

# Органическая и печатная электроника — новая ветвь развития

**В статье показаны основные продуктовые направления развития органической и печатной электроники, приведены примеры прототипов и серийно выпускаемых изделий, дана оценка и прогноз рынка. Рассмотрены преимущества и недостатки технологий печати, а также продемонстрированы примеры материалов, применяемых в качестве оснований, проводников, полупроводников и диэлектриков.**

Антон Нисан

edu@ostec-group.ru

## Что такое органическая и печатная электроника?

Прежде всего, название «органическая и печатная электроника» вовсе не означает, что все используемые материалы являются органическими и наносятся они исключительно методами печати. На наш взгляд, достаточно удачны определения органической и печатной электроники, приведенные в Википедии. Согласно им печатная электроника — «совокупность печатных методов, используемых для создания электронных приборов». А органическая, или пластиковая, или полимерная электроника — «направление в электронике, основанное на применении проводящих полимеров, пластиков, органических соединений с низкой молекулярной массой (small molecular)».

Таким образом, слова «органическая» и «печатная» характеризуют одно и то же направление в электронике, но по разным признакам: первое отражает преимущественный состав используемых материалов, а второе — преимущественную технологию нанесения материалов в процессе производства устройств (рис. 1).

Основные преимущества органической электроники в сравнении с традиционной заключаются в меньшей стоимости изготовления устройств, их

гибкости, применении более простых технологий изготовления, а также возможности изготовления изделий большой площади, что особенно актуально для экранов и систем освещения. Вместе с тем на настоящем этапе развития органической электроники она не лишена ряда недостатков: это низкое разрешение при печати (>5 мкм), низкая степень интеграции и низкая подвижность носителей заряда, ограничивающая диапазон рабочих частот. Так, при подвижности носителя заряда  $0,5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  максимальная рабочая частота составит  $100 \text{ кГц}^1$ .

## Дорожная карта органической и печатной электроники

Первые изделия органической печатной электроники — билеты, идентификационные и игровые карточки (рис. 2) — появились на рынке в 2005–2006 г. Анализ, проведенный Ассоциацией органической электроники (ОЕ-А), позволил выделить девять ключевых продуктовых направлений, по которым затем

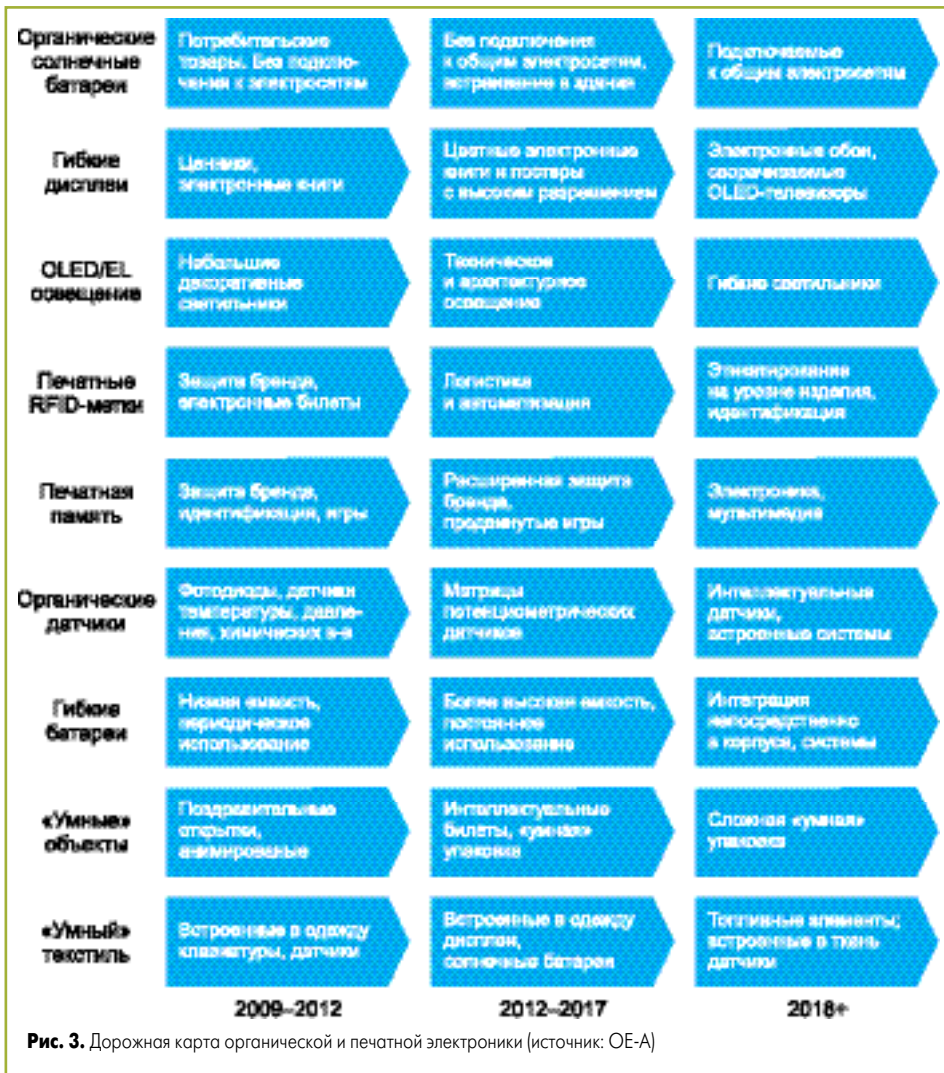
<sup>1</sup> По данным Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН.



Рис. 1. К определению органической и печатной электроники



Рис. 2. Серийно выпускаемые карточки с печатной памятью для интерактивных игр (источник: Menippos)



была подготовлена дорожная карта, представленная на рис. 3. На этом рисунке показано развитие этих направлений в краткосрочной, среднесрочной и долгосрочной перспективе.

Примеры прототипов и серийно выпускаемых изделий органической и печатной электроники можно видеть на рис. 4–8. На рис. 4 изображен прототип «защиты бренда»: на упаковке с таблетками напечатана RFID-метка, позволяющая при поднесении к сканеру определить подлинность таблеток. На рис. 5 показан прототип гибкого органического экрана производства Plastic Logic. Запуск производства на заводе Plastic Logic в Зеленограде запланирован на 2013–2014 г. Это будет второй завод компании, первый открыт в Дрездене в 2008 г. На рис. 6 — серийно выпускаемые гибкие органические солнечные батареи производства компании Konarka, размещенные на тентах. На рис. 7 — сумка с гибкой органической солнечной батареей, которую можно купить в интернет-магазине amazon.de за 149 евро. В сумку встроен литий-ионный аккумулятор, заряжающийся от солнечной батареи. От этого аккумулятора можно подзарядить мобильный телефон или mp3-плеер. На рис. 8 — прототип «индикатора свежести» продукта: пример «умного объекта».

**Оценка рынка**

По данным компании IDTechEx, в 2010 году объем мирового рынка печатной электроники составил \$700 млн. Согласно прогнозам этой же компании мировой рынок органической электроники в 2020 году достигнет \$55 млрд, причем доля напечатанной элек-



**Рис. 4.** Упаковка с таблетками с RFID-меткой (источник: PolyID)



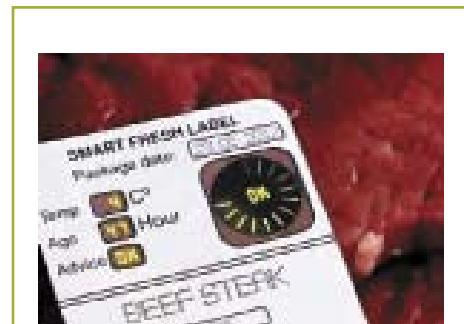
**Рис. 5.** Гибкий органический экран производства Plastic Logic (источник: Plastic Logic, ОАО «РОСНАНО»)



**Рис. 7.** Сумка с гибкой органической солнечной батареей



**Рис. 6.** Гибкие органические солнечные батареи производства компании Konarka (источник: Konarka)



**Рис. 8.** Индикатор свежести продукта (источник: Holst Centre)

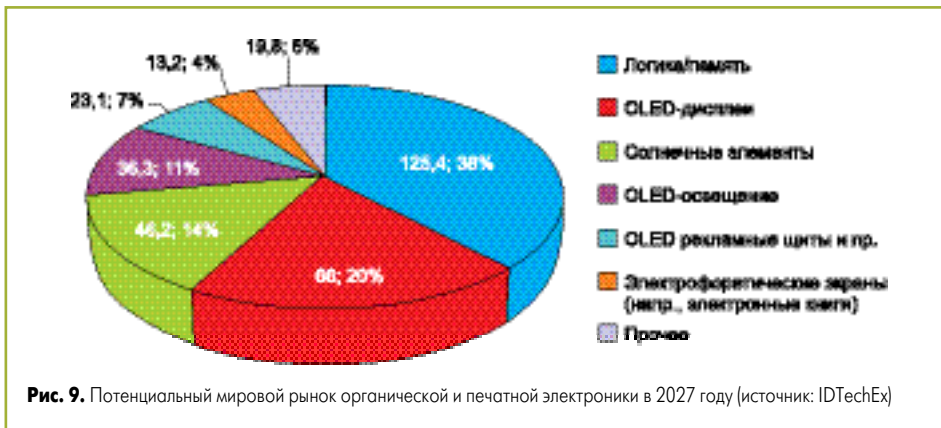


Рис. 9. Потенциальный мировой рынок органической и печатной электроники в 2027 году (источник: IDTechEx)

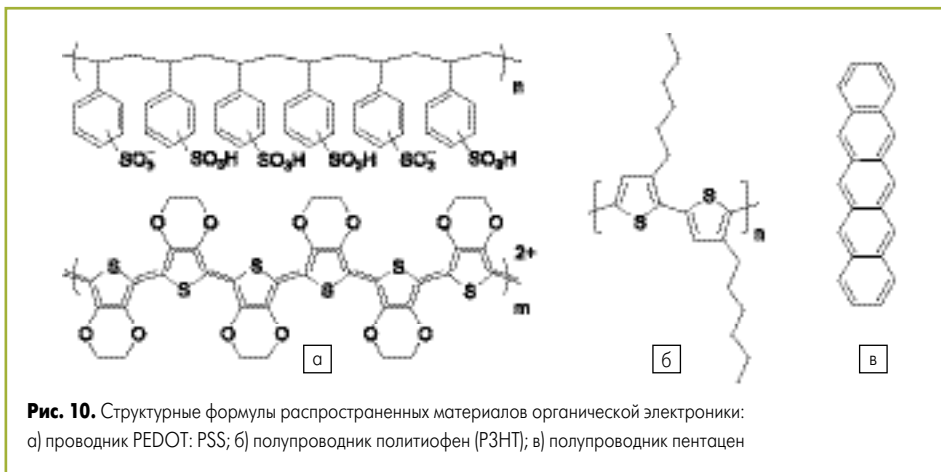


Рис. 10. Структурные формулы распространенных материалов органической электроники: а) проводник PEDOT:PSS; б) полупроводник политиофен (P3HT); в) полупроводник пентацен

троники оценивается в 71% от этой суммы. Сегментация потенциального мирового рынка органической и печатной электроники в 2027 году показана на рис. 9. Суммарный объем рынка может составить \$330 млрд. На диаграмме указаны объемы (в млрд долларов) и доли (%) основных сегментов рынка.

Прогнозируемый объем мирового рынка органической и печатной электроники через полтора десятилетия сопоставим с сегодняшним объемом мирового рынка полупроводников, составившим в 2010 году \$298,3 млрд по данным Ассоциации полупроводниковой индустрии.

### Материалы органической электроники

#### Основания

Как правило, в органической электронике используются гибкие полимерные основания. Однако это создает ряд проблем. Гибкие основания обычно не полностью стабильны по размерам, что может существенно сказаться на разрешении и совмещении при печати рисунка. Кроме того, при воздействии высоких температур гибкие основания могут расплавиться, что ограничивает технологические возможности при производстве изделий органической электроники.

В качестве гибких оснований в органической электронике наиболее широко применяются такие полиэферы, как полиэтилентерефталат (PET) и полиэтиленнафталат (PEN); также могут использоваться полиимид (PI), полипропилен (PP), полилактид (PLA), циклоолефиновый сополимер (COC), бумага и другие материалы.

#### Проводники

Проводники необходимы практически во всех изделиях органической электроники. К проводникам предъявляется ряд требований, включающих низкое сопротивление, гладкость поверхности, химическую стойкость. Выделяют три группы материалов, используемых в органической электронике в качестве проводников:

- материалы на основе металлов;
- органические соединения;
- оксиды металлов.

Материалы на основе металлов, например серебра, наиболее часто наносятся в виде паст, содержащих металлосодержащие частицы. Могут использоваться пасты, содержащие наночастицы, которые после нанесения спекаются при

температурах, выдерживаемых используемыми пластиками (<150 °C), для образования электрически непрерывных структур. Другой подход формирования проводников на основе металлов заключается в печати тонкого «зародышевого» слоя металла, поверх которого затем осаждаются слои металла большей толщины.

Хотя некоторые полимеры могут проводить электричество, их электропроводность более чем в тысячу раз хуже, чем у металлов. В качестве полимерных проводников, наносимых методами печати, в органической электронике используются гетероароматические полимеры на основе анилина, тиафена, пиррола и их производных. Чаще всего в качестве проводящего полимера используется PEDOT:PSS (рис. 10), обладающий высокой проводимостью и высокой прозрачностью для видимого света. Пленки PEDOT:PSS устойчивы к повышенным температурам: после пребывания на воздухе при температуре свыше +100 °C в течение более 1000 часов их проводимость изменяется незначительно.

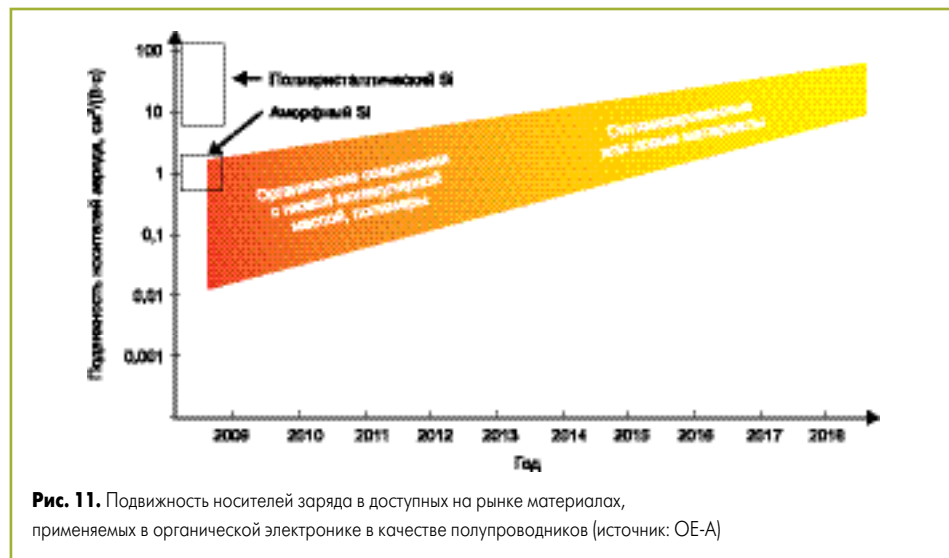
Преимущество проводников из оксидов индия и олова (ITO) состоит в их высокой прозрачности, поэтому они используются в дисплеях, в том числе в сенсорных и солнечных элементах.

#### Полупроводники

Органические полупроводники используются в различных активных устройствах, причем многие из них могут быть нанесены из раствора, в том числе методами печати. В органической электронике в качестве полупроводников могут применяться следующие группы материалов:

- полимеры, например политиофен;
- олигомеры, например олиготиафены;
- органические соединения с низкой молекулярной массой, например пентацен и его производные;
- углеродные нанотрубки;
- «гибридные» (органонеорганические) материалы.

Мобильность носителей заряда в органических полупроводниках сравнима с аморфным кремнием, но пока значительно ниже, чем в поликристаллическом кремнии (рис. 11).





Ожидается, что в ближайшие несколько лет мобильность носителей заряда достигнет уровня поликристаллического кремния: сначала в лабораторных условиях, а потом и в серийно выпускаемых устройствах. Это станет возможным благодаря оптимизации органических соединений с низкой молекулярной массой и полимеров или использованию новых материалов, таких как углеродные нанотрубки или гибридные материалы.

Большинство используемых сейчас органических полупроводников, в частности пентацен и политиофен, относятся к полупроводникам *p*-типа, но полупроводники *n*-типа становятся более распространенными. Наличие полупроводников *p*- и *n*-типа позволяет создавать структуры типа КМОП, обладающие существенными преимуществами, в том числе меньшим энергопотреблением.

**Диэлектрики**

В качестве диэлектриков может использоваться широкий спектр материалов, как органических, так и неорганических. Примером неорганических диэлектриков могут служить оксиды кремния или алюминия, но, как правило, их невозможно нанести методами печати. Органические материалы, применяемые в качестве диэлектриков, включают в себя полипропилен, поливиниловый спирт, поливинилфенол, полиметилметакрилат, полиэтилентерефталат.

**Технологии печати**

Для производства изделий органической электроники может быть использована глубокая, флексографская, офсетная, трафаретная и струйная технологии печати, а также лазерная абляция. Возможная классификация этих технологий представлена на рис. 12, а сравнение показателей приведено на рис. 13 и в таблице.

**Глубокая печать**

Принцип глубокой печати представлен на рис. 14. В формном цилиндре имеются соответствующие элементам рисунка углубления, определяющие объем, форму и местоположение отпечатков наносимого материала. При вращении формного цилиндра эти углубления заполняются наносимым материалом, излишки которого удаляются ракелем так, чтобы наносимый материал оставался только в углублениях цилиндра. После этого материал переносится из углублений цилиндра на гибкое основание.

К преимуществам данной технологии относят высокую производительность и возможность нанесения отпечатков различной толщины на одно основание. Основной недостаток — риск образования неровных краев отпечатков.

**Флексографская печать**

Схематическое изображение процесса флексографской печати приведено на рис. 15. В этой технологии анилоксовый (растровый) вал, представляющий собой цилиндр с углублениями, забирает наносимый материал из резервуара и переносит его на печатающие

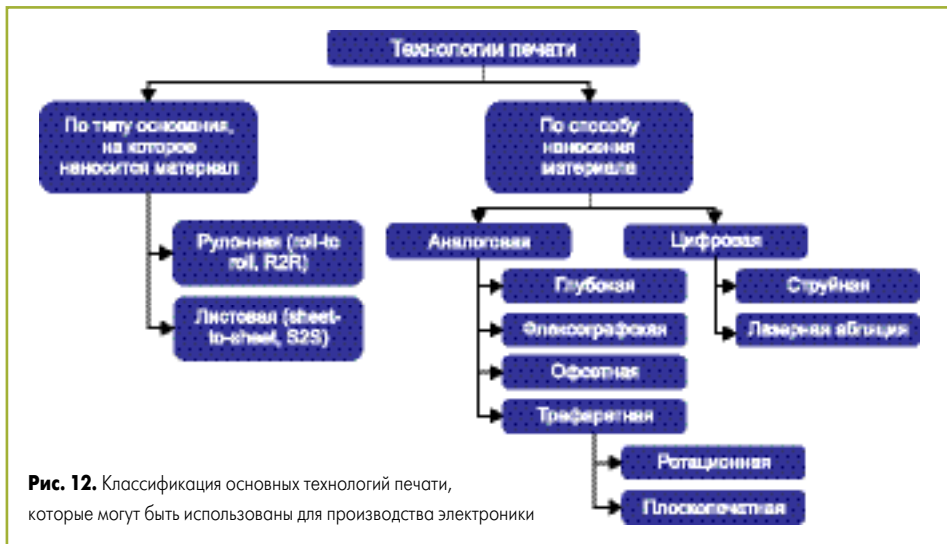


Рис. 12. Классификация основных технологий печати, которые могут быть использованы для производства электроники

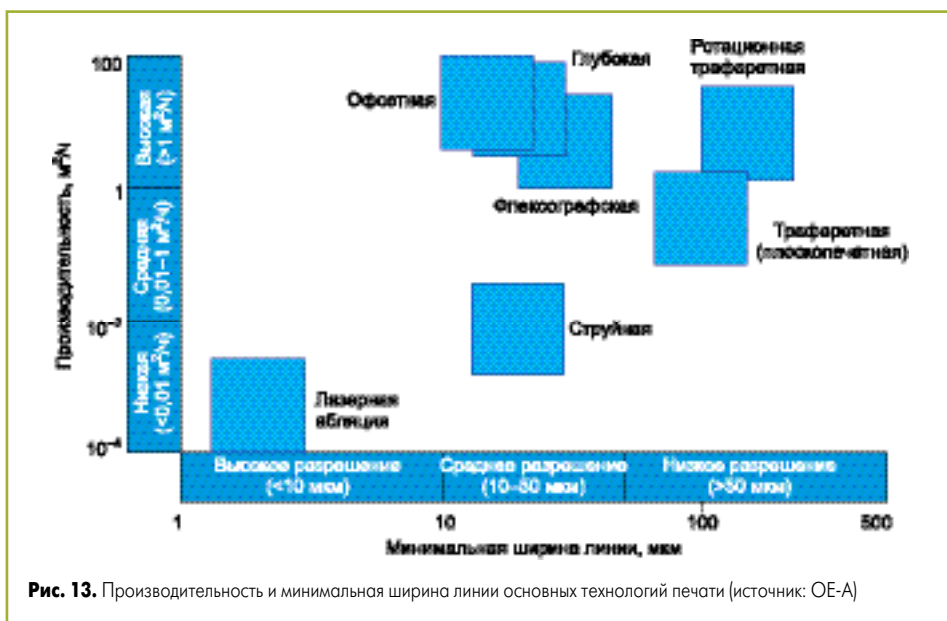


Рис. 13. Производительность и минимальная ширина линии основных технологий печати (источник: OE-A)

Таблица. Сравнение технологий печати (источник: Final vision document in roll-to-roll printed electronics manufacturing equipment, production lines and systems. Deliverable report on EU Seventh Framework Programme project)

Технология печати	Минимальная ширина линии, мкм	Вязкость наносимого материала, Па·с	Толщина слоя наносимого материала, мкм	Скорость печати*, м/с	Стоимость запуска в производство нового изделия
Флексографская	30–80	0,01–0,5	0,04–8	3–10	Низкая
Глубокая	10–50	0,01–0,2	0,02–12	10–16	Высокая
Ротационная трафаретная	50–100	1–700	1–100	2	Высокая (трафарет дешевле, чем формный цилиндр для глубокой печати)
Струйная	10–50	0,001–0,03	0,01–0,5	1–5	Низкая (но высокая стоимость картриджа и печатающих головок)
Офсетная	10–50	1–100	0,5–3	8–15	Низкая

Примечание. \* Указана скорость для печатных изданий. В печатной электронике скорости пока существенно ниже.

элементы печатной формы. Затем наносимый материал переносится на гибкое основание, прокатываемое между упругой печатной формой и жестким печатным цилиндром.

Среди преимуществ данной технологии: высокая производительность нанесения, простота и сравнительно низкая стоимость изготовления печатных форм. Недостатки флексографской печати заключаются в склонности к образованию ореолов вокруг элементов рисунка и ограниченном разрешении.

**Офсетная печать**

В технологии офсетной печати перенос наносимого материала с печатной формы на основание производится не напрямую, а с использованием промежуточного, так называемого «офсетного», цилиндра (рис. 16).

На печатной форме на формном цилиндре имеются два типа участков: одни притягивают краску, но отталкивают воду (гидрофобные), другие наоборот — отталкивают краску, но притягивают воду (гидрофильные). В тра-



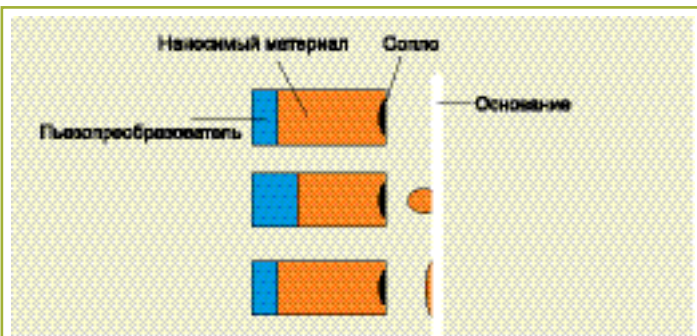


Рис. 19. Струйная печать (источник: OE-A)

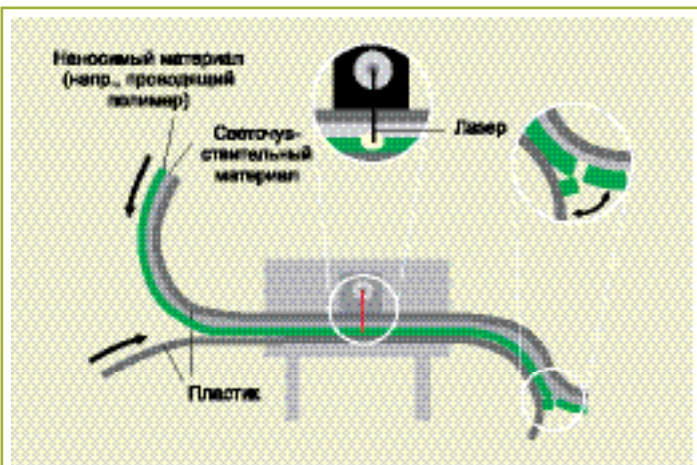


Рис. 20. Лазерная абляция (источник: OE-A)

К преимуществам лазерной абляции следует отнести самое высокое разрешение среди всех перечисленных технологий печати и отсутствие печатных форм. Кроме того, лазерная абляция относится к «сухим» методам. Но есть и недостатки: самая низкая производительность и риск деструкции полимеров при нагреве.

### Заключение

Сегодня серийно выпускаются билеты, идентификационные карточки, солнечные батареи и другие изделия органической и печатной электроники. Конечно, по многим техническим характеристикам эти изделия уступают кремниевым аналогам: КПД солнечных батарей ниже, а объемы органической памяти и частота органического процессора несоизмеримо меньше. Тем не менее уникальные преимущества органической и печатной электроники, заключающиеся в низкой стоимости массового производства, гибкости и возможности изготовления изделий большой площади, а также высокие темпы совершенствования изделий открывают перед ней широкую область применения. Ведь далеко не во всех устройствах нужны гигабайты памяти и гигагерцы частот.

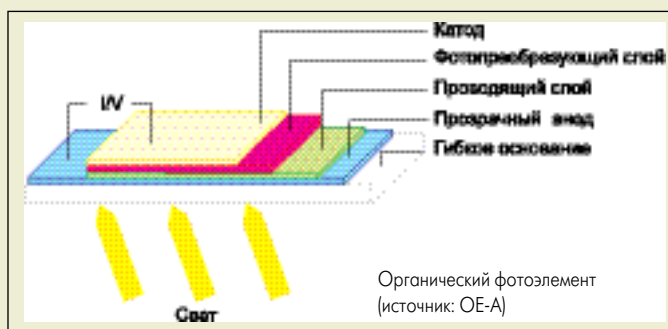
### Из истории органической электроники:

- 1950-е гг. — открыты органические полупроводники.
- 1963 г. — получен полимер со сравнительно высокой проводимостью (1 См/см).
- 1974 г. — изготовлен первый органический электронный компонент.
- 2000 г. — присуждена Нобелевская премия за проводящие полимеры.
- 2004 г. — основана Ассоциация органической электроники.
- 2005–2006 г. — на рынке появились первые изделия органической и печатной электроники (в том числе билеты).
- 2011 г. — изготовлен первый в мире органический процессор, состоящий из 4000 органических транзисторов и работающий на частоте 6 Гц.

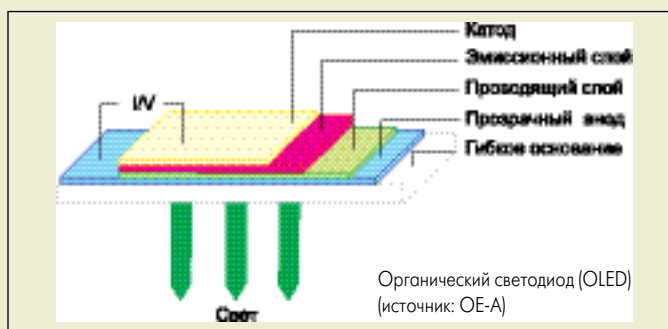
### Элементная база органической электроники



Органический полевой транзистор (источник: OE-A)



Органический фотоэлемент (источник: OE-A)



Органический светодиод (OLED) (источник: OE-A)