Наноэлектроника

Лекция 4

к.т.н., доц. Марончук И.И.

Молекулярная электроника (макромолекулярная, органическая, полимерная)

Макромолекулярная электроника

В малекулярной электронике выделяют два основных направления: микромолекулярная электроника (или просто молекулярная электроника) и макромолекулярная электроника (или органическая электроника).

Макромолекулярная электроника – это электроника в которой в качестве элементов схем используются тонкие (20-200 нм) пленки органических материалов.

Что такое органическая электроника?

Электроника на уровне 1 молекулы

Электроника, основанная на сопряженных полимерах

Может быть как органической, так и неорганической или гибридной

Любая электроника на гибкой основе

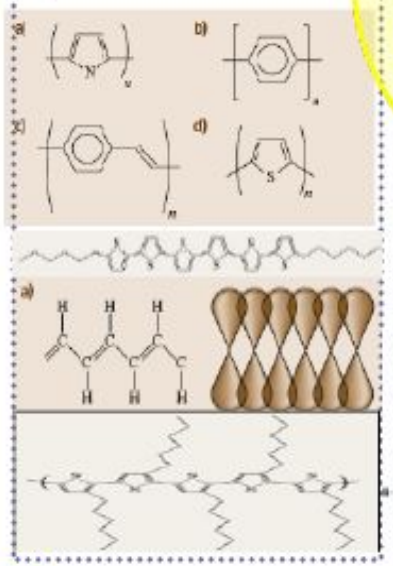
Любая электроника, которую можно напечатать на бумаге

Может быть как органической, так и неорганической или гибридной

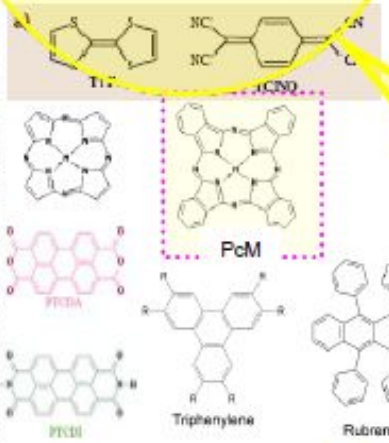
Органическая электроника

Материалы
(organic materials for electronics)

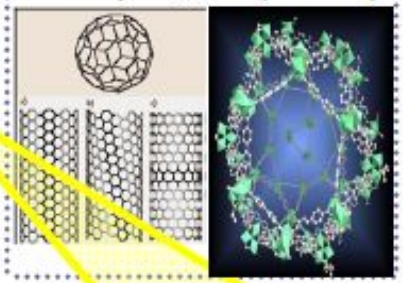
Полимеры (ВМС)
/plastic electronics/



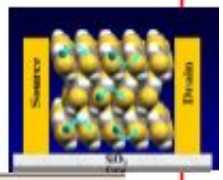
Низко-молекулярные соединения (комплексы)

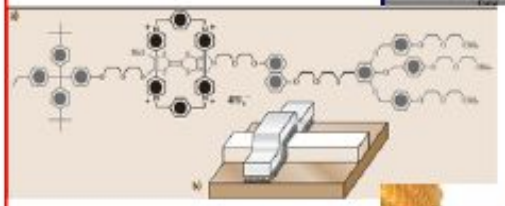


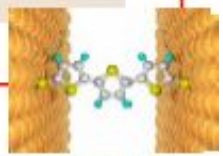
Другое: фуллерены, нанотрубки, гибриды (NCs)

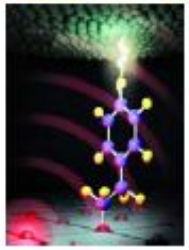


Электроника единичных молекул, молекулярных ансамблей и других наноразмерных объектов
(molecular-scale electronics)









Молекулярная электроника в нашем случае

Биоматериалы (ДНК, хлорофилл…)

Микромолекулярная электроника (молекулярная электроника или молетроника) – это электроника в которой в качестве элементов микроэлектронных схем используются отдельные органические молекулы или даже их фрагменты.

Молекулярная электроника – наука об электронных свойствах молекулярных материалов и возможности их применения в электронике, как элементов и приборов ...

(Молекулярная электроника, Н.В.Агринская, ФТИ РАН 2002)

Молекулярная электроника – междисциплинарное направление связанное с исследованием и использованием электрофизических свойств (элементо-)органических материалов…

(Г.Л. Пахомов, 2008)

Теоретические работы (<5%)
Эксперименты, технология

Основная мотивация работ, их относительное количество: 99% - прикладной интерес

C,H + гетероатомы: N, O, S, Si, а также металлы и пр. Например – фталоцианиновые комплексы (Pc), кремнийорганические полимеры, тиофены, биомолекулы

электрооптические, фотовольтаические, люминесцентные, магнитные, механические, акустические…

Органическая электроника – с чего все начиналось

1940-е гг. – первые органические полупроводники

1965 – электролюминесценция монокристалла антрацена

1977 – первый полимерный проводник (допированный полиацетилен)

1980-е гг. – активное изучение свойств органических проводников и полупроводников, органические тонкопленочные транзисторы

1990 – электролюминесценция полимерных полупроводников

1995 – полимерные фотовольтаические ячейки

Органическая электроника сегодня

На сегодняшний день **органическая электроника** представляет собой междисциплинарную область науки и техники, связанную с поиском новых органических веществ, обладающих рекордными (полу)проводниковыми свойствами, изучением их физико-химических характеристик и разработкой различных (опто)электронных устройств на их основе.

В настоящее время органическая электроника развивается, благодаря тесному сотрудничеству специалистов в области органической химии, химии и физики полимеров, физической химии, металлоорганической химии и катализа, электрохимии, молекулярной спектроскопии, электроники, нанотехнологий и др.

молекулярные материалы:

материалы, основные физические свойства которых связаны с химическим строением молекул

- межмолекулярное взаимодействие (определяемое ван-дер-ваальсовыми силами) в этом случае оказывается гораздо более слабым (расстояние, энергия связи) чем внутримолекулярное взаимодействие и зависит от (внутри-)молекулярного строения

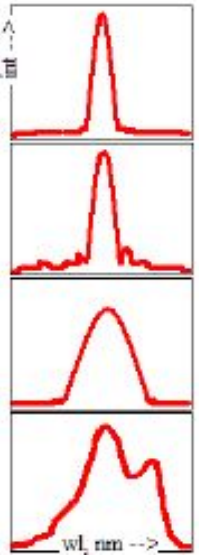
- связь фазовой и молекулярной структуры !!

Максимальное упрощение:

молекулярное твёрдое тело = конденсированный молекулярный газ

На самом деле:

межмолекулярное взаимодействие может заметно искажать свойства индивидуальных молекул (например, оптические) при образовании твёрдой фазы, особенно в Д-А кристаллах и приводит определяет к появлению различных фазовых свойств, например проводимости



Искажение оптических свойств индивидуальных молекул:

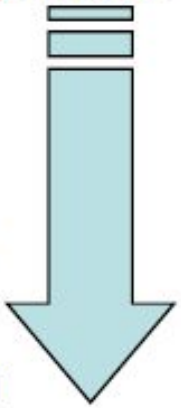
-в парах

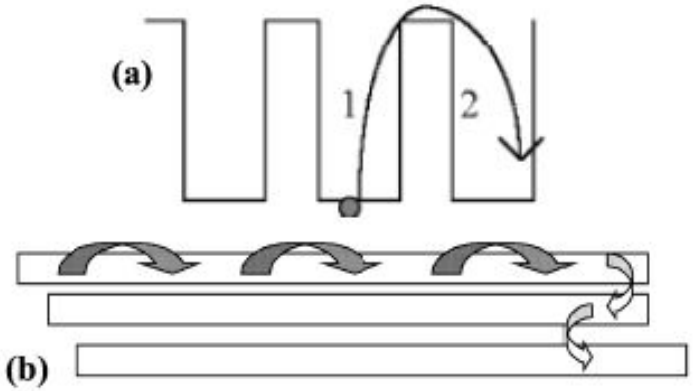
-в растворах

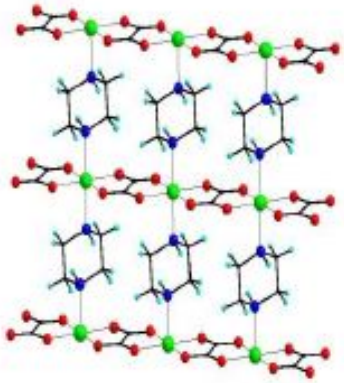
-в твёрдой фазе

аморфная

кристаллическая







Организационная иерархия молекулярных твёрдых тел

(от простого к сложному – слева направо)

Внутри (интра-) молекулярная

Супра (над-) молекулярная

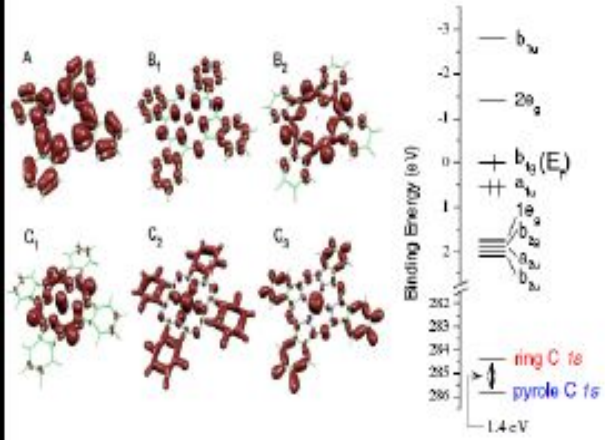
Объемная (фазовая)

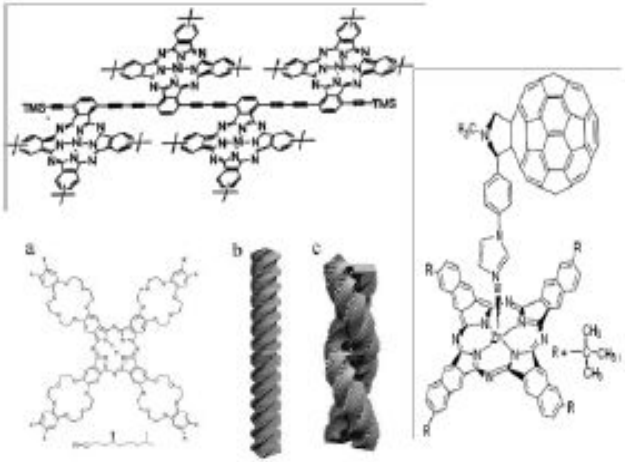
Ключевые слова, свойства:

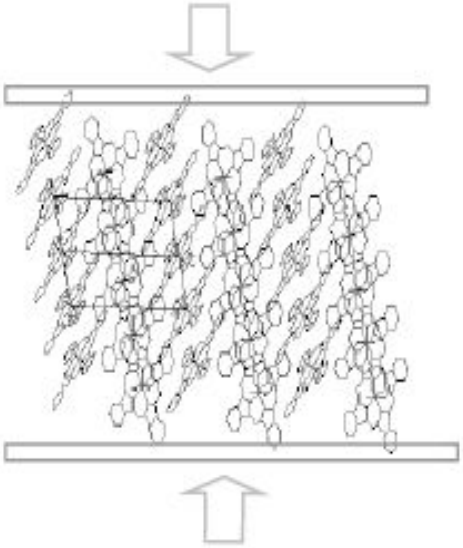
атомные расстояния, симметрия молекулы, σ-, π-связи, делокализация электронов (контуры сопряжения), дипольный, магнитный момент, d-π, n-π взаимодействия и др.

межмолекулярное перекрывание, перенос заряда, аггрегация, ди- тримеры и олигомеры, эксимеры и эксиплексы, стопки, ассоциаты, ЛБ-слои, 1D-проводники и др.

моно- и поликристаллы, домены тонкие пленки, текстуры, фазовые переходы, аморфизация, электро-теплопроводность, сжимаемость и др.

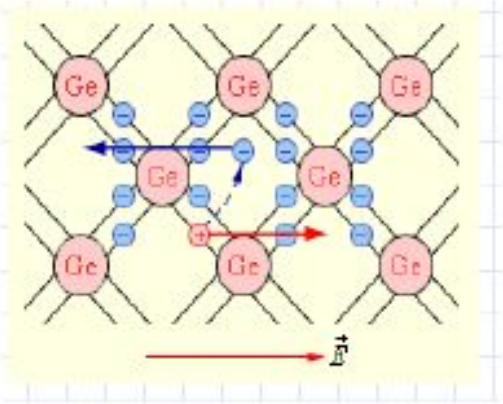






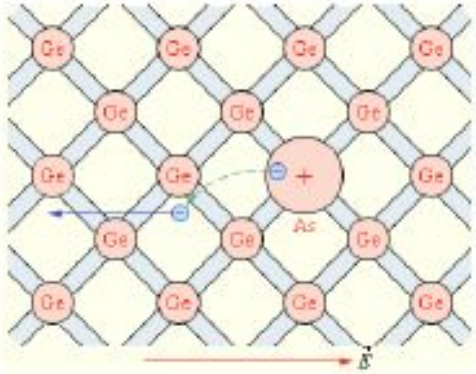
Традиционная (неорганическая) электроника

Собственная проводимость

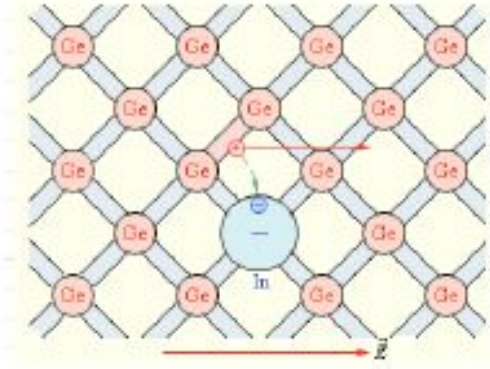


зависит от температуры

Примесная проводимость



донорная примесь
электронная провод-ть
полупроводник n-типа



акцепторная примесь
дырочная провод-ть
полупроводник p-типа

\+

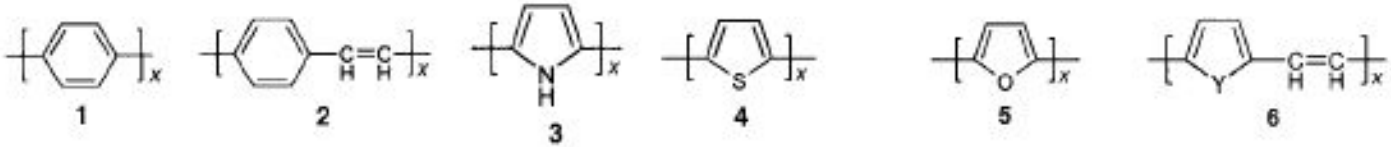
1. Быстродействие
2. Долговечность

\-

1. Высокая стоимость производства:
- кремния (необходима сверхчистота)
- устройств (литография/гравировка)
2. Токсичность производства (As, Ga, Te)

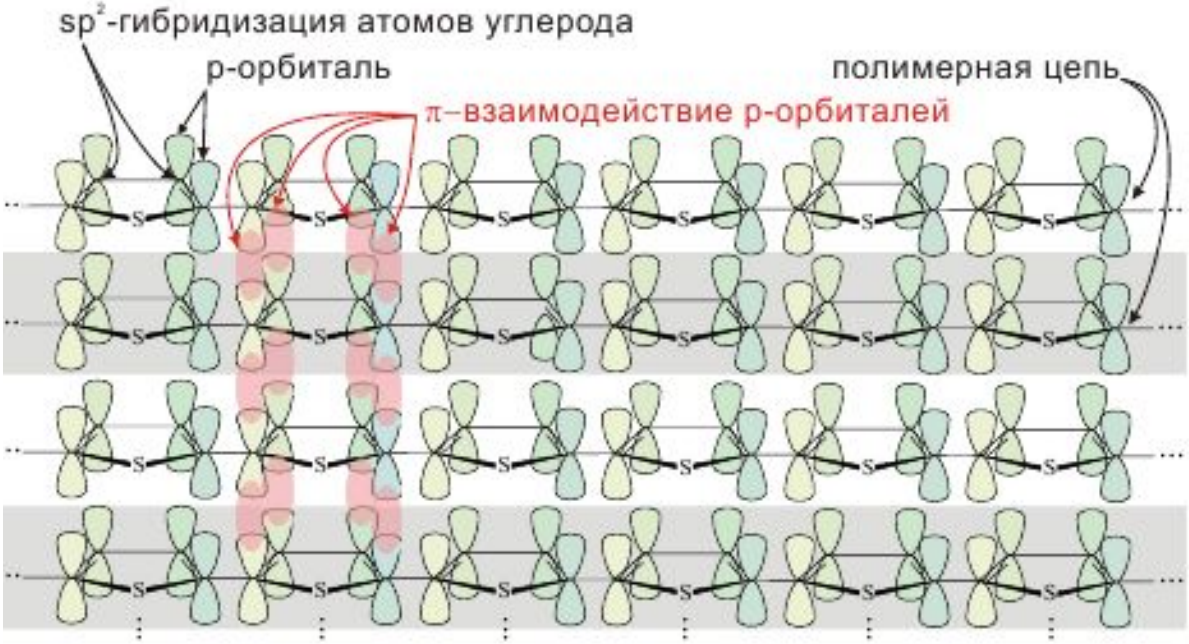
Органическая (полимерная) электроника

На основе сопряженных олигомеров и полимеров



Собственная проводимость

Примесная проводимость



1. Для полимера идеальная чистота недостижима
2. Существующие примеси компенсируют друг друга, поэтому нужны большие количества допанта (%)
3. Допирование часто проводят за счет инжекции заряда с электродов

Функциональные материалы для органической электроники должны обладать сочетанием следующих свойств:

полупроводниковые свойства (высокая подвижность носителей заряда)

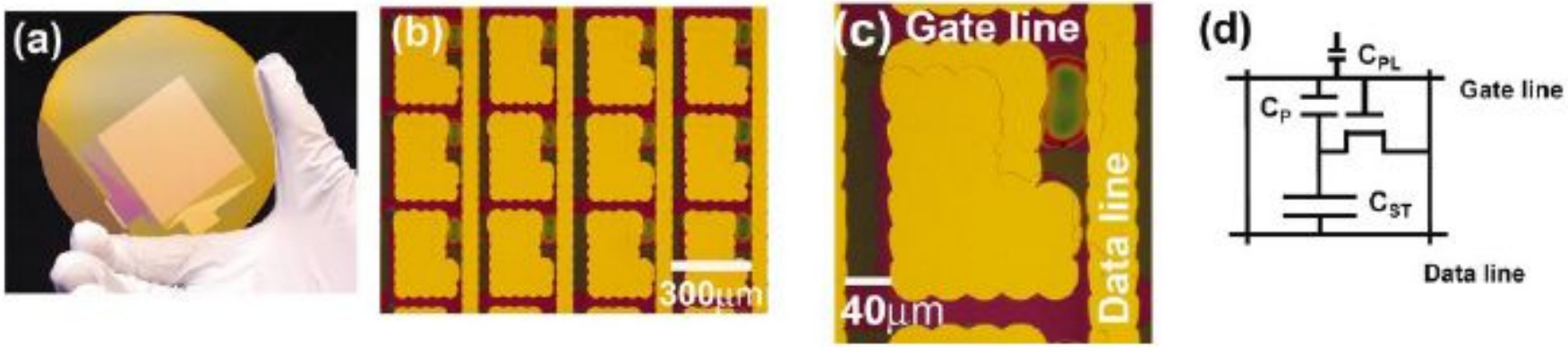
Эффективное поглощения света или люминесценция

высокая растворимость

хорошие пленкообразующие свойства

стабильность при нормальных условиях (на воздухе)

неизменность свойств при хранении и использовании



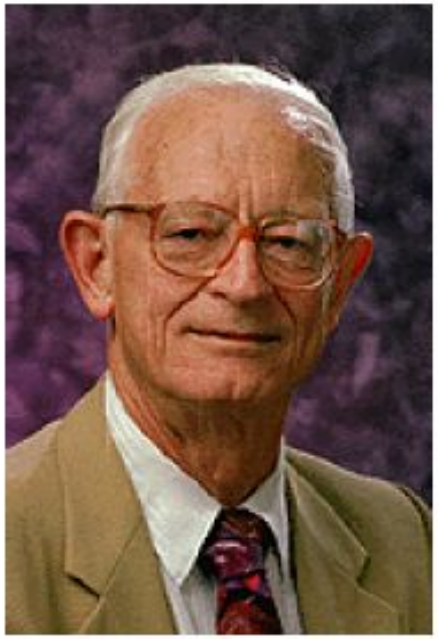
Appl. Phys. Lett., Vol. 85, No. 15, 11 October 2004

Нобелевская премия по химии 2000 г.

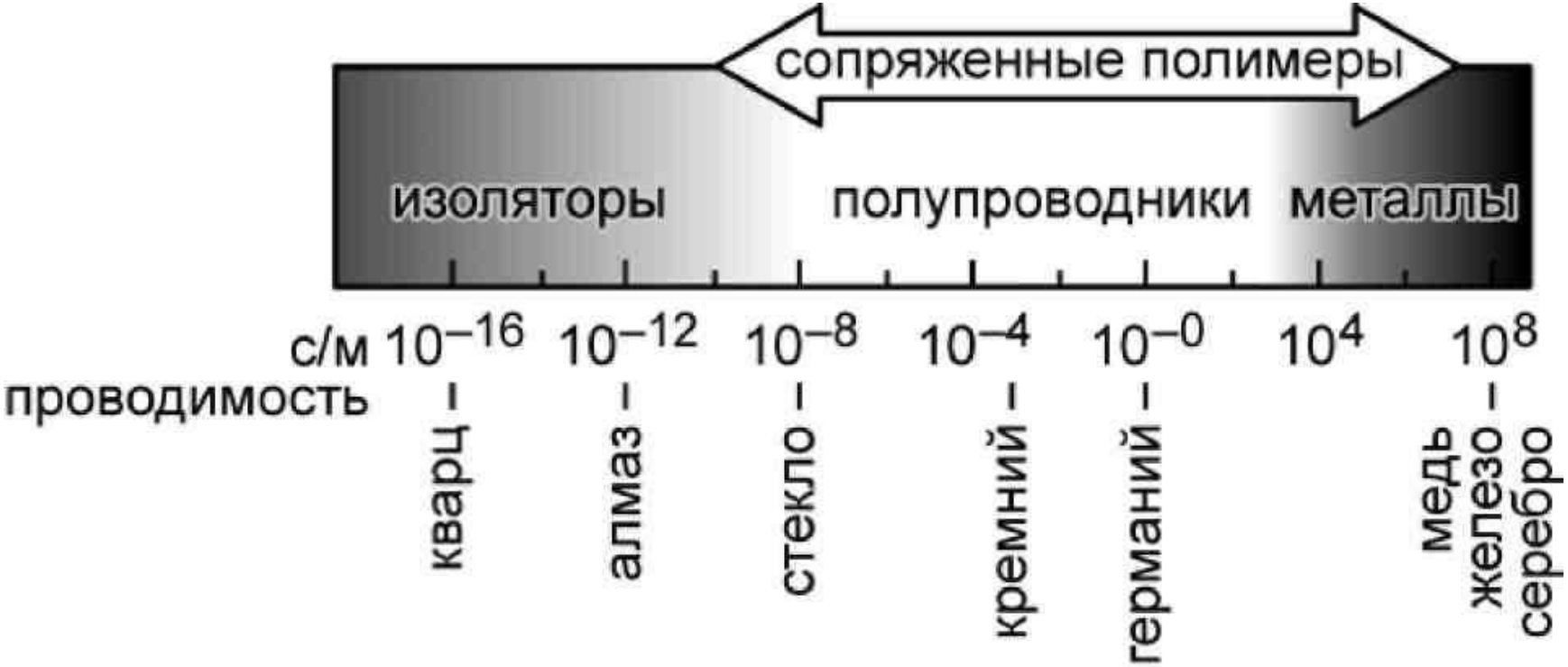
"For the Discovery and Development of Conductive Polymers"
(За открытие и исследование проводящих полимеров)

Alan Heeger
(Алан Хигер)
University of California
at Santa Barbara
(род. 1936)

Hideki Shirakawa
(Хидеки Сиракава)
University of Tsukuba
(род. 1936)

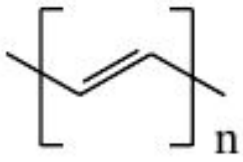


Alan MacDiarmid
(Алан МакДиармид)
University of
Pennsylvania
(1927 - 2007)

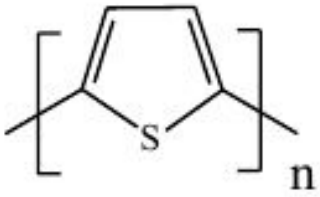


Проводимость сопряженных полимеров по сравнению с другими материалами и полупроводниками

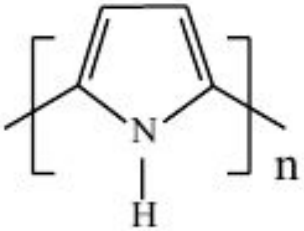
Основные классы сопряженных полимеров



Транс-полиацетилен (t-PA)



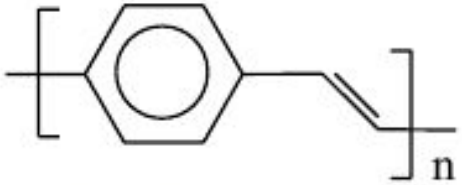
Политиофен (PT)



Полипиррол (PPY)

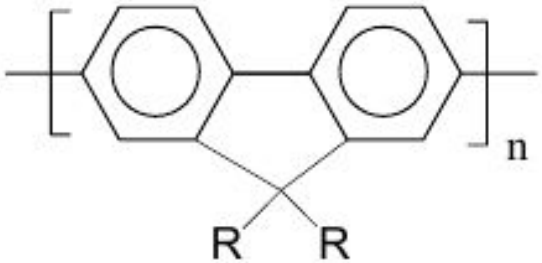
Поли(*п*-фенилен)

(PPP)

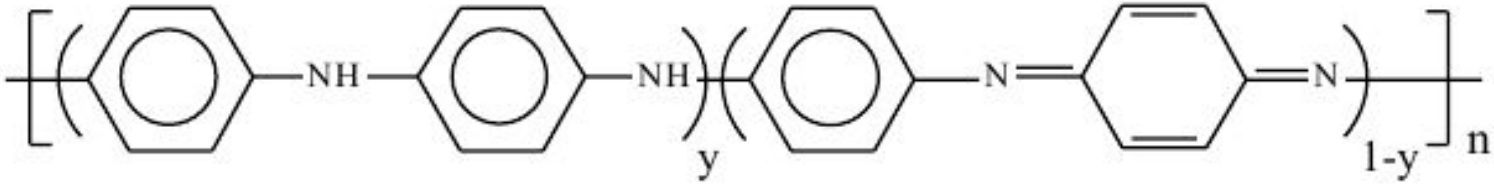


Поли(*п*-фениленвинилен)

(PPV)



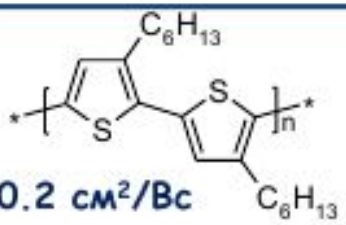
Полифлуорен (PF)



Полианилин (PANI)

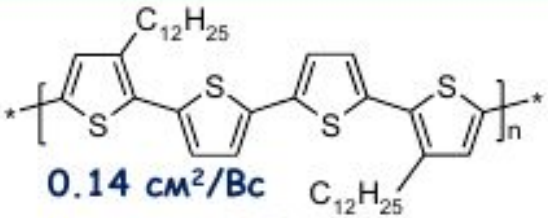
Полимерные полупроводники

p-типа



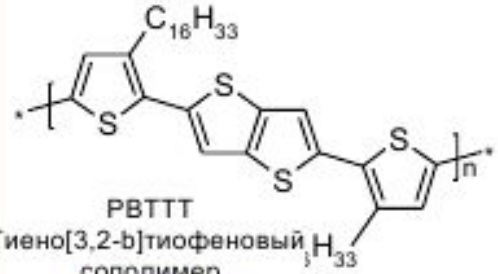
0.2 см²/Вс

P3HT
региорегулярный
поли(3-гексилтиофен)



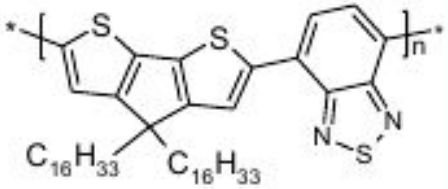
0.14 см²/Вс

PQT-12
Поли[3,4''''-бис(додецил)кватротиофен]



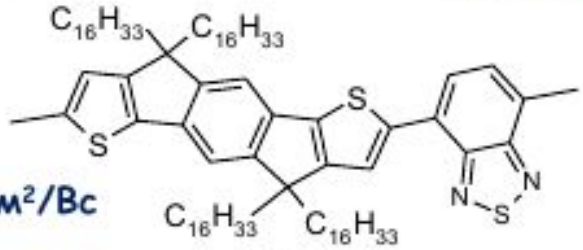
PBTTT
Тиено[3,2-b]тиофеновый сополимер

1.0 см²/Вс



CDTBTZ
Сополимер Циклопентадитиофена-бензотиадиазола

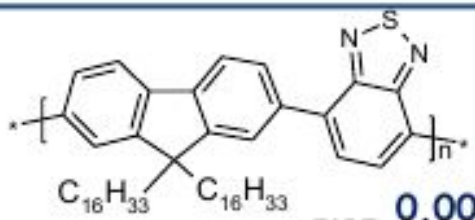
1.4 см²/Вс



1.2 см²/Вс

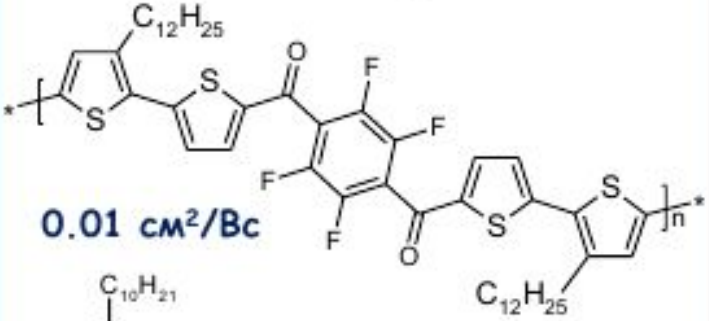
IDTBTZ
Сополимер Инденаценодитиофена-бензотиадиазола

n-типа



0.005 см²/Вс

F8BT
Сополимер флуорена-бензотиадиазола



0.01 см²/Вс

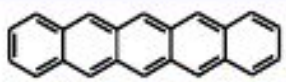
Сополимер фторфенацил-кватротиофенаола

Сополимер нафталинкарбоксилиимида и битиофенаола

0.85 см²/Вс

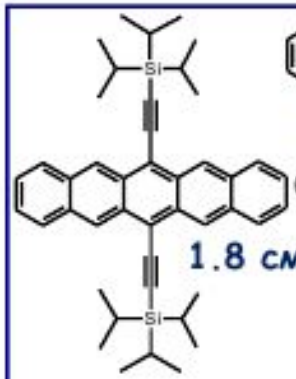
Органические полупроводники

p-типа



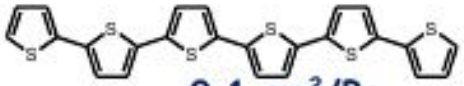
пентацен (P5, 5AC)

μ = 5.0 см²/Вс



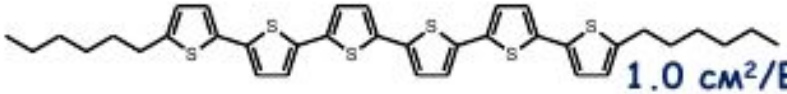
6,13-бис(триизопропилсилилэтинил)пентацен
TIPS-pentacene (TIPS-P5, TIPS-5AC)

1.8 см²/Вс



0.1 см²/Вс

2,2':5',2":5",2"':5"',2"":5"",2"""-секситиофен (6T)



1.0 см²/Вс

5,5"""-дигексил-2,2':5',2":5",2"':5"',2"":5"",2"""-секситиофен
(Hex-6T-Hex, DH-6T)

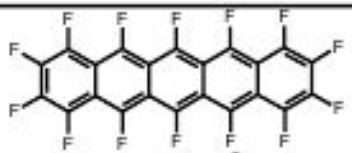
μ = 24.5 (мк) см²/Вс

9,10,11,12-тетрафенилнафтацен
(рубрен)

0.02 см²/Вс

фталоцианин меди
(CuPc)

n-типа

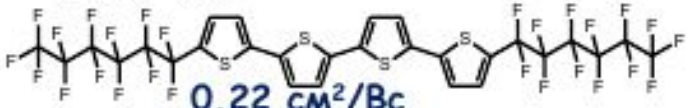


0.11 см²/Вс

перфторпентацен
(F-P5, F-5AC)

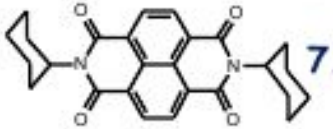
6.0 см²/Вс

[60]фуллерен, C_{60}



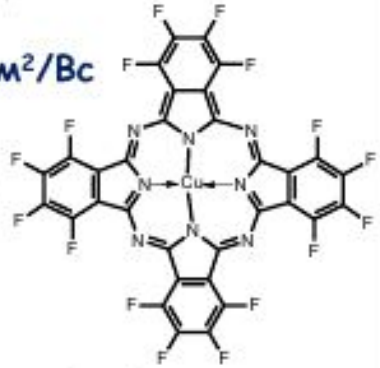
0.22 см²/Вс

5,5"""-ди(перфторгексил)-2,2':5',2":5",2"':5"'-кватротиофен
(DFH-4T)



7.5 см²/Вс

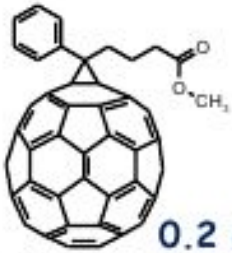
N,N-дициклогексил-
нафталинтетракарбоксидиимид



перфторфталоцианин меди
(FCuPc)

0.03 см²/Вс

0.35 (мк) см²/Вс

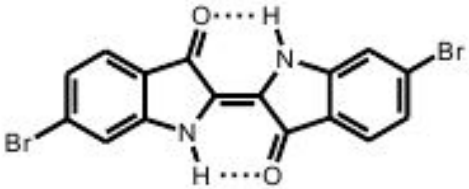


0.2 см²/Вс

метиловый эфир
[6,6]-фенил-C_{61}-масляной кислоты
(PCBM, [60]PCBM)

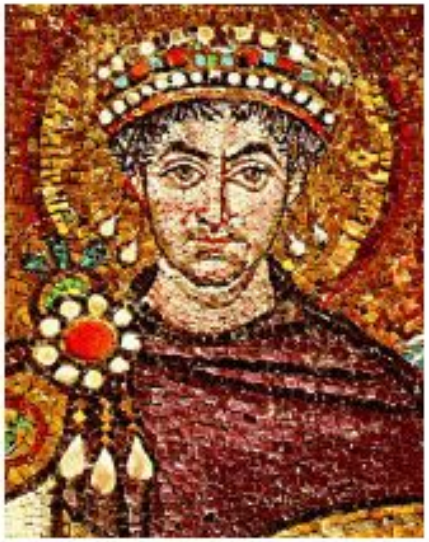
Органические полупроводники на основе природных красителей

Тирский пурпур



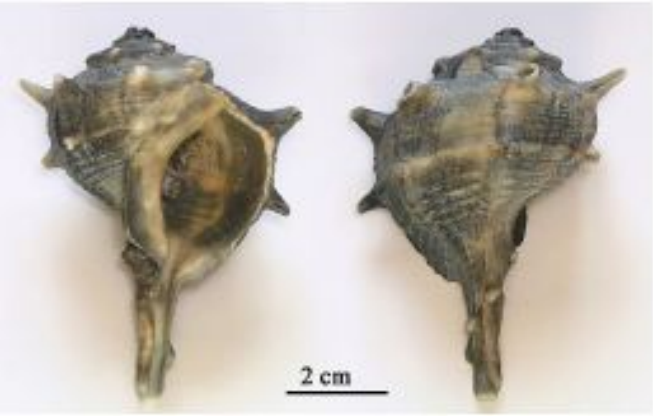
6,6-дибромоиндиго

Крашенная пурпуром шерсть



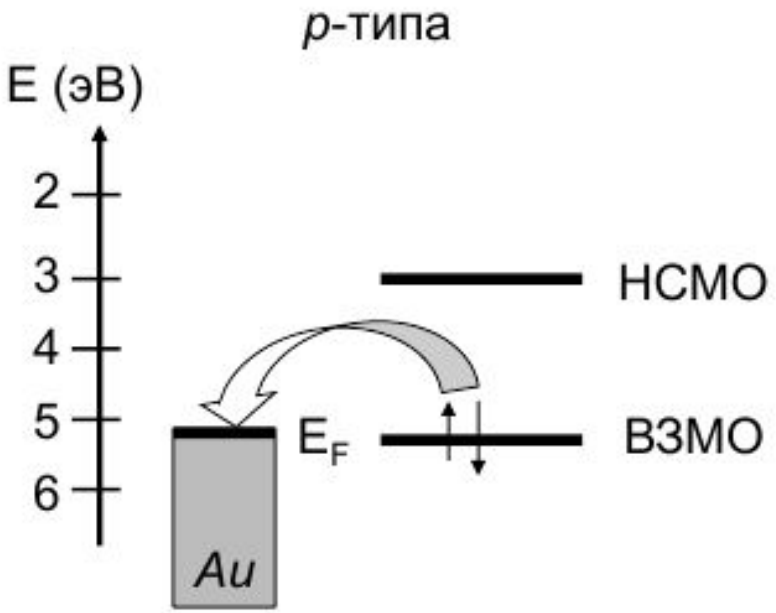
Крашенный пурпуром шёлк

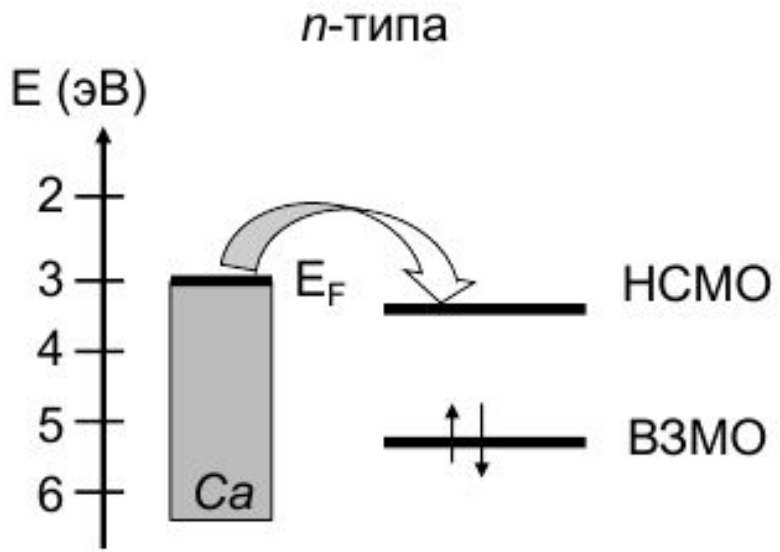
Раковины Murex brandaris L.



Пу́рпур (от лат. purpura — пурпур, греч. πορφύρα), также в античных источниках тирский пурпур — краситель различных оттенков от багряного до пурпурно-фиолетового цвета, извлекавшийся из морских брюхоногих моллюсков — иглянок.

Органические полупроводники





Органический полупроводник проявляет дырочную проводимость (является полупроводником p-типа), если инжекция дырок с электрода происходит легче, чем инжекция электронов.

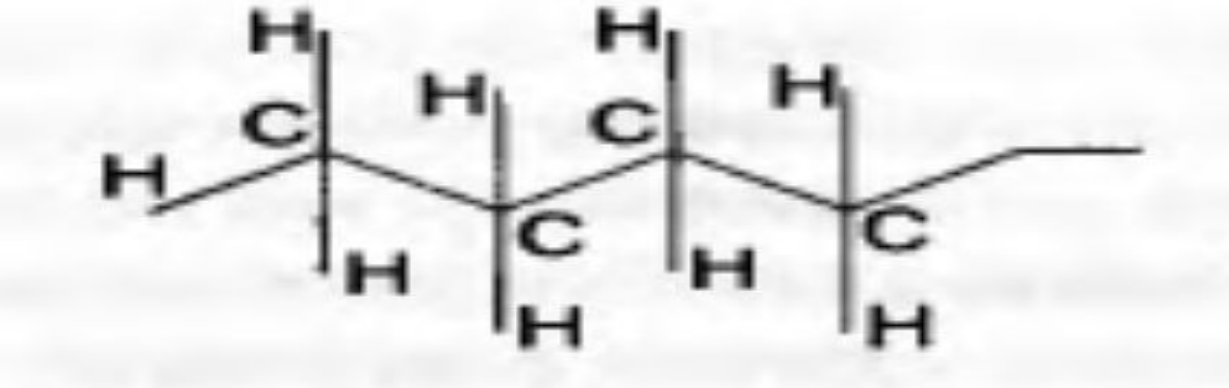
Органический полупроводник проявляет электронную проводимость (является полупроводником n-типа), если инжекция электронов с электрода происходит легче, чем инжекция дырок .

ВЗМО – высшая занятая молекулярная орбиталь (**HOMO**)
НСМО – низшая свободная молекулярная орбиталь (**LUMO**)

Молекулы-изоляторы

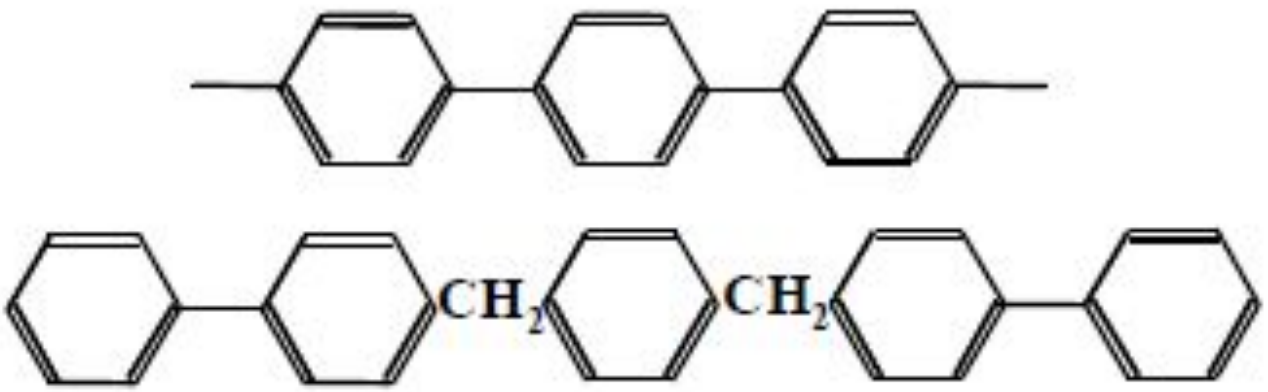
Отдельные виды молекул и их совокупности могут выполнять функции диэлектриков, проводников, активных элементов – диодов, транзисторов и логических элементов.

Примером молекул-изоляторов могут служить алканы C_nH_{2n+2}. Связи С–С и С–Н образованы локализованными молекулярными σ-орбиталями. Такие молекулы ток не проводят.



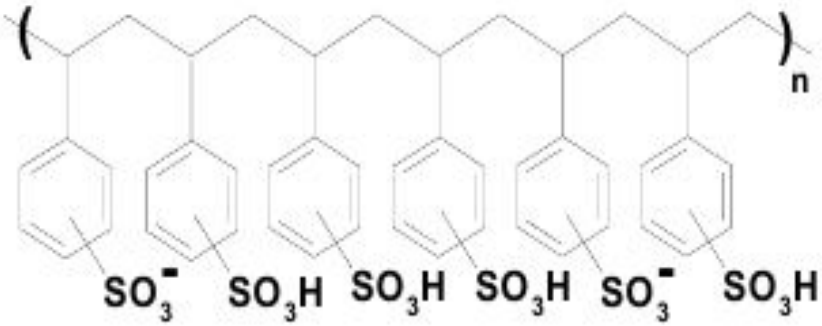
Молекулы – проводники

В настоящее время проектирование молекулярных логических устройств основано на использовании молекул полифенилена. Молекула полифенилена состоит из бензольных колец, соединенных между собой одиночными sp2 связями. За счет наличия в бензольных кольцах и соединяющих мостиках делокализованных π-электронов молекулы полифенилена являются хорошими проводниками.



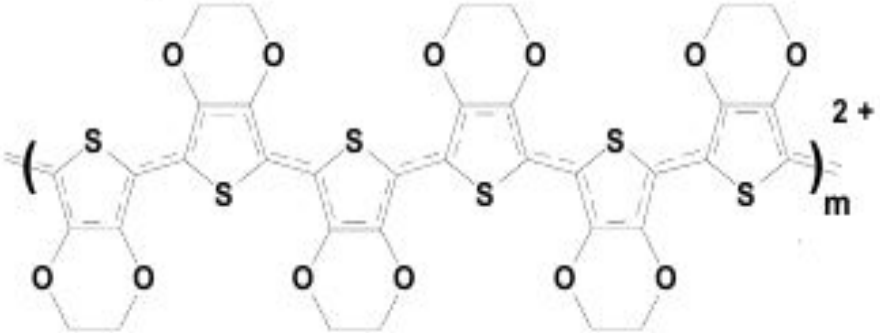
Молекулы на основе полифенилена.

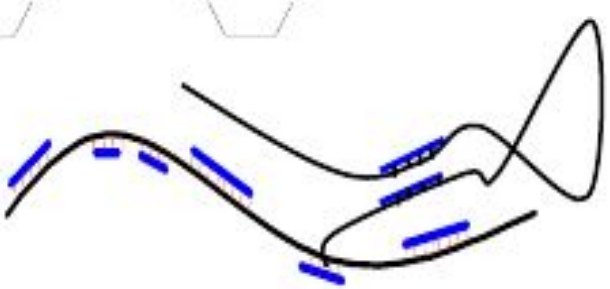
Проводящие полимерные дисперсии: PEDOT-PSS



Полимерный комплекс PEDOT-PSS

- Темплатная полимеризация в водной среде 3,4-этилендиокси-тиофена (EDOT) в присутствии полистиролсульфокислоты (PSS)
- Ионообменная хроматография
- Характкристики продукта:
  - Тамно-синяя дисперсия
  - Концентрация 1.3% [или выше]
  - от степень полимеризации сегментов EDOT от 5 до 15
  - Дырочно допирован, примерно 1 дырка на 3 мономерных звена

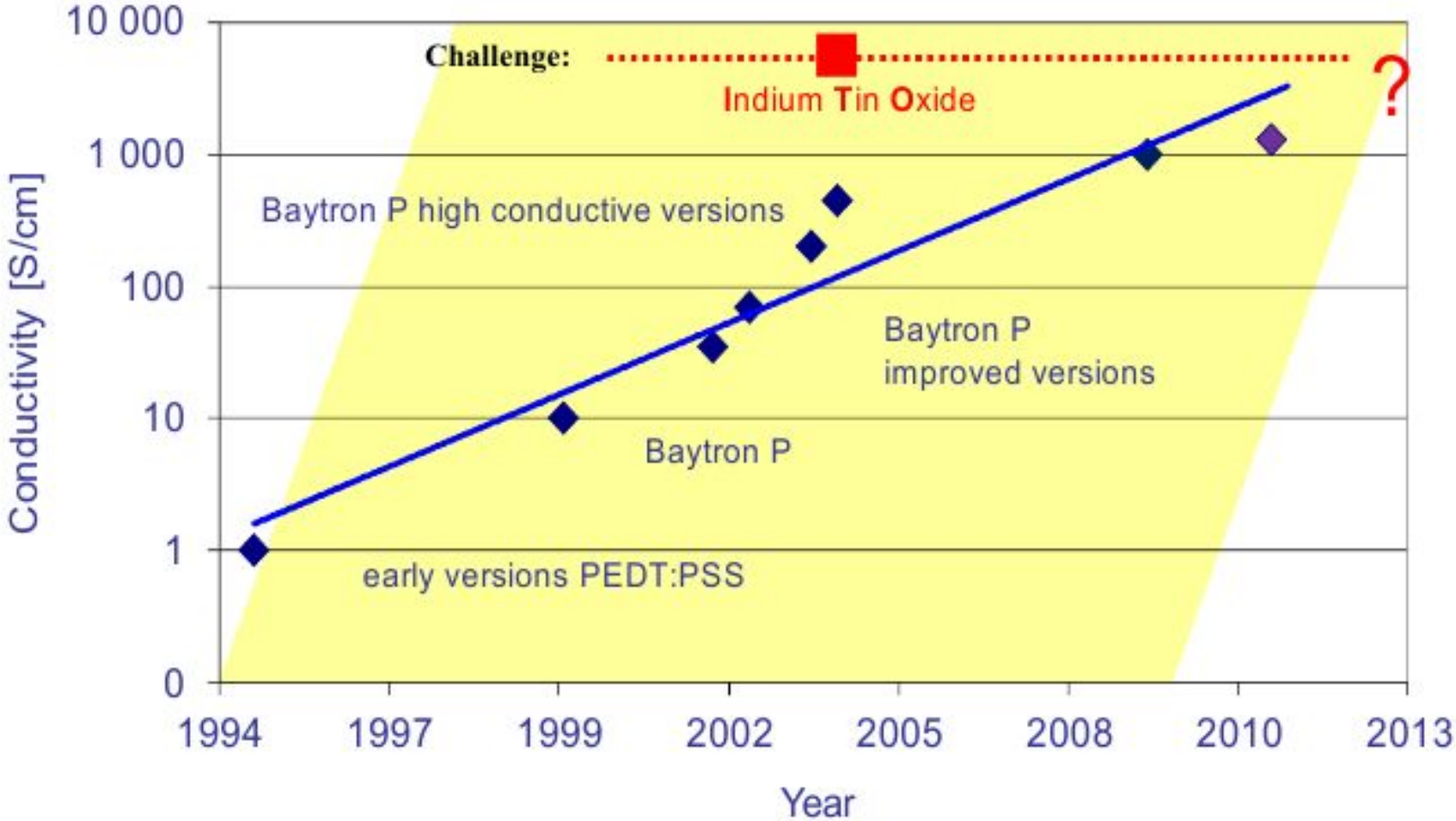




Цепочка PSS с олигомерами PEDOT

BAYTRON® P (сейчас Clevios™).

Улучшение проводимости PEDOT:PSS



С момента начала промышленного производства PEDOT:PSS удалось повысить проводимость более чем на два порядка!

Применение PEDOT:PSS различной проводимости

В зависимости от условий производства удается варьировать проводимость PEDOT:PSS в широком интервале, и каждая градация находит применение в различных устройствах (не только электронных!).

Молекулярный сверхпроводник.

Интересно рассмотреть также недавно открытый сверхпроводник - диборид магния (Тс=40К). Его структура показана на рис. Атомы бора (маленькие сферы) упакованы в плоскости, подобные графитовым, при этом атомы магния (большие сферы) располагаются в центре ячеек, сформированных бором. Можно рассматривать это соединение как соль с переносом заряда. Бор отличается от углерода только тем, что на внешней оболочке имеет один р-электрон вместо двух, т.е. он также способен образовывать молекулярные орбитали с делокализованными π-электронами. Атомы Mg отдают два внешних валентных электрона в слои сильно ковалентно связанных атомов бора, образуя квазиметаллический бор. Высокая температура сверхпроводящего перехода связана с высокими частотами фононов для легких атомов бора.

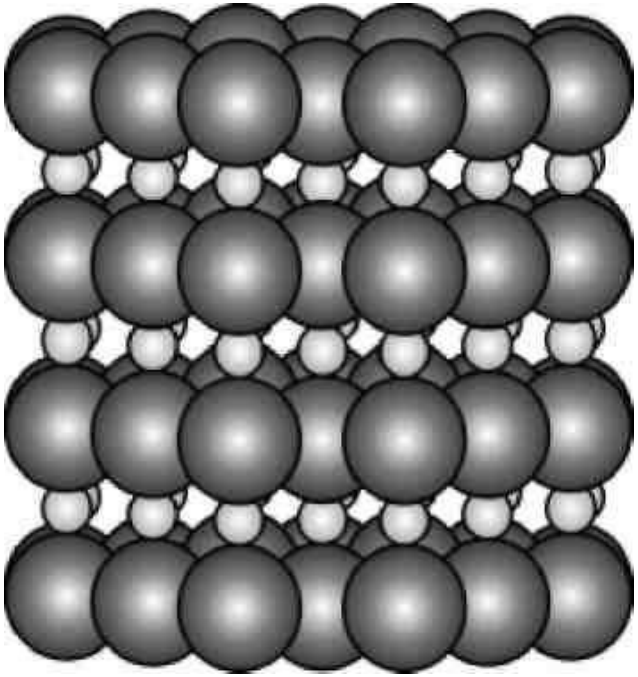
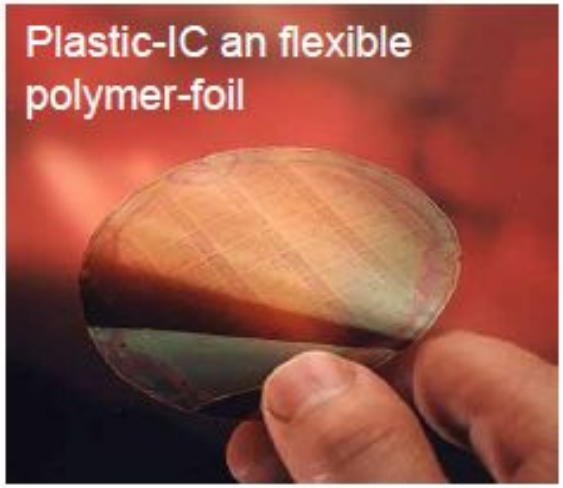


Рис. Структура MgB_2

Основные устройства органической электроники

органические тонкопленочные транзисторы и ИС на их основе



органические светодиоды и дисплеи на их основе

NATURE | VOL 421 | 20 FEBRUARY 2003

органические фотовольтаические преобразователи (солнечные батареи)

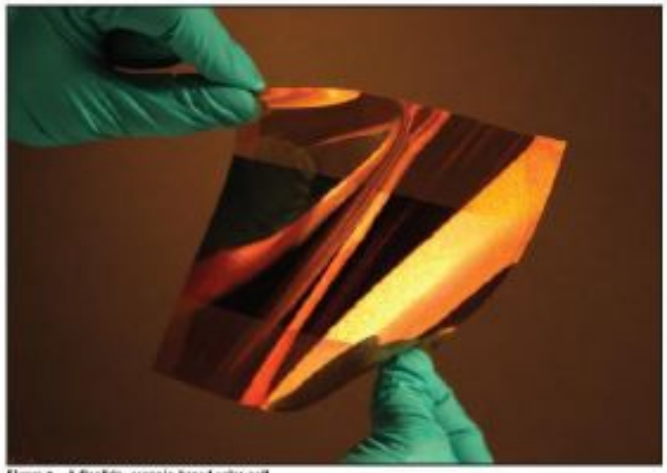
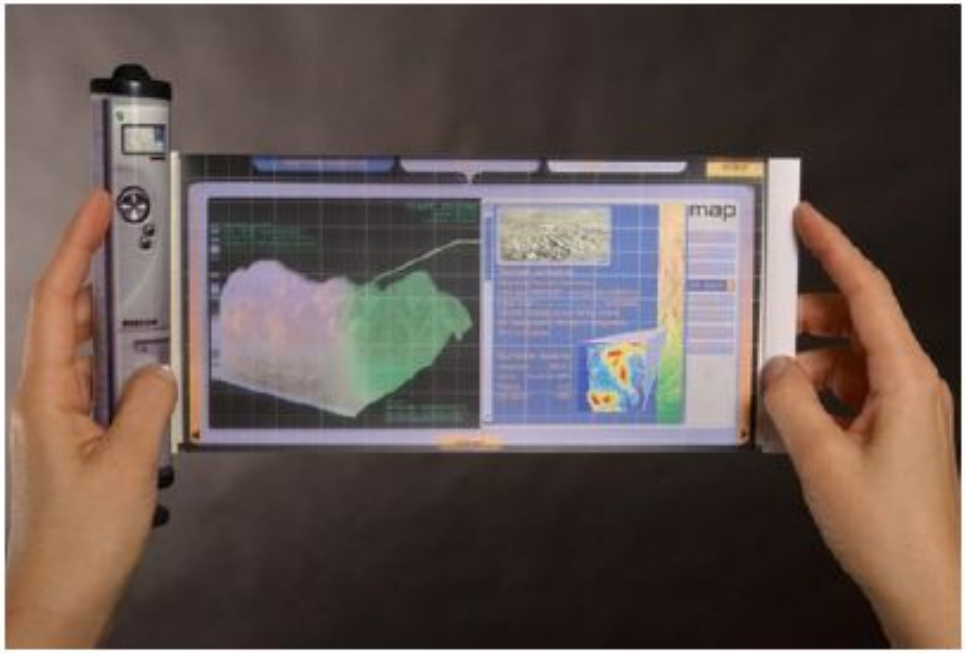
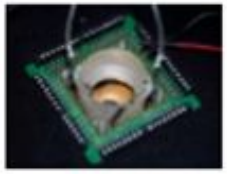
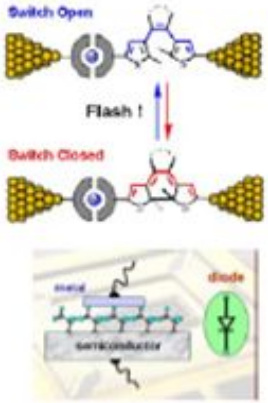


Figure 1. A flexible, organic-based solar cell

NATURE | VOL 428 | 29 APRIL 2004

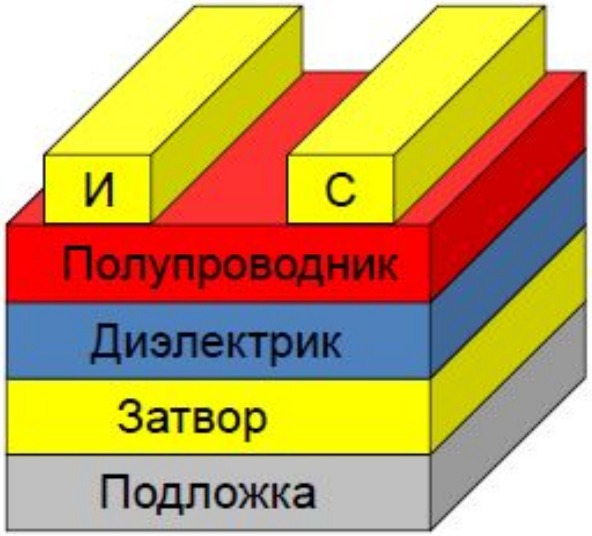


Устройства молекулярной электроники

	Органические фото-вольтаические ячейки (OPVC)	Органические светоизлучающие диоды (OLED)	Органические полевые транзисторы (OFET)	Сенсоры (CGS)	Другие устройства (логика, память, выпрямители, переключатели, молекулярные провода, магниты, сверхпроводники…)
					
История	Eley, Nature 1948 Вартанян, ЖФХ 1949 Baba et al, Nature 1956	Bernanose et al JCP (Fr.) 1953-60 (Acridine) Pope JCP 1963 (anthracene) Tang & vanSlyke APL 1987 (AlQ3+Pc)	Simon & Andre, CPL 1987 Barbe and Westgate *J Phys Chem Solids* 1970 Петрова и Розеншейн ФТТ 1970 (Chl).	W. Goepel 1980s Sadaoka 1980s Pauly 1980s	
Статус	коммерческие образцы в 2007 г. (Konarka, IMEC)	На рынке с 2002 г.: mp3, GPS, Mobile phones… Ожидаются: OLED-TVs, general lighting…	Разработка прототипов устройств, оптимизация параметров	Известны с 80-х. Есть данные о применении	Ведутся лабораторные исследования

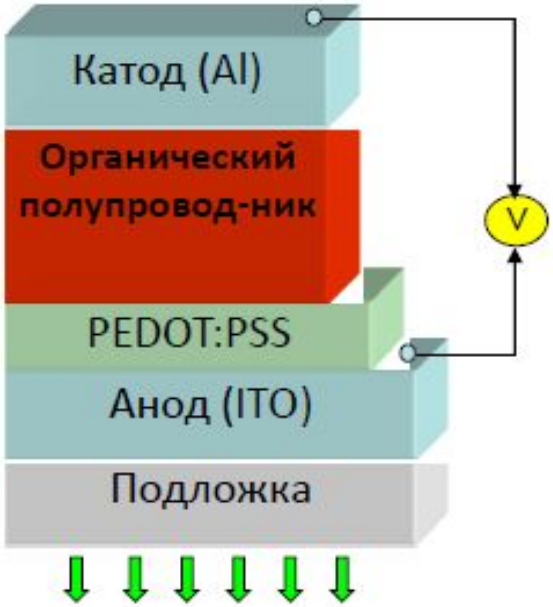
Основные устройства органической электроники

Органический тонкопленочный (полевой) транзистор (ОТПТ) – OFET, OTFT (англ.)

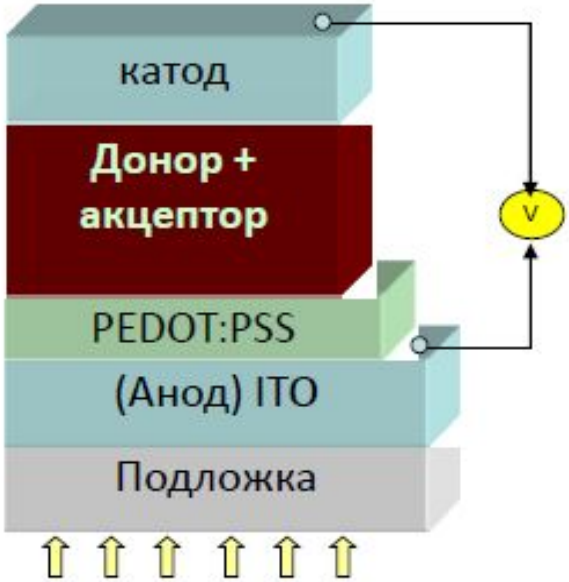


Верхние контакты:
И – исток, **С** – сток

Органический светоизлучающий диод (ОСИД) – OLED (англ.)



Органическая фотовольтаическая ячейка (солнечная батарея, фотодетектор)

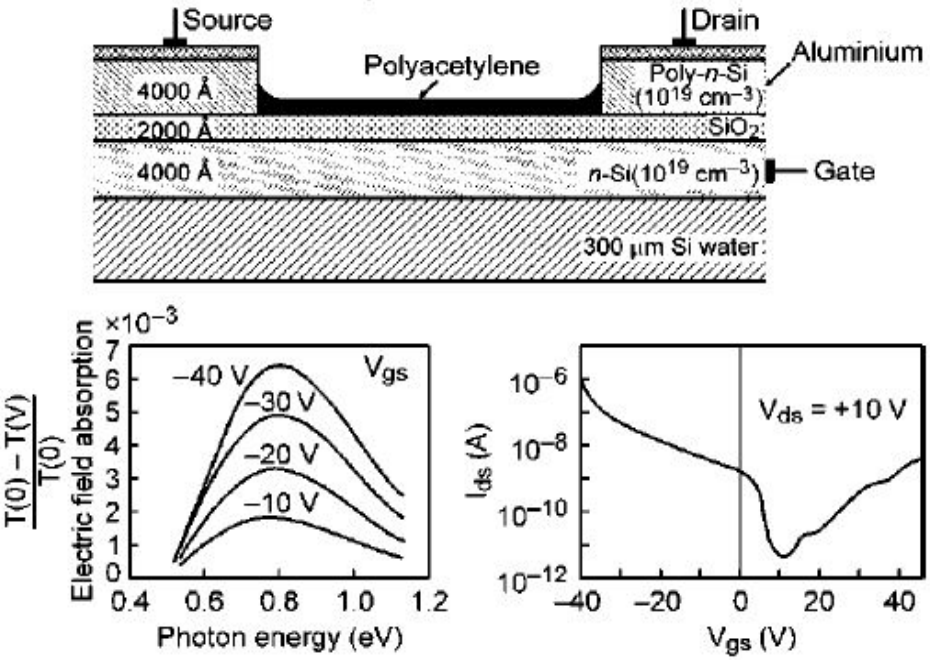


Толщина каждого функционального слоя – от 10 до 500 нм

Молекулы транзисторы

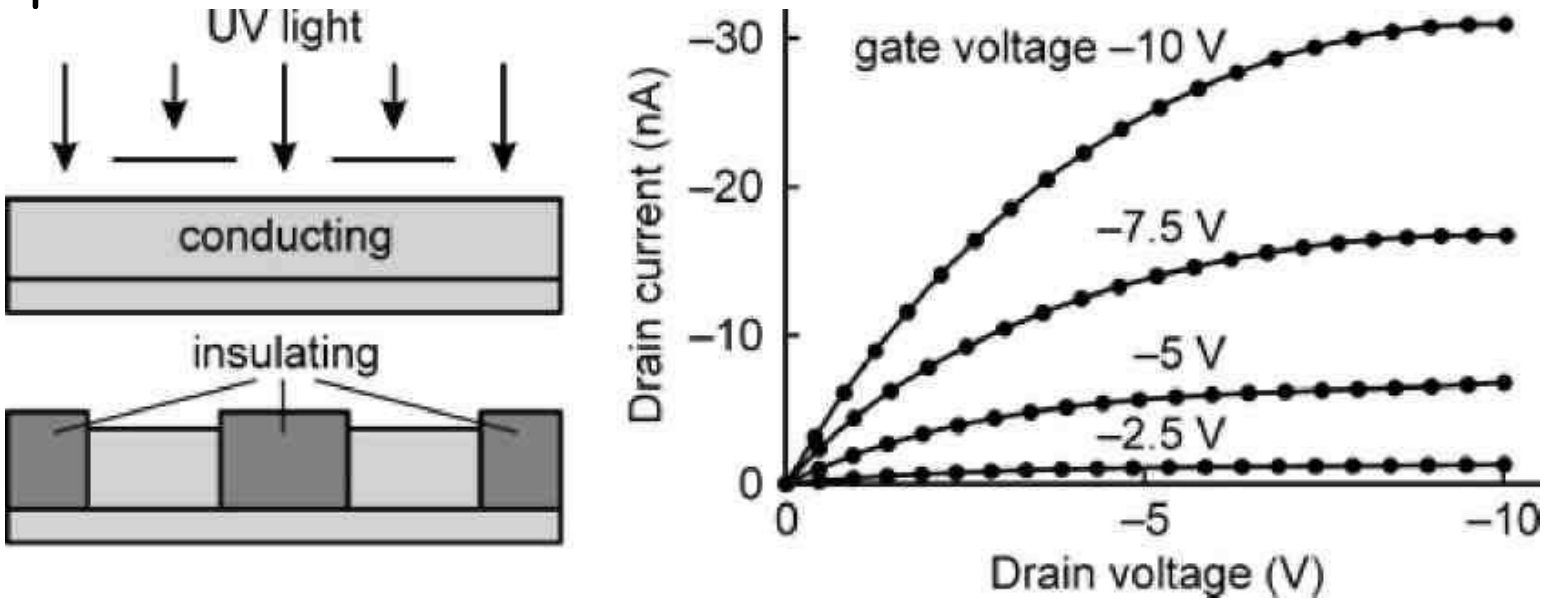
Первый полевой транзистор на основе ПА был создан в 1980 г., его структура и характеристики показаны на рис. Он состоял из неорганических контактов, оксидного слоя, полупроводниковым слоем был транс ПА р-типа. Сопоставляя полученные характеристики с теоретическими можно получить важный параметр полимера, который характеризует его быстродействие . подвижность инжектированных носителей (μ).

Для первого транзистора значения μ были достаточно малы $\mu \sim 10^{-4}$-10^{-2} см^2/Вс и частота переключения $\sim \mu/L^2$ (где L-длина канала) составляла 100 кГц. Особенностью данного транзистора является его способность модулировать оптическое пропускание (поскольку при инжекции дырок возникает солитонная полоса поглощения).



Полевой транзистор на основе полиацетилена, его ВАХ и спектр поглощения в зависимости от смещения.

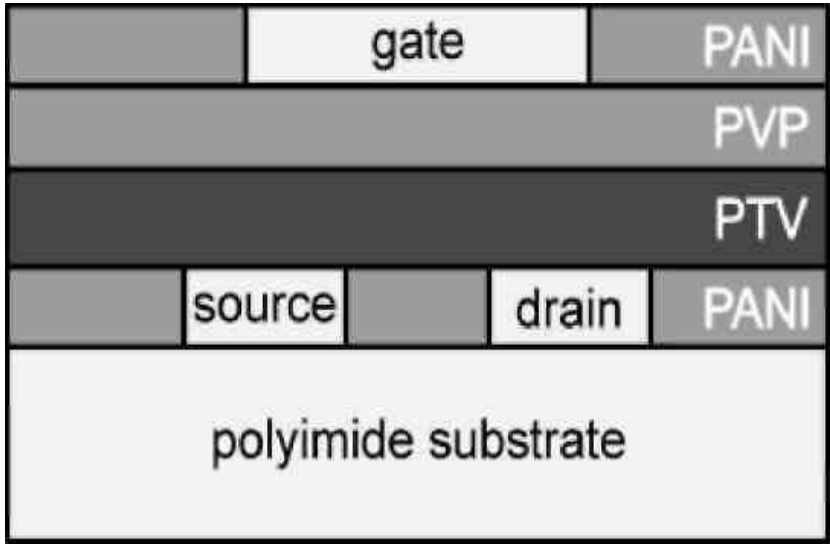
В дальнейшем в 1994 г. был создан полностью полимерный транзистор. Технология его приготовления очень дешева и проста, она основана на технике - spin coating - капля полимерного раствора помещается на подложку, которая быстро вращается, формируя тонкую полимерную пленку. Далее применяется либо печатная технология, либо фотолитография. На рис.показан процесс создания полностью полимерного транзистора на основе полианилина и его характеристики.



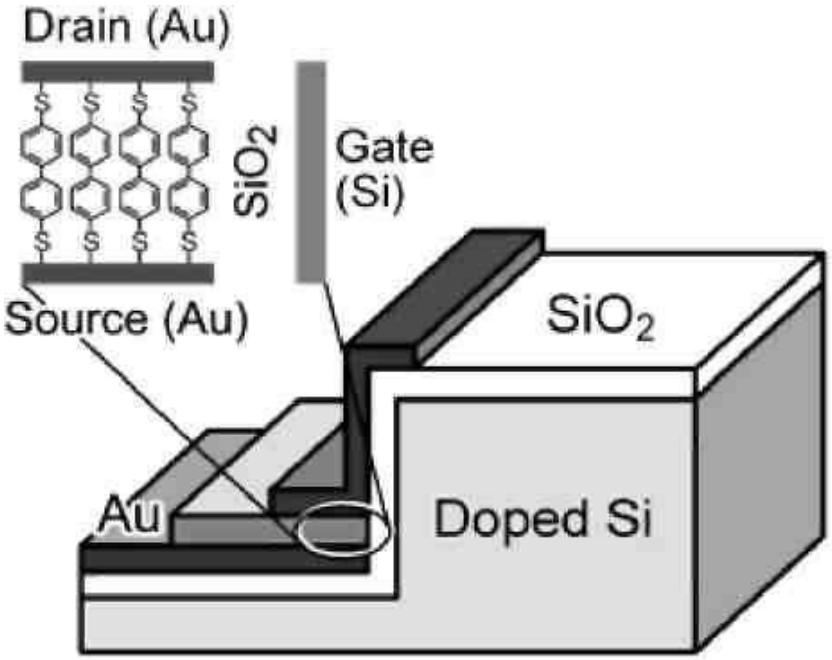
Процесс создания и характеристики полностью полимерного транзистора на основе полианилина (PANI).

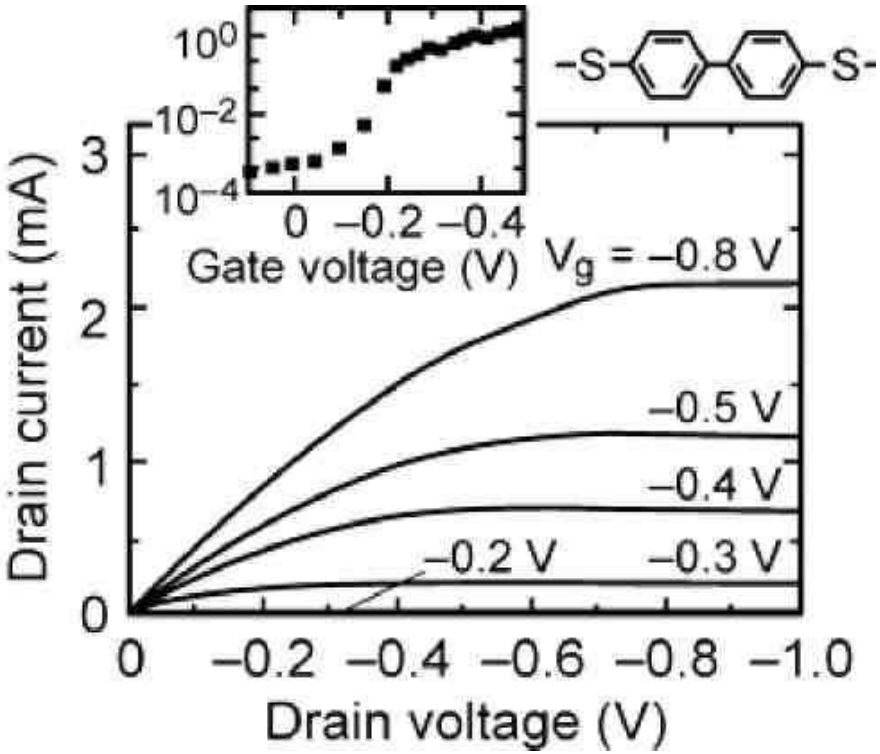
Проводящий PANI нанесен на гибкую полимерную подложку. Освещение УФ светом через маску проводящей пленки PANI приводит к изменению сопротивления на 11 порядков и созданию проводящих путей в изолирующей матрице, которые используются как базовый и токовые электроды. Характеристики на рис. зависимости тока от напряжения на токовых и базовом электродах для транзистора с длиной канала 1мкм и подвижностью μ~3 10^{-4} $см^2/В$ сек. Характеристики имеют вид типичный для полевых транзисторов. Особенностью транзистора является то, что существует небольшой ток при нулевом базовом напряжении.

Для увеличения подвижности и улучшения характеристик транзисторов в этой же технологии используют сочетание различных полимеров . Политиофен-винилен (PTV) наносится как полупроводниковый слой (50 нм) и поливинилфенол (PVP) как базовый диэлектрик (250 нм).



Полностью полимерный транзистор



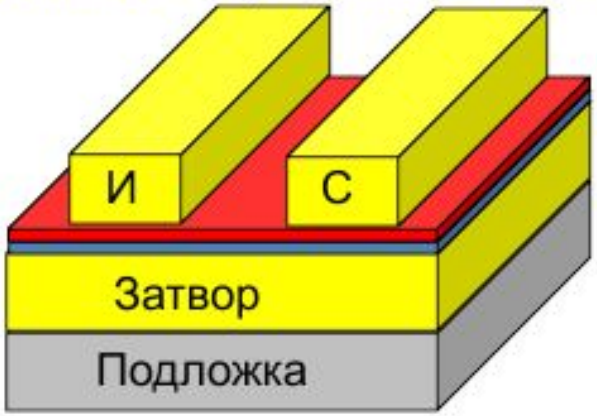


Структура и характеристики молекулярного транзистора на основе молекул 4,4-бифенилдитиола.

Будущее: монослойная электроника

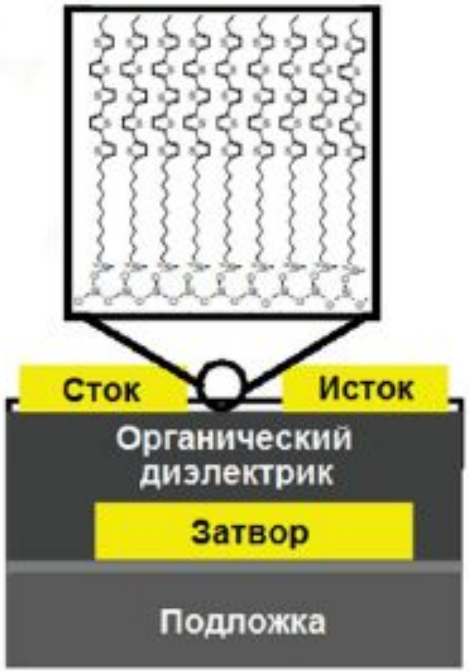
Транспорт зарядов на 90% происходит в верхнем слое пленки, т.е. для монослоевых пленок достижимы значения проводимости, сравнимые с блочными пленками.

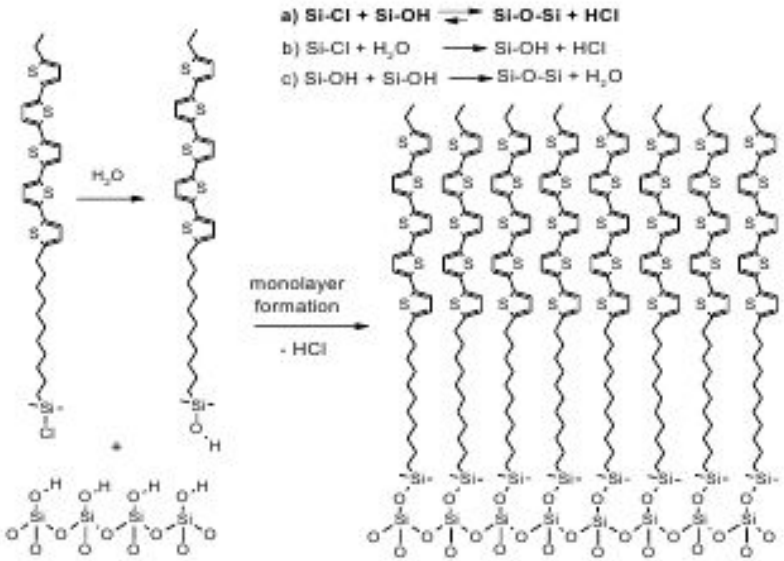
Идеальная структура (пока недостижимая цель): ОТПТ с монослойным полупроводником и монослойным диэлектриком



Толщина слоев ~ 3-5 нм

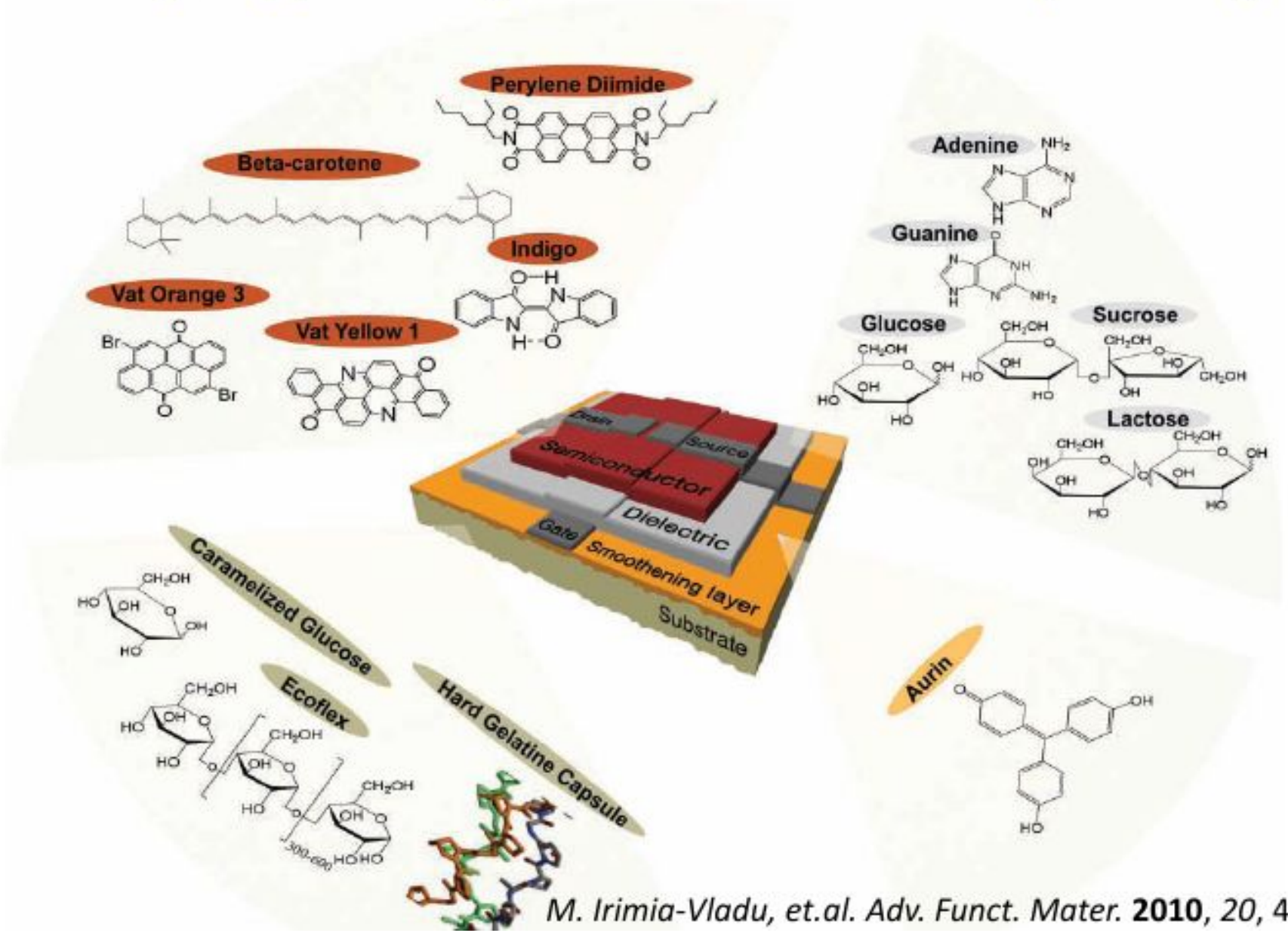
Самоорганизующийся монослой (SAM)





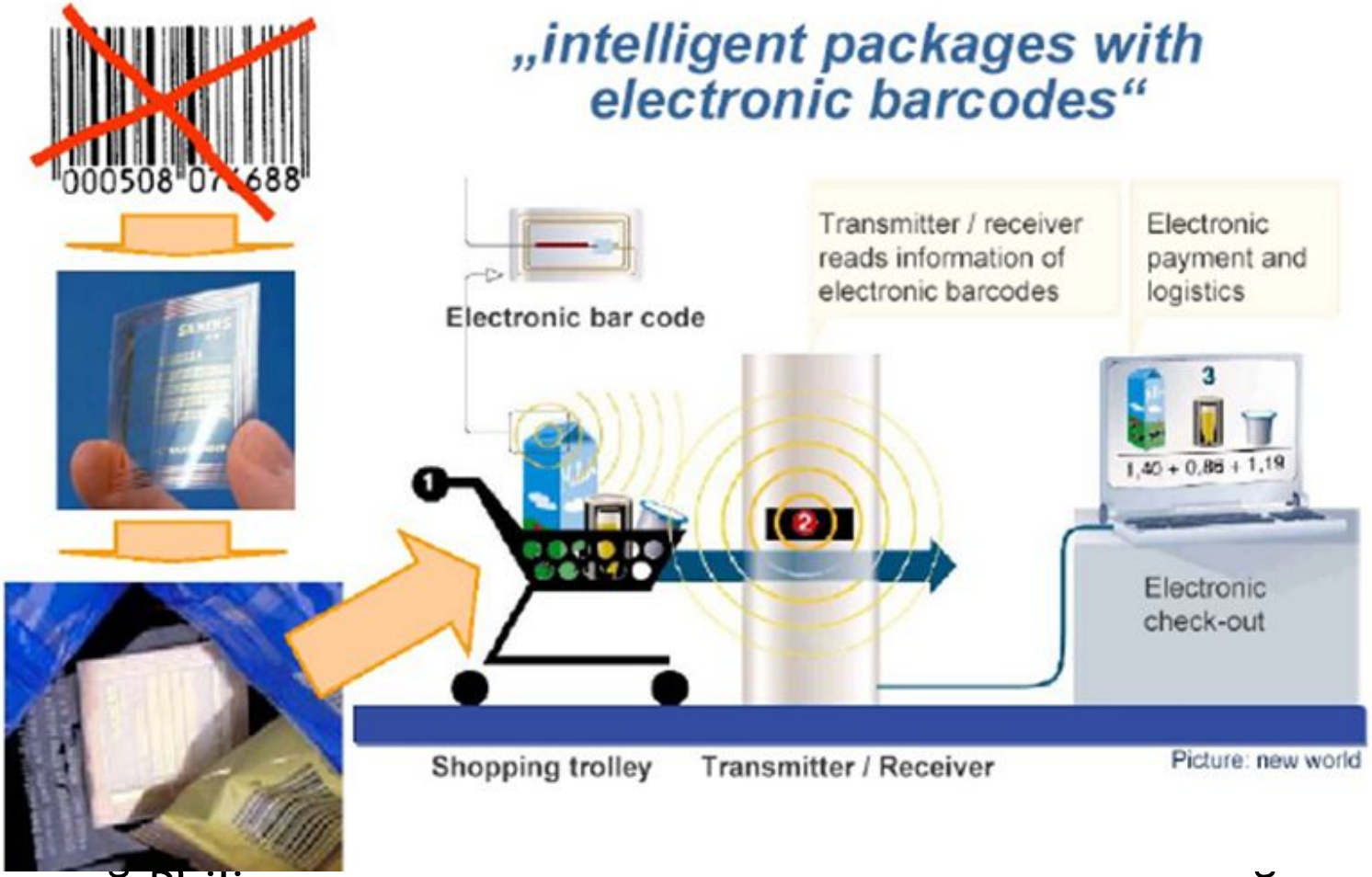
1. Edsger C. P. Smits et al. *Nature*, **455**, 956–959 (2008)
2. Fatemeh Gholamrezaie et al. *Nano Lett.*, **10**, 1998–2002 (2010)

Биодеградируемые органические полевые транзисторы



M. Irimia-Vladu, et.al. Adv. Funct. Mater. **2010**, *20*, 4069

Электронные метки радиочастотной идентификации

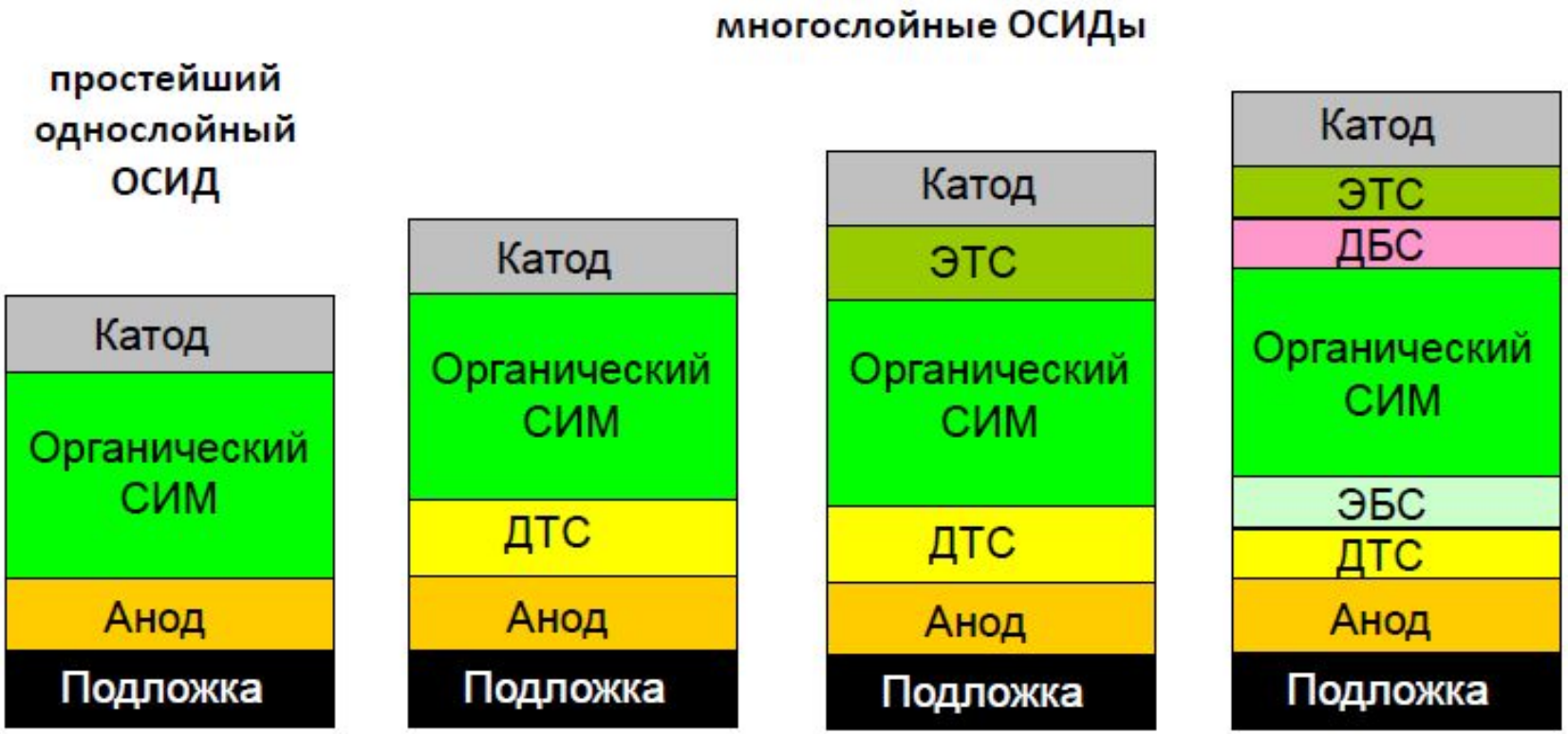


Компанией Philips уже изготовлен полностью полимерный чип площадью 27 мм^2 с минимальным размером деталей 5мкм. Скорость обработки информации с помощью таких интегральных схем составляет 10-100 бит/с. Этот параметр пока мал, чтобы использовать такие схемы в компьютерах, однако достаточен для использования в кодовых замках, электронных ярлыках для товаров в магазинах и др.

В настоящее время существует несколько вариантов молекулярных транзисторных устройств – аналогов полевого транзистора и способов их изготовления:

- молекулярный одноэлектронный транзистор, в котором квантовым островом служит ион кобальта, между ионом и золотыми электродами имеются туннельные барьеры;
- на основе молекулы C60 и туннельного микроскопа;
- на основе одностеночной полупроводниковой нанотрубки и кремниевой подложки.
- на основе Si, SiO^2 и упорядоченного монослоя молекул
- полностью полимерный транзистор

Схематическое изображение различных типов органических светоизлучающих диодов (ОСИДов)



Органический СИМ – органический светоизлучающий материал

ДТС – дырочно-транспортный слой

ЭТС – электроно-транспортный слой

ДБС – дырочно-блокирующий слой

ЭБС – электроно-блокирующий слой

Современные панели ОСИД

Commercial Production OLED Lighting Panels with World' s Highest Color Rendering Index of Ra93 (Lumiotec, 2012)

Индекс цветопередачи, коэффициент цветопередачи (colour rendering index, CRI) — параметр, характеризующий уровень соответствия естественного цвета тела видимому (кажущемуся) цвету этого тела при освещении его данным источником света.

Белые ОСИДы

Требования DOE к энергетически эффективному освещению:

Эффективность панели (168 Лм/Вт)

Время жизни (L_{70} – 100 000 ч)

Качество цветопередачи (CRI > 85; Цветовая температура 2580 -3710 K)

Прогресс на лабораторном уровне:

0.83 Лм/Вт Kido *et al, Appl.Phys.Lett., 1994*

38 Лм/Вт Forrest *Nature*, 2006

90 Лм/Вт Leo *et al, Nature, 2009*

99 Лм/Вт So *et al, Adv. Energy Mater. 2011*

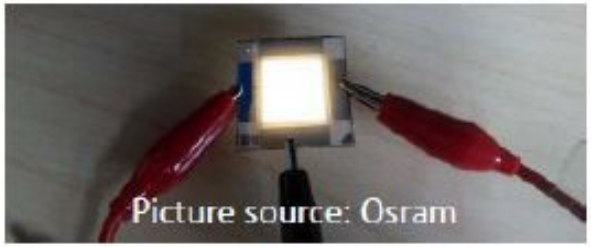
128 Лм/Вт Panasonic 2011

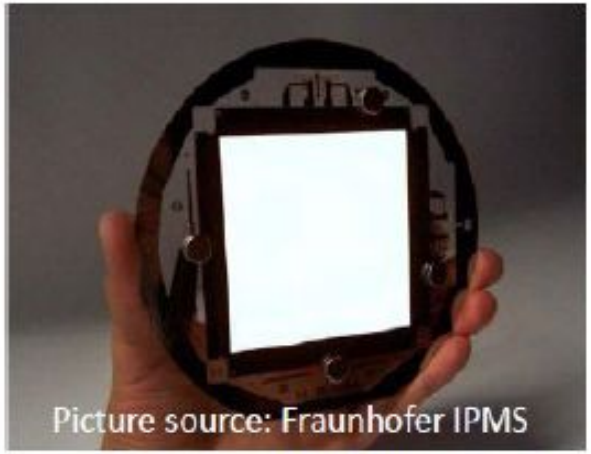
Белые панели ОСИД приближаются к требованиям DOE:

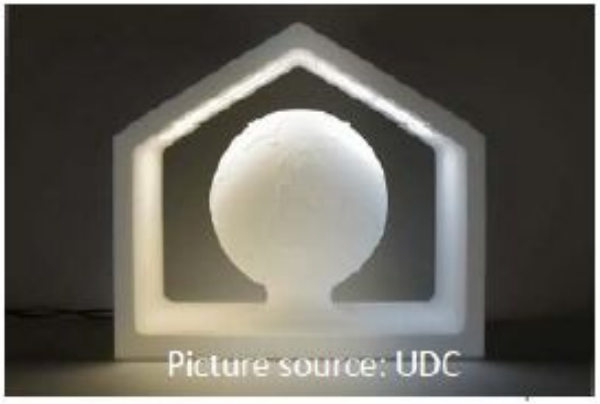
45.7 Лм/Вт Kodak 12/2009

58 Лм/Вт UDC 2011 SID

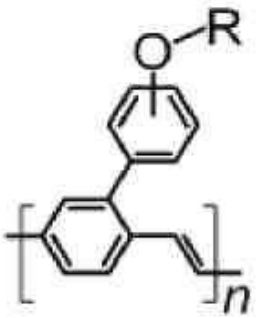
87 Лм/Вт Osram 2011



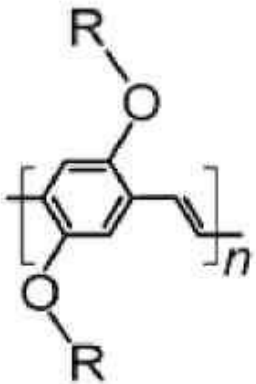




Сопряженные полимеры



Зеленое излучение

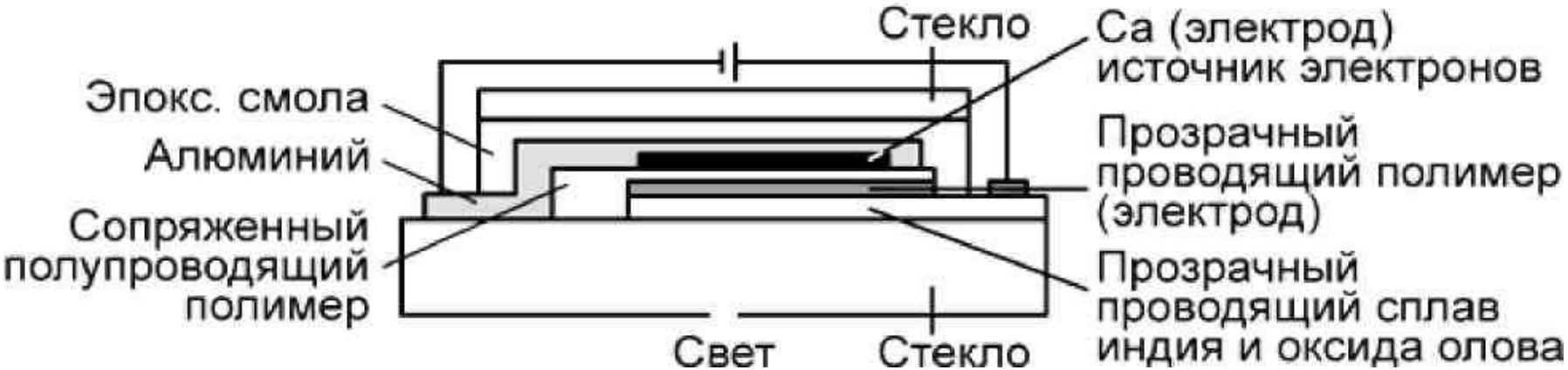


Красно-оранжевое излучение

PEDOT–PSS

Водный раствор (1.3%)

Разрез полимерного светодиода



Полимеры, используемые для создания СД, и поперечное сечение полимерного светодиода

Органические светоизлучающие транзисторы

Трехслойный ОСИТ

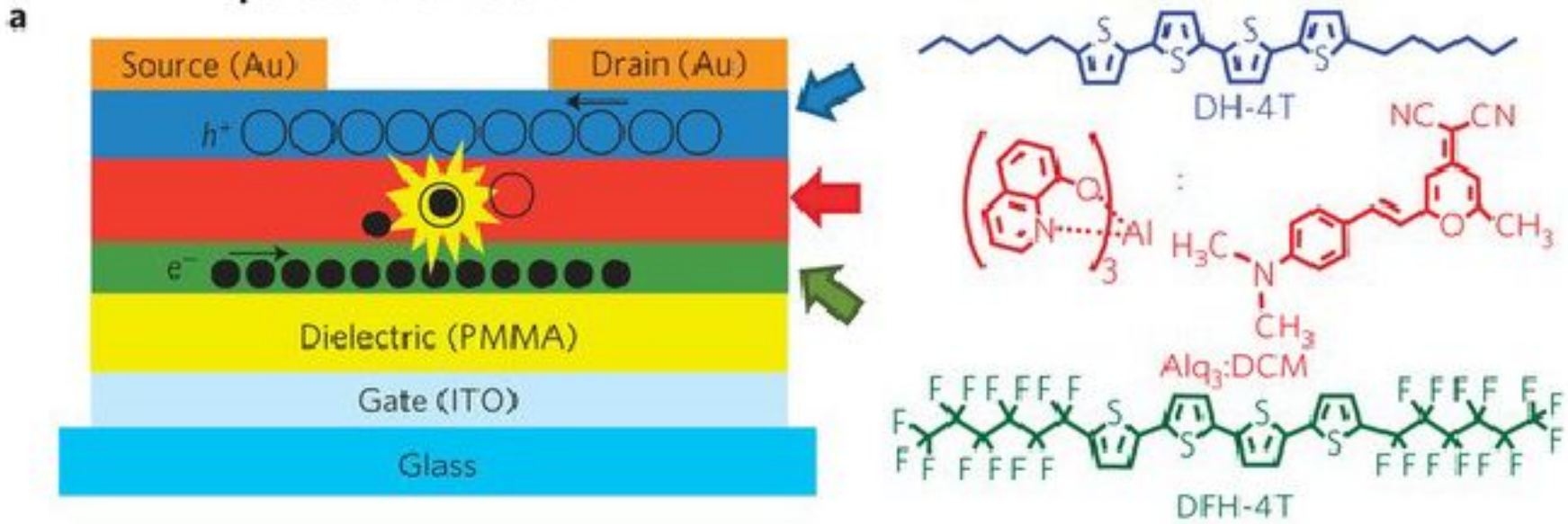
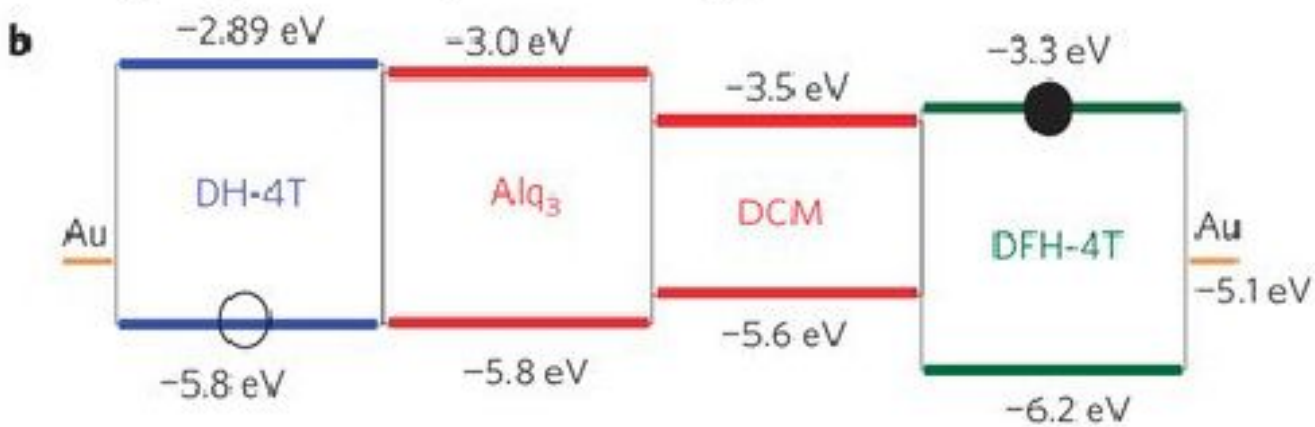


Диаграмма энергетических уровней



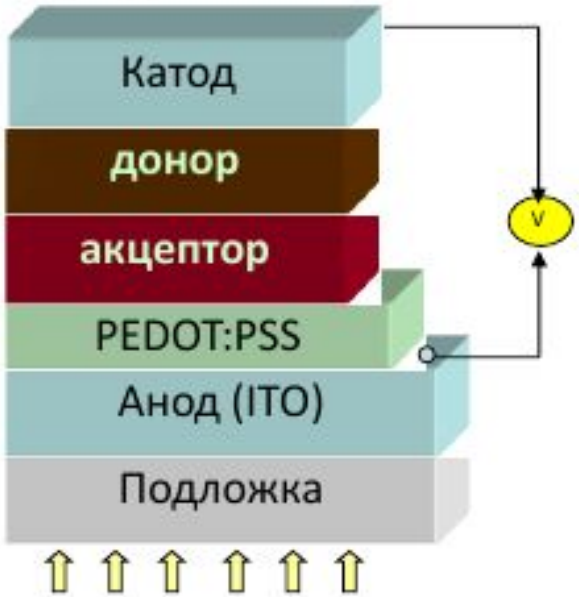
F. Capelli, M. Muccini, at. al., ***Nature Materials*** **2010**, 9, 496–503

В настоящее время разработаны светящиеся дорожные знаки, плоские дисплеи в различных приборах. В ближайшее время, по-видимому, станут реальностью плоские ТВ экраны на основе полимерных LED, внутренние стены помещений, светящиеся белым светом, и многое другое.

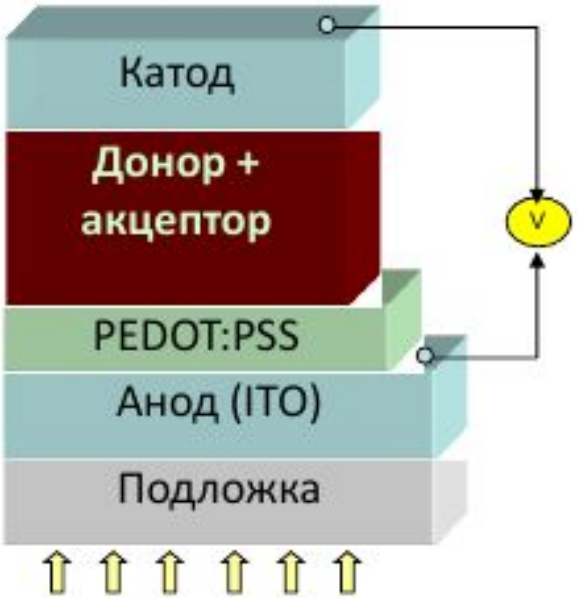
Причины большого коммерческого потенциала органических СД (как молекулярных, так и полимерных) следующие: они могут быть произведены быстро , дешево и в больших количествах; с помощью добавления красителей могут работать во всех областях спектра; низкие рабочие напряжения .до 10 В; широкий угол обзора (по сравнению с ЖК мониторами); быстрый фотоответ; легкость конструкции; высокая эффективность излучения.

Органические фотовольтаические ячейки

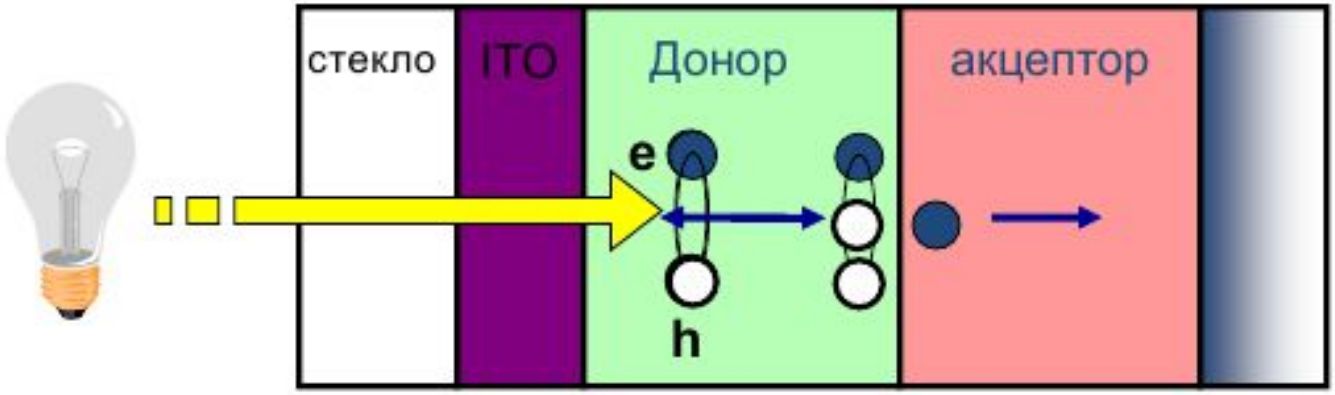
Двухслойное устройство



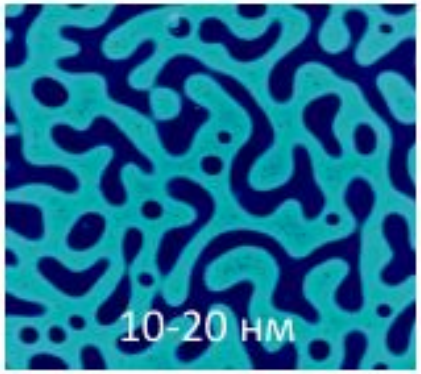
Устройство с объемным гетеропереходом



Фотоиндуцированная генерация заряда



Нанокомпозит донор-акцептор

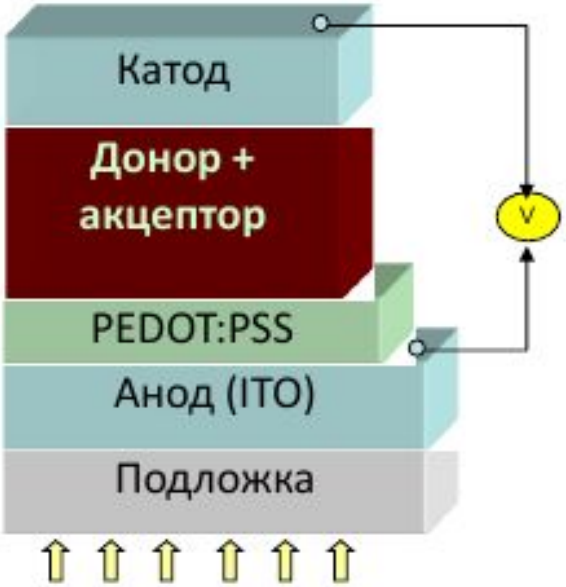


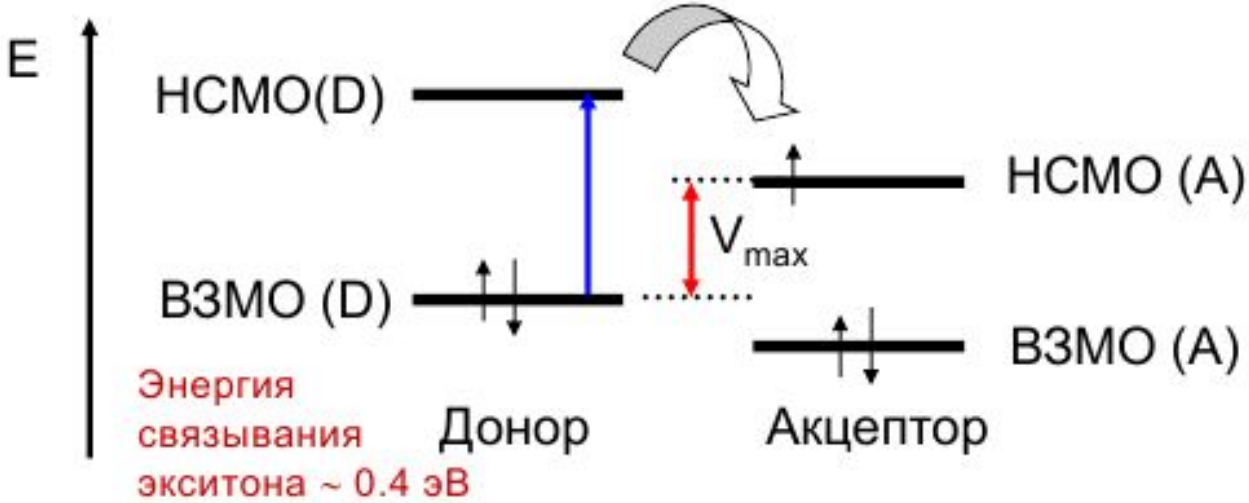
Органические фотовольтаические ячейки

Параметры:

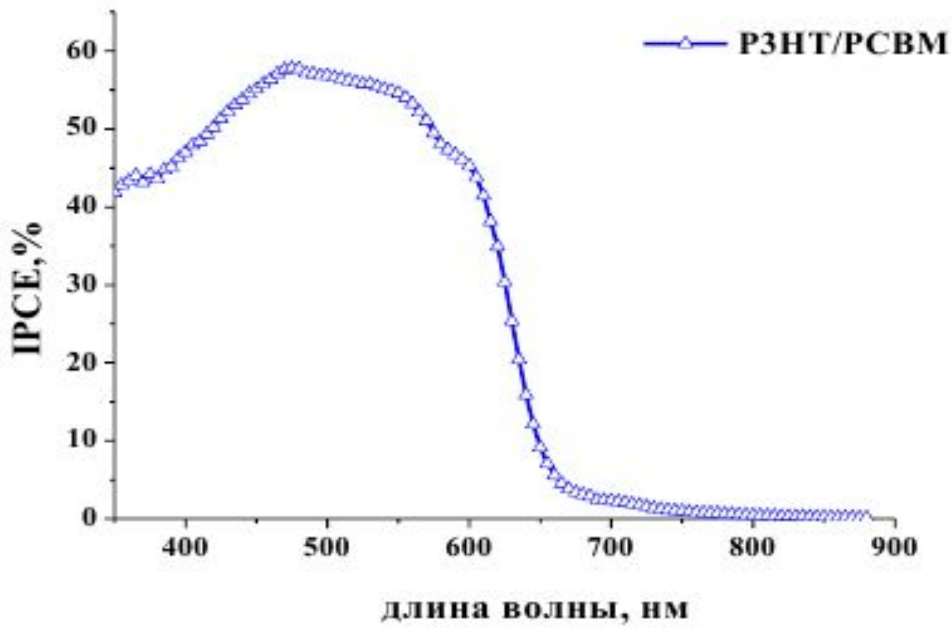
- Поглощение света
- Перенос заряда
- Растворимость
- Морфология
- Уровни ВЗМО и НСМО донора и акцептора

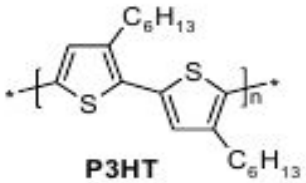
Устройство с объемным гетеропереходом



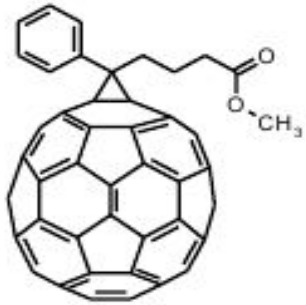


Основные характеристики органической фотовольтаической ячейки





P3HT



PCBM

$$IPCE = 1240 \frac{J_{SC}}{\lambda_i P_{light}}$$

***IPCE* - внешняя квантовая эффективность ,**

англ.: IPCE – incident photon to current efficiency,
EQE – external quantum efficiency

J_{SC} – ток короткого замыкания,
λ_i – длина волны,
P_{light} – мощность падающего света

Стандартные условия тестирования представляют собой облучение симулятором солнечного света мощностью 100 мВт/см^2 при 298 К в условиях AM1.5G

AM1.5G - Air Mass 1.5 – воздушно-массовый коэффициент, характеризующий солнечный спектр, проходящий через атмосферу, где 1,5 – толщина атмосферы, при которой работают наземные солнечные батареи.

Рост эффективности органических солнечных батарей

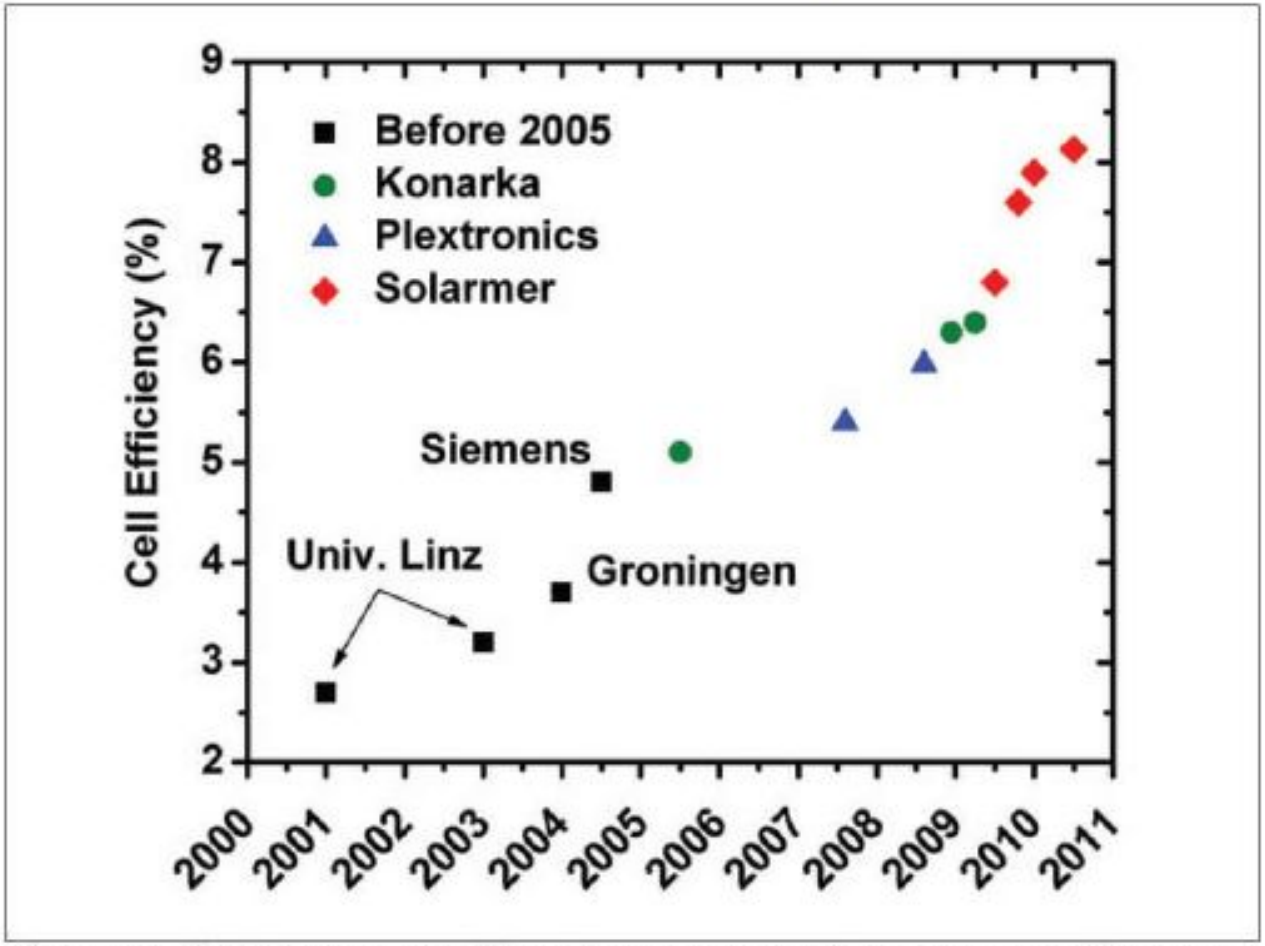
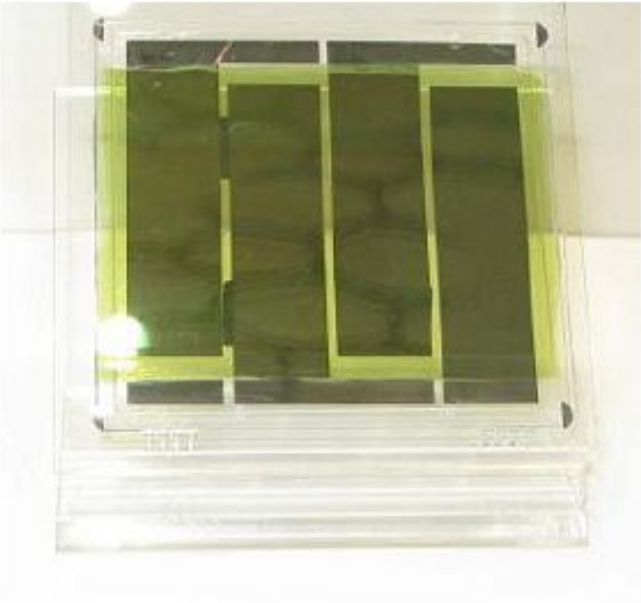


Figure 2. Certified highest OPV cell efficiency from 2001 to 2010. The data was extracted from NREL's compilation of best research solar cell efficiencies, with the exception of one data point which is certified by Newport Corp. for Solarmer in 2009. (Source: Solarmer Energy, Inc.)

Сегодня органические солнечные батареи находятся на пороге коммерциализации



10.3 %

11.2011

Mitsubishi Chemical

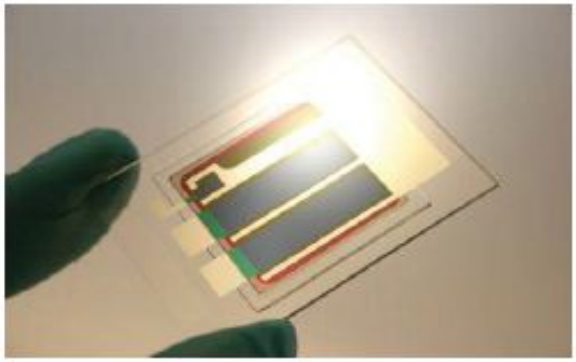
tetrabenzoporphyrin

9.0 %

28.2.2012

Konarka (USA)

Polymer/fullerene



12.0 %

01.2013

Heliatek (Dresden)

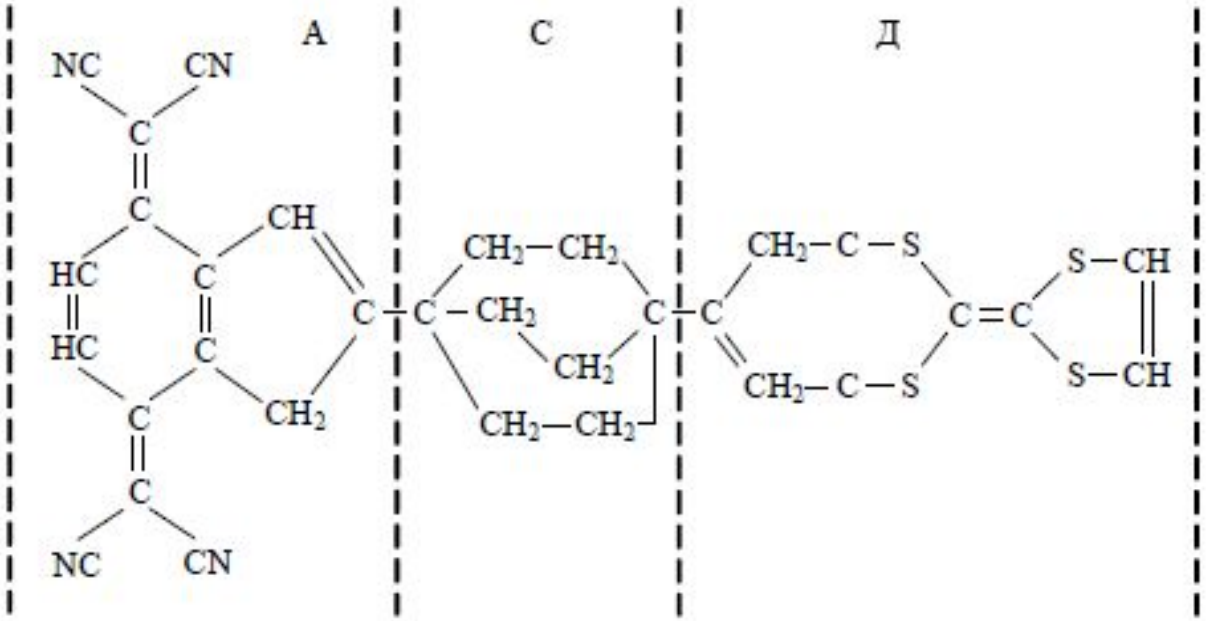
Small molecules/

sublimation

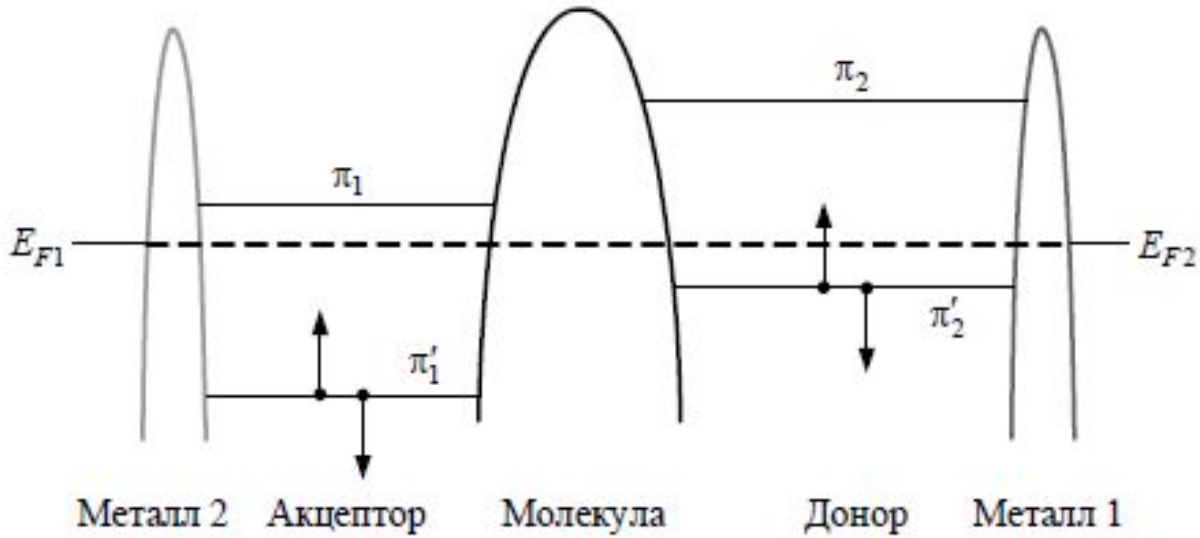
Молекулы – диоды

В 1974 г. ведущие инженеры фирмы IBM А. Авирам и М. Ратнер предложили модель выпрямителя (диода), состоящего из одной органической молекулы. Две половинки этой молекулы обладают противоположными свойствами по отношению к электрону: одна может только отдавать электрон (донор), а другая – только принимать (акцептор). Если поместить такую ассиметричную молекулу между двумя металлическими электродами, то вся система будет проводить ток только в одном направлении.

Аналогом p–n-перехода в данном случае является донорноакцепторная молекула. на рис. показана модельная молекула, состоящая из: А – акцептора тетрацианохинодиметан), Д – донора(тетратиофульвален) и С – соединительной системы метиленовыхмостиков.



Молекула, обладающая выпрямляющими функциями



Энергетическая диаграмма выпрямителя
в равновесном состоянии

Акцептор А имеет низколежающую свободную орбиталь π1, донор Д имеет свободную орбиталь с более высокой энергией π2. Донор и акцептор разделены изолирующей подгруппой. Молекула помещена между двумя металлическими электродами с уровнями Ферми EF1 и EF 2 (рис. 1.81). Если на электрод 1 подать «минус», а на электрод 2 «плюс», то уровень EF1 поднимется, и электроныбудут переходить из металла 1 на свободный уровень π1. Уровень EF 2 понизится, на него будут уходить электроны с занятого уровня π2. На освободившийся уровень туннелируют электроны, перешедшие на π1. Ток течет от электрода 1 к электроду 2, электроны при движении понижают энергию на каждой ступени.

Если изменить полярность электродов, то на свободный уровень π2 электроны из металла 2 пойдут при гораздо большем напряжении, так как уровень π2 расположен высоко. Таким образом, реализуется односторонняя проводимость, что указывает на то, что рассмотренная структура обладает выпрямляющими свойствами.

Молекулярные интегральные микросхемы

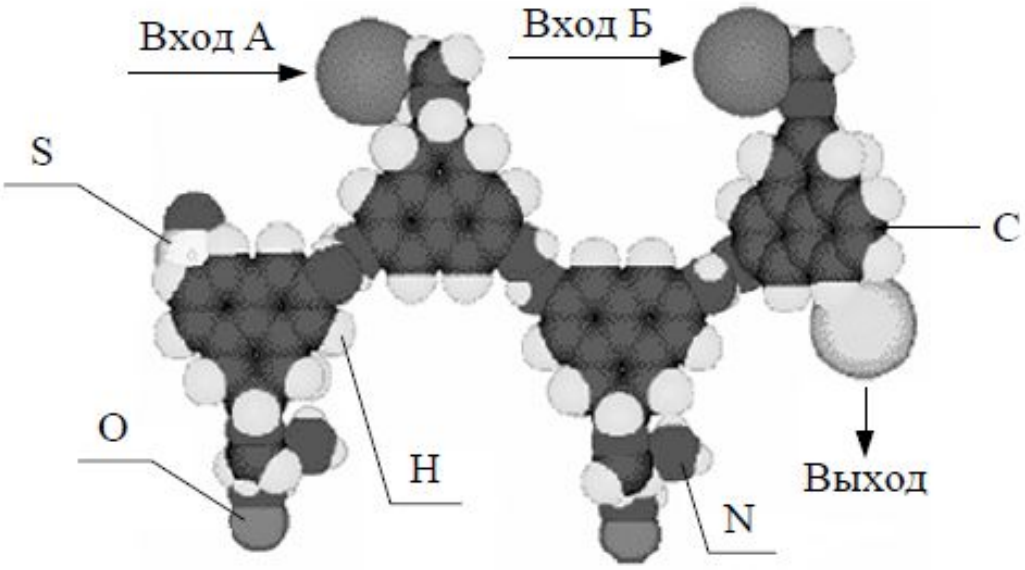
Имея молекулы – проводники, изоляторы, диоды, транзисторы, логические элементы и переключатели, можно разрабатывать молекулярные интегральные схемы. Размер молекулярного транзистора равен ~1 нм. Если создать ИМС из 10^9 таких транзисторов, то она будет размером с песчинку. При этом ее производительность возрастет в 10^2–10^3 раз, а энергопотребление уменьшится до весьма малых величин.

Элементы памяти.

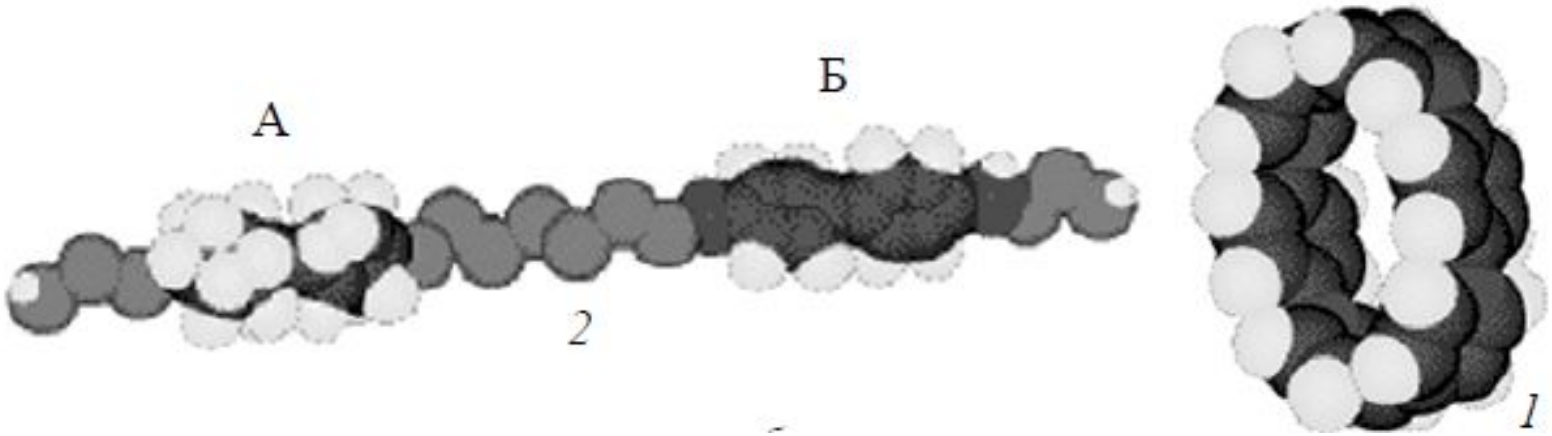
Существуют классы молекул, которые могут находиться в двух стабильных состояниях с различными значениями электропроводности. Такие молекулы могут быть использованы в качестве переключателей, логических элементов или элементов памяти.

На рис.*показан молекулярный логический элемент* «НЕ-И» с двумя входами. Электрон будет проходить через молекулярную цепочку только в те моменты, когда сигнал на обоих входах отсутствует.

Молекулярный логический элемент: C – атом углерода; H – атом водорода; N – атом азота; S – сера; O – кислород



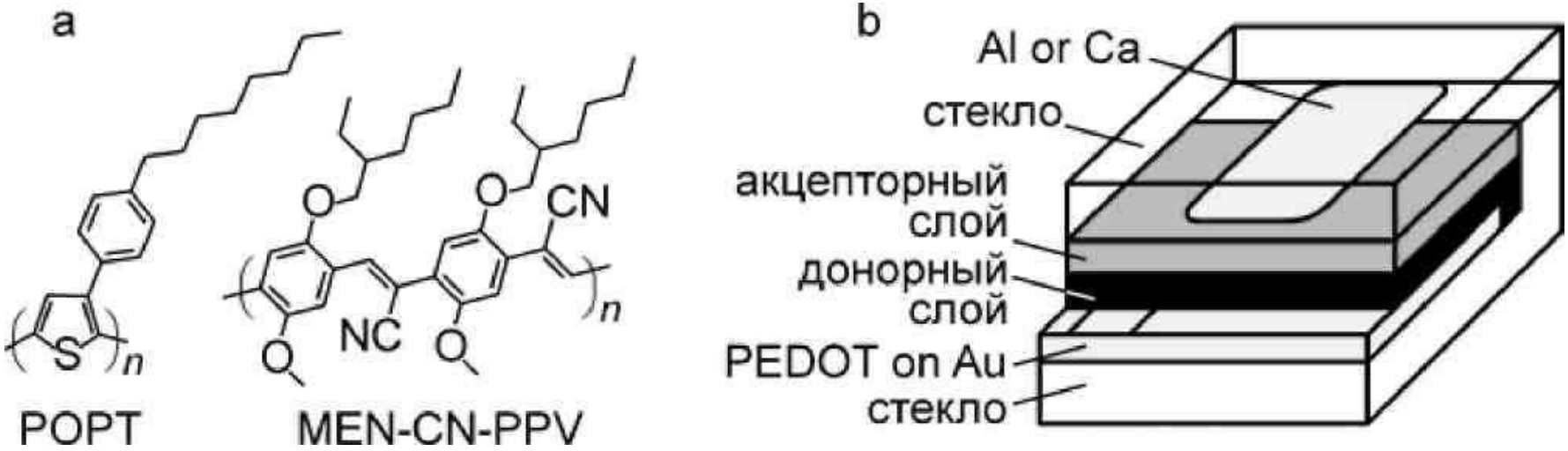
На рис. *представлен логический элемент* на основе молекул ротаксана: *1 – циклический компонент*, или «бусина»; *2 – линейный компонент, или «нить». В рабочем* положении «бусина» нанизана на «нить». Переключение элемента производится за счет перемещения «бусины» из положения А в положение Б (и обратно).



Молекулярный логический элемент на основе молекул ротаксана:
1 – «бусина»; 2 – «нить»

Органические фотодиады.

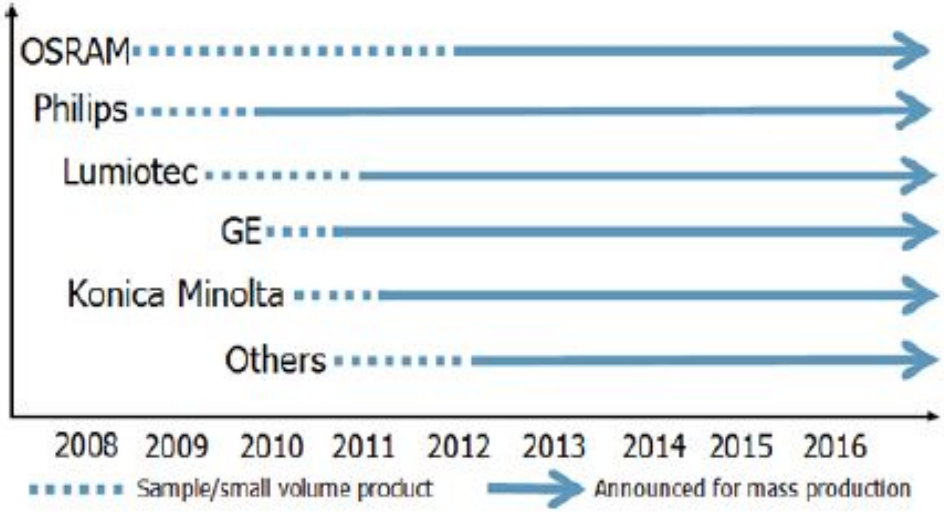
Первоначально в 80-е годы созданные фотодиоды на барьерах Шоттки давали небольшой квантовый выход η~0.7 % (электрон/фотон). В дальнейшем стали изготавливать структуры с полимерными p-n переходами, содержащие p и n органические полупроводники. На рис. а и б показан полимерный многослойный фотодиод, содержащий производную полифенилевинилена в качестве донорного слоя и производную политиофена в качестве акцепторного слоя, в этом приборе в режиме разомкнутой цепи достигается η~4.8 %.



а - производная полифенилевинилена (MEH-CN-PPV) и производная политиофена (POPT). б - многослойный фотодиод

Рынок органической электроники

Работы в области органической электроники ведут все ведущие мировые фирмы, производящие электронику



Общий бюджет разработок оценивают в десятки млрд. долларов

Рынок материалов для органической электроники растет в быстрыми темпами:

1 млрд. долларов (2010 год) → 35 млрд. долларов (2015 год) → 350 млрд. долларов (2025 год)

Преимущества органической электроники

- Легкость
- Гибкость
- Энергоэффективность
- Большая площадь
- Прозрачность
- Низкая стоимость производства
  - Отсутствие высоковакуумных процессов
  - Отсутствие литографии
  - Недорогие субстраты (пластик, бумага, одежда…)
  - простота интегрирования в конечные устройства

Преимущества органической электроники

- Низкая проводимость органических проводников

  ⇨ **одежда с подогревом**

- Низкая подвижность носителей зарядов в органических полупроводниках, которая не позволяет производить из них процессоры

  ⇨ **дешевые малопроизводительные устройства (например, радиочастотные метки)**

- Короткое время жизни и сильная зависимость от свойств от окружающих условий

  ⇨ **высокочувствительные сенсоры**

Органическая электроника открывает возможности новым высокотехнологичным применениям, которые в настоящее время трудно или невозможно реализовать на основе неорганической электроники

Основные преимущества

1) *Линейный размер активного элемента, по крайней мере, на 3 порядка меньше.*

2) *Расположение молекулярных фрагментов строго детерминировано (как, например, в молекуле ДНК) в отличие от случайного распределения примесей в неорганических материалах.*

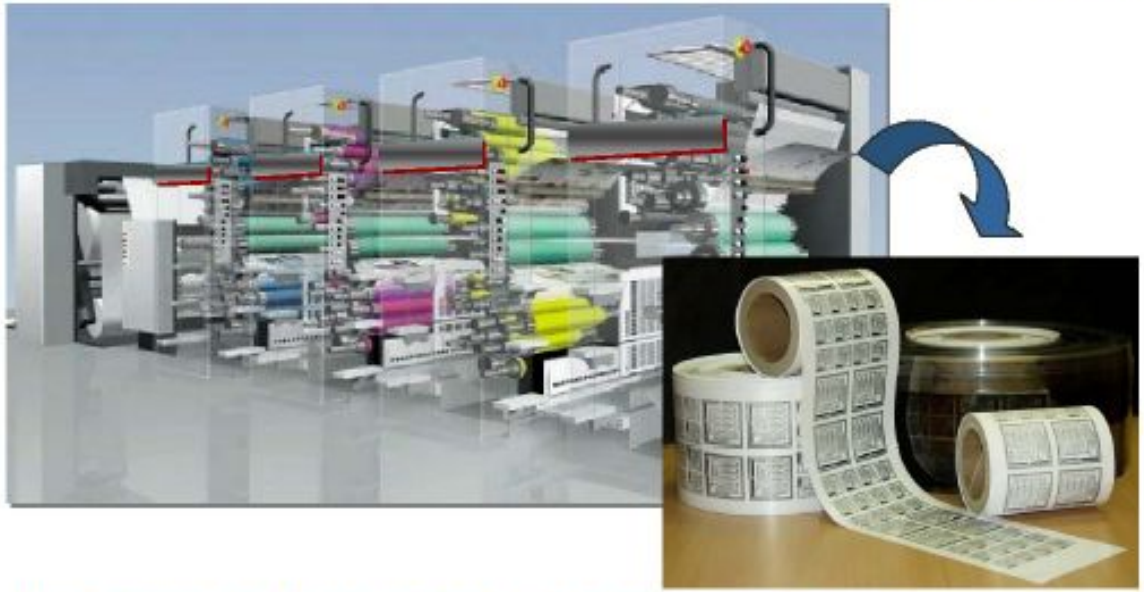
3) *Возможность 3-мерной организации.*

4) *Уменьшение размеров до 10^{-7} см означает увеличение быстродействия . теоретически до $10^{-7}/10^{8} = 10^{-15}$ с (где 10^{8} см/с . скорость передачи заряда, т.е. скорость электрона). Заметим, что в ряде случаев более жесткие ограничения связаны с конечностью частоты молекулярных колебаний, ограничивающие время, в течение которого может происходить перестройка молекулы (10^{13} . 10^{14} c^{-1}).*

5) *Наконец, важно отметить возможность многозначной логики и, соответственно, более эффективных способов обработки информации.*

Преимущества органической электроники

1. Возможность создания сверхтонких и сверхлегких устройств на гибкой основе
2. Совместимость со струйными и печатными технологиями
3. Выход на новые рынки и удешевление технологии производства



"let´s print electronics like a newspaper"

Недостатки:

1. Недостаточно высокие характеристики получаемых устройств
2. Недолговечность в обычных условиях

Недостатки

Хотя теоретические основы молетроники уже достаточно хорошо разработаны и созданы прототипы практически всех элементов логических схем, однако на пути реального их использования встают значительные сложности. Главная проблема молекулярной электроники – это интеграция молекул в схему. Молекулярное устройство должно представлять собой сложные разветвленные цепи из атомных группировок. Подходы к созданию базовых элементов схем хорошо разработаны, но проблема их интеграции в порядке, обеспечивающем работу схемы, еще далека от решения. Основным путем решения данной проблемы является процесс самосборки, основанный на молекулярном распознавании взаимно дополняющих структур. В настоящее время разработаны технологии некоторых простых процессов самосборки. Это – формирование упорядоченных самоорганизованных пленок; синтез по методу Мэррифилда, в котором соединяются «выходы» одних молекул с «входами» других; получение трехмерных молекулярных структур типа «решеток», «лестниц» и крестообразных структур (молек. ДНК).

Основные проблемы современной органической электроники

Повышение эффективности устройств

Повышение стабильности и времени жизни

Снижение себестоимости

Пути решения:

Поиск новых функциональных материалов

Создание эффективных барьерных материалов

Разработка новых типов устройств и способов их получения