



ГИБКИЕ ПЕЧАТНЫЕ ЭКРАНЫ

Антон Нисан

edu@ostec-group.ru

Мы продолжаем серию публикаций, посвященных органической и печатной электронике. В настоящей статье будут рассмотрены принцип работы и существующие технологии производства гибких печатных экранов.

1 ВВЕДЕНИЕ

Объем информации, обрушивающейся в современном мире на человека, огромен, и он неизбежно продолжает расти. Существенная часть этой информации поступает к нам с многочисленных окружающих нас экранов телевизоров, мониторов, ноутбуков, планшетных компьютеров, коммуникаторов, электронных книг и т.п. Многие из этих устройств портативны, и обращаемся мы с ними не всегда аккуратно, чего иногда не прощают нам хрупкие экраны на стеклянных подложках. Если сделать экраны гибкими или даже сворачиваемыми, то с хрупкостью может быть покончено. Кроме того, максимально возможное использование методов печати в производстве экранов на гибких подложках позволит наиболее полно раскрыть преимущества органической и печатной электроники. Области применения таких экранов показаны на рис. 1, а пример полностью напечатанного экрана – на рис. 2.

Укрупненно, гибкий экран состоит из двух частей («слоев», рис. 3): формирующей изображение (frontplane) и управляющей (backplane). По принципу работы формирующая изображения часть может быть двух типов: отражающей свет как обычная бумага и излучающей

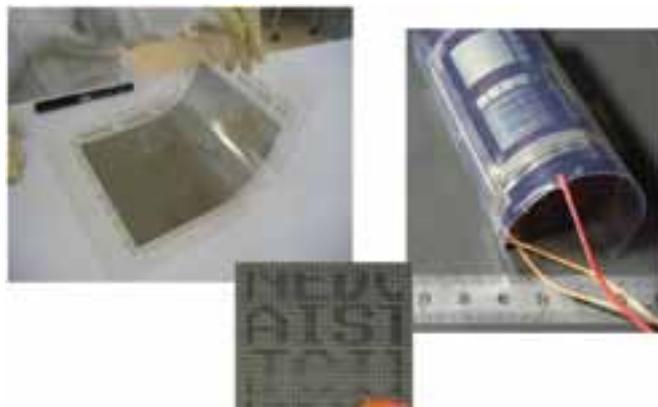


Рис. 2 Гибкий, полностью напечатанный экран с разрешением 200 пиксель/дюйм и диаметром в свернутом виде 34 мм. Источник: National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

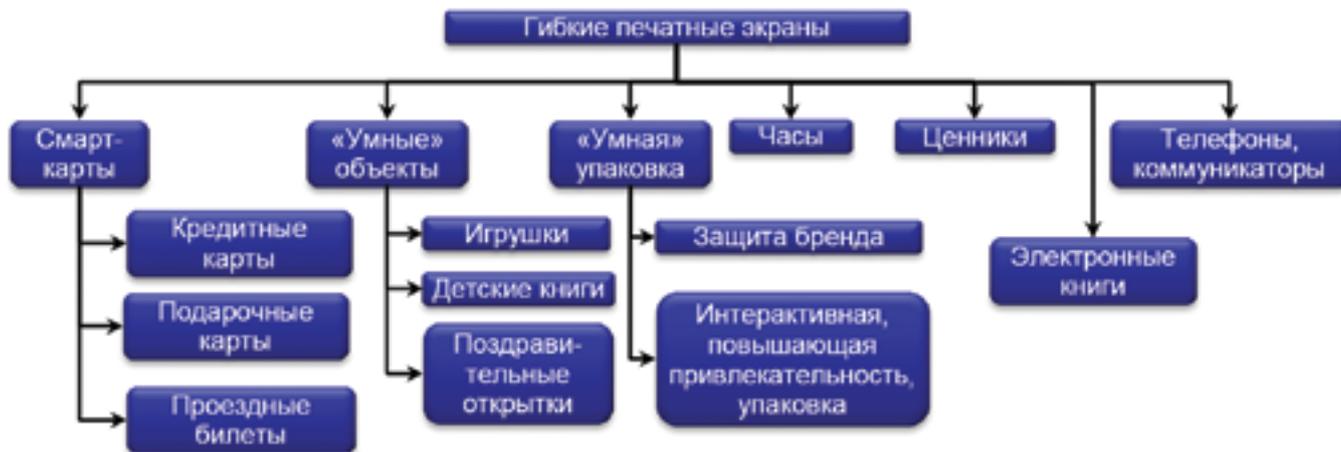


Рис. 1 Области применения гибких печатных экранов



Рис. 3 Способы классификации гибких печатных экранов

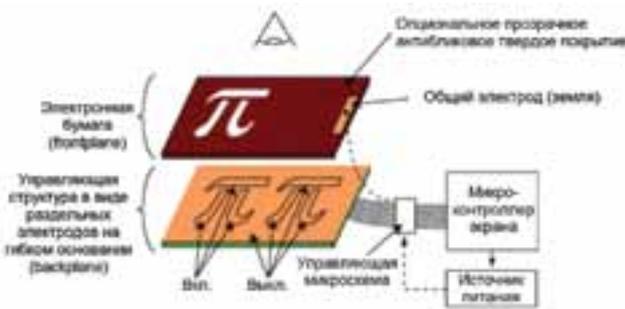


Рис. 4 Схематичное изображение конструкции сегментного экрана. Источник: SiPix

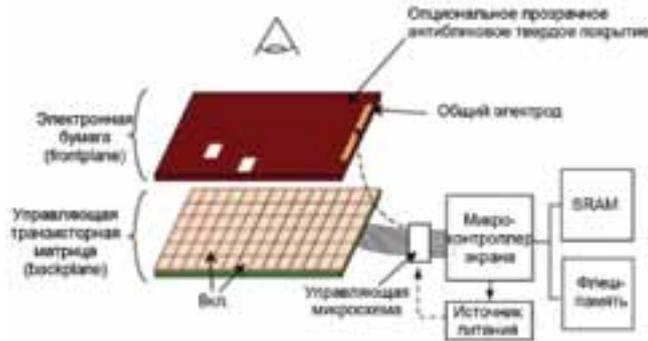


Рис. 5 Схематичное изображение конструкции пиксельного экрана. Источник: SiPix

свет. Например, к первому типу относятся электрофоретические и электрохромные экраны, ко второму – экраны на органических светодиодах (OLED) и электролюминесцентные (EL) экраны. Огромное преимущество экранов, отражающих свет, заключается в снижении усталости глаз, так как нам привычнее воспринимать информацию в отраженном свете, а также в снижении энергопотребления таких экранов, поскольку энергия расходуется только при смене изображения на экране.

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

Рассмотрим принцип работы и технологию производства структур, формирующих изображение в электрофоретических, электрохромных и OLED экранах, а также управляющие матрицы из органических печатных транзисторов.

2 ЭЛЕКТРОФОРЕТИЧЕСКИЕ ЭКРАНЫ

Пожалуй, наиболее широко распространены и известны электрофоретические экраны компании E-Ink, применяемые, например, в электронных книгах Sony и PocketBook. 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 – прозрачный. При приложении к нижнему электроду положительного (относительно верхнего электрода) потенциала пиксель приобретает белый цвет, отрицательного – черный. И хотя подавляющее большинство таких экранов изготавливается на стеклянных подложках, существует возможность их печати на гибких пластиковых основаниях.

Компанией SiPix разработаны несколько иные электрофоретические экраны. Их принцип работы основан на том, что 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 пиксель приобретает белый цвет, при подаче отрицательного напряжения – 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 (рис. 8).

Схема процесса производства экранов SiPix по рулонной технологии приведена на рис. 9. Лента из полиэтилентерефталата (PET) с прозрачным проводящим слоем, например, оксида индия, легированного оловом (ITO), подается в устройство нанесения покрытия, в котором по поверхности ленты равномерно распределяется слой смолы. После этого микроштампом в смоле создается необходимый рельеф: формируются микроячейки (рис.10), которые заполняются

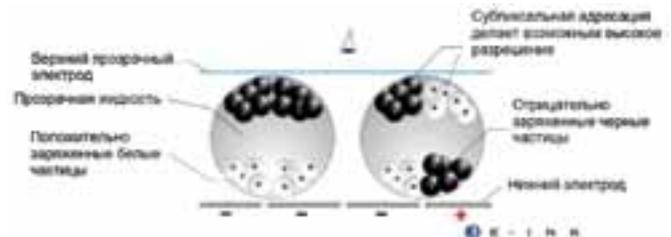


Рис. 6 Схема экрана E-Ink. Источник: NeoLux Corporation

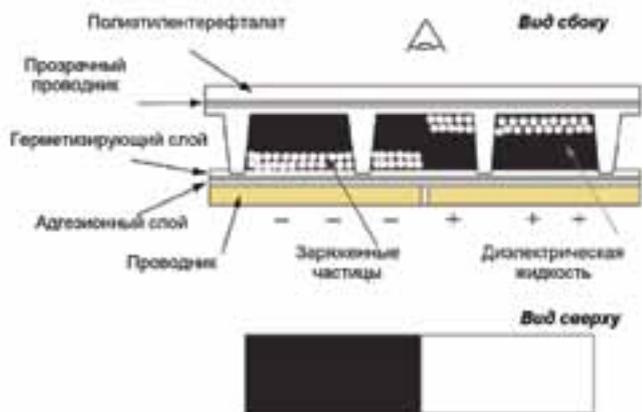


Рис. 7 Принцип работы электрофоретических экранов. Источник: SiPix



Рис. 8 Пример электрофоретического экрана с тремя цветовыми областями. Источник SiPix

диэлектрической жидкостью с положительно заряженными частицами и герметизируются. На следующей операции производится ламинирование пленки, служащей защитой экрану до его монтажа на управляющую матрицу, и резка ленты.

3 ЭЛЕКТРОХРОМНЫЕ ЭКРАНЫ

Структура гибкого печатного электрохромного экрана показана на рис. 11. Она состоит из нескольких пористых слоев, последовательно напечатанных на основании из полиэтилентерефталата, с прозрачными электродами из оксида индия, легированного оловом. Формирование изображения на электрохромном экране осуществляется за счет того, что при подаче на прозрачный электрод отрицательного (относительно проводящего углеродного слоя) потенциала виологен¹, абсорбированный слоем TiO₂, восстанавливается, приобретая темно-синий цвет. При подаче обратного напряжения виологен окисляется и становится прозрачным. Таким образом, питание (порядка 1В) необходимо только при смене изображения, однако при отсутствии обновления изображение постепенно за несколько часов исчезает.

Белый светоотражающий слой предназначен для повышения контрастности, а также для электрической изоляции слоя TiO₂ от слоя

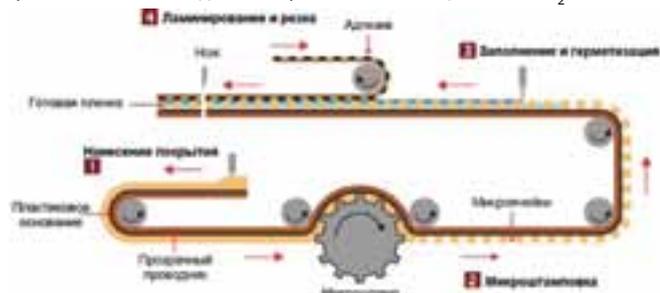


Рис. 9 Рулонная технология производства электрофоретических экранов, разработанная компанией SiPix

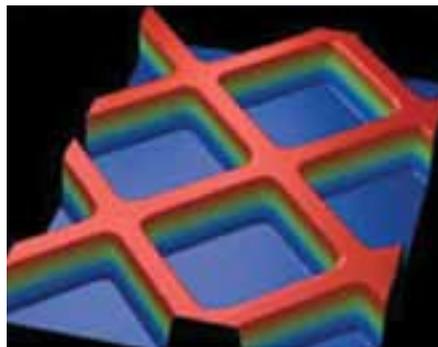


Рис. 10 Модель микроячеек. Типовой объем микроячеек 10-1000 пл. Источник: SiPix

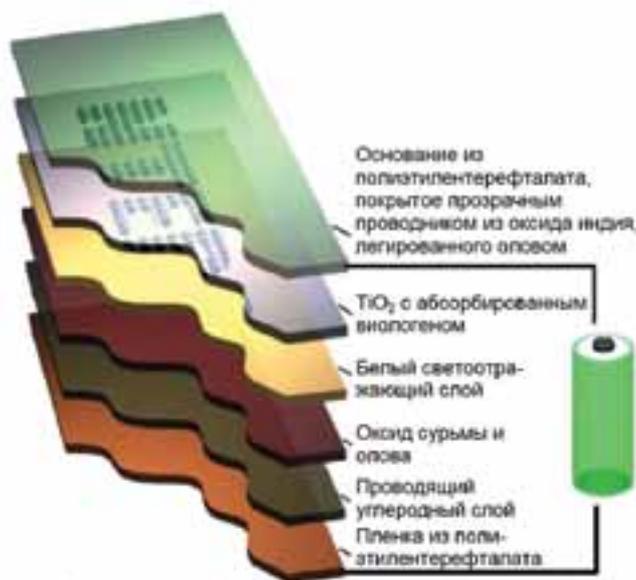


Рис. 11 Структура гибкого печатного электрохромного экрана. Источник: С. Giacoponello, H. Lindstrom. Electrochromics: Unlocking Color in Electronic Paper. Information Display 1/08

оксидов сурьмы и олова (ATO). Слой оксидов сурьмы и олова имеет высокую емкость и служит для уравнивания зарядов в TiO₂ для сохранения нейтрального заряда всего устройства. Проводящий углеродный слой играет роль второго электрода.

На рынке предлагаются наборы материалов для трафаретной, флексографской и струйной печати слоев сегментных экранов. В предлагаемой компанией Ntera технологии на основе из полиэтилентерефталата с формирующим пиксели слоем ITO трафаретной, флексографской или струйной печатью наносятся слои экрана в последовательности, показанной на рис. 11. После проводящего углеродного слоя наносится не показанный на рисунке жидкий или гелеобразный электролит, и ламинируется пленка из полиэтилентерефталата. При этом суммарная толщина печатаемых слоев примерно равна 25 мкм.

Компанией GSI Technologies разработаны и изготовлены кредитные карты с печатными экранами для отображения одноразовых паролей (рис. 12 - 14). Экранный модуль напечатан на гибкой плате из полиэфирной пленки толщиной 75 мкм. Ширина проводников и зазоров на гибкой плате составила 100 мкм, сквозные отверстия выполнялись лазером, финишное покрытие контактных площадок – Ni/Au. Сам 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 вы-

¹ Виологен – производное соединение 4,4'-дипиридила.



Рис. 12 Устройство кредитной карты со встроенным гибким печатным экраном для отображения одноразовых паролей. Источник: G. Smith. How printed electronics enable one-time passcode cards, 2011

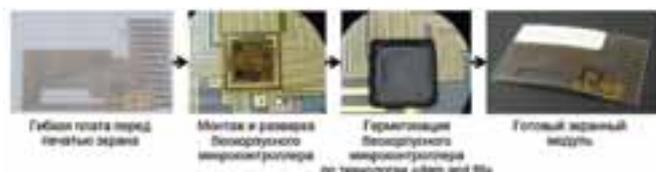


Рис. 13 Основные этапы производства экранного модуля. Источник: G. Smith. How printed electronics enable one-time passcode cards, 2011



Рис. 14 Фотография кредитной карты со встроенным гибким печатным экраном для отображения одноразовых паролей. Источник: G. Smith. How printed electronics enable one-time passcode cards, 2011

водов и герметизация бескорпусного микроконтроллера. Герметизация выполнялась по технологии «dam and fill»: вокруг кристалла формировался «барьер», после чего пространство внутри «барьера» заполнялось герметизирующим материалом. Суммарная толщина кристалла и герметизирующего слоя составила 450 мкм.

4 OLED ЭКРАНЫ

Принцип работы OLED экранов основан на следующем: 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 с дырками, в результате которой избыток энергии может выделиться в виде излучения, длина волны которого зависит от состава полимера. Излученный свет проходит через прозрачный анод. Компанией Add-Vision разработана технология изготовления сегментных гибких полностью печатных экранов на органических светодиодах (P-OLED или AP-OLED), см. рис. 15 - 17. На гибком основании из полиэтилентерефталата или полиэтилен нафталата, покрытом слоем ИТО, производится формирование анода: ИТО 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 сушки светоизлучающего полимера наносится катодный слой методом трафаретной печати, выполняется его сушка. На завершающем этапе экран герметизируется ламинированием пленки.



Рис. 15 Структура гибкого печатного OLED экрана. Источник: Add-Vision



Рис. 16 Схема процесса производства гибкого печатного OLED экрана. Источник: J. Devin MacKenzie. Flexible OLEDs: print-based manufacturing, devices and applications. Printed Electronics USA, 2010



Рис. 17 Полностью напечатанный экран для отображения числовых данных и пиктограмм. Источник: Add-Vision

5 УПРАВЛЯЮЩАЯ МАТРИЦА ИЗ ПЕЧАТНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Возможные варианты структуры печатного органического транзистора (OTFT) представлены на рис. 18. Представленные варианты отличаются от обычных OTFT двумя особенностями:

- наличием модифицирующего слоя, показанного на рис. 18 зеленым цветом и предназначенного для оптимизации химических и электрических свойств поверхности слоя диэлектрика с целью обеспечения соответствующих электрических свойств на границе между диэлектриком и полупроводником и улучшения управляемости процесса нанесения полупроводникового слоя;

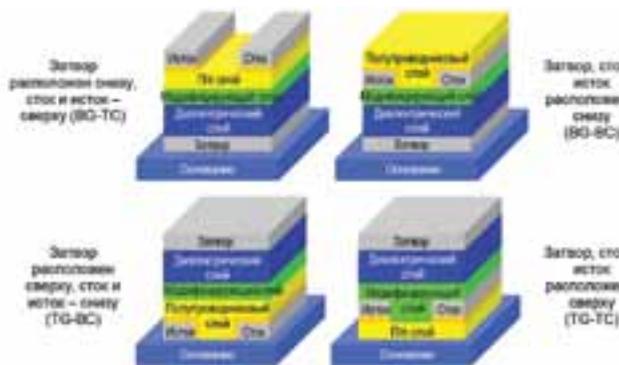


Рис. 18 Варианты структуры управляющего органического печатного транзистора. Источник: PRODI WP1. OTFT for display manufacturing requirements

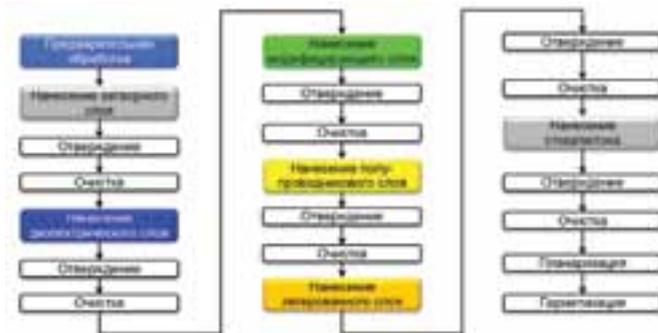


Рис. 19 Схема процесса производства структуры BG-TC. Источник: PRODI WP1. OTFT for display manufacturing requirements

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 нанесение диэлектрического, модифицирующего, полупроводникового и герметизирующего слоев

| Технология нанесения | Диапазон вязкости | Толщина слоя | Производительность | Примечания |
|-----------------------|-------------------|--------------|--------------------|---|
| Глубокая печать | Широкий | Очень малая | Высокая | Потенциальные проблемы с переносом материалов |
| Трафаретная печать | Широкий | Большая | Низкая | |
| Струйная печать | Широкий | Малая | Очень низкая | |
| Офсетная печать | Широкий | Средняя | Высокая | |
| Флексографская печать | Широкий | Малая | Высокая | Низкая стойкость печатной формы к растворителям |
| Ламинирование | - | Большая | Высокая | |
| Напыление | - | Очень малая | Низкая | |
| «Мягкая» литография | - | Очень малая | Низкая | Больше подходит для формирования рисунка |

• наличием дополнительного легированного слоя p- или n-типа, показанного на рис. 18 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.

Схема одного из возможных процессов производства печатных органических тонкопленочных транзисторов, у которых затвор располагается снизу, а сток и исток – сверху, представлена на рис. 19. В качестве гибкого основания используются пленки из полиэтилентерефталата, полиэтилен нафталата или полиэфирсульфона. На этапе предварительной обработки поверхность пленки подвергается очистке и пассивируется. При необходимости, если шероховатость пленки слишком высока, может выполняться планаризация поверхности. После нанесения каждого слоя структуры проводится отверждение и очистка. Сравнение применимости различных технологий, в том числе печати, для формирования слоев структуры представлено в таблицах 1 и 2.

Примеры материалов, используемых в качестве слоев структуры светодиода:

- 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.

6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многообразие типов гибких экранов, технологий их производства и областей применения не ограничивается упомянутыми выше. Многие ведущие компании периодически анонсируют разработку устройств с гибкими (не всегда печатными) экранами. Гибкость экранов позволит встраивать их в изделия, ранее лишенные экранов, например, в одежду, в детские книги, интерактивные игрушки. Применение массовых технологий печати обеспечит низкую стоимость экранов, сделав такие устройства доступными широкому кругу потребителей. ■■

За дополнительной информацией по гибким печатным экранам 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 демонстрационном зале вы также можете ознакомиться с образцами гибких печатных экранов.