



ОРГАНИЧЕСКАЯ И ПЕЧАТНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА – НОВАЯ ВЕТВЬ РАЗВИТИЯ

Нисан Антон

edu@ostec-group.ru

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, продемонстрированы примеры материалов, применяемых в качестве оснований, проводников, полупроводников и диэлектриков.

1 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).



Рис. 1 К определению органической и печатной электроники

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: низкого разрешения при печати (>5 мкм), низкой степени интеграции, низкой подвижности носителей заряда, ограничивающей диапазон рабочих частот. Так, при подвижности носителя заряда $0,5 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ максимальная рабочая частота составит 100 кГц^1 .

2 ДОРОЖНАЯ КАРТА ОРГАНИЧЕСКОЙ И ПЕЧАТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ



Рис. 2 Серийно выпускаемые карточки с печатной памятью для интерактивных игр. Источник: Menippos

¹ По данным Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН



Рис. 3 Дорожная карта органической и печатной электроники. Источник: OE-A



Рис. 4 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. Источник: Plastic Logic, ОАО «РОСНАНО»



Рис. 5 Прототип «защиты бренда»: на упаковке с таблетками напечатана RFID-метка, позволяющая при поднесении к сканеру определить подлинность таблеток. Источник: PolyIC

Первые изделия органической печатной электроники: билеты, идентификационные и игровые карточки (рис. 2) появились на рынке в 2005-2006 гг. Анализ, проведенный Ассоциацией органической электроники (OE-A), позволил выделить девять ключевых продуктовых направлений, по которым затем была подготовлена дорожная карта, представленная на рис. 3. На рисунке проиллюстрировано развитие этих направлений в краткосрочной, среднесрочной и долгосрочной перспективе. Примеры прототипов и серийно выпускаемых изделий органической и печатной электроники показаны на рис. 4-8.



Рис. 6 Серийно выпускаемые гибкие органические солнечные батареи производства компании Koparka, размещенные на тентах. Источник: Koparka



Рис. 7 Сумка с гибкой органической солнечной батареей, которую можно купить в интернет-магазине amazon.de за 149 евро. В сумку встроены литий-ионный аккумулятор, заряжающийся от солнечной батареи. От этого аккумулятора можно подзарядить мобильный телефон или mp3-плеер



Рис. 8 Прототип «индикатора свежести» продукта – пример «умного объекта». Источник: Holst Centre

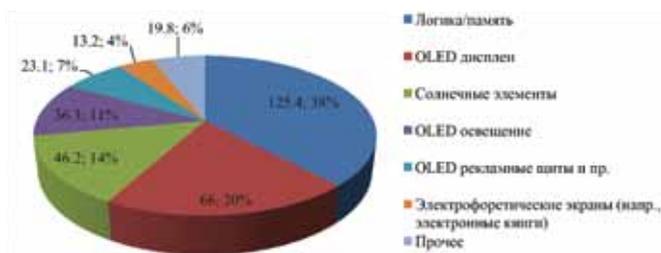


Рис. 9 Потенциальный мировой рынок органической и печатной электроники в 2027 г. Суммарный объем рынка может составить 330 млрд. долларов в США. На диаграмме указаны объемы (в млрд. долларов) и доли (%) основных сегментов рынка. Источник: IDTechEx

3 ОЦЕНКА РЫНКА

По данным компании IDTechEx в 2010 году объем мирового рынка печатной электроники составил 700 млн. долларов США. Согласно прогнозам этой же компании, мировой рынок органической электроники в 2020 году составит 55 млрд. долларов, причем доля напечатанной электроники оценивается в 71% от этой суммы. Сегментация потенциального мирового рынка органической и печатной электроники в 2027 году показана на рис. 9.

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. долларов по данным Ассоциации полупроводниковой индустрии.

4 МАТЕРИАЛЫ ОРГАНИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

4.1 Основания

Как правило, в органической электронике используются гибкие полимерные основания. Однако их использование 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 полиэфиры, как полиэтилентерефталат (PET) и полиэтиленнафталат (PEN); также могут использоваться полиимид (PI), полипропилен (PP), полилактид (PLA), циклоолефиновый сополимер (COC), бумага и другие материалы.

4.2 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 металлические частицы. Могут использоваться пасты, содержащие наночастицы, которые после нанесения спекаются при температурах, выдерживаемых используе-

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 гг. – первые изделия органической и печатной электроники (в том числе, билеты) появились на рынке
- 2011 г. – изготовлен первый в мире органический процессор, состоящий из 4000 органических транзисторов и работающий на частоте 6 Гц

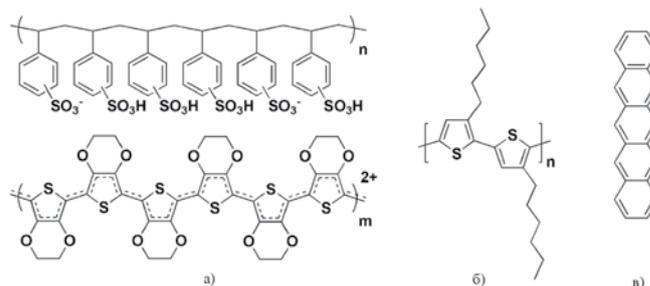


Рис. 10 Структурные формулы распространенных материалов органической электроники: а) проводник PEDOT:PSS б) полупроводник политиофен (P3HT), в) полупроводник пентацен

мыми 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, тиофена, пиррола и их производных. Чаще всего в качестве проводящего полимера используется PEDOT:PSS (рис. 10), обладающий высокой проводимостью, высокой прозрачностью для видимого света. Пленки PEDOT:PSS устойчивы к повышенным температурам: после пребывания на воздухе при температуре более 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 сенсорных, и солнечных элементах.

4.3 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, олиготиофены;
- 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,

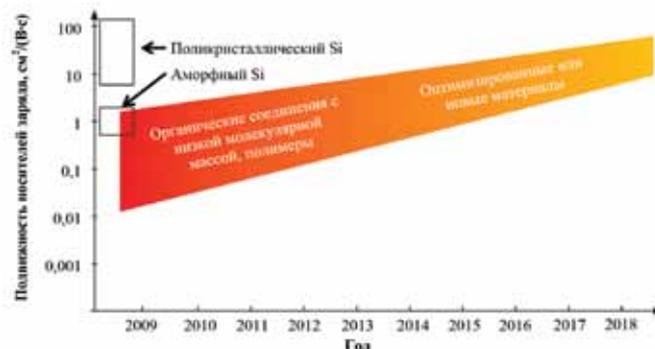


Рис. 11 Подвижность носителей заряда в доступных на рынке материалах, применяемых в органической электронике в качестве полупроводников. Источник: OE-A

таких как углеродные нанотрубки или гибридные материалы. Большинство используемых сейчас органических полупроводников, в частности, пентацен и политиофен, относятся к полупроводникам р-типа, но полупроводники n-типа становятся более распространенными. Наличие полупроводников р- и n-типа позволяет реализовывать структуры типа КМОП, обладающие существенными преимуществами, в том числе меньшим энергопотреблением.

4.4 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.

5 ТЕХНОЛОГИИ ПЕЧАТИ



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

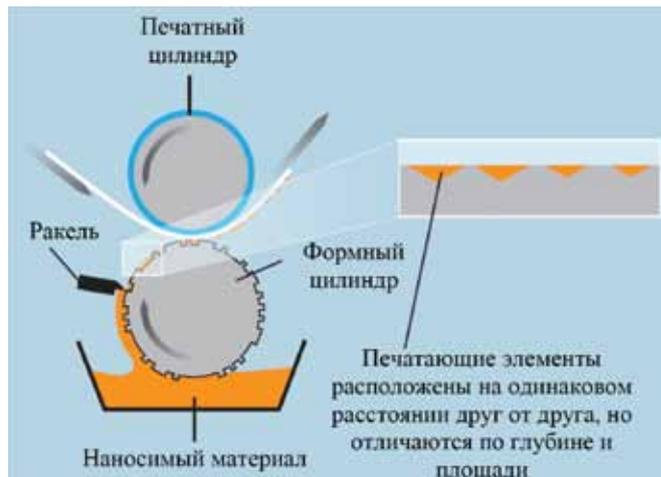


Рис. 14 Глубокая печать. Источник: OE-A



Рис. 15 Схематическое изображение процесса флексографской печати. Источник: OE-A

Для производства изделий органической электроники может быть использована глубокая, флексографская, офсетная, трафаретная и струйная технологии печати, а также лазерная абляция. Возможная классификация данных технологий представлена на рис. 12, сравнение показателей этих технологий приведено на рис. 13 и в таблице 1.

5.1 Глубокая печать

Принцип глубокой печати проиллюстрирован 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 углубле-

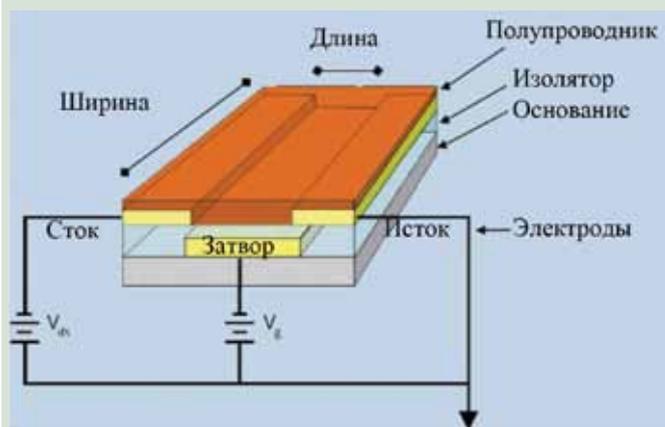
Таблица 1 Сравнение технологий печати. Источник: Final vision document in roll-to-roll printed electronics manufacturing equipment, production lines and systems. Deliverable report on EU Seventh Framework Programme project

Технология печати	Минимальная ширина линии, мкм	Вязкость наносимого материала, Па·с	Толщина слоя наносимого материала, мкм	Скорость печати ² , 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

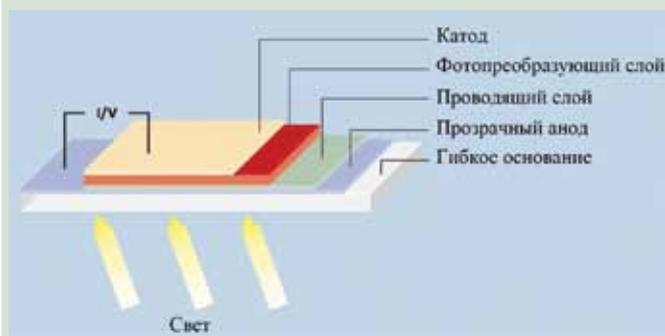
² Указана скорость для печатных изданий. В печатной электронике скорости пока существенно ниже



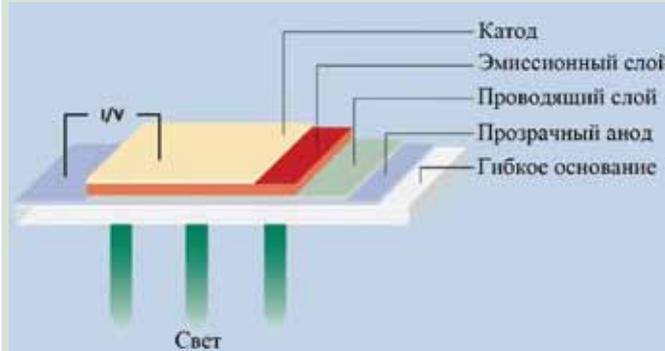
Элементная база органической электроники



Органический полевой транзистор. Источник: OE-A



Органический фотоэлемент. Источник: OE-A



Органический светодиод (OLED). Источник: OE-A

ниях 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.

5.2 Флексографская печать

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

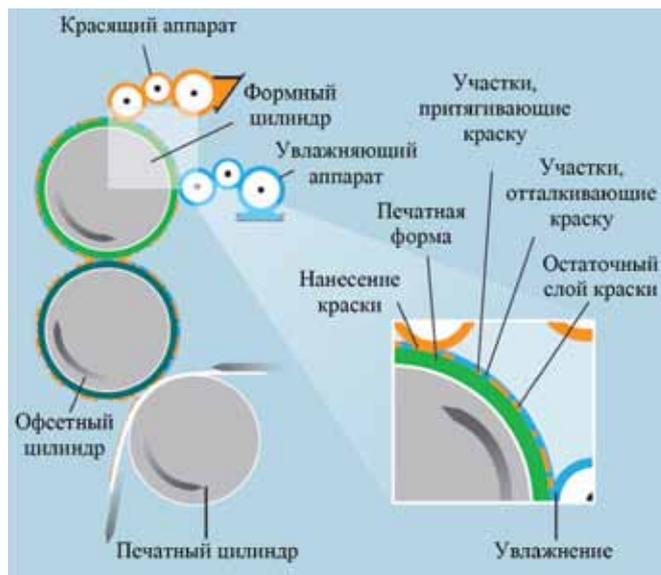


Рис. 16 Офсетная печать. Источник: OE-A

5.3 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 традиционной технологии офсетной печати для создания этих участков на форму, представляющую собой металлическую пластину, покрытую светочувствительным слоем, наносят изображение, экспонируют и проявляют. После этого засвеченные участки формы начинают притягивать воду, но отталкивать маслянистый материал, в частности, краску, незасвеченные – наоборот. В цифровых офсетных машинах очищенный формный цилиндр заряжается до определенного потенциала, например, до -800 В. После этого участки формного цилиндра, образующие изображение, засвечиваются лазером и разряжаются, например, до потенциала -100 В.

В процессе печати на вращающийся формный цилиндр из увлажняющего аппарата наносится тонкий слой водного раствора, смачивающего гидрофильные участки, из красящего аппарата – слой краски, смачивающей гидрофобные участки. После этого слой краски переносится на офсетный цилиндр, а затем на гибкое основание. Основные преимущества офсетной печати включают в себя очень широкую распространенность, высокое разрешение, четкие края и высокую производительность. В то же время недостатком этой

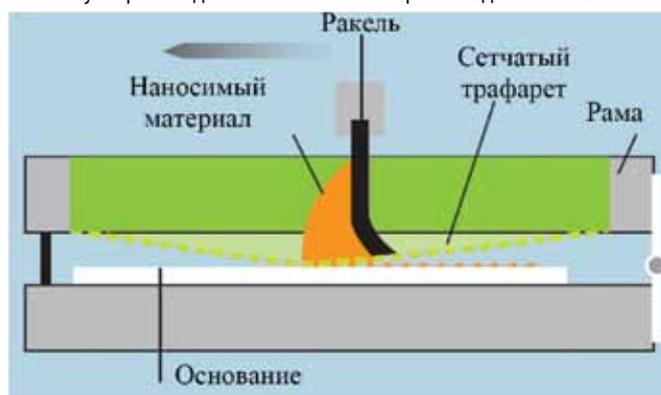


Рис. 17 Плоскопечатная трафаретная печать. Источник: OE-A

технологии является необходимость обеспечения соответствующих реологических свойств наносимых материалов.

5.4 Трафаретная печать

В плоскочетных установках трафаретной печати наносимый материал продавливается ракелем через сетчатый трафарет на основание (рис. 17). Однако производительность такого процесса сравнительно невелика. Установки ротационной трафаретной печати, в которых трафарет расположен на печатном цилиндре, а наносимый материал – внутри печатного цилиндра (рис. 18), лишены этого недостатка.

Преимуществом трафаретной печати является очень широкий диапазон толщины отпечатков, а недостаток заключается в достаточно низком разрешении.

5.5 Струйная печать

Струйная печать – цифровая технология печати, в которой капли малого объема материала наносятся непосредственно из сопел печатающей головки на основание (рис. 19).

Среди преимуществ струйной печати выделяют отсутствие печатных форм и отсутствие контакта с основанием при нанесении. Недостатки данной технологии заключаются в низкой производительности, риске засорения сопел, растекании нанесенной капли материала, что приводит к снижению разрешения печати.

5.6 Лазерная абляция

В данной технологии нанесения материала лазерный луч фокусируется на тонком слое светочувствительного материала в местах, в которых требуется перенести материал с «донорной» пленки на основание (рис. 20). Под действием нагрева светочувствительный материал переходит в газообразное состояние и выдавливает наносимый материал на основание.

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. Можно выделить следующие недостатки данной технологии: самую низкую производительность и риск деструкции полимеров при нагреве.

6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день очень успешно 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! ■■

За дополнительной информацией по органической и печатной электронике и по другим передовым технологиям в электронике вы можете обращаться к сотрудникам Направления развития образования и прикладных исследований ЗАО Предприятие Остек по тел. (495) 788-44-44 или по электронной почте edu@ostec-group.ru. В нашем демозале вы также можете ознакомиться с образцами изделий, произведенных по технологиям органической и печатной электроники.

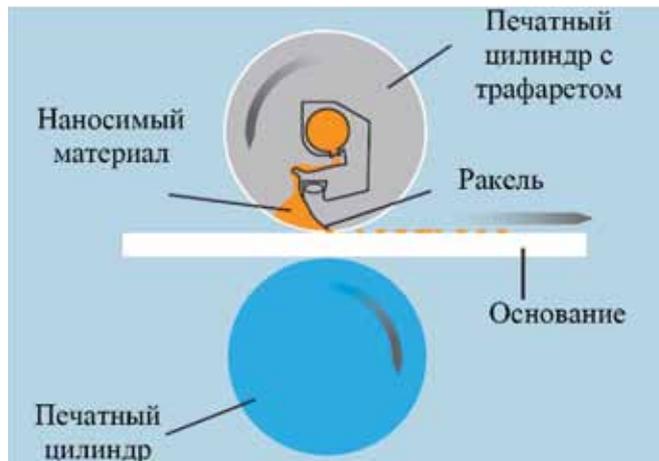


Рис. 18 Ротационная трафаретная печать. Источник: OE-A

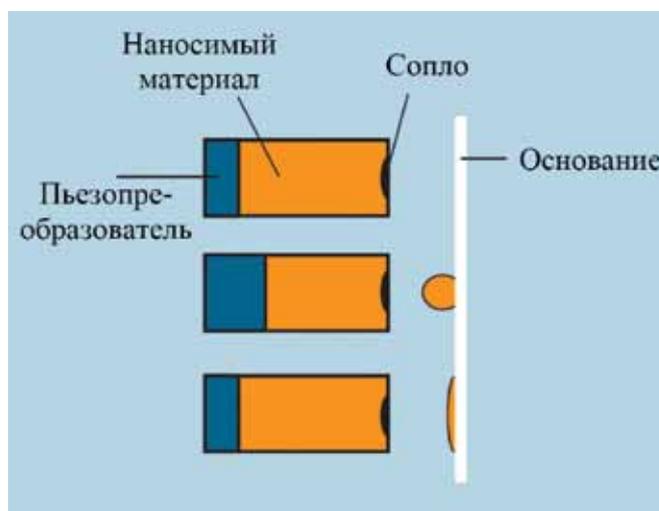


Рис. 19 Струйная печать. Источник: OE-A

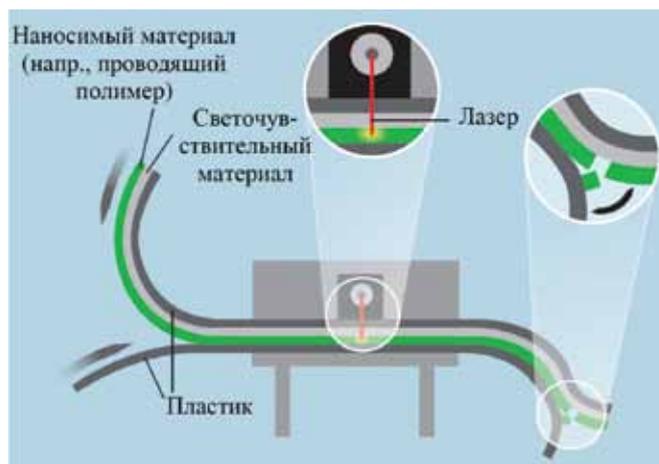


Рис. 20 Лазерная абляция. Источник: OE-A