин И.Б., Белакурова В.С., Земсков В.С., Маврин О.И.* Способ получения монокристаллов твердого раствора Ge-Si. Гос. Ком. По. Изобр. и откр. ГКНТ СССР. Авт. свид. №1555402 11-03-1988.

С85 Тепловое расширение, изотермическая сжимаемость и параметр Grüneisen полупроводникового соединения TlGaSe₂

Курбанов М.М.¹, Салимова Вафа Вали¹, Назаров А.М.², Мамедов Ф.А.¹

¹*Сумгаитский государственный университет. Сумгаит. Азербайджан*

²*Институт физики им. академика Г.М.Абдуллаева. Баку. Азербайджан.
afinnazarov@yahoo.com*

Thermal expansion, isothermal compressibility and Grüneisen parameter of the TlGaSe₂ semiconductor compound

Kurbanov M.M.¹, Salimova Vafa Vali¹, Nazarov A.M.², Mamedov F.A.¹

¹*Sumgayit State University, Sumgayit, Azerbaijan*

²*Institute of physics, Baku, Azerbaijan, afinnazarov@yahoo.com*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-469

Based on experimental data, thermal expansion, isothermal compressibility and heat capacities at constant pressure, the thermodynamic relationships ($C_p - C_v$) and ($\chi_T - \chi_S$), as well as the equality $C_p/C_v = \chi_T/\chi_S$, have been verified. To determine the influence of anharmonicity of thermal vibrations on thermal properties, also the Grüneisen parameter. The temperature dependences of all calculated parameters are given in the tables.

Среди термодинамических свойств твердых тел особое место занимают теплоемкости, теплового расширения и упругие параметры. Это связано с тем, что колебательное движение атомов и молекул, из которых состоят тела, очень чувствительно к типу взаимодействия этих частиц и характеру их движения. Именно поэтому всегда существовал большой интерес к экспериментальному и теоретическому изучению тепловых и упругих параметров твердых тел.

Большинство теоретических моделей даны для изотропных твердых тел с кубической кристаллической структурой. С точки зрения практического применения важно убедиться, что эти модели справедливы и для сложных полупроводниковых соединений [1].

В представленной работе проверен ряд теоретических моделей и эмпирических формул для термодинамических зависимостей удельной теплоемкости, коэффициентов теплового расширения и изотермического сжатия полупроводникового соединения TlGaSe₂.

Соединение TlGaSe₂ считается интересным объектом как с точки зрения теоретического, так и практического применения. Так как этот тип соединений используется при изготовлении оптических квантовых генераторов и других чувствительных преобразовательных устройств.

Соединение TlGaSe_2 синтезировано по методике имеющей в литературе и измерены теплоемкость, тепловое расширение и изотермическое сжатие в широком диапазоне температур [2-4].

Значения удельной теплоемкости при постоянном объеме (C_v) и коэффициент адиабатического сжатия (χ_s), используемые при проверке теоретических моделей, определялись из существующих термодинамических соотношений.

$$C_p - C_v = \frac{9\alpha^2 VT}{\chi_T} \quad (1) \quad \text{и} \quad \chi_T - \chi_s = \frac{9\alpha^2 VT}{C_p} \quad (2)$$

Как показано в литературе из совместного решения формул (1) и (2) получается равенство $C_p/C_v = \chi_T/\chi_s$ (3) [1].

Как отмечается в литературе, изобарная теплоемкость (C_p), давление (P) и коэффициент теплового расширения (α) в твердых телах определяются только ангармонизмом колебаний кристаллической решетки. С учетом этого из существующих термодинамических соотношений $\gamma_T = \frac{3\alpha VT}{\chi_T C_v}$ (4) определено

значение параметра Грюнайзена для соединения TlGaSe_2 .

Во всем температурном интервале $C_p > C_v$ и $\chi_T > \chi_s$. Этот результат можно обосновать с тем, что при повышении температуры системы на один градус в изобарических условиях объем тела должен расширяться, чтобы сохранить давление постоянным, и в этом случае часть отдаваемого тепла тратится о работе, совершаемой при расширении объема.

В то же время сжать тело в адиабатических условиях ($S = \text{const}$) сложнее, чем сжать его в изотермических условиях. Таким образом, при адиабатическом сжатии система в определенной степени нагревается, поэтому естественным образом сжать ее затруднительно.

Расчеты показали, что значение параметра Грюнайзена для соединения TlGaSe_2 относительно велико по сравнению с другими изотропными твердыми телами. Это можно объяснить наличием анизотропии величин межатомных химических связей в исследуемом соединении и тем, что колебания решетки более ангармоничны. Такая дисгармония колебаний проявляется и в значениях теплового расширения, теплоемкости и коэффициентов изотермического сжатия. Сравнение отношений C_p/C_v и χ_T/χ_s , показанных ранее в формулах (1), (2) и (3) показывает, что соотношение выполняется и для полупроводниковых соединений типа TlGaSe_2 . Исследование тепловых и упругих параметров соединения TlGaSe_2 показывает, что значениями этих параметров влияют также параметр Грюнайзена (γ_T), характеризующий ангармонизм тепловых колебаний атомов кристаллической решетки, и соотношение коэффициента ангармоничности (κ) в квадрат коэффициента гармоничности (β) (κ/β^2) пропорционален. Таким образом, эти параметры также имеют между собой прямо пропорциональную зависимость.

Результаты расчетов показали, что во всех температурных интервалах разница ($\chi_T - \chi_S$) для соединения TlGaSe_2 меньше по сравнению с разницей ($C_p - C_v$). Такое отличие может быть связано с тем, что в то время как изотермическое сжатие тела происходит в направлении, противоположном тепловому расширению, в величина адиабатической теплоемкости участвует также тепловое расширение с одинаковым знаком.

1. *Аскеров Б.М.* Термодинамика и статистическая физика. Баку, 2005, 627 с.
2. *Бурлаков В.М., Маков М.М., Ризак Б.М.* Влияния морфологии образца на фазовые переходы в TlGaSe_2 . ФТТ, 1990, том 32, №6, с.1690-1693.
3. *Курбанов М.М.* Тепловое расширение и изотермическая сжимаемость TlGaSe_2 . Неорганические материалы, 2003, том 37, №12, с.1447-1448.
4. *Курбанов М.М., Годжаев М.М., Маммедов Ф.А., Салимова В.В.* Тепловое расширение, изотермическое сжимаемости и упругих параметров соединений TlGaS_2 и TlGaSe_2 . Journal of Engineering Physics, 2023, vol.7, №1, pp.40-44.

С86 Образование пленок твердого раствора $\text{TlIn}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ со сверхрешетками

Алекперов Э.Ш.¹, Ибрагимов Г.Б.², Назаров А.М.²

¹*Бакинский государственный университет. Баку. Азербайджан.
alekperoveldar@mail.ru*

²*Институт физики им. академика Г.М. Абдуллаева. Баку. Азербайджан*

Formation of $\text{TlIn}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ solid solution films with superlattices

Alekperov Eldar Shakhshuvar¹, Ibragimov G.B.², Nazarov A.M.²

¹*Baku State University, Baku, Azerbaijan, alekperoveldar@mail.ru*

²*Institute of Physics named after academician G.M. Abdullayev, Baku, Azerbaijan*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-472

Phase transformations in $\text{TlIn}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ ($0.01 \leq x \leq 0.09$) films with a thickness of 30 nm were studied using the electron diffraction method. It has been established that the interaction of atoms of a ternary compound with Sn atoms introduced as impurities leads to the formation of substitutional solid solutions in the composition range $0.01 \leq x \leq 0.09$. A superstructure with tetragonal syngony has been revealed, which has parameters increased by 4÷5 times relative to the initial phase. It is possible to precisely control the parameters of thin epitaxial films of superstructural phases.

Электроннографическим методом исследованы фазовые превращения в пленках $\text{TlIn}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ ($0.01 \leq x \leq 0.09$) толщиной 30 нм. Установлено, что взаимодействие атомов тройного соединения с внедренными в качестве примеси атомами Sn приводит к образованию твердых растворов замещения в интервале составов $0.01 \leq x \leq 0.09$. Выявлена сверхструктура с тетрагональной сингонией, которая обладает увеличенными в 4÷5 раз параметрами по отношению к исходной фазе. Возможно, прецизионно управлять параметрами тонких эпитаксиальных пленок сверхструктурных фаз.

В настоящее время в мире имеются лишь три метода, составляющие главные направления поиска структурирования сверхрешеток, возникновение которых приводит к появлению новых свойств материалов. Первым методом является модулированное пространственное распределение примесей в полупроводниках, вторым – периодическое сочетание как физически, так и химически совместимых полупроводниковых слоев. Оба подхода имеют как преимущества, так и недостатки. Третий способ – ориентированная кристаллизация, дающая возможность получить однородные высокосовершенные монокристаллические пленки с минимальным количеством дефектов, что более сложно реализуемо на монокристаллических слитках.

В настоящей работе даны результаты исследования условий формирования тонких пленок твердых растворов замещения $\text{TlIn}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ в зависимости от концентрации ($0.01 \leq x \leq 0.09$) примеси Sn. Исследуемые пленки толщиной 30 нм получены конденсацией из двух молибденовых печей в вакууме $\sim 10^{-4}$ Па. Эти пленки покрывались сверху и снизу углеродной пленкой толщиной 3-4 нм. Экспериментальными исследованиями установлено, что пленки TlInSe_2 имеют нетривиальные особенности, которые контролируются как условиями формирования, так и дозированным легированием их атомами химического элемента Sn. Влияние легирования оловом различной дозировки на формирование эпитаксиальных пленок твердого раствора $\text{TlIn}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ определено в диапазоне температур от комнатной до $T_{\text{п}} \sim 573$ К. Легирование оловом в указанном диапазоне приводит к понижению температуры образования и роста монокристаллических пленок до 443 К, что составляет 463 К для нелегированного TlInSe_2 . На электронограммах, снятых от пленок $\text{TlIn}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$, полученных термическим методом на подложке NaCl, отработанных и нагретых до $T_{\text{п}} = 523$ К, наблюдается формирование монокристаллических пленок твердых растворов со сверхрешетками, т.е. видны точечные рефлексы, свидетельствующие о наличии трех типов ориентаций кристалликов, при которых плоскости (100), (010) и (111) ориентируются параллельно плоскости (100) NaCl. Параметры монокристаллических пленок твердых растворов замещения со сверхрешетками тетрагонального $\text{TlIn}_{0.93}\text{Sn}_{0.07}\text{Se}_2$ соответствуют $a \approx 5a_0 = 4,050$ нм; $c \approx 4c_0 = 2,876$ нм. Сопоставление данных по исследованию влияния примесей на образование пленок твердых растворов $\text{TlIn}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ и сверхструктурных решеток на их основе с изменением состава образцов $\text{TlIn}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ в пределах области гомогенности, простирающейся в интервале $0.01 \leq x \leq 0.09$, позволяет сделать некоторые выводы о характере расположения и перемещения атомов химического элемента Sn в сверхструктурной кристаллической решетке этого соединения. Монокристаллические пленки сверхструктурных $\text{TlIn}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ ориентируются плоскостью (100) параллельно грани (100) NaCl. Локальные искажения ячеек сверхструктуры, создаваемые растворенными атомами Sn, таковы, что атомы, статистически отклоняясь от занимаемых положений, сохраняют трехмерную периодичность с усредненными периодами $a \approx 5a_0 = 4,100$ нм; $c \approx 4c_0 = 2,926$ нм. Периоды ЭЯ твердых растворов на основе сверхструктурных $\text{TlIn}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ подчиняются закономерности, установленной Вегардом – приблизительно линейно зависят от концентрации, за исключением $x = 5 \div 6$.

Таким образом, в сверхструктурах $\text{TlIn}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ происходит явление растворимости Sn в молекулярном состоянии с образованием ограниченных твердых растворов взаимозамещения, в которых атомы Sn замещают атомы In и описываются формулой $\text{TlIn}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$, согласно которой кристаллы для любых «x» изоструктурны между собой. Примеси олова во всем интервале составов

$0.01 \leq x \leq 0.09$ способствуют образованию твердых растворов по структурам сверхрешеток $\text{TlIn}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ и позволяют прецизионно – строго и с большой точностью управлять параметрами тонких эпитаксиальных пленок $\text{TlIn}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$. При эпитаксиальном росте пленок $\text{TlIn}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ несоответствие в параметрах, сопрягающихся плоскости подложки и формирующейся сетки составляло 1,8%.

С87 Структурные и оптические свойства тонких пленок твердых растворов $Pb_{1-x}Eu_xTe$

Нуриев И.Р.¹, Назаров А.М.¹, Садыгов М.С.¹, Фарзалиев С.С.¹, Садыгов Р.М.^{1,2}

¹*Институт физики им. академика Г.М.Абдуллаева. Баку. Азербайджан.
afinnazarov@yahoo.com*

²*Азербайджанский технический университет. Баку. Азербайджан*

Structural and optical properties of thin films of $Pb_{1-x}Eu_xTe$ solid solutions

Nuriyev I.R.¹, Nazarov Afin Mahammad¹, Sadigov M.S.¹, Farzaliyev S.S.¹,
Sadigov R.M.^{1,2}

¹*Institute of Physics named after academician G.M.Abdullayev, Baku, Azerbaijan,
afinnazarov@yahoo.com*

²*Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan*

DOI: 10.51368/978-5-94836-696-8-2024-475

Thin films of $Pb_{1-x}Eu_xTe$ was grown on (111) surface of BaF_2 by condensation of molecular beams in a vacuum of 10^{-4} Pa. As grown films was (200) oriented single crystal. It was shown that the conductivity is very sensitive to the temperature of the additional compensating source Te temperature, and at 380 K the type of conductivity changes from n to p. It was established that the smoother and uniform surface without any clusters was obtained at the deposition condition $\vartheta_c=8\div 9$ Å/c, $T_{sub}=543\div 623$ K. Optical measurements showed that the produced films are direct band gap semiconductor with $E_g=0.386$ eV, $\alpha=10^4$ cm⁻¹. The larger value of the energy gap of $Pb_{1-x}Eu_xTe$ than that of $PbTe$ suggests that the energy gap can be tuned by replacing some Pb atoms with Eu.

Полупроводниковые соединения типа A^4B^6 (PbS , $PbSe$ и $PbTe$) характеризуются узкой запрещенной зоной ($E_g\sim 0,1$ эВ). Добавив к этим соединениям редкоземельные элементы (Eu, Sm, Yb) можно регулировать ширину запрещенной зоны полученных полумагнитных твердых растворов, что расширяет область применения этих материалов. Эти твердые растворы широко используются при создании различных оптоэлектронных устройств, свойствами которых можно управлять с помощью магнитного поля.

$PbTe$ является одним из важных материалов с высоким показателем преломления в инфракрасной области благодаря своей превосходной химической стабильности и простоте нанесения пленки. Запрещенную зону этого материала можно регулировать путем легирования ее с $SnTe$, $EuTe$ и т.д. Заменяв часть свинца редкоземельным элементом Eu (создавая твердый раствор $Pb_{1-x}Eu_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$)), можно плавно увеличить запрещенную зону и

уменьшить показатель преломления [1,2].

Поскольку основой твердого раствора $Pb_{1-x}Eu_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) являются бинарные соединения $PbTe$ и $EuTe$, все его свойства аналогичны свойствам этих соединений. Поэтому, естественно предположить, и это подтверждается экспериментально, что твердые растворы с содержанием Eu , близким к нулю, имеют свойства, близкие к $PbTe$. Соединения $PbTe$ и $EuTe$ имеют гранцентрированную кубическую кристаллическую решетку с очень близкими параметрами решетки ($a_{PbTe}=6,46 \text{ \AA}$, $a_{EuTe}=6,60 \text{ \AA}$). Следовательно, в нормальных условиях и при x близком к нулю, твердый раствор $Pb_{1-x}Eu_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) сохраняет структуру $PbTe$ и его тонкие пленки могут быть получены методом получения тонких пленок $PbTe$. Для производства пленок $PbTe$ использовалось множество технологий, таких как испарение из лодочки, взрывное испарение, испарение методом горячих стенок и так далее. В данной работе, для получения тонких пленок $Pb_{1-x}Eu_xTe$, мы использовали, изготовленного из особо чистого углерода нагреватель для испарения сыпучих материалов с высоким давлением пара.

Определены оптимальные условия получения эпитаксиальных пленок $Pb_{1-x}Eu_xTe$ n - и p -типа проводимости с высокими подвижностями. Выяснилось, что структура $Pb_{1-x}Eu_xTe$ является таким же кубическим, как и $PbTe$ ($a=6,46 \text{ \AA}$).

Ширина запрещенной зоны $Pb_{1-x}Eu_xTe$ больше, чем у $PbTe$, что позволяет предположить, что ширину запрещенной зоны можно регулировать, заменив некоторые атомы Pb на Eu . Пленки толщиной 2-5 мкм были выращены на свежесколотой поверхности BaF_2 (111) методом конденсации молекулярных пучков в вакууме 10^{-4} Па. В процессе осаждения температуры источника и подложки поддерживались при $T_{ист}=1000-1100 \text{ К}$ и $T_{под}=580 \text{ К}$ соответственно. В качестве исходных материалов для испарения использовались синтезированные при 1100 К твердые растворы $Pb_{1-x}Eu_xTe$ ($x=0,05$).

Структурные свойства исследованы методом рентгеноструктурного (РФА) анализа пленок на приборе Bruker D2 Phaser (Германия). Концентрацию и подвижность свободных носителей заряда в слоях определяли с помощью эффекта Китли-Холла. Составный анализ и стехиометрию пленки проводили с помощью сканирующей электронной микроскопии SEM S-4800 с системой EDX (Hitachi Ltd., Япония). Толщину пленки измеряли эллипсометром. Оптические свойства пленок исследовали на Фурье-спектрометре (FTIR, Nicolet-NEXUS-870) при нормальном падении луча.

В рентгенодифракционном спектре порошка появились только линии $Pb_{1-x}Eu_xTe$. А единственная линия в пленке, соответствующая (200) линии $Pb_{1-x}Eu_xTe$ указывает на то, что полученные пленки являются монокристаллическими. Оптические исследования показали, что в спектре пропускания появляются ярко выраженное интерференционные линии, по положению которых определяли толщину пленки (~ 3 мкм). Линейная зависимость $(ah\nu)^2$ от $h\nu$ является свидетельством того что, электронные

переходы в $\text{Pb}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$ ($x=0,05$) являются прямыми разрешенными. Вычислены параметры $E_g=0,386$ эВ, $\alpha=10^4$ см^{-1} .

[1] *Jianfei Wang, Juejun Hu, Xiaochen Sun, Anuradha M. Agarwal, Lionel C. Kimerling, Desmond R. Lim, and R. A. Synowicki* Structural, electrical, and optical properties of thermally evaporated nanocrystalline PbTe films. *Journal of Applied Physics* **104**, 053707 (2008).

[2] *Д.А.Пашкеев, И.И.Засавицкий* Роль междолинного рассеяния в излучательной рекомбинации твердого раствора $\text{Pb}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$ ($0 < x < 1$). *ФТП*, **46** (2013), 745-750.

Правила направления, рецензирования и опубликования научных статей в журнале «Успехи прикладной физики»

1. Журнал «Успехи прикладной физики» предназначен для публикации развернутых статей и обзоров по последним наиболее значимым достижениям в области физики, имеющих перспективу прикладного (технического и научного) применения. Журнал входит в новый Перечень ВАК, вступивший в действие 1 декабря 2015 г.

Направляя рукопись статьи в редакцию журнала, авторы передают редколлегии, учредителю и издателю журнала безвозмездное неисключительное право опубликовать ее на русском языке в качестве статьи в печатной версии журнала, в электронной версии журнала в сети Интернет и на лазерных дисках. При этом за авторами сохраняются их интеллектуальные права на рукопись статьи (в т. ч. «авторское право»). В связи с этим и с учетом Четвертой части (Раздел VII) Гражданского Кодекса РФ авторами должно быть представлено в редакцию письмо в следующей форме:

Лицензионный договор о передаче права на публикацию (издательский лицензионный договор)

Мы, нижеподписавшиеся, авторы рукописи _____ предоставляем редколлегии, редакции, учредителю и издателю журнала «Успехи прикладной физики» безвозмездную простую (неисключительную) лицензию на публикацию этой рукописи статьи как в печатной, так и в электронной версиях журнала.

Мы подтверждаем, что данная публикация не нарушает интеллектуальных прав других лиц или организаций.

Подписи авторов: _____ (ф. и. о., ученая степень, дата)

Статья должна быть подписана всеми авторами. В случае нескольких авторов указывается фамилия автора, ответственного за переписку с редакцией. Рукопись статьи направляется на адрес редакции журнала: 111538, Москва, ул. Косинская, д. 9, АО «НПО «Орион», Редакция журнала «Успехи прикладной физики» или по электронной почте: advance@orion-ir.ru

2. Рукопись статьи в редакцию представляется обязательно на русском языке.

3. Рукопись статьи должна сопровождаться экспертным заключением о возможности публикации в открытой печати, оформленным в установленном порядке.

4. Объем статьи (без рисунков) не должен превышать 12 страниц формата А4 при однократном межстрочном интервале, а объем статьи обзорного характера – не более 25 страниц. Материал статьи представляется в печатном виде (на бумажном носителе) и в электронном варианте на CD/DVD-диске с текстом в формате Word (гарнитура шрифта – Times New Roman, размер шрифта – 12), причем текст уже должен содержать в нужном месте рисунки и подписи под ними. Однако следует избегать приведения в тексте излишне подробных и громоздких математических преобразований и выражений. Оформление статьи следующее:

– название раздела журнала;

- индекс УДК;
- код классификации PACS
(https://publishing.aip.org/wp-content/uploads/2019/01/PACS_2010_Alpha.pdf);
- заголовок статьи;
- инициалы и фамилии авторов;
- аннотация статьи (10–15 строк с раскрытием цели работы и её основных результатов);
 - ключевые слова;
 - шифр научной специальности.

5. Основной текст статьи должен начинаться разделом «Введение» с четкой постановкой цели и задач работы, сопровождаемой аргументами в пользу ее выполнения на фоне существующего состояния затронутой в статье проблемы. Дальнейший текст статьи также должен иметь смысловые рубрикаторы (разделы и подразделы) без их нумерации. Заканчиваться статья должна отдельным разделом «Заключение» с перечислением основных результатов, следующих из них выводов и, по возможности, предложений по развитию исследований и использованию их результатов.

Внизу первой страницы текста помещается отдельный абзац (полужирным шрифтом), содержащий контактную информацию об авторе (или авторах) в следующем виде: фамилия, имя, отчество (полностью), должность, ученая степень, e-mail, почтовый адрес предприятия.

После основного текста – список использованных источников под названием «Литература».

Примеры обозначения в разделе "Литература" использованных источников.

Ссылка на **статьи** дается следующим образом: Фамилия И.О., название журнала, год, том, номер, номер страницы.

Иванов И. И. // Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9. № 1. С. 12.

Lang D. V. // J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. № 7. P. 3023.

Ссылка на **книги**: Фамилия И.О., название книги, город, издательство, год. (При ссылке на определенную главу или страницу в книге после года ставится номер страницы.)

Корн Г., Корн Е. Справочник по математике. – М.: Наука, 1974.

Биберман Л. М., Воробьев В. С., Якубов И. Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. – М.: Наука, 1982. С. 371.

Ультрафиолетовые технологии в современном мире / под ред. Кармазинов Ф. В. Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н. – Долгопрудный: Интеллект, 2012.

Ссылка на **материалы конференций**: Фамилия И.О., название публикации, место и дата проведения, номера страниц.

Романов А. В., Степович М. А., Филиппов М. Н. / Труды XVII Международного совещания «Радиационная физика твердого тела». – Севастополь, 2007. С. 592–599.

Ссылка на **патенты**: Фамилия И.О., название, вид, номер, год.

Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Якубов Р. Х. Вакуумный искровой разрядник. Патент на изобретение № 2654494 (РФ). 2018.

Ссылка на **диссертации и авторефераты**: Фамилия И.О., название работы (автореферата), дисс. ... канд. (д-ра) физ.-мат. наук, город, организация, год.

Гречихин В. А. Разработка и анализ компьютерных алгоритмов обработки

одночастичных сигналов лазерных доплеровских анемометров: Автореф. дисс. канд. техн. наук. – М.: МЭИ, 1996.

Далее размещается подробная англоязычная информация о статье, необходимая для индексирования всего журнала, данной статьи и её авторов в международных наукометрических базах данных, а именно: PACS, название статьи, фамилия и инициалы авторов (английская транслитерация), предприятие, его почтовый адрес, e-mail автора (авторов), аннотация, ключевые слова (Keywords), пристатейная библиография (References); поскольку журнал распространяется и за рубежом, редакция оставляет за собой право корректировать английскую часть текста без изменения его смысла.

Оформление пристатейной библиографии в англоязычной части статьи (References) имеет свои особенности. В частности, если цитируемая книга или монография является русскоязычным переводом с зарубежного издания, то указываются исходные данные этого издания (авторы, название книги, издательство, город или страна, год издания), а также русскоязычное издательство и год издания на русском языке. Ниже приведены основные примеры обозначения использованных источников в разделе References:

Статья из журнала:

Ivanov I. I., Usp. Prikl. Fiz. **9** (1), 12 (2021) [in Russian].

Lang D. V., J. Appl. Phys. **45** (7), 3023 (1974).

Примечание: если русскоязычный журнал имеет печатный англоязычный аналог, то используется английское название аналога и номера страниц должны быть указаны из него. Если англоязычного аналога нет, то применяется английская транслитерация русскоязычного названия.

Книга:

Korn G. and Korn E., Mathematical Handbook, New York-London, McGraw-Hill Book Company, 1968; Moscow, Nauka, 1974.

Ultraviolet technologies in the modern world / ed. Karmazinov F. V., Kostyuchenko S. V., Kudryavtsev N. N., Dolgoprudny, Intellect, 2012 [in Russian].

Материалы конференции:

Romanov A. V., Stepovich M. A., and Filippov M. N. Proc. XVII Intern. Meeting on Radiation Physics of Solid State. Sevastopol, 2007, pp. 592–599.

Патенты:

Davydov S. G., Dolgov A. N., Yakubov R. H. Vacuum spark gap. Patent for invention № 2654494 (RF). 2018.

Диссертации и авторефераты:

Grechikhin V. A. Development and analysis of computer algorithms for processing single-particle signals of laser Doppler anemometers: Abstract. Diss. Candidate of Technical Sciences. M., MEI, 1996.

6. Список использованных источников («Литература») должен соответствовать всем ссылкам на внешние источники в тексте статьи. Эти ссылки оформляются в квадратных скобках, например, [1–3], [7, 8]. Внутренние ссылки, т. е. ссылки на формулы, рисунки и таблицы статьи оформляются с использованием круглых скобок, например, формула (3), уравнение (1), (рис. 2), (табл. 3). Любые ссылки в подписях к рисункам и в самих рисунках не рекомендуются.

7. Количество рисунков и фотографий для типовой статьи не должно превышать

10. Если один рисунок содержит два, три или более вариантов графических (или фото) изображений типа «рис. 2а», «рис. 2б» и т. д., то каждый отдельный вариант в этом случае засчитывается как отдельный рисунок. При превышении вышеуказанных лимитов на количество рисунков (фотографий) статья возвращается авторам на переработку. Графика (черно-белая и цветная) представляется непосредственно в нужном месте в статье и в желаемом масштабе. Рядом с осями графиков указываются отображаемые физические величины только (**строго!**) в символьной (буквенной) форме, а через запятую – размерность величины по-русски (прямым шрифтом). Различные кривые на графиках рекомендуется нумеровать, даже если они характеризуются отдельным цветом или типом линии. Графики представляются только (**строго!**) на белом фоне. Вспомогательные сетки на площади графика не допускаются.

8. Подписи под соответствующими рисунками представляются в нужных местах текста. Каждая подпись должна быть по возможности лаконичной, но емкой по содержанию. Любой указываемый в подписи физический (технический) символ должен иметь там же свое словесное раскрытие.

9. Простые формулы вводить в текст в формате используемого текстового редактора, более сложные формулы — с использованием редактора формул MathType. Стандартные математические обозначения (например, \max , \log , \sin , \exp и т. д.) должны быть набраны прямо. То же относится к цифрам и числам. Номера формул пишутся справа в круглых скобках. Для символьного обозначения не векторных физических (технических) величин использовать только латинский и греческий алфавиты, при этом в тексте для греческих букв использовать прямой шрифт, для латинских букв — наклонный шрифт (курсив). Векторы и матрицы обозначать полужирным прямым шрифтом (предпочтительнее) или стрелкой над курсивным символом вектора (менее желательно). Для нижних и верхних индексов применять арабские цифры, латинские или греческие буквы, но если индекс, обычно нижний, представляет собой краткую (сокращенную) форму русского слова-характеристики, то допустимо использовать в его обозначении русские буквы (прямой шрифт), например $U_{\text{вх}}$, $I_{\text{вых}}$, $v_{\text{тр}}$ и т. п. Размерность физических величин обозначается всегда только по-русски прямым шрифтом.

10. Таблицы выполнять в соответствии со следующими требованиями: верхняя строка – наименование данных и размерность; следующие строки – сами данные.

11. Формулы, таблицы и рисунки должны иметь свою отдельную сквозную нумерацию. Если на конкретную формулу нет дополнительных (возвратных) ссылок в тексте или она в единственном числе, то нумерация ее не нужна. Единственные таблицы и/или рисунок также не нумеруются.

12. Рукописи, а также CD/DVD-диски редакцией не возвращаются.

13. Авторы (или автор) каждой статьи после ее публикации в очередном номере журнала имеют право на получение от редакции электронной версии статьи в PDF-формате (редактор Adobe Acrobat).

14. При публикации в журнале каждая статья (в контактной информации) сопровождается сноской со знаком охраны авторского права ©, поставленным перед фамилией автора (фамилиями авторов) и годом издания. В статье указывается также дата поступления статьи в редакцию.

Правила направления, рецензирования и опубликования научных статей в журнале «Прикладная физика»

1. Журнал «Прикладная физика» ориентирован в основном на срочную публикацию кратких статей о последних достижениях в области физики, имеющих перспективу прикладного (технического и научного) применения. Журнал входит в новый Перечень ВАК, вступивший в действие 1 декабря 2015 г.

Направляя рукопись статьи в редакцию журнала, авторы передают редколлегии, учредителю и издателю журнала безвозмездное неисключительное право опубликовать ее на русском языке в качестве статьи в печатной версии журнала, в электронной версии журнала в сети Интернет и на лазерных дисках. При этом за авторами сохраняются их интеллектуальные права на рукопись статьи (в т. ч. «авторское право»). В связи с этим и с учетом Четвертой части (Раздел VII) Гражданского Кодекса РФ авторами должно быть представлено в редакцию письмо в следующей форме:

Лицензионный договор о передаче права на публикацию (издательский лицензионный договор)

Мы, нижеподписавшиеся, авторы рукописи _____ предоставляем редколлегии, учредителю и издателю журнала «Прикладная физика» безвозмездную простую (неисключительную) лицензию на публикацию рукописи статьи как в печатной, так и в электронной версиях журнала.

Мы подтверждаем, что данная публикация не нарушает интеллектуальных прав других лиц или организаций.

Подписи авторов: _____ (ф. и. о., ученая степень, дата)

Статья должна быть подписана всеми авторами. В случае нескольких авторов указывается фамилия автора, ответственного за переписку с редакцией. Рукопись статьи направляется на адрес редакции журнала: 111538, Москва, ул. Косинская, д. 9, АО «НПО «Орион», Редакция журнала «Прикладная физика» или по электронной почте: advance@orion-ir.ru

2. Рукопись статьи в редакцию представляется обязательно на русском языке.

3. Рукопись статьи должна сопровождаться экспертным заключением о возможности публикации в открытой печати, оформленным в установленном порядке.

4. Объем статьи (вместе с рисунками, библиографией и англоязычной частью) не должен превышать 7 страниц формата А4 при однократном межстрочном интервале. (Статью большего объема предлагается направлять в аффилированный журнал "Успехи прикладной физики", предназначенный для публикации развернутых статей и обзоров). Материал статьи представляется в печатном виде (на бумажном носителе) и в электронном варианте на CD/DVD-диске с текстом в формате Word (гарнитура шрифта – Times New Roman, размер шрифта – 12), причем текст уже должен содержать в нужном месте рисунки и подписи под ними. Однако следует избегать приведения в тексте излишне подробных и громоздких математических преобразований и выражений. Оформление статьи следующее:

– название раздела журнала;

– индекс УДК;

– код классификации PACS

https://publishing.aip.org/wp-content/uploads/2019/01/PACS_2010_Alpha.pdf;

– заголовок статьи;

- инициалы и фамилии авторов;
- аннотация статьи (10–15 строк с раскрытием цели работы и её основных результатов);
- ключевые слова;
- шифр научной специальности.

5. Основной текст статьи должен начинаться разделом «Введение» с четкой постановкой цели и задачи работы, сопровождаемой аргументами в пользу ее выполнения на фоне существующего состояния затронутой в статье проблемы. Дальнейший текст статьи также должен иметь смысловые рубрикаторы (разделы и подразделы) без их нумерации. Заканчиваться статья должна отдельным разделом «Заключение» с перечислением основных результатов, следующих из них выводов и, по возможности, предложений по развитию исследований и использованию их результатов.

Внизу первой страницы текста помещается отдельный абзац (полужирным шрифтом), содержащий контактную информацию об авторе (или авторах) в следующем виде: фамилия, имя, отчество (полностью), должность, ученая степень, e-mail, почтовый адрес предприятия.

После основного текста – список использованных источников под названием «Литература».

Примеры обозначения в разделе "Литература" использованных источников.

Ссылка на **статьи** дается следующим образом: Фамилия И.О., название журнала, год, том, номер, номера страниц.

Иванов И. И. // Прикладная физика. 2022. № 1. С. 12–18.

Lang D. V. // J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. № 7. P. 3023–3034.

Ссылка на **книги**: Фамилия И.О., название книги, город, издательство, год. (При ссылке на определенную главу или страницу в книге после года ставится номер страницы.)

Корн Г., Корн Е. Справочник по математике. – М.: Наука, 1974.

Биберман Л. М., Воробьев В. С., Якубов И. Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. – М.: Наука, 1982. С. 371.

Ультрафиолетовые технологии в современном мире / под ред. Кармазинов Ф. В. Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н. – Долгопрудный: Интеллект, 2012.

Ссылка на **материалы конференции**: Фамилия И.О., название публикации, место и дата проведения, номера страниц.

Романов А. В., Степович М. А., Филиппов М. Н. / Труды XVII Международного совещания «Радиационная физика твердого тела». – Севастополь, 2007. С. 592–599.

Ссылка на **патенты**: Фамилия И.О., название, вид, номер, год.

Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Якубов Р. Х. Вакуумный искровой разрядник. Патент на изобретение № 2654494 (РФ). 2018.

Ссылка на **диссертации и авторефераты**: Фамилия И.О., название работы (автореферата), дисс. ... канд. (д-ра) физ.-мат. наук, город, организация, год.

Гречихин В. А. Разработка и анализ компьютерных алгоритмов обработки одночастичных сигналов лазерных доплеровских анемометров: Автореф. дисс. канд. техн. наук. – М.: МЭИ, 1996.

Далее размещается подробная англоязычная информация о статье, необходимая для индексирования всего журнала, данной статьи и её авторов в международных наукометрических базах данных, а именно: PACS, название статьи, фамилия и инициалы авторов (английская транслитерация), предприятие, его почтовый адрес, e-mail автора (авторов), аннотация, ключевые слова (Keywords), пристатейная библиография (References); поскольку журнал распространяется и за рубежом, редакция оставляет за собой право корректировать английскую часть текста без изменения его смысла.

Оформление пристатейной библиографии в англоязычной части статьи (References) имеет свои особенности. В частности, если цитируемая книга или монография является русскоязычным переводом с зарубежного издания, то указываются исходные данные этого издания (авторы, название книги, издательство, город или страна, год издания), а также русскоязычное издательство и год издания на русском языке. Ниже приведены основные примеры обозначения использованных источников в разделе References:

Статья из журнала:

Ivanov I. I., Applied Physics, № 1, 12–18 (2022) [in Russian].

Lang D. V., J. Appl. Phys. **45** (7), 3023–3034 (1974).

Примечание: если русскоязычный журнал имеет печатный англоязычный аналог, то используется английское название аналога и номера страниц должны быть указаны из него. Если англоязычного аналога нет, то применяется английская транслитерация русскоязычного названия.

Книга:

Korn G. and Korn E., Mathematical Handbook, New York-London, McGraw-Hill Book Company, 1968; Moscow, Nauka, 1974.

Ultraviolet technologies in the modern world / ed. Karmazinov F. V., Kostyuchenko S. V., Kudryavtsev N. N., Dolgoprudny, Intellect, 2012 [in Russian].

Материалы конференции:

Romanov A. V., Stepovich M. A., and Filippov M. N. Proc. XVII Intern. Meeting on Radiation Physics of Solid State. Sevastopol, 2007, pp. 592–599.

Патенты:

Davydov S. G., Dolgov A. N., Yakubov R. H. Vacuum spark gap. Patent for invention № 2654494 (RF). 2018.

Диссертации и авторефераты:

Grechikhin V. A. Development and analysis of computer algorithms for processing single-particle signals of laser Doppler anemometers: Abstract. Diss. Candidate of Technical Sciences. M., MEI, 1996.

6. Список использованных источников («Литература») должен соответствовать всем ссылкам на внешние источники в тексте статьи. Эти ссылки оформляются в квадратных скобках, например, [1–3], [7, 8]. Внутренние ссылки, т. е. ссылки на формулы, рисунки и таблицы статьи оформляются с использованием круглых скобок, например, формула (3), уравнение (1), (рис. 2), (табл. 3). Любые ссылки в подписях к рисункам и в самих рисунках не рекомендуются.

7. Количество рисунков и фотографий для типовой статьи не должно превышать 4. Если один рисунок содержит два, три или более вариантов графических (или фото) изображений типа «рис. 2а», «рис. 2б» и т. д., то каждый отдельный вариант в этом

случае засчитывается как отдельный рисунок. При превышении вышеуказанных лимитов на количество рисунков (фотографий) статья возвращается авторам на переработку. Графика (черно-белая и цветная) представляется непосредственно в нужном месте в статье и в желаемом масштабе. Рядом с осями графиков указываются отображаемые физические величины только **(строго!)** в символьной (буквенной) форме, а через запятую – размерность величины по-русски (прямым шрифтом). Различные кривые на графиках рекомендуется нумеровать, даже если они характеризуются отдельным цветом или типом линии. Графики представляются только **(строго!)** на белом фоне. Вспомогательные сетки на площади графика не допускаются.

8. Подписи под соответствующими рисунками представляются в нужных местах текста. Каждая подпись должна быть по возможности лаконичной, но емкой по содержанию. Любой указываемый в подписи физический (технический) символ должен иметь там же свое словесное раскрытие.

9. Простые формулы вводить в текст в формате используемого текстового редактора, более сложные формулы – с использованием редактора формул MathType. Стандартные математические обозначения (например, \max , \log , \sin , \exp и т. д.) должны быть набраны прямо. То же относится к цифрам и числам. Номера формул пишутся справа в круглых скобках. Для символьного обозначения не векторных физических (технических) величин использовать только латинский и греческий алфавиты, при этом в тексте для греческих букв использовать прямой шрифт, для латинских букв – наклонный шрифт (курсив). Векторы и матрицы обозначать полужирным прямым шрифтом (предпочтительнее) или стрелкой над курсивным символом вектора (менее желательно). Для нижних и верхних индексов применять арабские цифры, латинские или греческие буквы, но если индекс, обычно нижний, представляет собой краткую (сокращенную) форму русского слова-характеристики, то допустимо использовать в его обозначении русские буквы (прямой шрифт), например $U_{вх}$, $I_{вых}$, $v_{тр}$ и т. п. Размерность физических величин обозначается всегда только по-русски прямым шрифтом.

10. Таблицы выполнять в соответствии со следующими требованиями: верхняя строка – наименование данных и размерность; следующие строки – сами данные.

11. Формулы, таблицы и рисунки должны иметь свою отдельную сквозную нумерацию. Если на конкретную формулу нет дополнительных (возвратных) ссылок в тексте или она в единственном числе, то нумерация ее не нужна. Единственные таблицы и/или рисунок также не нумеруются.

12. Рукописи, а также CD/DVD-диски редакцией не возвращаются.

13. Авторы (или автор) каждой статьи после ее публикации в очередном номере журнала имеют право на получение от редакции электронной версии статьи в PDF-формате (редактор Adobe Acrobat).

14. При публикации в журнале каждая статья (в контактной информации) сопровождается сноской со знаком охраны авторского права ©, поставленным перед фамилией автора (фамилиями авторов) и годом издания. В статье указывается также дата поступления статьи в редакцию.



Конференция в научной
соцсети Scinetwork



Присоединяйтесь
к телеграм-каналу форума