

ГИБКИЕ ПЕЧАТНЫЕ ЭКРАНЫ РАЗНОВИДНОСТИ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА

А.Нисан edu@ostec-group.ru

Неотъемлемой частью нашей жизни стали экраны, отображающие различную информацию. Большинство массово производящихся сегодня экранов имеют хорошие характеристики, однако они не обладают высокой механической прочностью. Современные технологии позволяют изготавливать гибкие печатные экраны, которые будут лишены этого недостатка.

Объем информации, обрушивающейся в современном мире на человека, огромен, и в будущем он, несомненно, будет расти. Существенная часть информации поступает к нам с многочисленных экранов телевизоров, мониторов, ноутбуков, планшетных компьютеров, коммуникаторов, электронных книг и т.п. Многие из этих устройств мы носим с собой, и поэтому экраны на стеклянных подложках требуют аккуратного обращения. Решить проблему хрупкости экранов можно, сделав их

гибкими или даже сворачиваемыми (рис.1, 2). Кроме этого, максимальное использование методов печати в производстве экранов на гибких подложках позволит наиболее полно раскрыть преимущества органической и печатной электроники.

Гибкий экран состоит из двух частей (или "слоев", рис.3): формирующей изображение (frontplane) и управляющей (backplane). По принципу работы формирующая изображение часть может быть двух типов: отражающей свет, как обычная бумага, и излучающей его. К первому

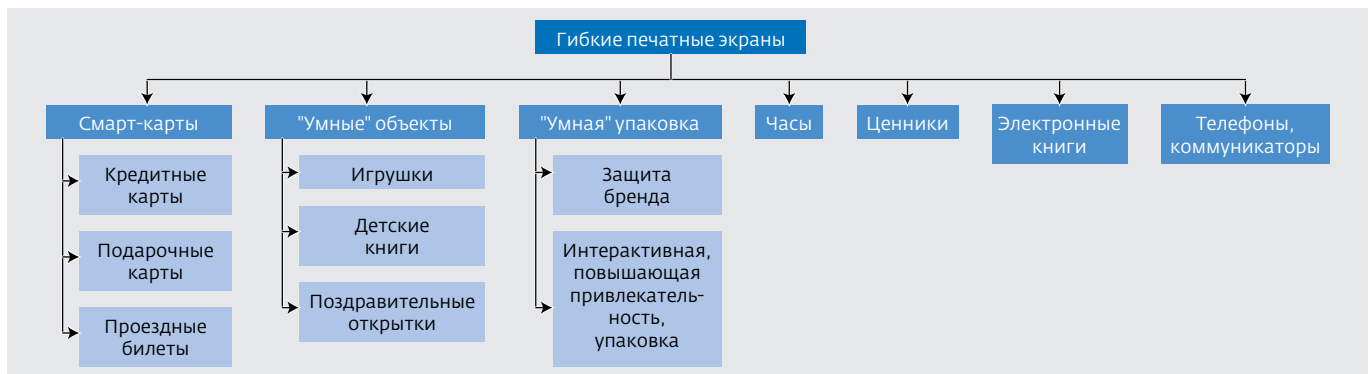


Рис.1. Области применения гибких печатных экранов [1]

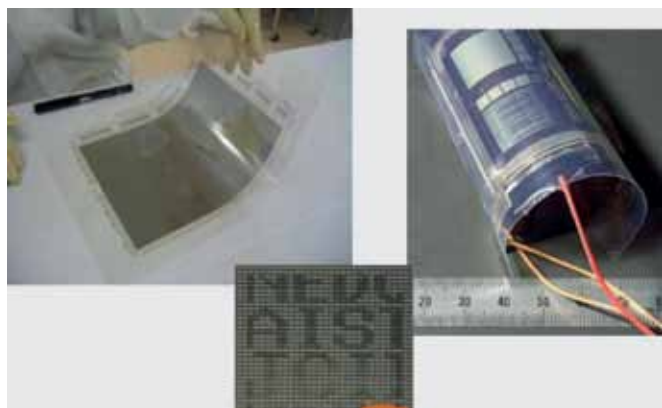


Рис.2. Гибкий, полностью напечатанный экран с разрешением 200 пиксел/дюйм и диаметром в свернутом виде 34 мм [1]

типу можно отнести электрофоретические и электрохромные экраны, ко второму – экраны на органических светодиодах (OLED) и электролюминесцентные (EL). Огромное преимущество экранов, отражающих свет, – в снижении нагрузки на глаза (человеку привычней воспринимать информацию в отраженном свете) и в низком энергопотреблении (энергия расходуется только при смене изображения на экране).

В качестве управляющей части в простых сегментных экранах используются отдельные электроды на гибком основании, соответствующие по размерам сегментам экрана (рис.4), а в сложных пиксельных – управляющие транзисторные матрицы (рис.5).

Далее подробно рассмотрим принципы работы и технологии производства структур,

формирующих изображение в электрофоретических, электрохромных и OLED-экранах, а также управляющие матрицы из органических печатных транзисторов.

ЭЛЕКТРОФОРЕТИЧЕСКИЕ ЭКРАНЫ

Сегодня, пожалуй, наиболее широко распространены электрофоретические экраны, разработанные компанией E-Ink (применяются, например, в электронных книгах различных производителей). Формирующая изображение структура таких экранов состоит из микрокапсул диаметром с человеческий волос, заполненных прозрачной жидкостью, содержащей положительно заряженные белые частицы и отрицательно заряженные черные частицы (рис.6). Микрокапсулы располагаются между двумя электродами, один из которых (верхний) – прозрачный. Если к нижнему электроду прилагается положительный (относительно верхнего электрода) потенциал, пиксел приобретает белый цвет, если отрицательный, – то черный. И хотя подавляющее большинство таких экранов изготавливается на стеклянных подложках, существует возможность их печати и на гибких пластиковых основаниях.

Компания SiPix разработала электрофоретические экраны с несколько иным принципом работы. В этих экранах белые, положительно заряженные частицы под действием электрического поля перемещаются в диэлектрической жидкости, заполняющей микроячейки в пластиковом основании (рис.7). При подаче на непрозрачный проводник положительного напряжения пиксел приобретает белый цвет, а

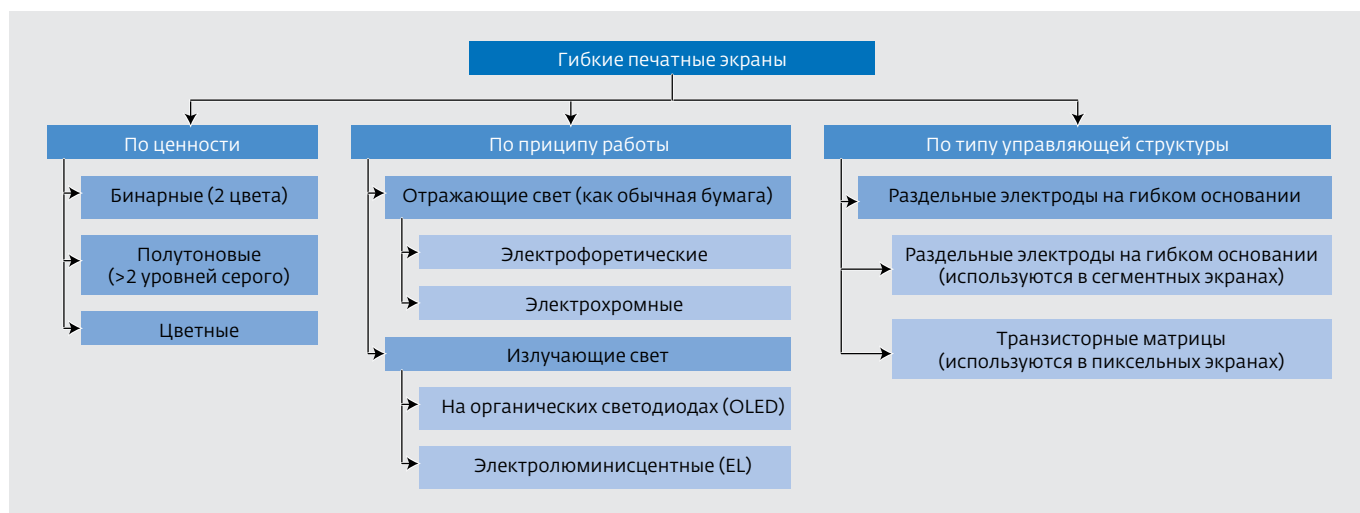


Рис.3. Классификация гибких печатных экранов

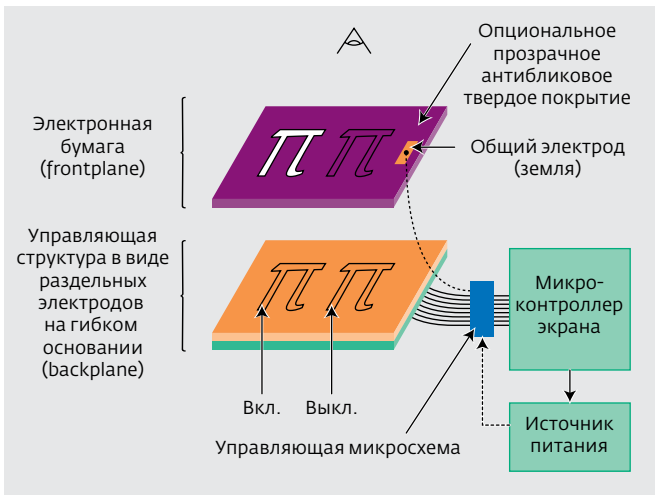


Рис.4. Схематичное изображение конструкции сегментного экрана [2]

при подаче отрицательного – цвет диэлектрической жидкости. Компанией SiPix выпускаются диэлектрические жидкости пяти цветов: черного, красного, зеленого, синего и золотистого, причем на одном основании возможно размещение нескольких цветовых областей.

Была также разработана рулонная технология производства таких экранов (рис.8). Лента из полиэтилентерефталата (PET) с прозрачным проводящим слоем, например оксида индия, легированного оловом (ITO), подается в устройство нанесения покрытий, в котором по поверхности ленты равномерно распределяется слой смолы. После этого в смоле микроштампом создается необходимый

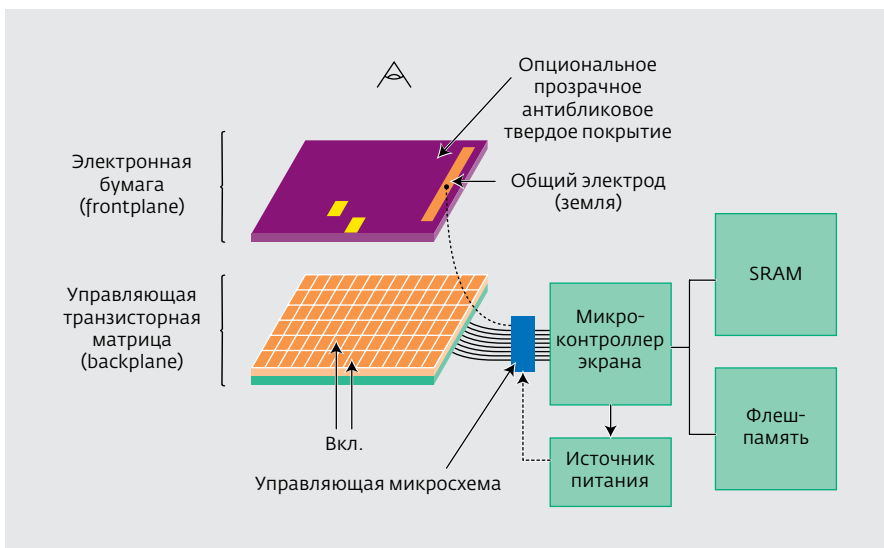


Рис.5. Схематичное изображение конструкции пиксельного экрана [2]

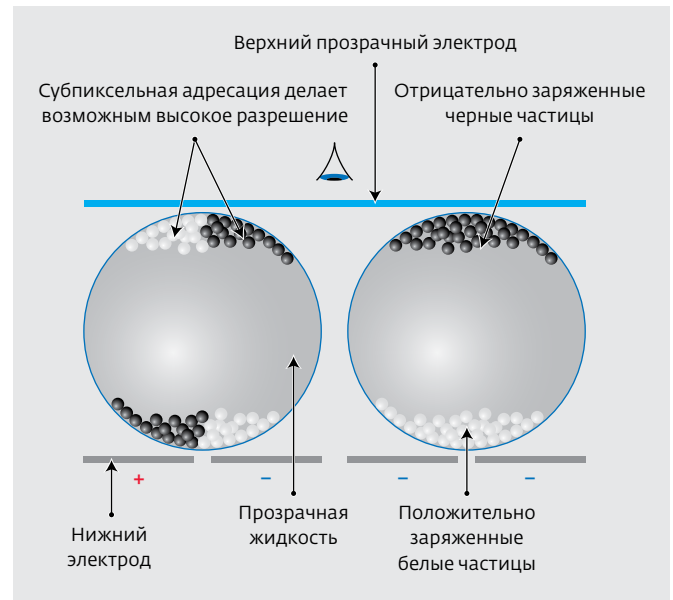


Рис.6. Схема экрана E-Ink [3]

рельеф – формируются микроячейки (рис.9), которые заполняются диэлектрической жидкостью с положительно заряженными частицами и герметизируются. На следующей операции производится ламинирование защитной пленки (она удаляется перед монтажом на управляющую матрицу) и резка ленты.

ЭЛЕКТРОХРОМНЫЕ ЭКРАНЫ

Электрохромные экраны состоят из нескольких последовательно напечатанных на основании из полиэтилентерефталата пористых слоев с прозрачными электродами из оксида индия, легированного оловом (рис.10). Активным веществом, формирующим изображение, в этих экранах является виологен – производное соединение 4,4'-дипиридила. При подаче на прозрачный электрод отрицательного (относительно проводящего углеродного слоя) потенциала виологен, абсорбированный слоем TiO_2 , восстанавливается, приобретая темно-синий цвет. При подаче обратного напряжения виологен окисляется и становится прозрачным. Белый светоотражающий слой предназначен для повышения контрастности, а также

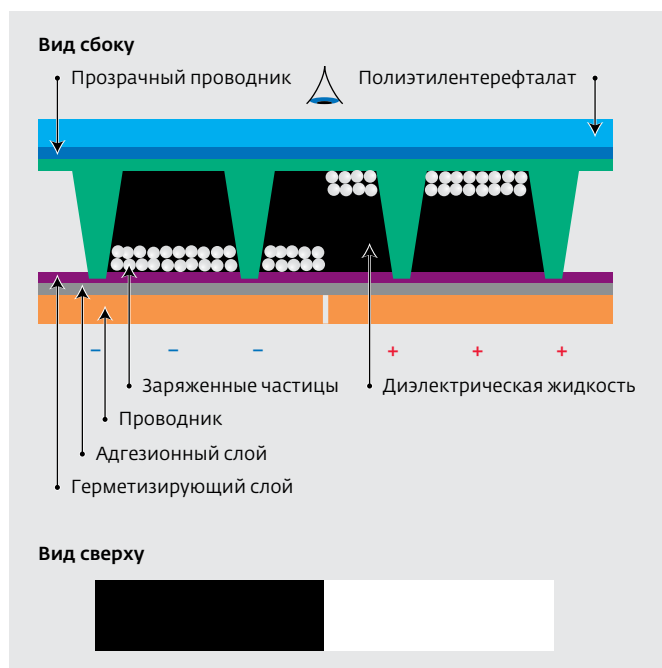


Рис.7. Принцип работы электрофоретических экранов [2]

для электрической изоляции слоя TiO_2 от слоя оксидов сурьмы и олова (АТО). Слой оксидов сурьмы и олова имеет высокую емкость и служит для уравнивания зарядов в TiO_2 для сохранения нейтрального заряда всего устройства. Проводящий углеродный слой играет роль второго электрода. Как и для электрофоретических экранов, энергия (напряжение питания – порядка 1В) необходима только для смены изображения, однако если изображение не обновлять, оно в течение нескольких часов постепенно исчезнет.

Сегодня на рынке можно найти наборы материалов для трафаретной, флексографской и струйной печати слоев сегментных экранов.

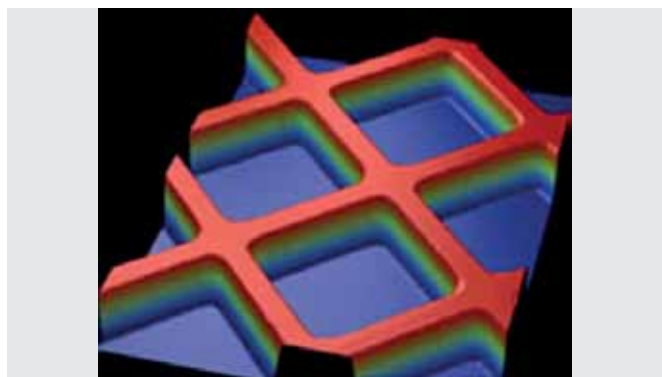


Рис.9. Модель микроячеек. Типовой объем микроячеек 10–1000 пл [2]

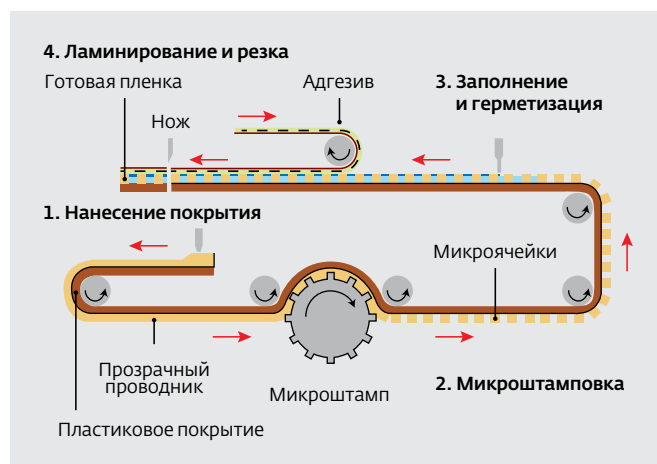
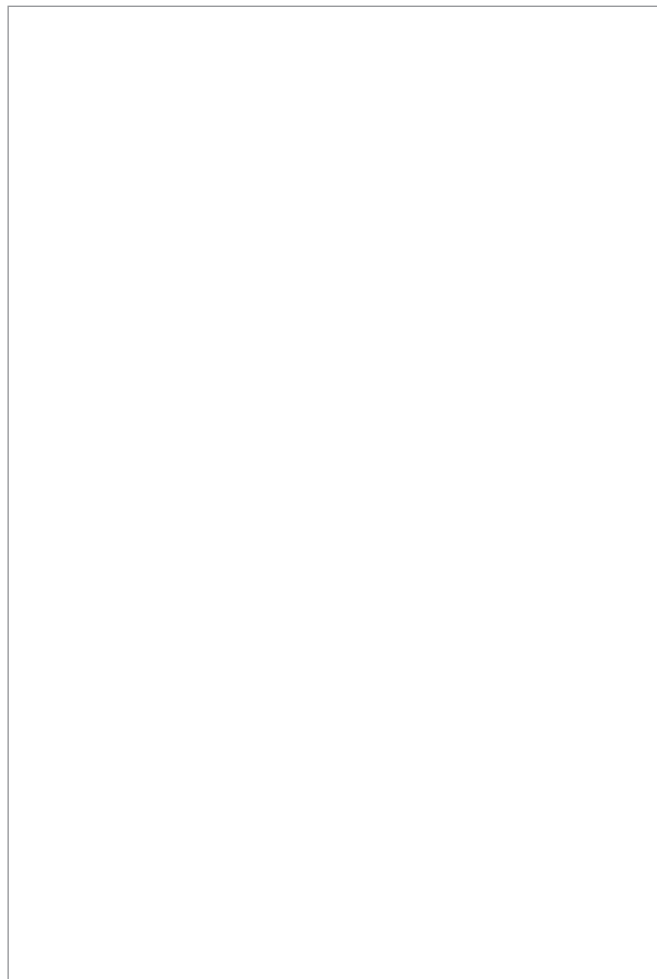


Рис.8. Рулонная технология производства электрофоретических экранов

В предлагаемой компанией SiPix технологии на основе из полиэтилентерефталата с формирующим пиксели слоем ITO трафаретной, флексографской или струйной печатью наносятся слои экрана (рис.10). После проводящего углеродного



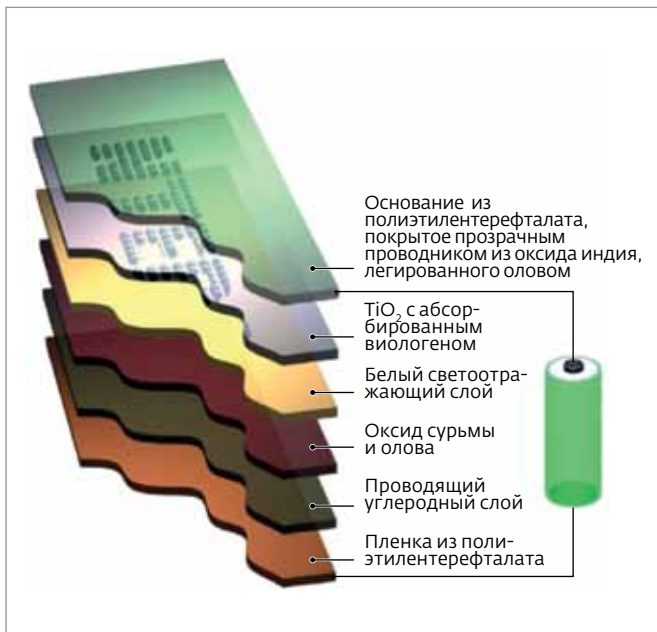


Рис.10. Структура гибкого печатного электрохромного экрана [4]

Слой наносится не показанный на рисунке жидкий или гелеобразный электролит и ламинируется пленка из полиэтилентерефталата. При этом суммарная толщина печатаемых слоев равна примерно 25 мкм.

Компанией GSI Technologies разработаны и изготовлены кредитные карты с печатными экранами для отображения одноразовых паролей (рис.11-13). Экранный модуль напечатан на гибкой плате из полиэфирной пленки толщиной 75 мкм. Ширина проводников и зазоров на гибкой плате - 100 мкм, сквозные отверстия выполнялись лазером, материал финишного покрытия контактных площадок - Ni/Au. Сам

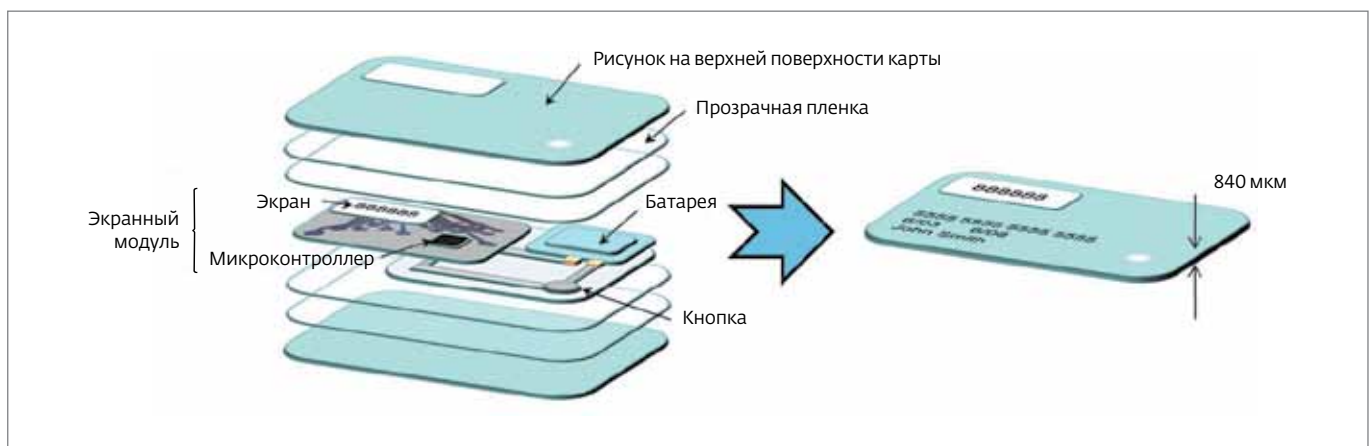


Рис.11. Устройство кредитной карты со встроенным гибким печатным экраном для отображения одноразовых паролей [5]

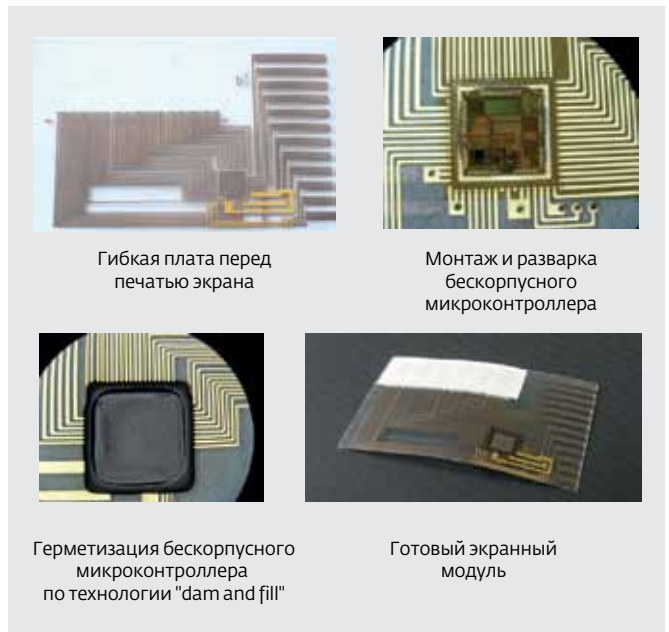


Рис.12. Основные этапы производства экранного модуля [5]

экран, отображающий шесть семисегментных цифровых символов, состоит из девяти слоев, последовательно нанесенных трафаретной печатью, причем рассовмещение слоев лежало в пределах 25 мкм, а суммарная толщина не превышала 60 мкм. На следующем этапе производился монтаж, разварка проволочных выводов и герметизация бескорпусного микроконтроллера. Герметизация выполнялась по технологии dam and fill: вокруг кристалла формировался барьер, после чего пространство внутри него заполнялось герметизирующим материалом. Суммарная толщина кристалла и герметизирующего слоя составила 450 мкм.



Рис.13. Кредитная карта со встроенным гибким печатным экраном для отображения одноразовых паролей [5]

OLED-ЭКРАНЫ

В этих экранах электролюминесцентный (светоизлучающий) полимер располагается между двумя электродами, один из которых прозрачен. Носители заряда инжектируются в электролюминесцентный полимер: со стороны катода – электроны, со стороны анода – дырки. В этом полимере происходит рекомбинация электронов

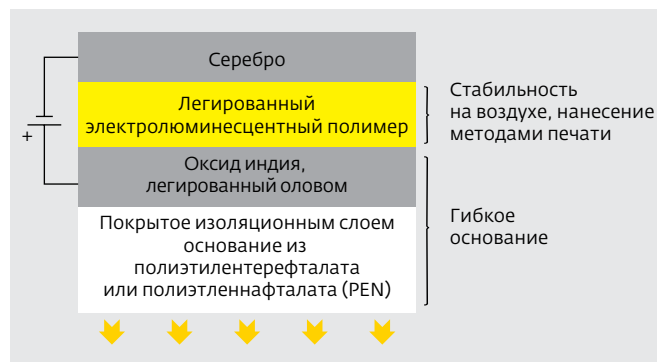


Рис.14. Структура гибкого печатного OLED-экрана [6]

с дырками, в результате которой избыток энергии может выделиться в виде излучения, длина его волны зависит от состава полимера. Полученное излучение проходит через прозрачный анод.

Компания Add-Vision разработала технологию изготовления гибких сегментных, полностью печатных экранов на органических светодиодах – P-OLED или AP-OLED (рис.14-15). На гибком основании из полиэтилентерефталата или

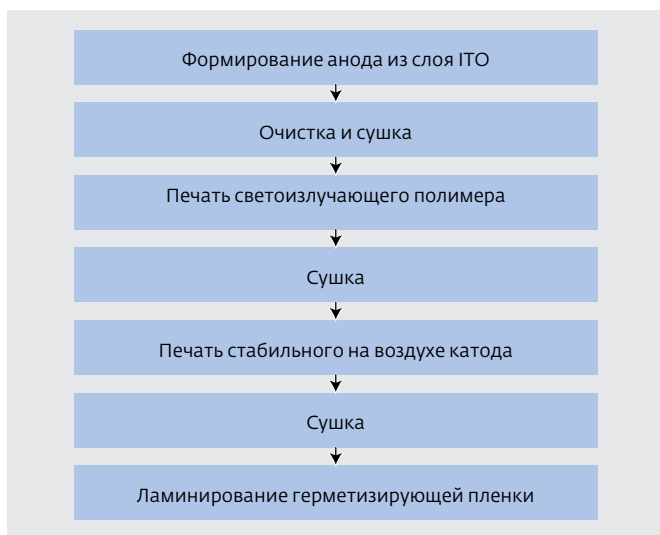


Рис.15. Схема процесса производства гибкого печатного OLED-экрана [7]

полиэтиленнафталата, покрытом слоем ITO, формируется анод: ITO стравливается с тех участков основания, на которых не требуется наличие анода, производится очистка поверхности и сушка. Затем на аноды методом глубокой печати наносится светоизлучающий полимер. После его сушки методом трафаретной печати наносится и сушится катодный слой. На завершающем этапе экран герметизируется пленкой.

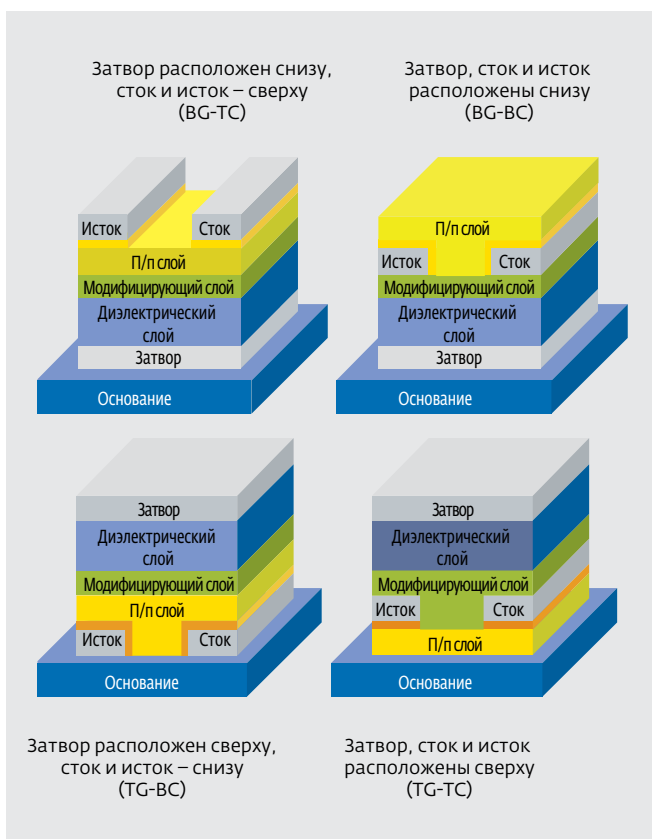


Рис.16. Варианты структуры управляющего органического печатного транзистора [8]

Таблица 1. Сравнение применимости технологий для нанесения затворного слоя и слоя сток/исток

Технология нанесения	Диапазон вязкости	Толщина слоя	Разрешение	Совмещение	Производительность	Примечания
Глубокая печать	Широкий	Малая	Среднее	Высокое	Высокая	–
Трафаретная печать	Широкий	Большая	Низкое	Низкое	Низкая	–
Струйная печать	Широкий	Малая	Высокое	Высокое	Очень низкая	–
Офсетная печать	Широкий	Малая	Высокое	Высокое	Высокая	–
Флексографская печать	Широкий	Средняя	Высокое	Низкое	Высокая	–
Ламинирование	Технология неприменима	–	–	–	–	–
Напыление	–	Очень малая	Очень высокое	Очень высокое	Низкая	Проводится в вакууме
"Мягкая" литография	–	Очень малая	Очень высокое	Очень высокое	Низкая	Проводится в вакууме

Таблица 2. Сравнение применимости технологий для нанесения диэлектрического, модифицирующего, полупроводникового и герметизирующего слоев

Технология нанесения	Диапазон вязкости	Толщина слоя	Производительность	Примечания	Производительность	Примечания
Глубокая печать	Широкий	Очень малая	Высокая	Потенциальные проблемы с переносом материала	Высокая	–
Трафаретная печать	Широкий	Большая	Низкая	–	Низкая	–
Струйная печать	Широкий	Малая	Очень низкая	–	Очень низкая	–
Офсетная печать	Широкий	Средняя	Высокая	–	Высокая	–
Флексографская печать	Широкий	Малая	Высокая	Низкая стойкость печатной формы к растворителям	Высокая	–
Ламинирование	–	Большая	Высокая	–	–	–
Напыление	–	Очень малая	Низкая	–	Низкая	Проводится в вакууме
"Мягкая" литография	–	Очень малая	Низкая	Больше подходит для формирования рисунка	Низкая	Проводится в вакууме

УПРАВЛЯЮЩАЯ МАТРИЦА ИЗ ПЕЧАТНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Печатные органические транзисторы (OTFT) могут иметь различную структуру (рис.16). Представленные варианты OTFT отличаются от обычных двумя особенностями:

- наличием модифицирующего слоя (на рис.16 отмечен зеленым цветом), предназначенного для оптимизации химических и электрических свойства поверхностного слоя диэлектрика. Этот слой обеспечивает соответствующие электрические свойства на границе между диэлектриком и полупроводником и улучшает управляемость процесса нанесения полупроводникового слоя;
- наличием дополнительного легированного слоя n- или p-типа (на рис.16 отмечен оранжевым цветом) между контактами сток-исток

и полупроводниковым слоем, что позволяет использовать полупроводники без преимущественной электронной или дырочной проводимости вместо полупроводников n- и p-типа.

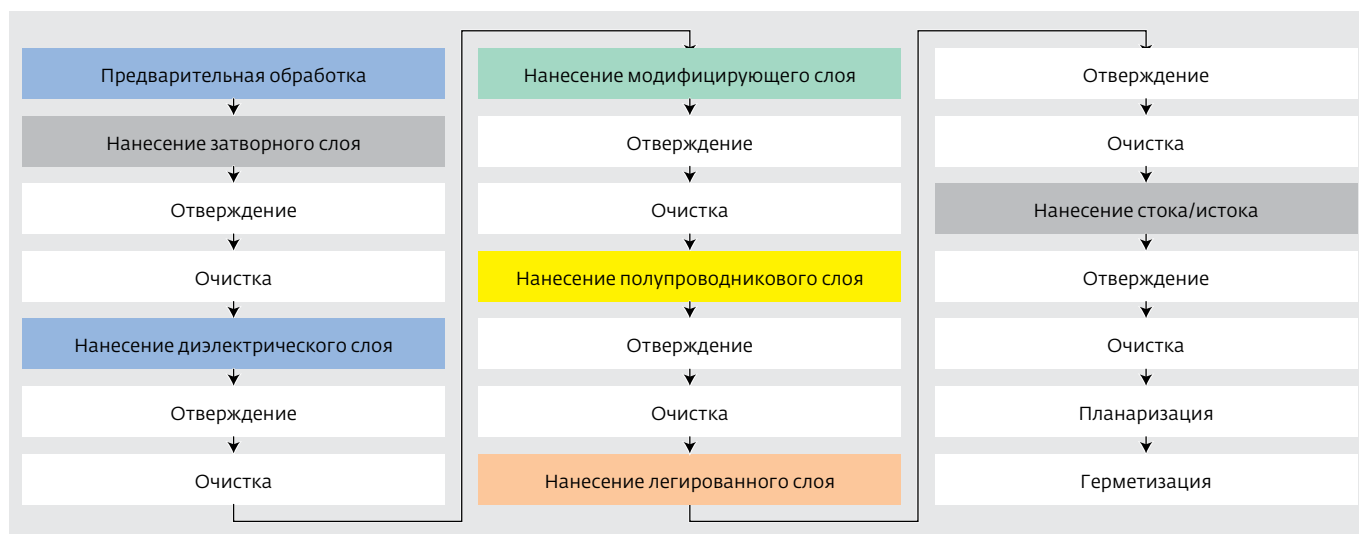


Рис.17. Схема процесса производства структуры BG-TC [8]

Схема одного из возможных процессов производства печатных органических тонкопленочных светодиодов, у которых затвор располагается снизу, а сток и исток – сверху, представлена на рис.17. В качестве гибкого основания используются пленки из полиэтилентерефталата, полиэтиленнафталата или полиэфирсульфона. На этапе предварительной обработки поверхность пленки подвергается очистке и пассивируется. При необходимости, если шероховатость пленки слишком высока, можно выполнить планаризацию поверхности. После нанесения каждого слоя структуры проводится отверждение и очистка. Сравнение применимости различных технологий, в том числе и печати, для формирования слоев структуры представлено в табл.1 и 2.

В качестве слоев структуры светодиода могут использоваться следующие материалы:

- затвор, сток, исток: высоколегированный Si, Al, Cr, Mo, Cu; оксид индия, легированный оловом; полианилин; PEDOT:PSS, в том числе, с диметилсульфоксидом или полидиметилсилоксаном;
- пары материалов для диэлектрического и модифицирующего слоев: нитрид кремния (35 нм) – полиметилметакрилат (10 нм); поливиниловый спирт (630 нм) – полиметилметакрилат (23 нм); Ta₂O₅ – полифлуорен (40 нм); поливинилпирролидон – полиимид;
- полупроводниковый слой: пентацен, тетрацен, полифениленвинилен, олиготиофены, региорегулярный политиофен, гибридные органо-неорганические материалы, поли(3-гексилтиофен) (P3HT), полимеры на основе полифлуорена;

- герметизирующий слой: поливинилацетат, нитрид кремния, парилен.

* * *

Многообразие типов гибких экранов, технологий их производства и областей применения не ограничивается описанными выше. Многие ведущие производители электронного оборудования периодически анонсируют разработки устройств с гибкими (не всегда печатными) экранами. Гибкость позволит использовать экраны там, где до недавних пор это казалось невозможным, например встраивать их в одежду, в детские книги или интерактивные игрушки. Применение массовых технологий печати обеспечит низкую стоимость экранов, сделав такие устройства доступными широкому кругу потребителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology – http://www.aist.go.jp/index_en.html
2. SiPix – <http://www.sipix.com>
3. NeoLux Corporation – www.neoluxiim.com/english/
4. **C.Giacoponello, H. Lindstrom.** Electrochromics: Unlocking Color in Electronic Paper. – Information Display, 2008, №1, p.12-15.
5. **G.Smith.** How printed electronics enable one-time passcode cards. – Printed Electronics, 2011, quarter 1, p.2-4.
6. Add-Vision – <http://www.add-vision.com>
7. **J.Devin MacKenzie.** Flexible OLEDs: print-based manufacturing, devices and applications. Printed Electronics USA 2010.
8. **G.Pieterse.** PRODI. WP1 OTFT for display manufacturing requirements. – Holst Centre, 2009.