

ПЕЧАТНЫЕ ФОТОДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ МАТРИЧНЫХ ФПУ БОЛЬШОЙ ПЛОЩАДИ

Санджиева Мария,
ООО «Лаборатория электроники ФлексЛаб»
Санкт-Петербург

13/10/2023

Немного о нашей лаборатории

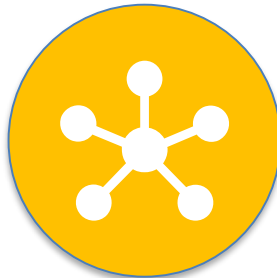
MISSION AND STRATEGIC GOAL

- ✓ Implementing research and technologies with advanced semiconducting materials
- ✓ Establishing network partnerships
- ✓ Promoting cutting-edge technologies in focus areas
- ✓ Education students

>80
Papers Q1



>20
Patents



>10
know-how



Printed
electronics



New
Materials



Фоточувствительные матрицы



1816
Первая фотография
Joseph Nicéphore Niépce



1848
Первая цветная
фотография
James Clerk Maxwell



1975
Первая цифровая
камера
Steven Sasson



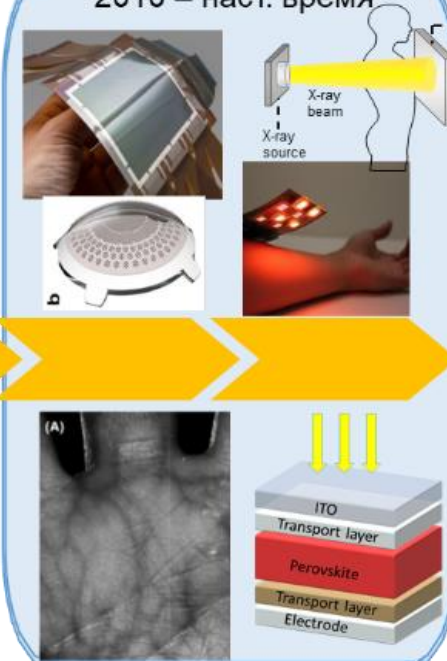
Рынок сенсоров изображений
(камер) на CMOS

1990 – наст. время



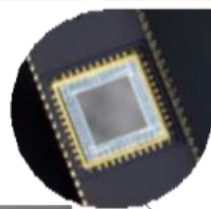
Рынок сенсоров изображений
большой площади

2010 – наст. время



1828
Первое фото человека
Louis Daguerre

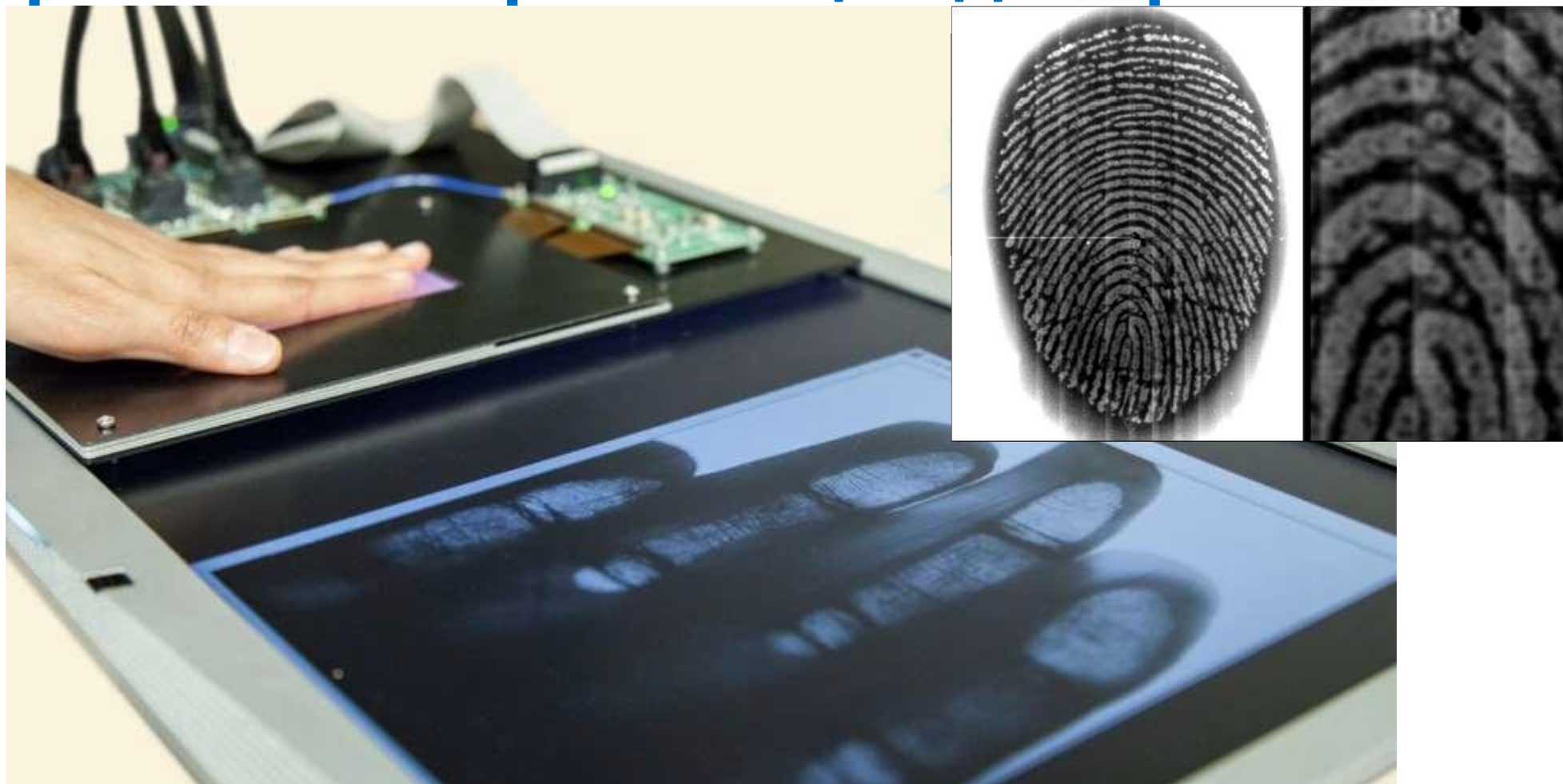
Willard Boyle,
George Smith
1935



1969
CCD

1993
CMOS сенсор
изображений
Eric Fossum

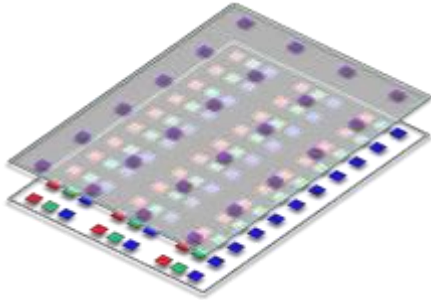
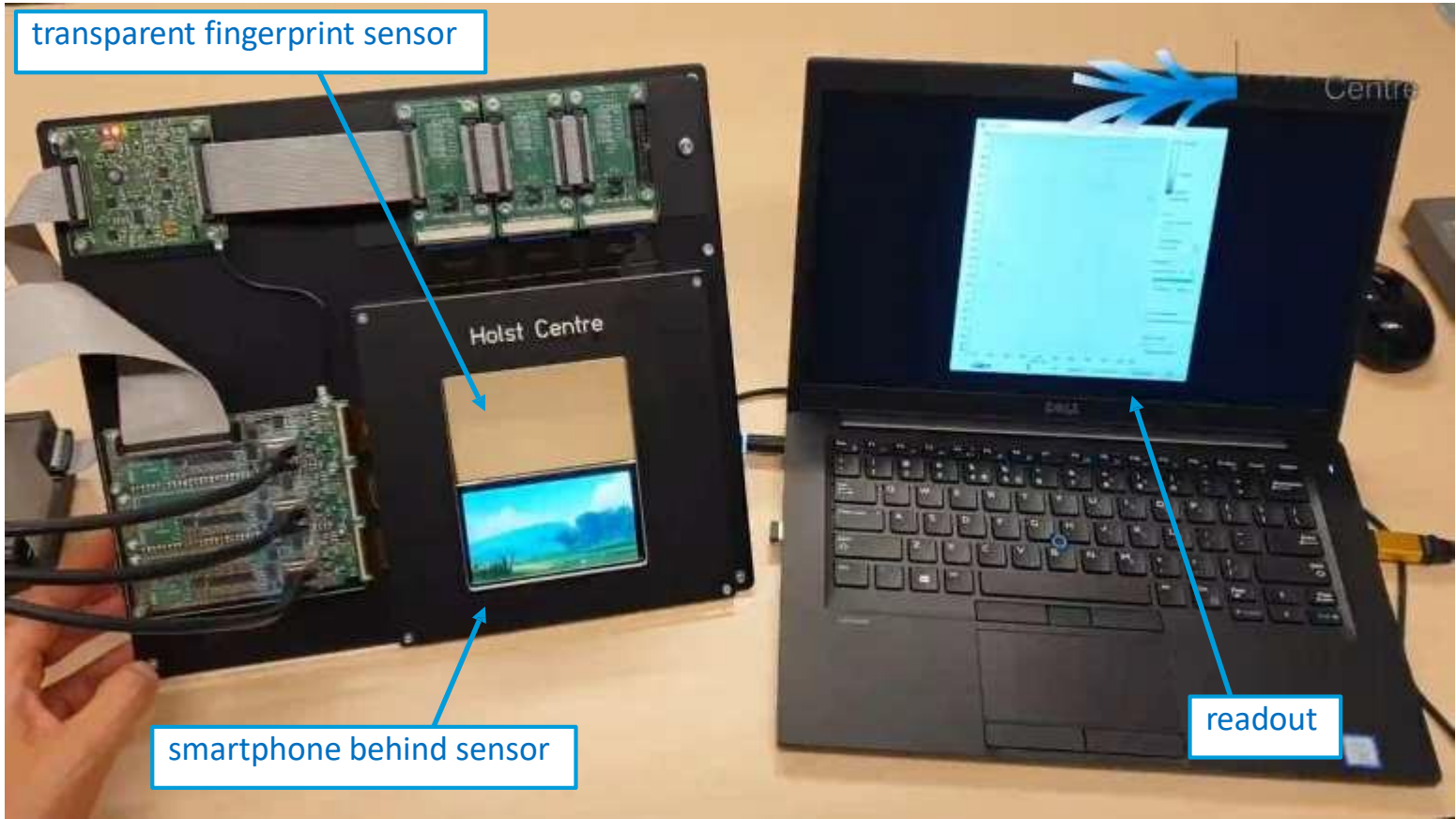
Большие сенсоры позволяют сканировать четыре пальца одновременно



Высокая детализация папиллярных узоров и пор

Akkerman et al. SID Digest 49 (2018) 494

Прозрачные сканеры отпечатка – на дисплее

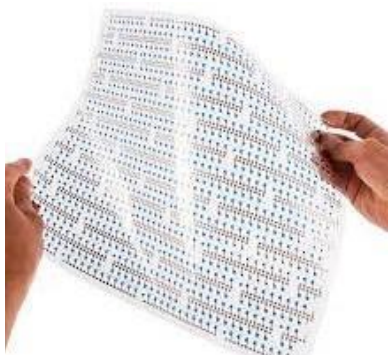


SID 2019
I-Zone
Best Prototype Award





Большие печатные матричные ФПУ



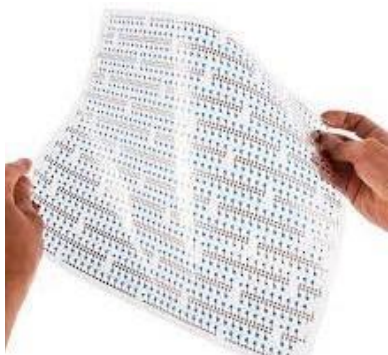
Array of organic photodetectors on a flexible TFT backplane. Source: ISORG

Печатные фотодетекторы

- Полностью наносимые из раствора органические (OPDs) или перовскитные ФД (PPDs).
- Гибридные органические (OPD нанесен КМОП, применение для цифровых камер)
- Гибридные на КТ (например, PbS на КМОП).

	Большие, низкое разрешение, TFT система считывания Обычно гибкие.	Маленькие, высокое разрешение silicon readout circuit. Not flexible.
Органические полупроводники		
Квантовые точки		

Большие печатные матричные ФПУ



Матрица органических фотодетекторов на TFT транзисторах. Источник: ISORG

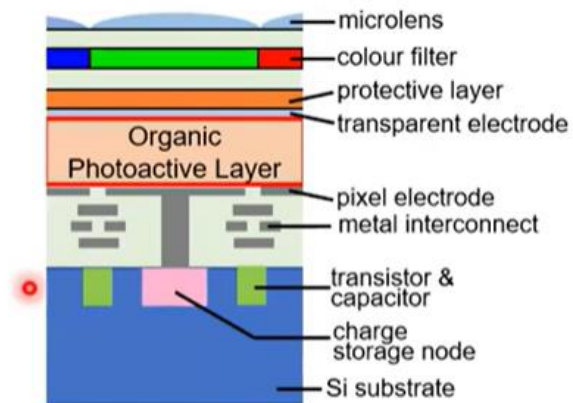
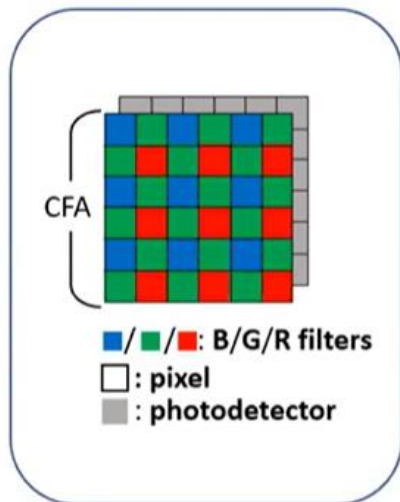
Печатные фотодетекторы

- Полностью наносимые из раствора органические (OPDs) или перовскитные ФД (PPDs).
- Гибридные органические (OPD нанесен КМОП, применение для цифровых камер)
- Гибридные на КТ (например, PbS на КМОП).

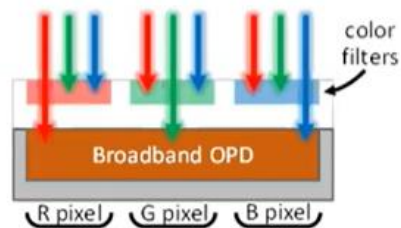
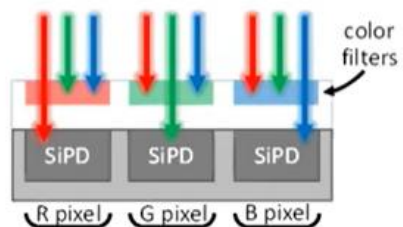
	Большие, низкое разрешение, TFT система считывания Обычно гибкие.	Маленькие, высокое разрешение silicon readout circuit. Not flexible.
Органические полупроводники		
Квантовые точки		

Гибридные системы на OPD

Conventional Colour Imaging



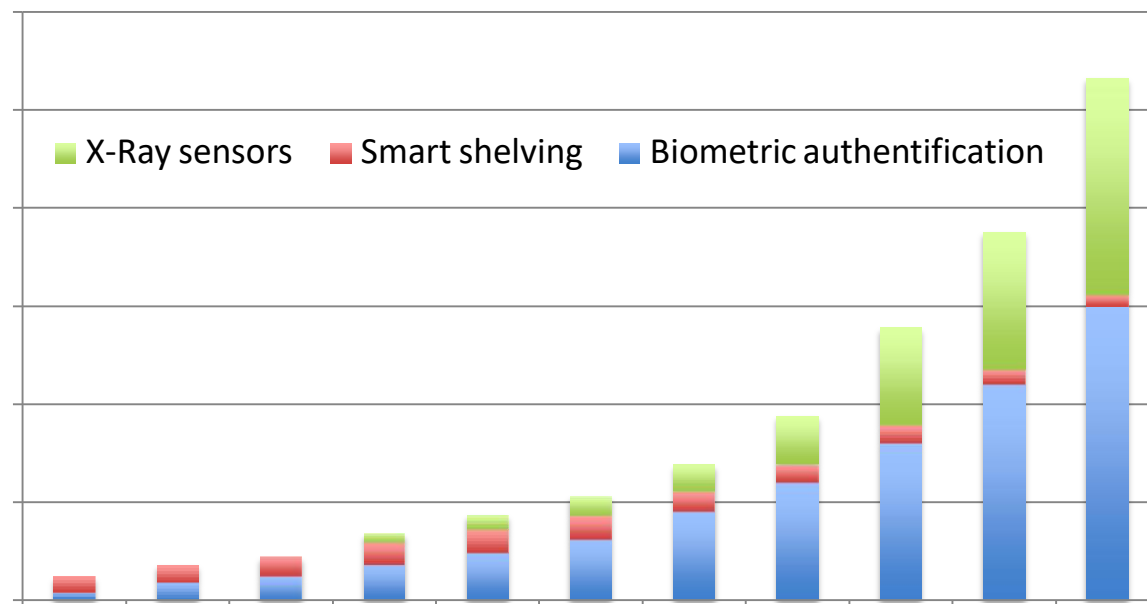
Colour-filter-based imaging with broadband OPDs already successfully demonstrated



Мотивация

Объёмы мирового рынка:

- детекторы рентгеновского излучения: >\$2 млрд. при CAGR 5%
- детекторы отпечатков пальцев: >\$4 млрд. при CAGR 15%
- гибридные детекторы изображения: >\$400 млн.

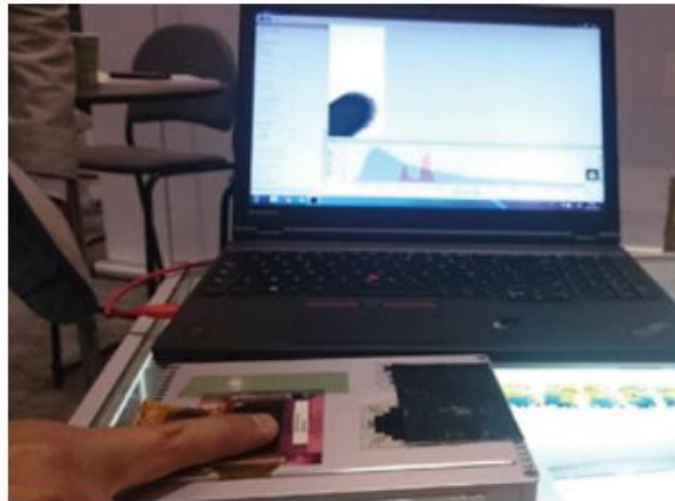


Большие печатные матричные ФПУ

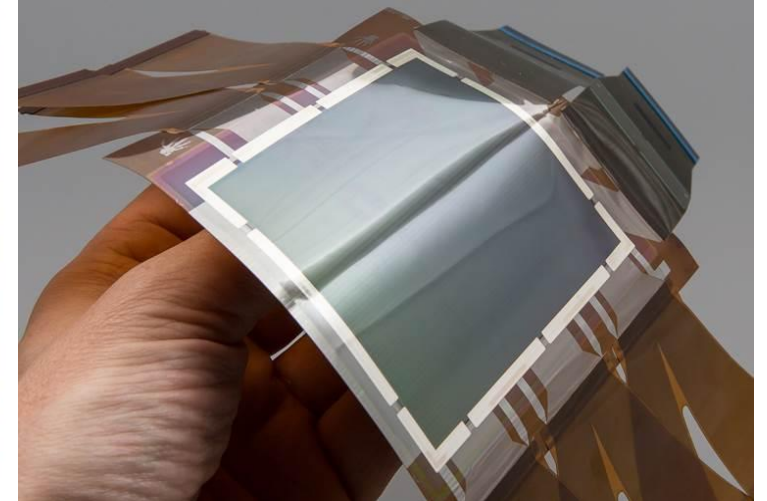
- Фотодетекторы могут быть нанесены на TFT матрицу
- Нет необходимости пикселировать ФД слой
- Прототипы продемонстрированы компаниями
ISORG, FlexEnable и imec (Holst)



ISORG



FlexEnable



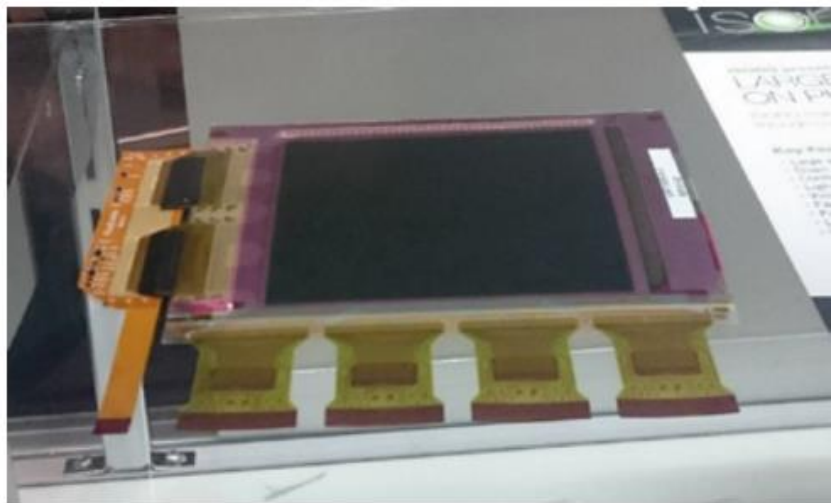
Imec (Holst Center)

Большие печатные матричные ФПУ

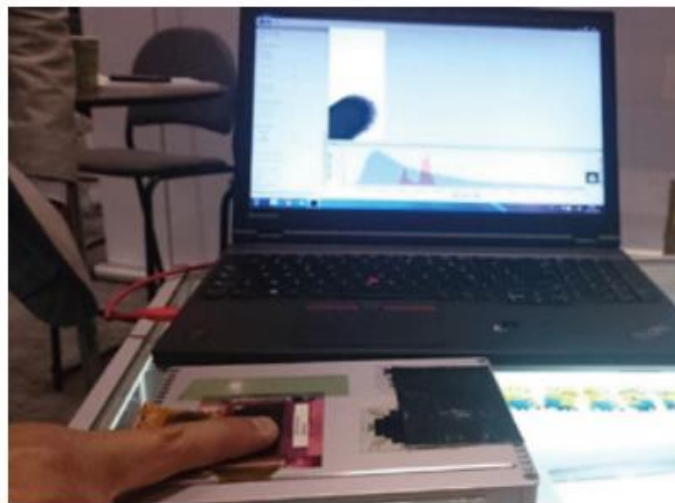
Dream

- Flexibility
- Lightness
- Semitransparent
- Solution-processed
- Stability
- Eco-friendly tech

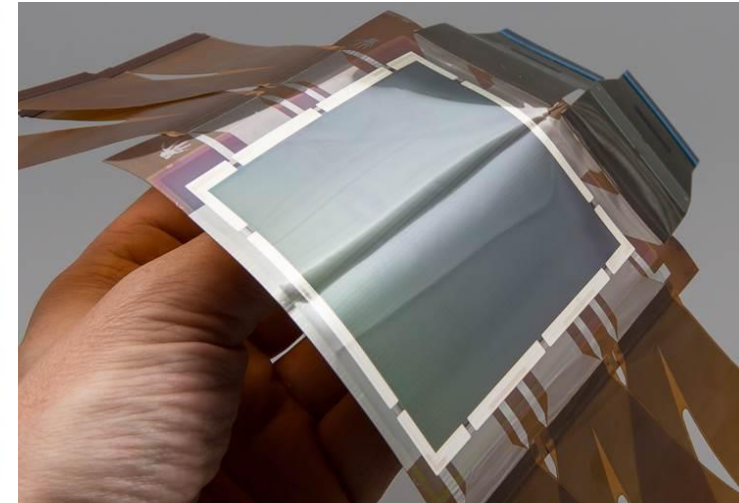
- Ультратонкие и гибкие датчики изображений
- Нет необходимости пикселировать ФД слой
- Растворные технологии, дешевизна, высокая скорость производства
- Низкие температуры, не нужен высокий вакуум,



ISORG



FlexEnable



Imec (Holst Center)

Печатные фотодетекторы?

The image shows a periodic table of elements. A red box highlights a group of elements, likely related to the question about printed photodetectors. The highlighted elements are:

30	31	32	33	34
Zn	Ga	Ge	As	Se
Zinc	Gallium	Germanium	Arsenic	Selenium
48	49	50	51	52
Cd	In	Sn	Sb	Te
Cadmium	Indium	Tin	Antimony	Tellurium
80	81	82	83	84
Hg	Tl	Pb	Bi	Po
Mercury	Thallium	Lead	Bismuth	Polonium

Печатные фотодетекторы?

The image shows a periodic table of elements. A red box highlights a specific region of elements, likely related to the question about photo detectors. The highlighted elements are:

Zn	Ga	Ge	As	Se	
Cd	In	Sn	Sb	Te	
Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At

The elements are arranged in rows and columns, with their atomic numbers and names listed. The highlighted elements are Zinc (Zn), Gallium (Ga), Germanium (Ge), Arsenic (As), Selenium (Se), Cadmium (Cd), Indium (In), Tin (Sn), Antimony (Sb), Tellurium (Te), Mercury (Hg), Thallium (Tl), Lead (Pb), Bismuth (Bi), Polonium (Po), and Astatine (At).

Печатные фотодетекторы?

The image shows a periodic table of elements. A red box highlights a group of elements: Zn, Ga, Ge, As, Se, Cd, In, Sn, Sb, Te, Hg, Tl, Pb, Bi, Po, At. Carbon (C) is highlighted in green. The table includes element symbols, names, and atomic numbers.

1 H Hydrogen																	2 He Helium
3 Li Lithium	4 Be Beryllium											5 B Boron	6 C Carbon	7 N Nitrogen	8 O Oxygen	9 F Fluorine	10 Ne Neon
11 Na Sodium	12 Mg Magnesi...											13 Al Aluminium	14 Si Silicon	15 P Phosph	16 S Sulfur	17 Cl Chlorine	18 Ar Argon
19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titanium	23 V Vanadium	24 Cr Chromium	25 Mn Mangan...	26 Fe Iron	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Copper	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germani	33 As Arsenic	34 Se Selenium	35 Br Bromine	36 Kr Krypton
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybde...	43 Tc Techneti...	44 Ru Ruthenium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Silver	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Tin	51 Sb Antimony	52 Te Tellurium	53 I Iodine	54 Xe Xenon
55 Cs Caesium	56 Ba Barium	57 La Lanthan...	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantalum	74 W Tungsten	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platinum	79 Au Gold	80 Hg Mercury	81 Tl Thallium	82 Pb Lead	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astatine	86 Rn Radon
87 Fr Francium	88 Ra Radium	89 Ac Actinium	104 Rf Rutherfo...	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborg...	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitneri...	110 Ds Darmsta...	111 Rg Roentge...	112 Cn Coperni...	113 Nh Nihonium	114 Fl Flerovium	115 Mc Moscovi...	116 Lv Livermor...	117 Ts Tenness...	118 Og Oganes...

ПЕЧАТНЫЕ ФОТОДЕТЕКТОРЫ?

The image shows a periodic table of elements. A callout box for Carbon (C) is positioned over the element's cell, which is highlighted in green. The callout box contains the atomic number 6, the symbol C, and the name Carbon. A blue arrow points from the callout box to the Carbon cell in the periodic table.

1 H Hydrogen																	2 He Helium
3 Li Lithium	4 Be Beryllium											5 B Boron	6 C Carbon	7 N Nitrogen	8 O Oxygen	9 F Fluorine	10 Ne Neon
11 Na Sodium	12 Mg Magnesium											13 Al Aluminium	14 Si Silicon	15 P Phosphorus	16 S Sulfur	17 Cl Chlorine	18 Ar Argon
19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titanium	23 V Vanadium	24 Cr Chromium	25 Mn Manganese	26 Fe Iron	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Copper	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Selenium	35 Br Bromine	36 Kr Krypton
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdenum	43 Tc Technetium	44 Ru Ruthenium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Silver	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Tin	51 Sb Antimony	52 Te Tellurium	53 I Iodine	54 Xe Xenon
55 Cs Caesium	56 Ba Barium	57 La Lanthanum	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantalum	74 W Tungsten	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platinum	79 Au Gold	80 Hg Mercury	81 Tl Thallium	82 Pb Lead	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astatine	86 Rn Radon
87 Fr Francium	88 Ra Radium	89 Ac Actinium	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Cn Copernicium	113 Nh Nihonium	114 Fl Flerovium	115 Mc Moscovium	116 Lv Livermorium	117 Ts Tennessine	118 Og Oganesson

ПЕЧАТНЫЕ ФОТОДЕТЕКТОРЫ?

The image shows a periodic table of elements. Two elements are highlighted with callout boxes:

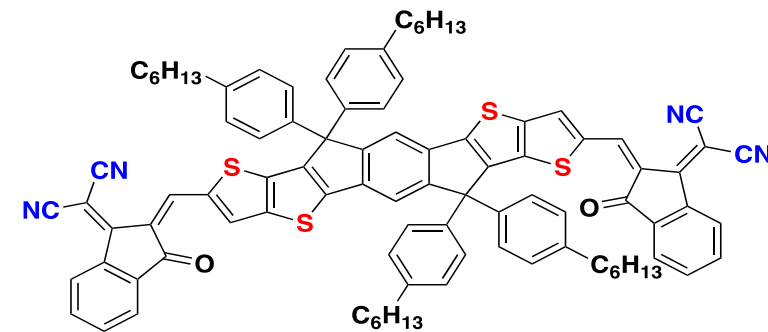
- Carbon (C):** Atomic number 6, atomic weight 12.011. The callout box is blue and contains the symbol 'C' and the name 'Carbon'.
- Lead (Pb):** Atomic number 82, atomic weight 207.20. The callout box is green and contains the symbol 'Pb' and the name 'Lead'.

The periodic table includes the following elements and their symbols:

1 H Hydrogen	2 He Helium																
3 Li Lithium	4 Be Beryllium	5 B Boron	6 C Carbon	7 N Nitrogen	8 O Oxygen	9 F Fluorine	10 Ne Neon										
11 Na Sodium	12 Mg Magnesium	13 Al Aluminium	14 Si Silicon	15 P Phosphorus	16 S Sulfur	17 Cl Chlorine	18 Ar Argon										
19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titanium	23 V Vanadium	24 Cr Chromium	25 Mn Manganese	26 Fe Iron	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Copper	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Selenium	35 Br Bromine	36 Kr Krypton
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdenum	43 Tc Technetium	44 Ru Ruthenium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Silver	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Tin	51 Sb Antimony	52 Te Tellurium	53 I Iodine	54 Xe Xenon
55 Cs Caesium	56 Ba Barium	57 La Lanthanum	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantalum	74 W Tungsten	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platinum	79 Au Gold	80 Hg Mercury	81 Tl Thallium	82 Pb Lead	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astatine	86 Rn Radon
87 Fr Francium	88 Ra Radium	89 Ac Actinium	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Cn Copernicium	113 Nh Nihonium	114 Fl Flerovium	115 Mc Moscovium	116 Lv Livermorium	117 Ts Tennessium	118 Og Oganesson

ПЕЧАТНЫЕ ФОТОДЕТЕКТОРЫ?

1 H Hydrogen																	6 C Carbon													
3 Li Lithium	4 Be Beryllium																			5 B Boron										
11 Na Sodium	12 Mg Magnesi...																			13 Al Aluminium										
19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titanium	23 V Vanadium	24 Cr Chromium	25 Mn Manganese	26 Fe Iron	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Copper	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germani...	33 As Arsenic	34 Se Selenium	35 Br Bromine	36 Kr Krypton													
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdenum	43 Tc Technetium	44 Ru Ruthenium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Silver	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Tin	51 Sb Antimony	52 Te Tellurium	53 I Iodine	54 Xe Xenon													
55 Cs Caesium	56 Ba Barium	57 La Lanthan...	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantalum	74 W Tungsten	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platinum	79 Au Gold	80 Hg Mercury	81 Tl Thallium	82 Pb Lead	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astatine	86 Rn Radon													
87 Fr Francium	88 Ra Radium	89 Ac Actinium	104 Rf Rutherford...	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitneri...	110 Ds Darmsta...	111 Rg Roentge...	112 Cn Coperni...	113 Nh Nihonium	114 Fl Flerovium	115 Mc Moscovi...	116 Lv Livermor...	117 Ts Tennes...	118 Og Oganese...													
																		82 207.20 Pb Lead												

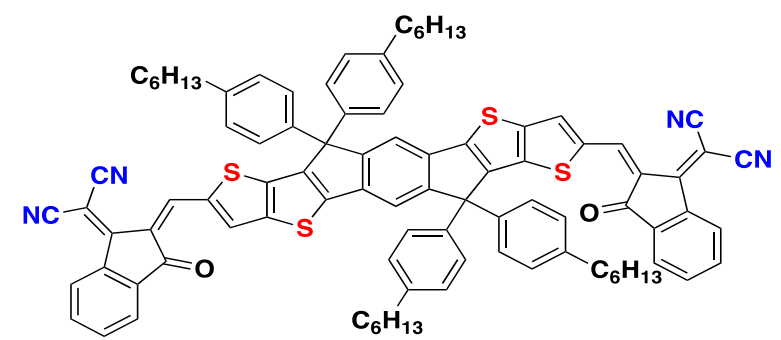
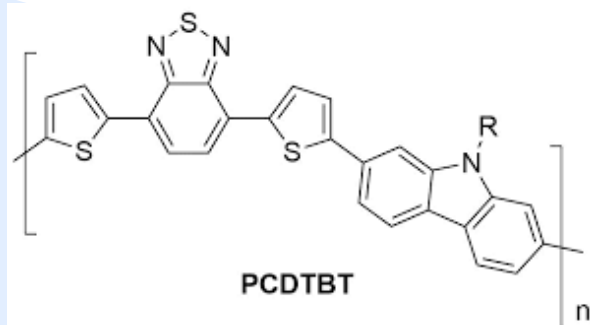


Печатные фотодетекторы?

1 H Hydrogen		
3 Li Lithium	4 Be Beryllium	
11 Na Sodium	12 Mg Magnesi...	
19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium
55 Cs Caesium	56 Ba Barium	57 La Lanthan...
87 Fr Francium	88 Ra Radium	89 Ac Actinium

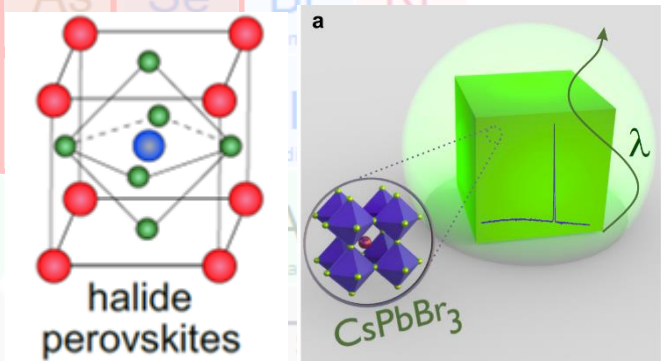
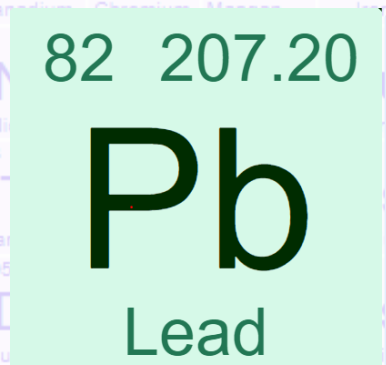
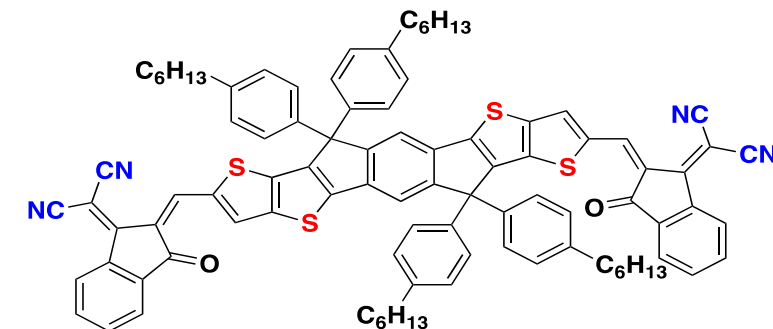
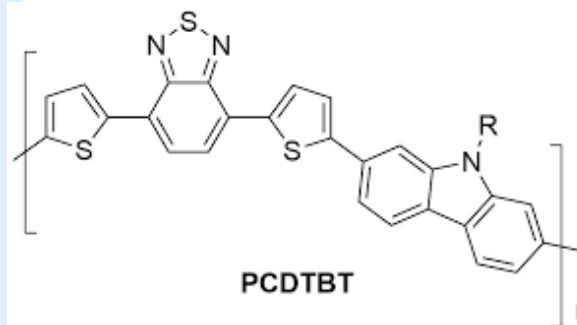
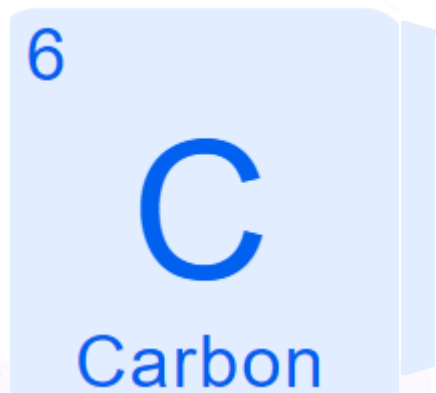
6
C
Carbon

82 207.20
Pb
Lead



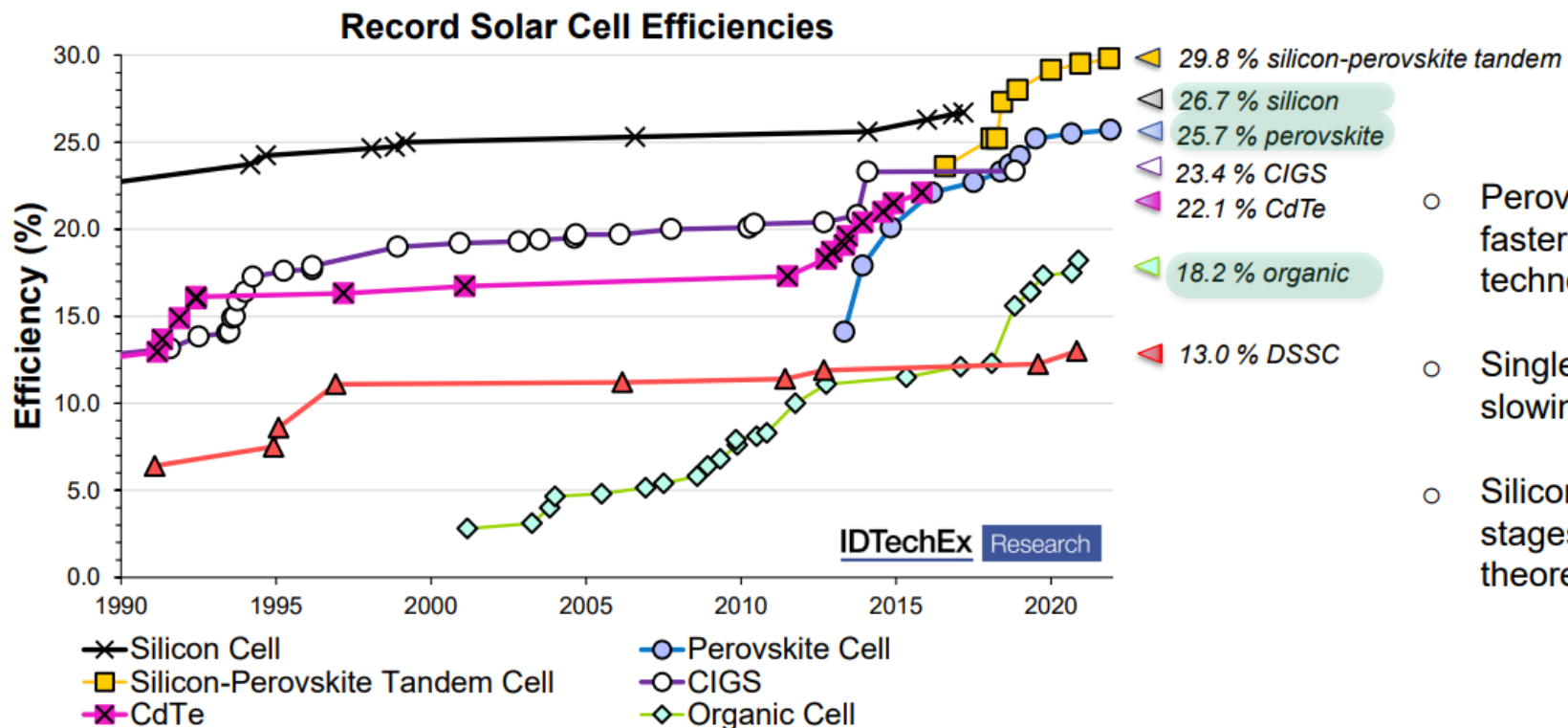
Печатные фотодетекторы?

1	H	Hydrogen
3	Li	Lithium
11	Na	Sodium
19	K	Potassium
37	Rb	Rubidium
55	Cs	Caesium
87	Fr	Francium
4	Be	Beryllium
12	Mg	Magnesium
20	Ca	Calcium
38	Sr	Strontium
56	Ba	Barium
88	Ra	Radium
21	Sc	Scandium
39	Y	Yttrium
57	La	Lanthanum
89	Ac	Actinium



Почему перовскиты и органика?

<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

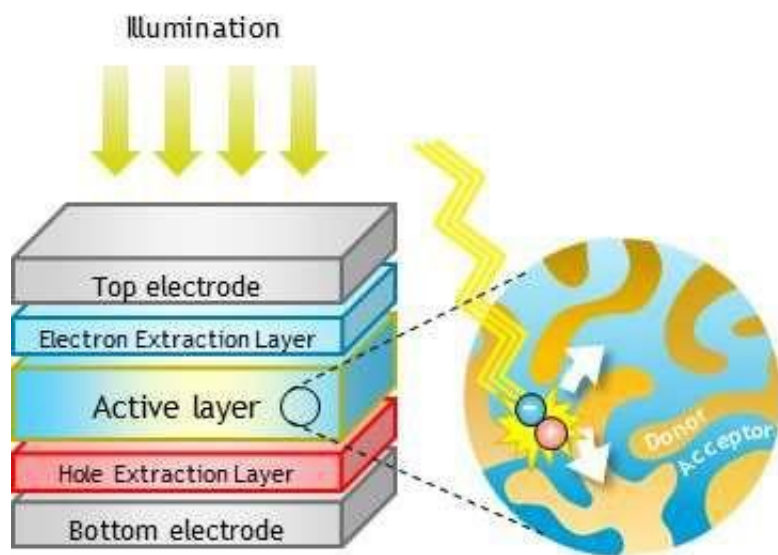


- Perovskite PV has advanced at a faster rate than any other technology
- Single junction perovskite PV slowing down
- Silicon-perovskite tandem is in early stages but has a maximum theoretical efficiency limit of ~43%

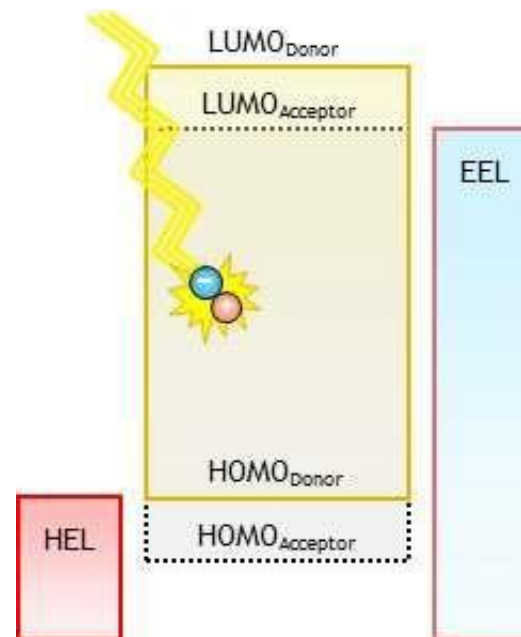
25.7% - pero
29.8% Si+pero
18.2% OPV

Органический фотодиод

BHJ DEVICE
ARCHITECTURE

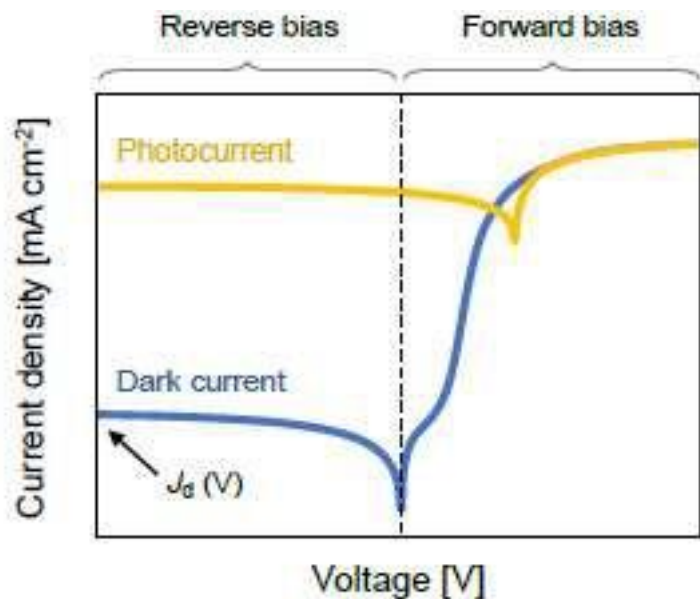


ENERGY
BAND DIAGRAM



Органический фотодиод – сенсор

Вольтамперная характеристика

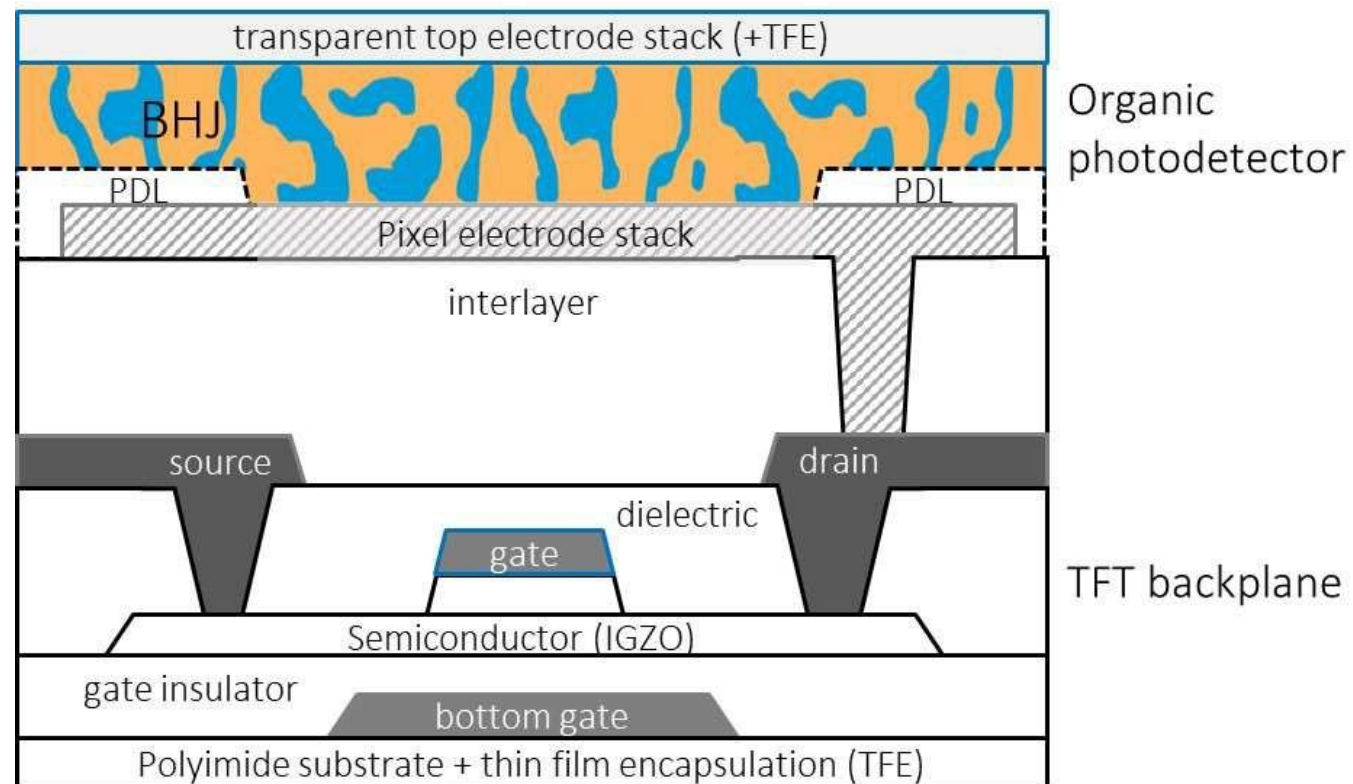


Ключевые показатели эффективности

- **Низкий темновой ток (J_D, i_{noise})**
 - Низкие шумы
 - Высокий динамический диапазон
- **Высокая EQE**
 - Диапазон чувствительности
 - Высокое соотношение S/N
- **Маленький размер пикселя**
 - Высокой разрешение
- **Скорость отклика**
 - Быстрое считывание
 - Отсутствие задержки кадров

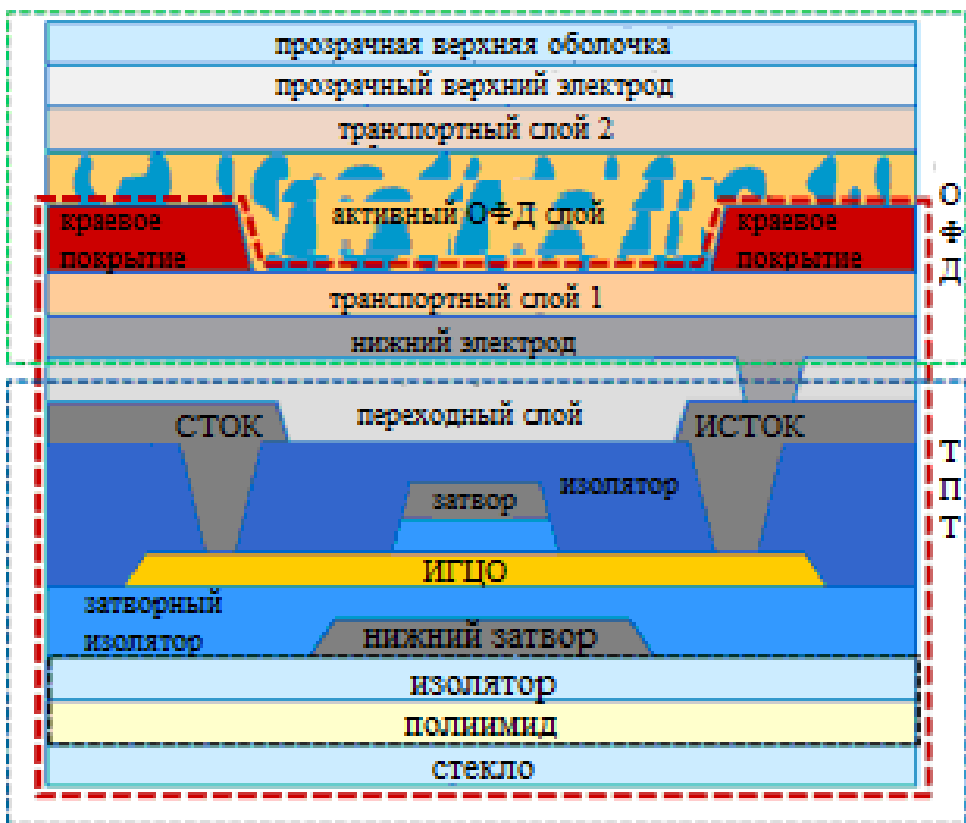
Схема рабочего стэка

1. IGZO транзисторная матрица (TFT)
2. Органический фотодиод (OPD)
3. Прозрачная инкапсуляция (TFE)

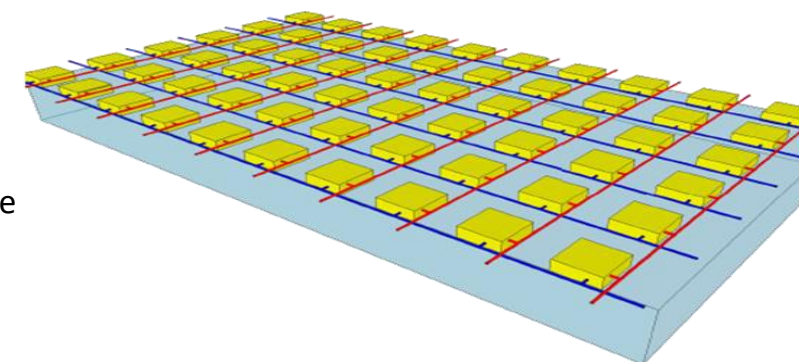
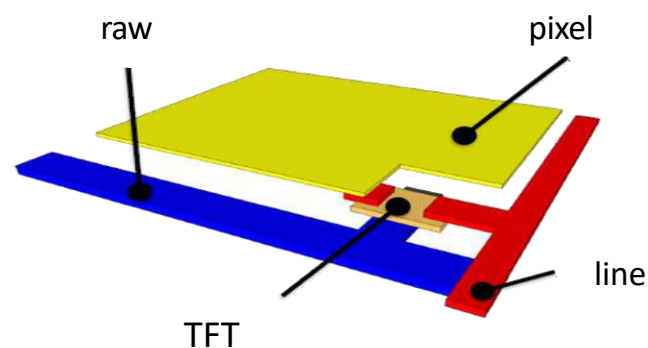


Общая толщина < 100 мкм

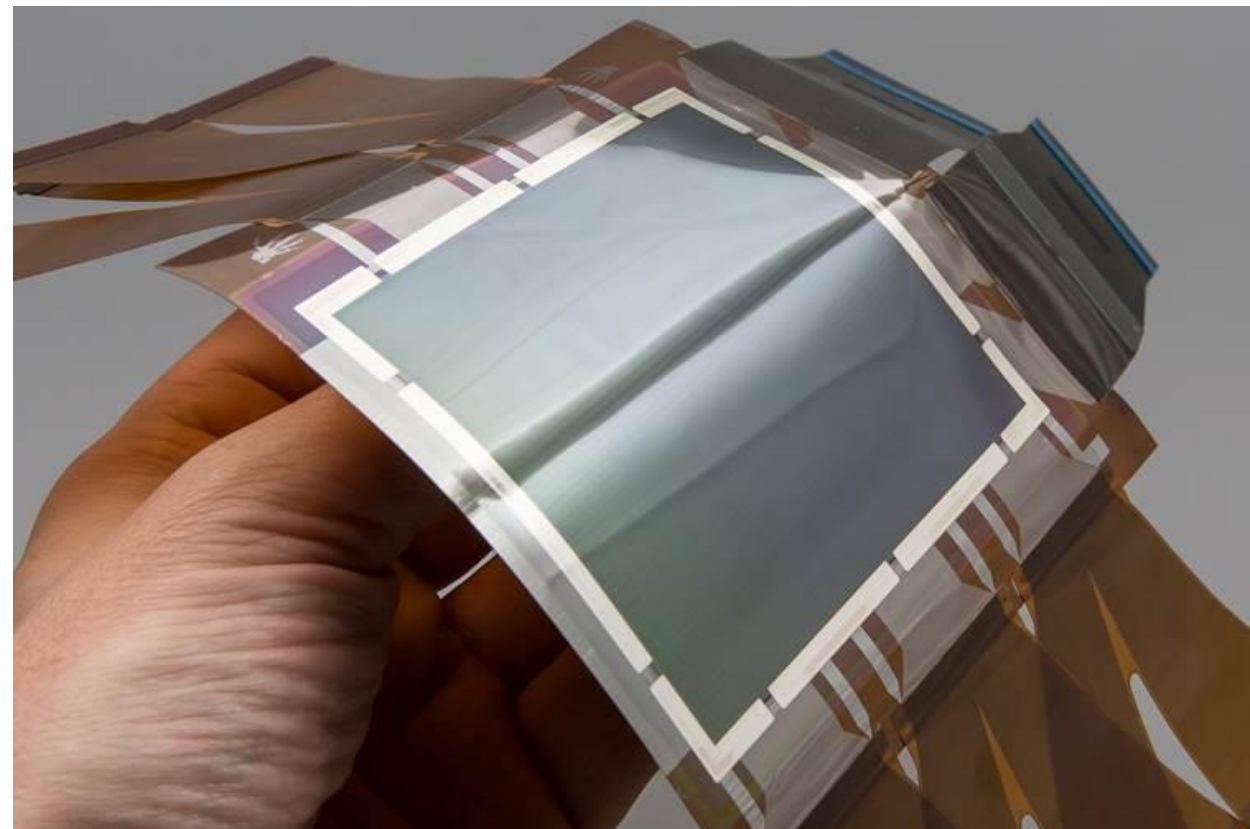
Схема рабочего стэка

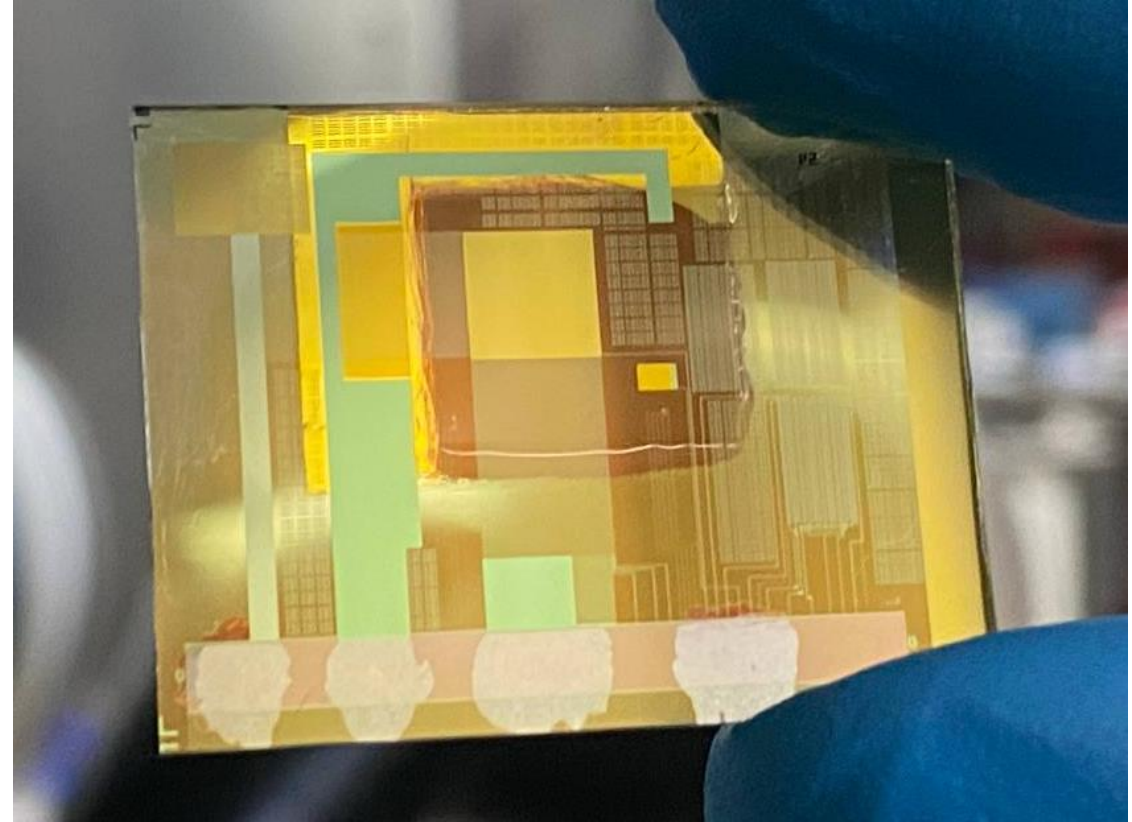
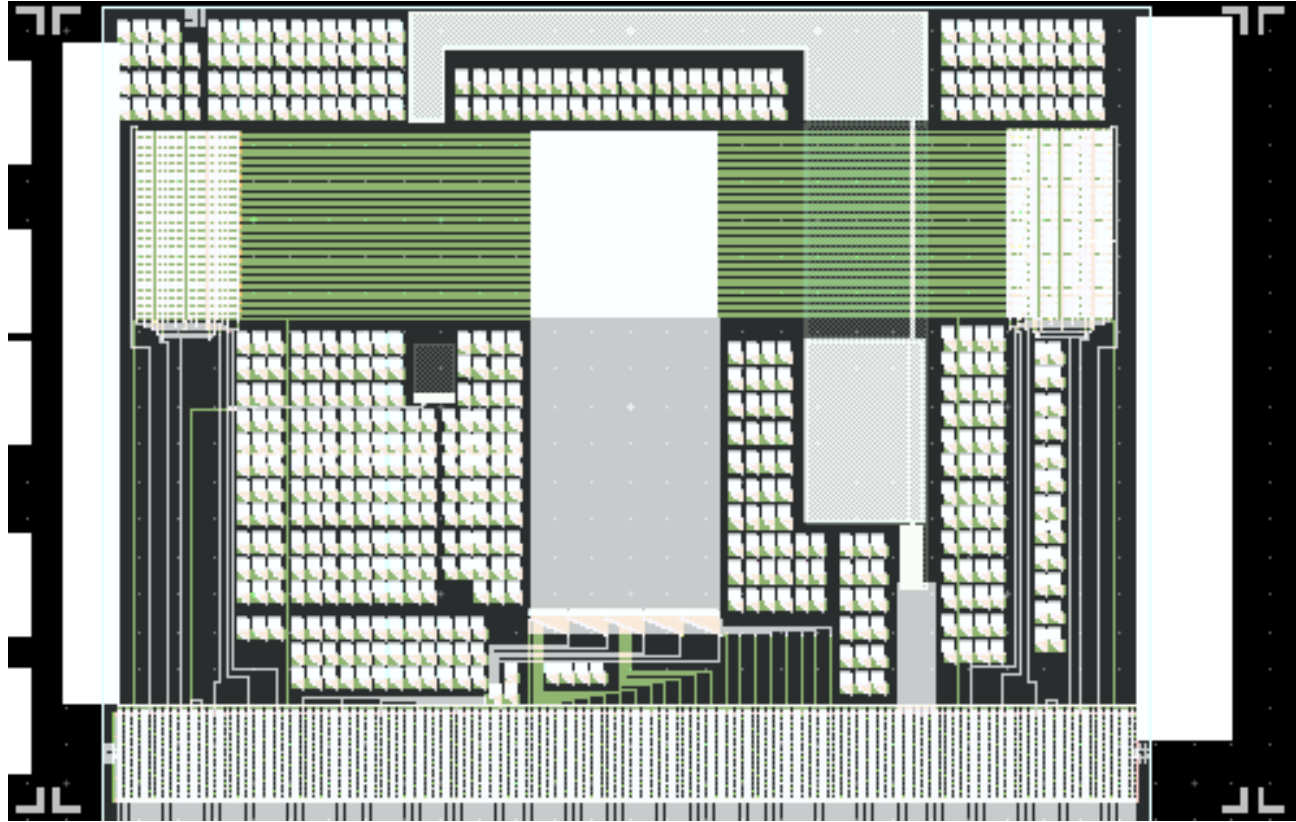


Структура матричного ФПУ

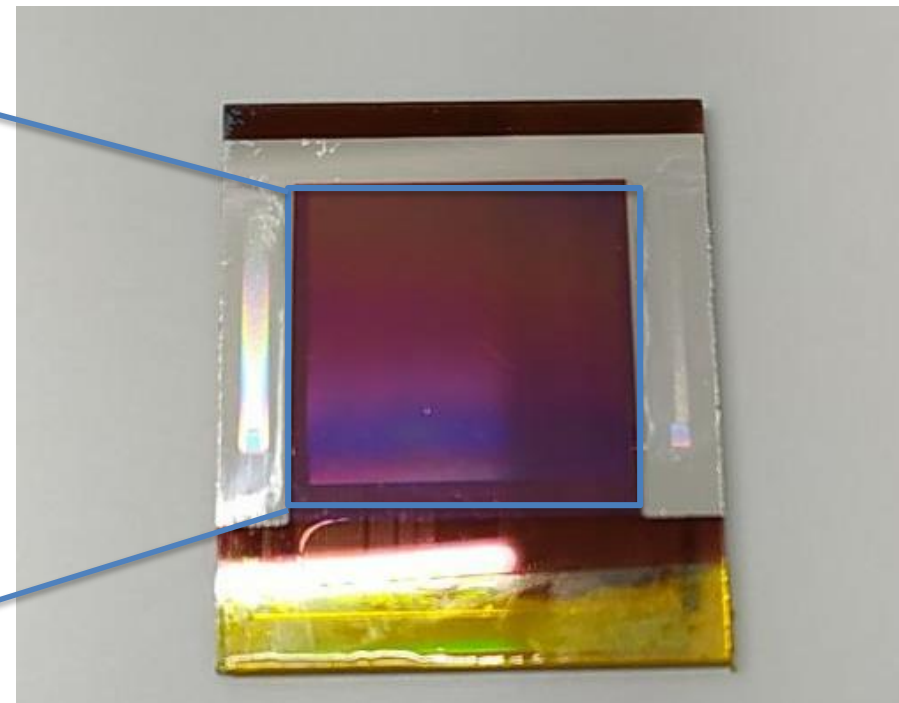
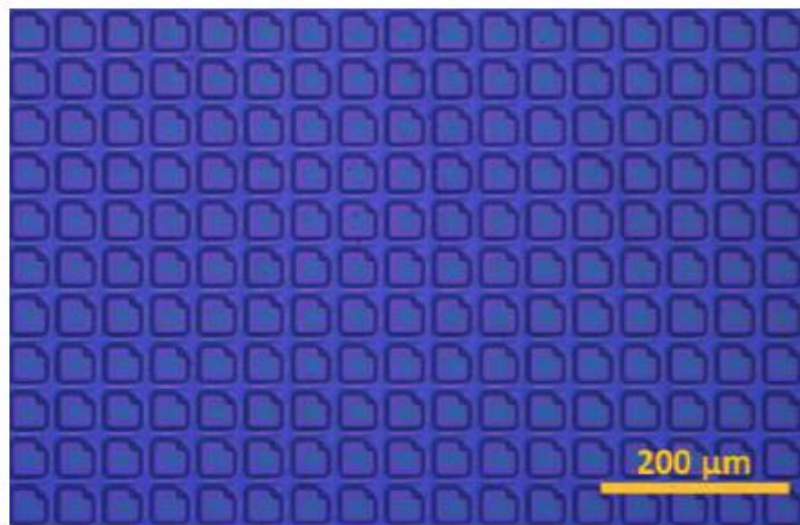
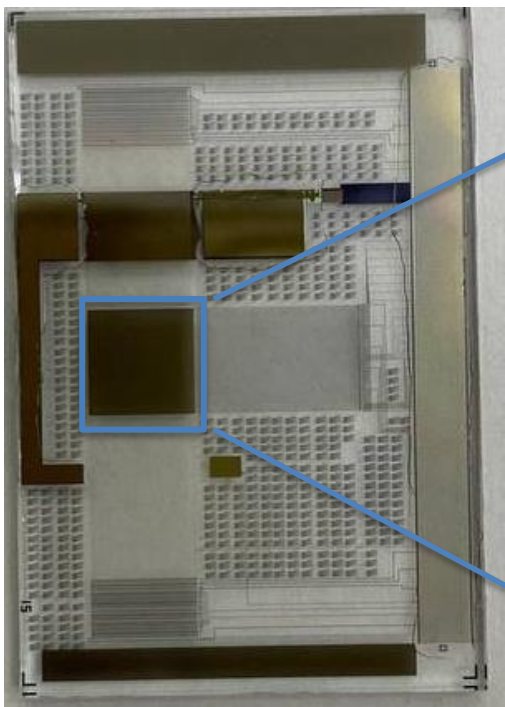


Large area, ultra-thin and flexible image sensors





Внешний вид и строение ФПУ



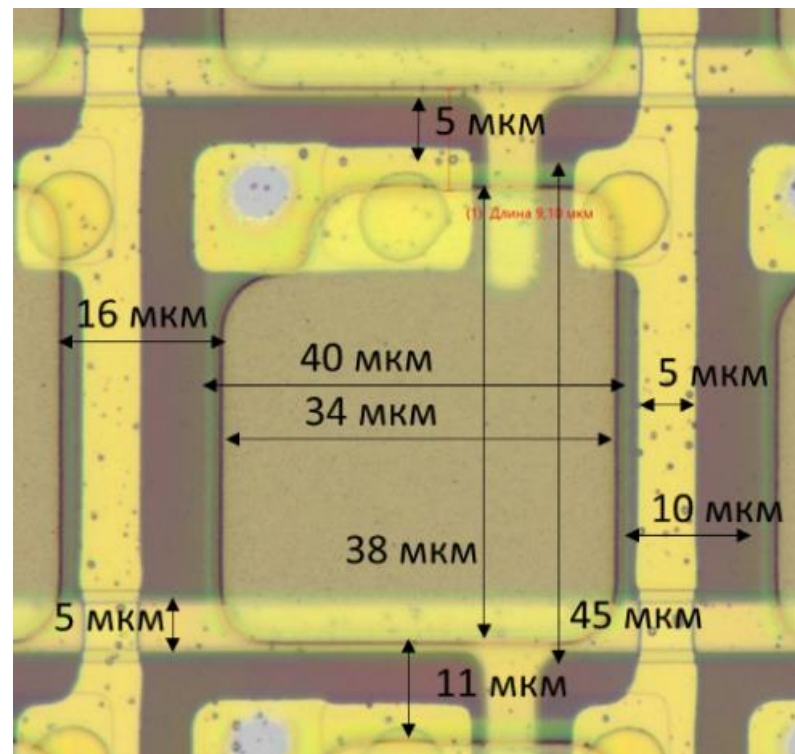
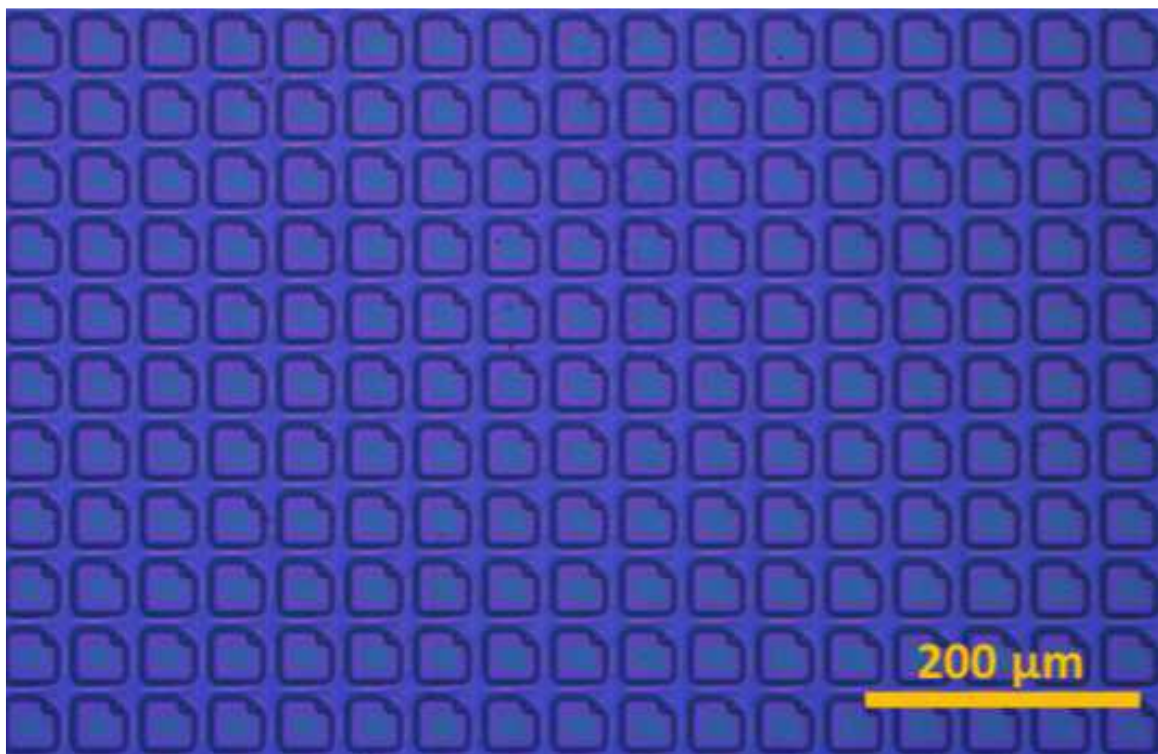
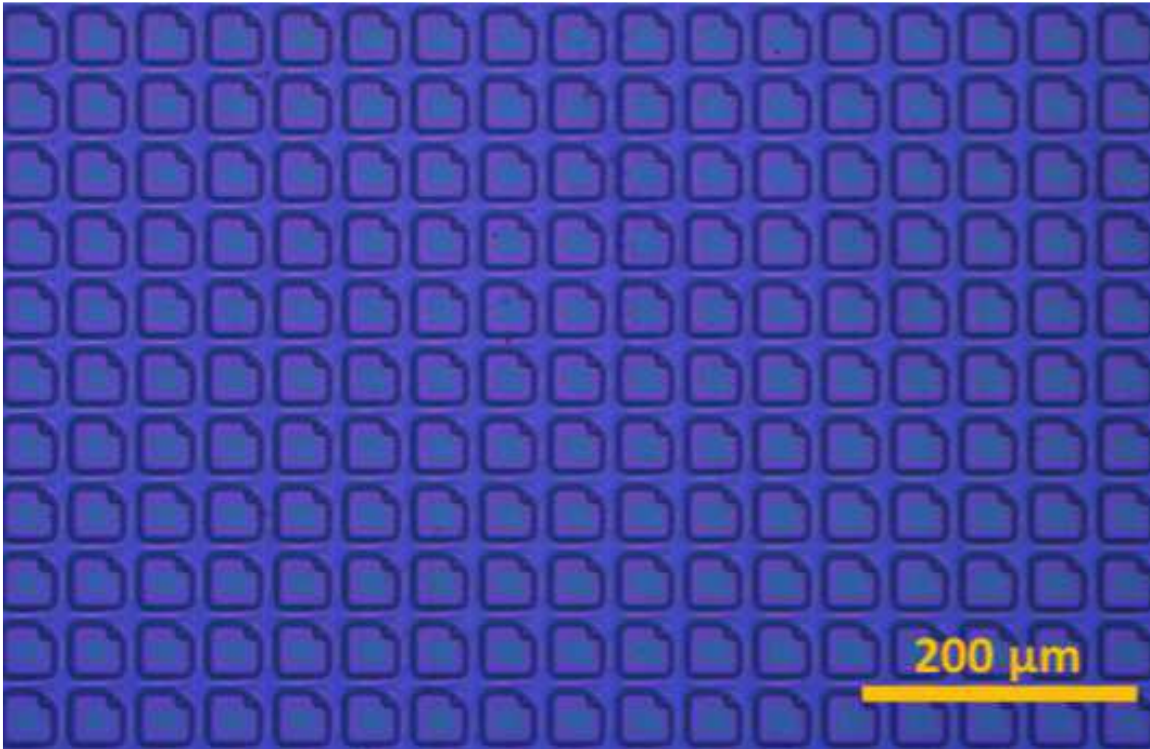


Схема считывание сигнала

508-ppi resolution



Мелкие пиксели, больше фактор заполнения

Возможно для OPD в силу его тонких ФАС и без необходимости паттернирования

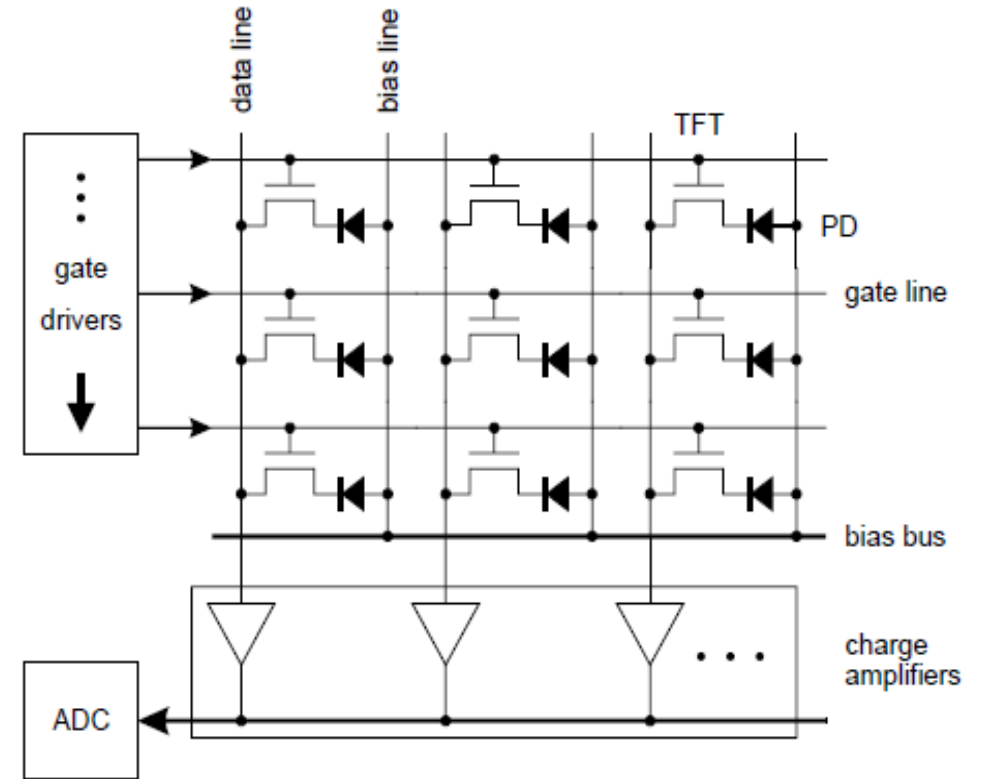
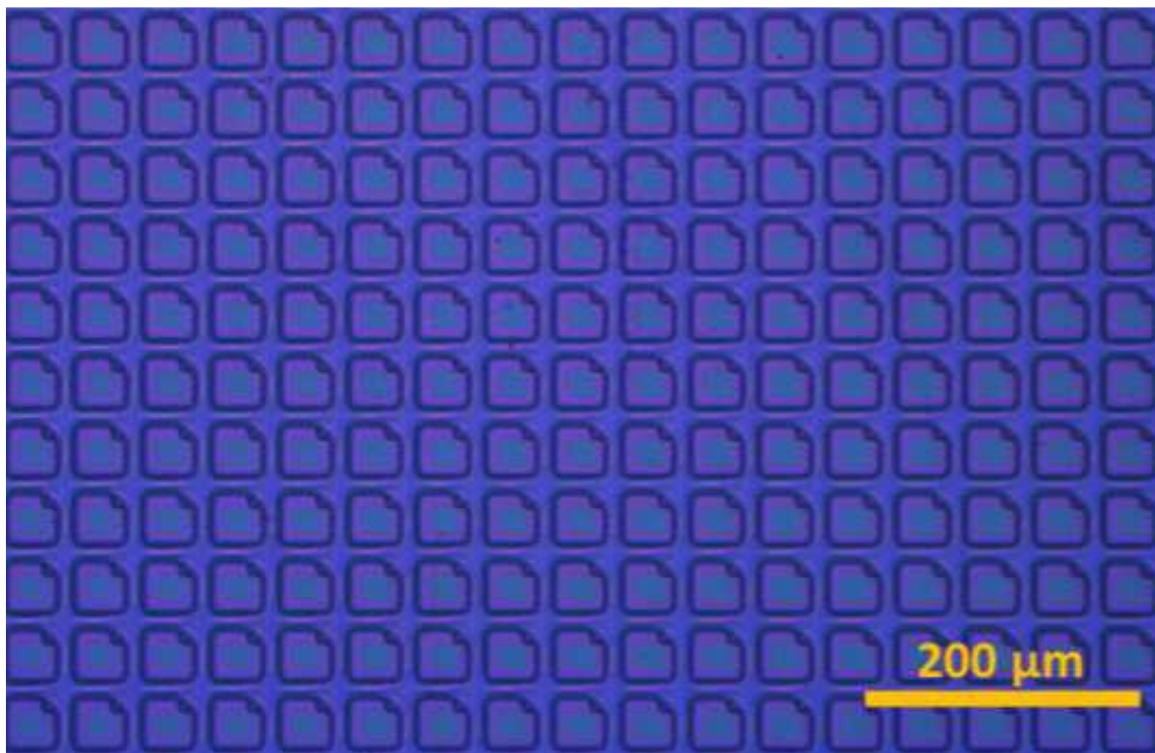


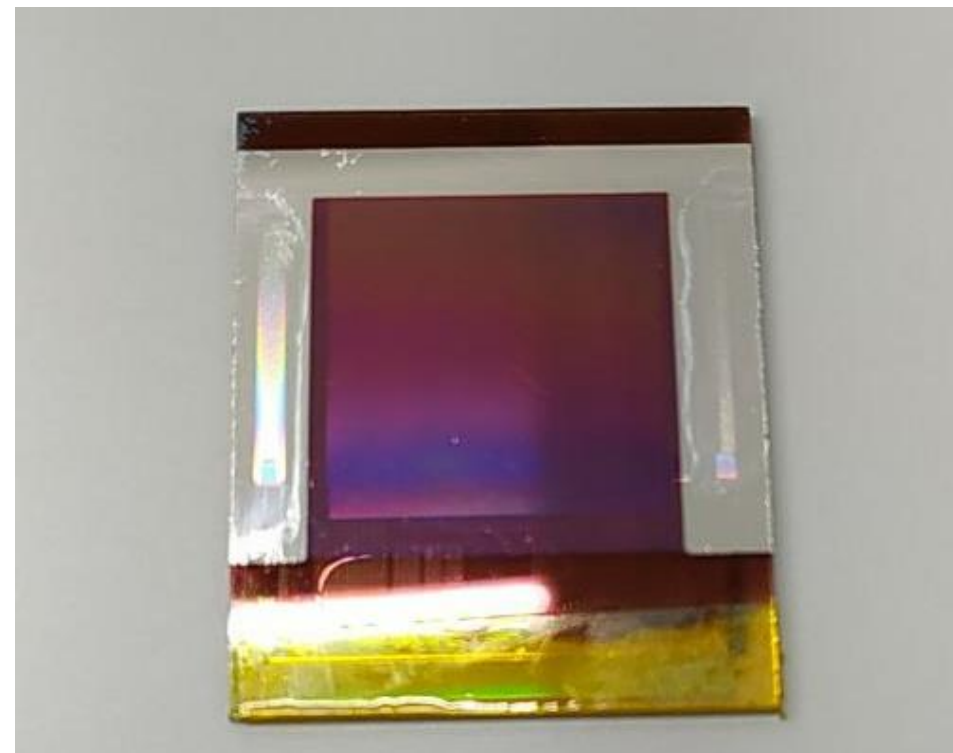
Схема считывание сигнала

508-ppi resolution



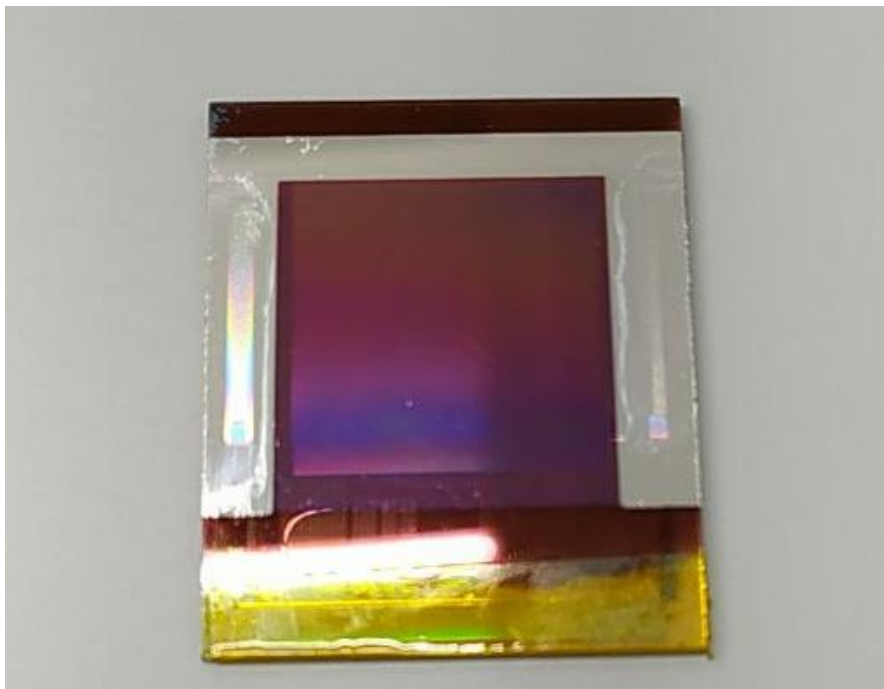
Мелкие пиксели, больше фактор заполнения

Возможно для OPD в силу его тонких ФАС и без необходимости паттернирования



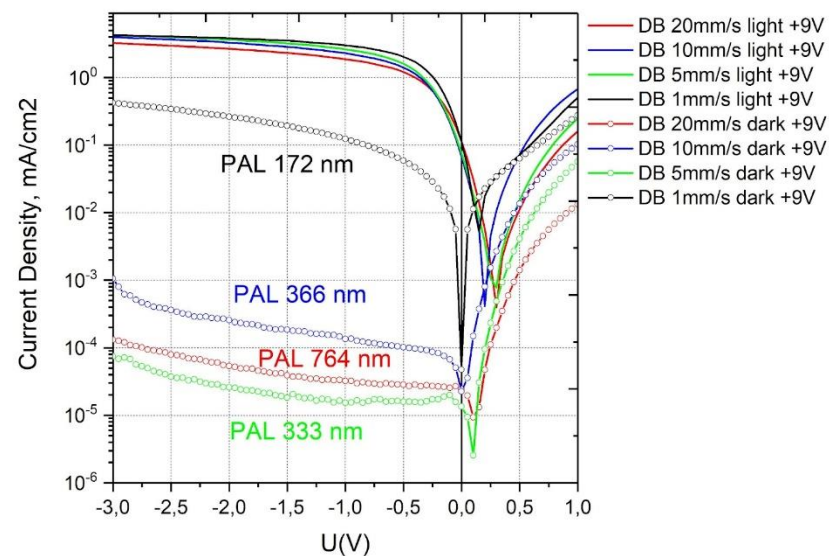
*Dr.Blade нанесение 300-нм OPD
фотоактивного слоя*

Органический фотодетектор



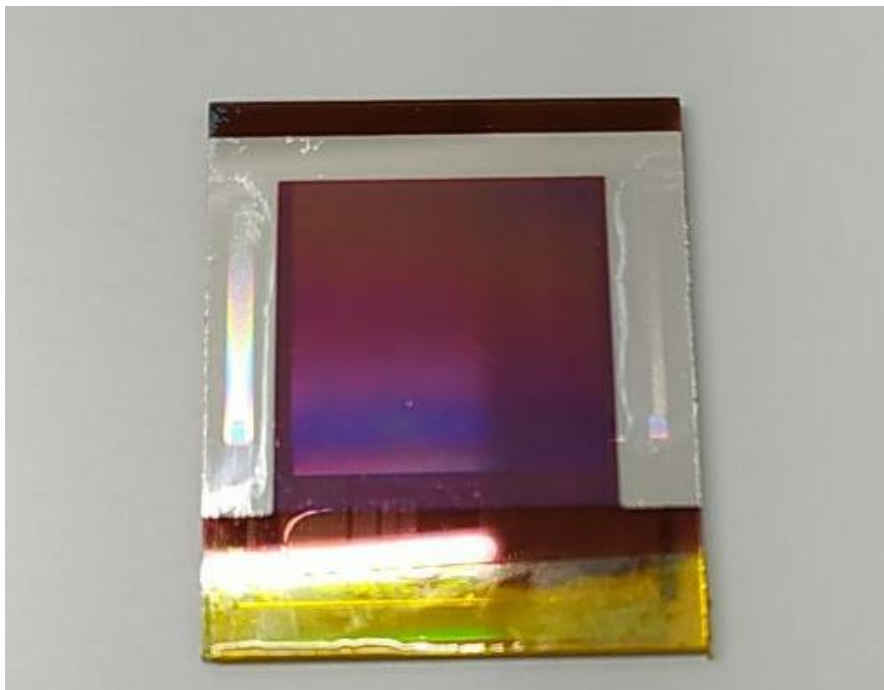
*Dr.Blade нанесение 300-нм OPD
фотоактивного слоя*

OPD42 DoctorBlade 1-20 mm/s double coat

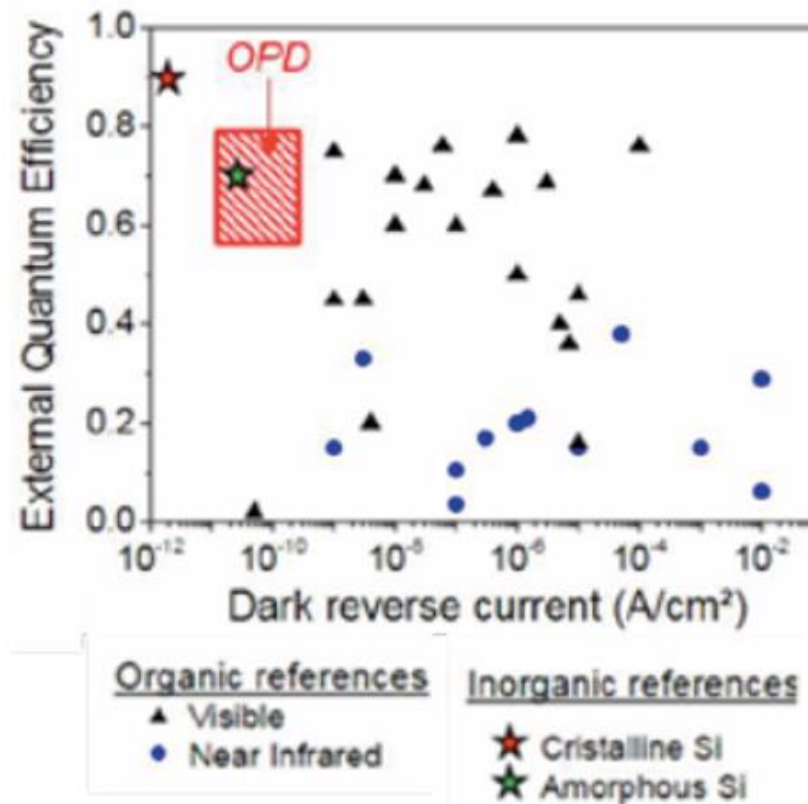


- Плотность темнового тока $< 3 \times 10^{-8}$ mA/cm²,
- EQE 60%
- D^* 3×10^{12} Jones (из NEP)
- Линейный отклик до единиц нВт/см²

Органический фотодетектор

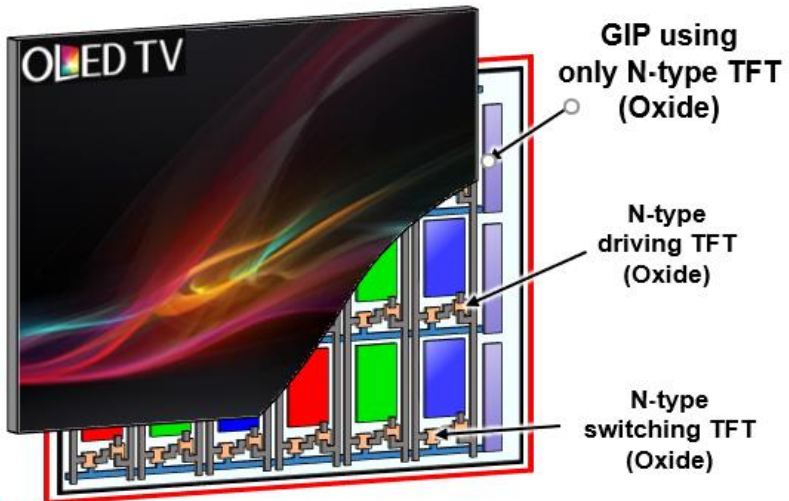


*Dr.Blade нанесение 300-нм OPD
фотоактивного слоя*

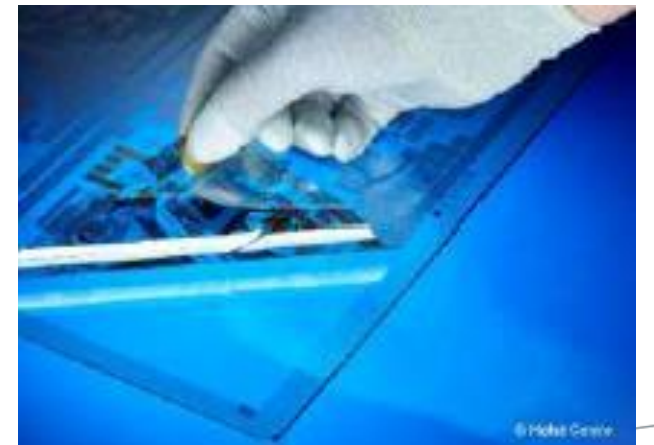


Large area, ultra-thin and flexible image sensors

Self-Aligned a-IGZO TFT



Panel



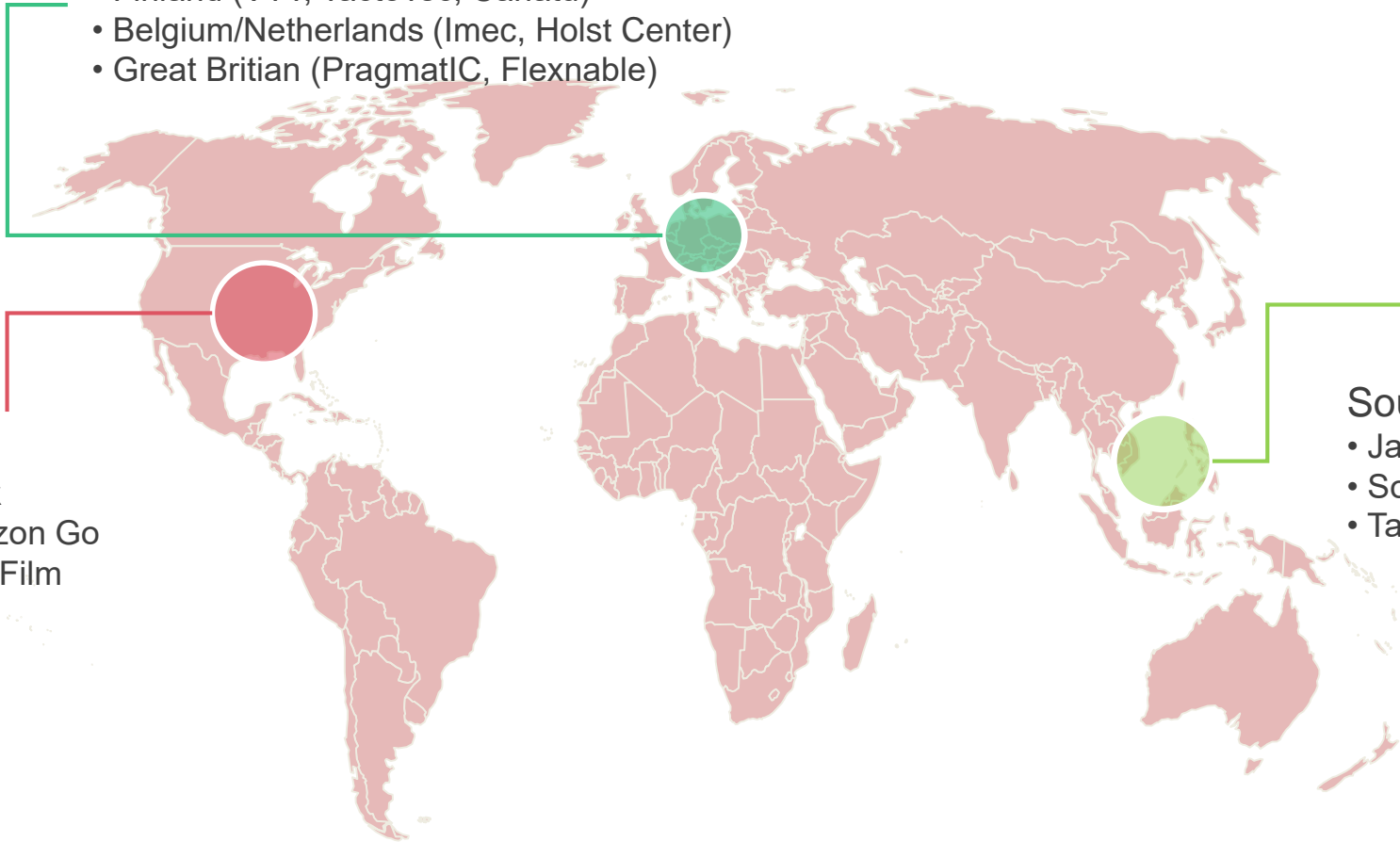
320x352mm Substrate Size

TFT Arrays for backplane: 30 years development



North Europe

- Finland (VTT, TactoTec, Canatu)
- Belgium/Netherlands (Imec, Holst Center)
- Great Britain (PragmatlC, Flexnable)



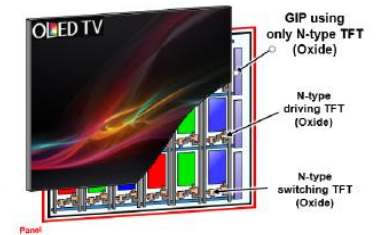
USA

- E-ink
- Amazon Go
- Thin Film



South East Asia

- Japan (Sharp, INOEL)
- South Korea (LG Displays, Samsung)
- Taiwan (Foxconn)



TFT Arrays for backplane: 30 years development



North Europe

- Finland (VTT, TactoTec, Canatu)
- Belgium/Netherlands (Imec, Holst Center)
- Great Britain (PragmatIC, Flexnble)

Russia

- Technospark

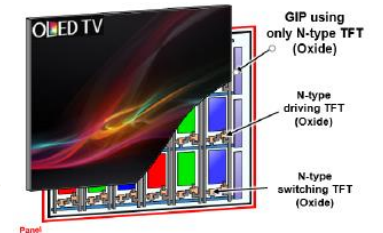


USA

- E-ink
- Amazon Go
- Thin Film

South East Asia

- Japan (Sharp, INOEL)
- South Korea (LG Displays, Samsung)
- Taiwan (Foxconn)



TFT Arrays for backplane: 30 years development



Sharp Aquos R3



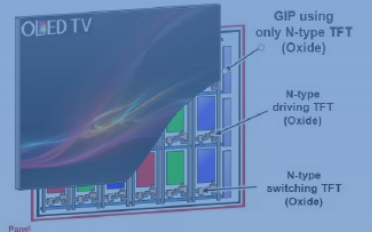
Apple iMac 27" 5K



Panasonic 65" 4K OLED TV



LG 88" 8K OLED TV



- USA
- E-in
- Ama
- Thin

- South East Asia
- Japan (Sharp, INOEL)
- South Korea (LG Displays, Samsung)
- Taiwan (Foxconn)



РОССИЙСКИЙ ЦЕНТР
ГИБКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Написать нам

СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ

Завод прототипирует и производит малые серии TFT-матриц и интегральных схем на пластиковой подложке.

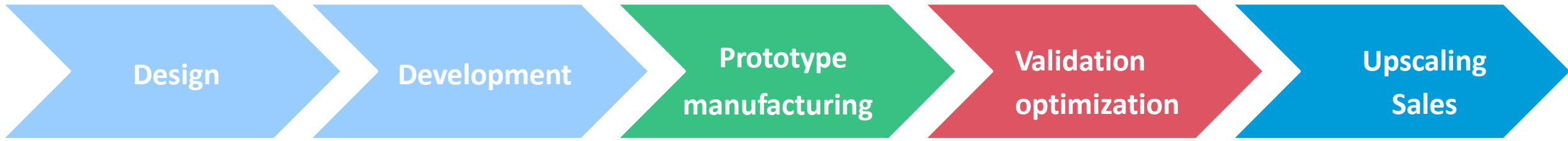
Road map

2021-2022

Now TRL 5

2024

2025



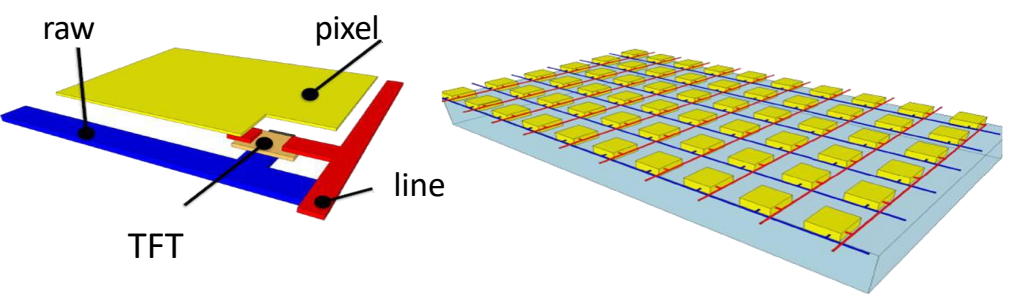
- material choices (circuits, electrodes, adhesives)
- electronics + firmware + soft development
- Technology demonstration

- Optimization RnD
- Gradual scaling up OPD
- Monitoring of operational performance

- complete device testing and validation

- extensive network of manufacturers for various aspect of TFT-based products

Matrix Image sensor structure



Parameters	Val.
Resolution	400 lines x 400 colons.
ppi	300 ppi
Pixel size	50,8 x 50,8 μm
Active area	53 x 36 mm ²
step	84 μm
mode	static

Parameters	Val.
Resolution	Min. 512x960 pix.
ppi	500 ppi
Pixel size	50,8 x 50,8 μm
Active area	Up to 300 x 400 mm ²
step	75 μm
mode	Dynamic/video mode

Road map

2021-2022

Now TRL 5

2024

2025

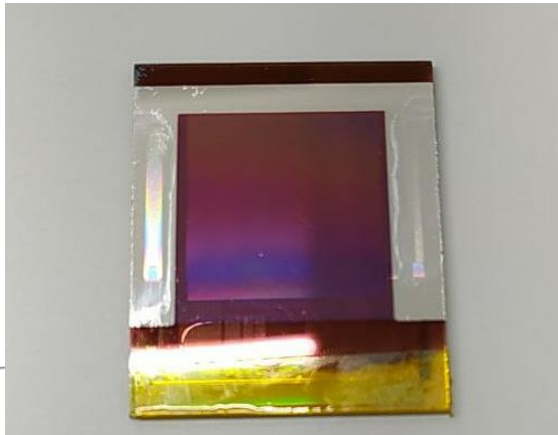


- material choices (circuits, electrodes, adhesives)
- electronics + firmware + soft development
- Technology demonstration

- Optimization RnD
- Gradual scaling up OPD
- Monitoring of operational performance

- complete device testing and validation

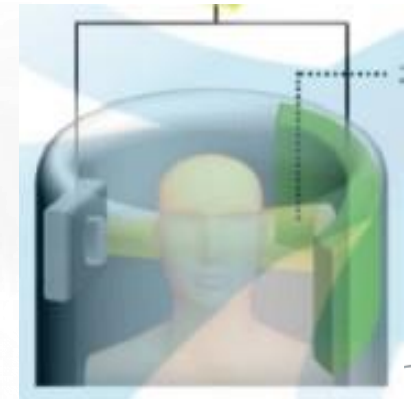
- extensive network of manufacturers for various aspect of TFT-based products



Parameters	Val.
Resolution	Min. 512x960 pix.
ppi	500 ppi
Pixel size	50,8 x 50,8 μm
Active area	Up to 300 x 400 mm
step	75 μm



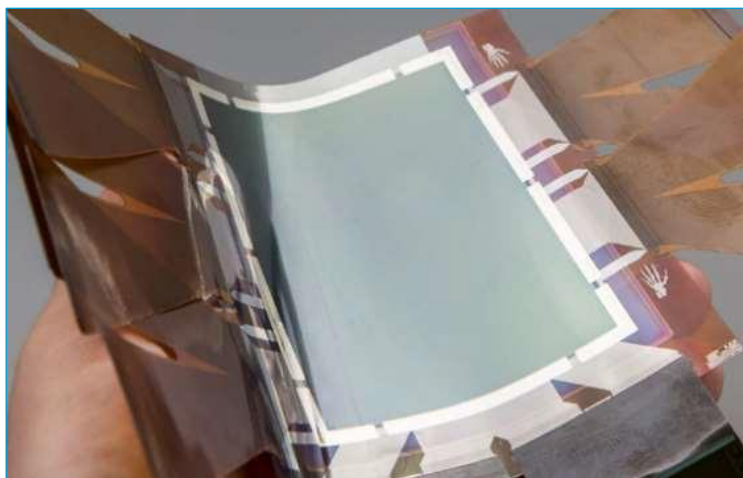
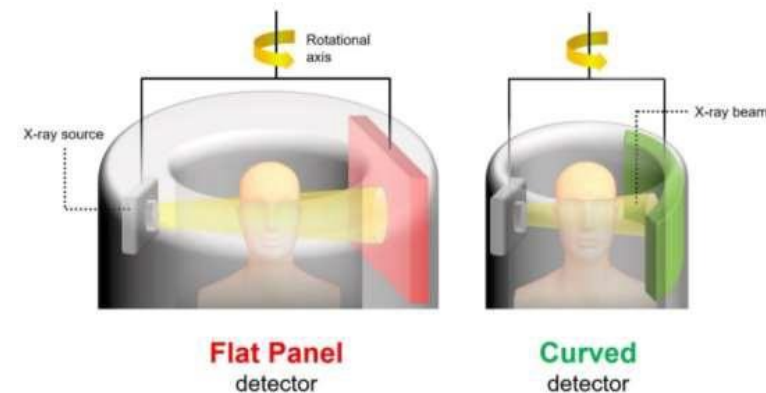
Nail-to-nail flexible fingerprint sensor



Xray detector

Искривленные X-ray детекторы

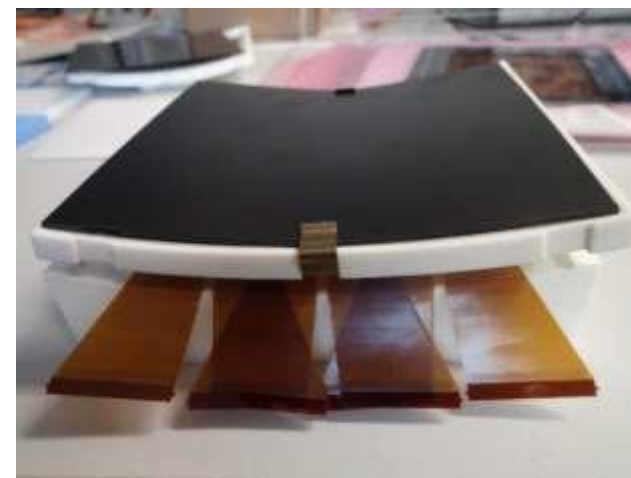
- В комбинации с гибкими сцинтилляторами



Flexible image sensor



Flexible scintillator



Curved X-ray detector prototype

PHILIPS



Выводы

- **Органические фотодиоды**

- Эффективность OPD на уровне с тонкопленочными ФД на $\text{Si}_{\text{аморф}}$
- Очевидные преимущества: лезвийное нанесение, низкотемпературные процессы, без паттернирования

- **Применение: тонкие, ударопрочные, дешевые**

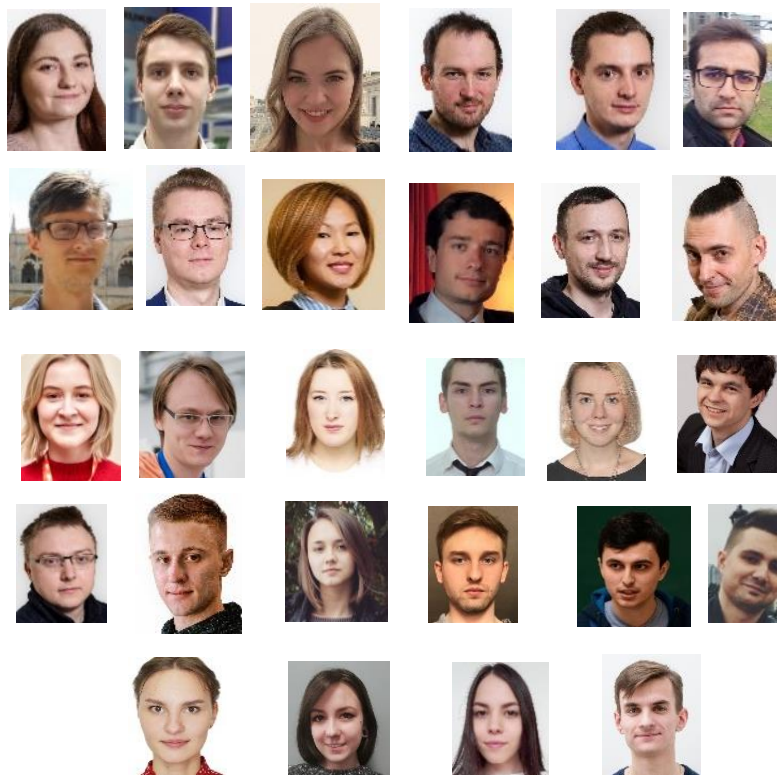
- **Биометрические сканнеры**

- Датчики отпечатка пальца для идентификации
- Интегрированные датчики отпечатка в дисплеи и другие умные поверхности
- Бесконтактное определение вен/рисунка вен

- **Медицинские датчики**

- Пульс и оксигенация (spO_2 , ...)
- X-ray детекторы нового поколения (unbreakable, multi-spectral stacked detectors, direct conversion, DAX)

Благодарности



С кем работаем



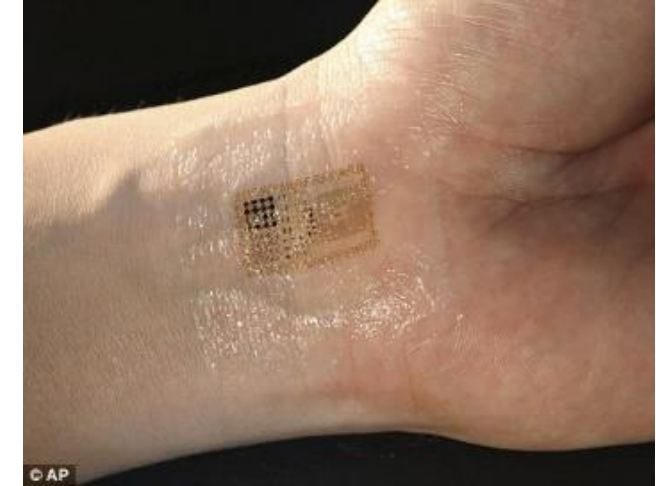
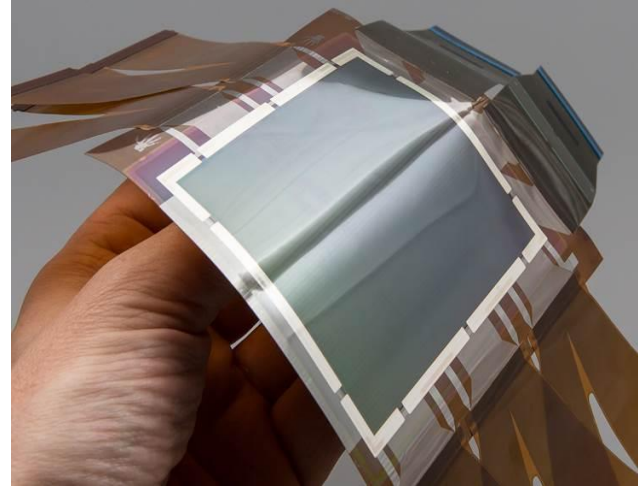
Спасибо за внимание!

Санджиева Мария

maria.sandzhieva@itmo.ru

+79112888674

Альтернатива КМОП или гибридным системам?



- ✓ **flexible** and **light-weight** materials
- ✓ solubility in organic solvents → **INKS!**
- ✓ **low cost printing** techniques on flexible substrates (plastic);
- ✓ **large area** applications -scalability
- ✓ **Biocompatibility**
- ✓ **Human tissue-equivalent** materials

