

УДК 004.356.2

В.И. Туев, Н.Д. Малютин, А.Г. Лоцилов, С.А. Артищев, А.Е. Здрок, А.М. Аллануров, А.А. Бомбизов, С.П. Караульных, И.М. Макаров, А.В. Убайчин

Исследование возможностей применения аддитивной принтерной технологии формирования пленок органических и неорганических материалов электроники

Проведен обзор современного состояния исследований по развитию принтерных (плоттерных) технологий в электронике. Рассмотрены особенности технологии получения металлических проводников, пленок органических полупроводников и диэлектриков. Даны классификация и краткое описание технологического оборудования для печати неорганическими и органическими растворами (чернилами). Описаны технологии печати транспортных и светоизлучающих слоев, изолирующих пленок, проводящих металлических слоев. Уделено внимание средствам измерения параметров пленок и функциональных устройств печатной электроники. Приведена информация об усовершенствовании плоттеров.

Ключевые слова: принтерные технологии, технология печати металлических проводников, пленки органических полупроводников, плоттеры для нанесения пленок контактным способом, технология печати транспортных слоев, технология печати светоизлучающих слоев, технология печати диэлектрических пленок, измерения параметров пленок и устройств печатной электроники, модернизация плоттеров.

Аддитивные технологии в машиностроении, электронике и других отраслях базируются на способе формирования модели или готовой к применению детали путем последовательного добавления материала к первому слою заготовки. Название имеет происхождение от английского термина add – добавлять. До недавнего времени более распространенными были субтрактивные технологии, при которых «лишний» материал удаляется с целью получения нужной формы детали. Проблемам развития аддитивных технологий в машиностроении посвящено большое число работ [1–4].

В настоящей работе отражены вопросы развития аддитивных технологий в электронике [5–15], уровень развития которых, на взгляд авторов, пока уступает уровню аддитивных технологий изготовления изделий из металлов и пластиков в машиностроении и приборостроении.

Развитие принтерной печати, появившейся как средство отображения текста и различных изображений на бумаге или ином носителе, в настоящее время идет по разным направлениям. Почти взрывообразно по исторической шкале времени найдены новые области применения, что стимулировало разработку новых конструкций принтеров и технологий. От печатания полноцветных плоских 2D-изображений – до создания 3D-реальных конструкций – таков сегодняшний диапазон применения принтерных технологий. Расширены также научно-технические, производственные и бытовые области применения принтерных методов решения разнообразных задач. Выделяя функциональное назначение как главный признак принтерных технологий, можно классифицировать их следующим образом:

- отображение информации в статическом виде на различных основаниях (бумага, полимерные пленки, керамика, металлы и т.п.);
- создание 3D-конструкций путем послойного «выращивания» изделия из наносимого материала;
- нанесение на подложки функциональных элементов путем формирования наноразмерных пленок полупроводников, металлов, диэлектриков, 2D-печать.

В настоящее время развитие всех трех видов принтерных технологий в той или иной степени базируется на достижениях в области нанотехнологий и наноматериалов [5–15]. Направление создания функциональных элементов с применением принтеров относится, с учетом сказанного, к нанoeлектронике. Это направление находится в стадии достаточно динамичного развития, поэтому исследования и разработки в данной области нанотехнологий – актуальная задача.

В 2012–2014 гг. в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники (ТУСУРа) и Национальном исследовательском Томском государственном университете

(НИ ТГУ) проведен цикл исследований, направленных на применение принтерной технологии для изготовления органических светодиодов [11–14]. Параллельно с этим разрабатывались образовательная программа профессиональной переподготовки и учебно-методический комплекс в области формирования покрытий и материалов методами струйной принтерной печати [15].

Развитие принтерных технологий функциональной электроники в России осуществляют также компания «Остек» [10], ОАО «ЦНИИ «Циклон» [16], ОАО Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов (НИИ ПП), ООО «Акколаб» [17], Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») [18].

Решению задач НИОКР и образовательного проекта [11–15] предшествовал анализ состояния разработок и производства принтерных технологий в Российской Федерации. Наиболее продвинутой в данной области является группа компаний САН, созданная 1 марта 1998 г. [19]. В САН налажено производство чернил, принтеров и программного обеспечения для реализации печати. Работает единственный в России и СНГ завод по производству чернил и высокотехнологичных химических продуктов, завод по производству оборудования цифровой струйной печати. САН содержит отдел разработок высокотехнологичного оборудования цифровой печати, электроники и программного обеспечения.

Для реализации аддитивной принтерной технологии электроники имеет большое значение решение проблемы создания материалов, пригодных для получения растворов (чернил) с заданными параметрами. Задачи этого плана решаются в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте высокомолекулярных соединений (ИВМС) Российской академии наук (г. Санкт-Петербург) [12], в Институте проблем химической физики (ИПХФ), г. Черноголовка [20–23], в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова Российской академии наук (ИСПМ РАН), г. Москва [24–26].

В ИПХФ [27] созданы новые низкомолекулярные и полимерные органические электролюминесцентные материалы, излучающие в синей, зеленой и красной областях спектра, предназначенные для использования в электролюминесцентных экранах и других устройствах отображения информации. Электролюминесцентные материалы пригодны к изготовлению тонких пленок как методами вакуумного напыления, так и методом полива из растворов. Созданы светоизлучающие структуры, характеризующиеся максимальными яркостями в тысячи кд/м^2 и низким энергопотреблением (менее 1 Вт/кд). Эти структуры используются в макетах светоизлучающих устройств, таких как макет семисегментного индикатора. Работа проводится совместно с ОАО «Научно-производственное предприятие «Сапфир» и ЗАО «Акционерный институт микроэлектронных технологий».

Большой вклад в исследование материалов для органической электроники внесла группа исследователей под руководством С.А. Пономаренко [6, 24–26].

Работы по применению струйных принтеров для получения пленок проводящих проводников и резисторов проводятся в компании «Остек». В ЗАО «НИИИТ» (Институт инновационных технологий), входящем в группу компаний «Остек», создана лаборатория печатной электроники [10].

Настоящая публикация содержит краткий обзор зарубежных и немногочисленных отечественных публикаций, направленных на практическое освоение принтерных технологий при печати проводящих, органических полупроводниковых, диэлектрических пленок из растворов. Описаны принципы работы доступного оборудования для печати и измерения параметров. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства промышленности и торговли РФ разработки базовой технологии принтерной печати (контракт № 12418.1006899.11.055).

Технологическое оборудование печати неорганическими и органическими чернилами. В нашей работе применялся принтер, созданный в США и описанный в патенте [28]. Печатающим элементом принтера является капилляр с жидкостью, работа которого основывается на физическом эффекте ультразвукового воздействия на раствор в капиллярном дозаторе. Этот эффект открыт Е.Г. Коноваловым, а явление ультразвукового воздействия на жидкости в капиллярах внесено в Государственный реестр открытий СССР под № 109 с приоритетом от 31 мая 1961 г. Формула открытия такова: «Экспериментально установлено неизвестное ранее явление аномального увеличения (в десятки раз) скорости движения и высоты подъема жидкости в капиллярах при непосредственном воздействии ультразвука и возрастание их с повышением температуры».

В публикации [29] следующим образом популярно описан ультразвуковой капиллярный эффект. Е.Г. Коновалов экспериментально обнаружил и доказал, что если жидкость в капилляре совершает колебания под влиянием источника ультразвука, то капиллярный эффект резко возрастает: высота

столба жидкости существенно увеличивается (до нескольких десятков раз), значительно возрастает скорость подъема. Установлено, что в данном случае жидкость толкают вверх не капиллярные силы, а стоячие ультразвуковые волны. Ультразвук в соответствии с законами образования стоячих волн сжимает столб жидкости и поднимает его вверх. Процесс идет до тех пор, пока напор, создаваемый ультразвуковыми волнами, не уравнивается высотой столба жидкости.

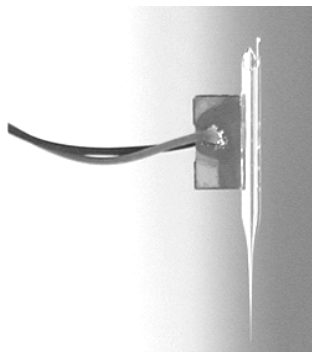


Рис. 1. Капиллярный дозатор-принтер

Подробное описание работы и применения принтера с капиллярным дозатором опубликовано в работах [30–37]. Дозатор (рис. 1), основанный на ультразвуковом капиллярном эффекте, с помощью системы позиционирования перемещается над поверхностью подложки. С кончика капилляра под действием силы тяжести и вибрации в направлении продольной оси свисает капля. В задачи системы позиционирования принтера входит обеспечение контакта мениска жидкости с поверхностью подложки и последующее перемещение капилляра по заданной траектории. При этом в каждой точке траектории контакт самого капилляра с поверхностью подложки должен быть исключен.

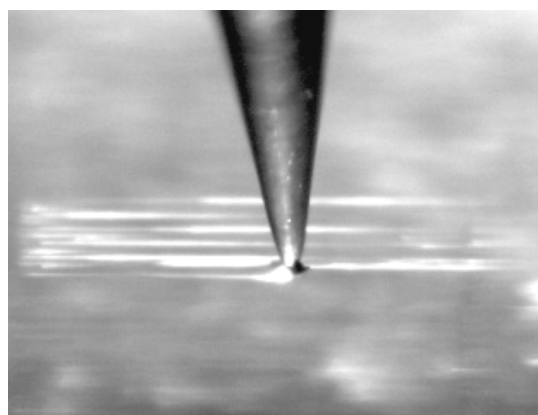
Ключевыми преимуществами контактного способа нанесения являются: высокая точность дозирования (от 0,6 пл), высокое разрешение (от 5 мкм) и детализация рисунка (диаметр точки от 5 мкм). К преимуществам также относится простота эксплуатации и высокая ремонтпригодность печатающей головки, отсутствие жестких требований к параметрам чернил. Учитывая особенности принтера с капиллярным дозатором по сравнению с более известными и распространенными струйными принтерами, их называют также плоттерами, чтобы подчеркнуть особенности нанесения чернил на подложки путем образования капли на конце дозатора, ее соприкосновения с поверхностью подложки и последующего растекания.

Основным недостатком принтера является изменение концентрации активного вещества в чернилах вследствие испарения растворителя. Это связано с тем, что печать осуществляется из открытого капиллярного дозатора, а забор чернил выполняется из открытой кюветы.

Технология плоттерной печати. Как уже отмечалось, технология и результаты плоттерной печати исследовались в работах [30–37] и в работах авторов настоящей публикации [13–15, 38–40, 43–47]. Внешний вид рабочего места, оборудованного плоттером и вспомогательным оборудованием, показан на рис. 2, а. На рис. 2, б иллюстрируется нанесение чернил капиллярным дозатором топологического элемента в виде линий на поверхность подложки.



а



б

Рис. 2. Рабочее место плоттерной печати (а) и нанесение чернил в виде линий на поверхность подложки капиллярным дозатором плоттера (б)

Для оценки технических характеристик метода плоттерной печати исследовалась зависимость параметров пленки от скорости перемещения печатающей головки. В векторном редакторе SonoDraw, ориентированном на работу с GIX Microplotter II, были подготовлены топологические примитивы: одиночные линии длиной 3 мм; полигоны в виде прямоугольников длиной 3 мм и шириной 0,5 мм, выполненные путем печати перекрывающихся линий с шагом 20 мкм; субпиксели (отрезки линий длиной 0,2 мм).

Большое значение для реализации печати имеют свойства растворов материалов, которые часто называют чернилами по аналогии с хорошо освоенными методами струйной печати текстов и изображений. Задача приготовления и исследования свойств растворов решается с применением хорошо отработанной технологии изготовления органических светодиодов методом центрифугирования [11]. Это позволило определить основные параметры растворов и органических светоизлучающих диодов на их основе [12]. Экспериментальные результаты, полученные таким образом, позволили в дальнейшем перейти к применению растворов при обработке технологии печати с помощью плоттеров.

Печать транспортного (дырочного) слоя. В качестве чернил использовался PEDOT:PSS марки M121 (Ossila), водный раствор органического полупроводника с дырочным типом проводимости. Подложка – кварцевое стекло марки S113 50×50×1,0 мм³ со слоем ITO 100 нм (Ossila). После нанесения слоя чернил подложка подвергалась отжигу в инфракрасной конвекционной печи «Аверон Тропик» при температуре 150 °С в течение пяти минут. На рис. 3 представлена микрофотография первых полученных пленок. На микрофотографии видно, что пленка непрерывна, обеспечивает заданную топологию, но недостаточно однородна и значительно по данному параметру уступает пленкам, получаемым методом напыления.

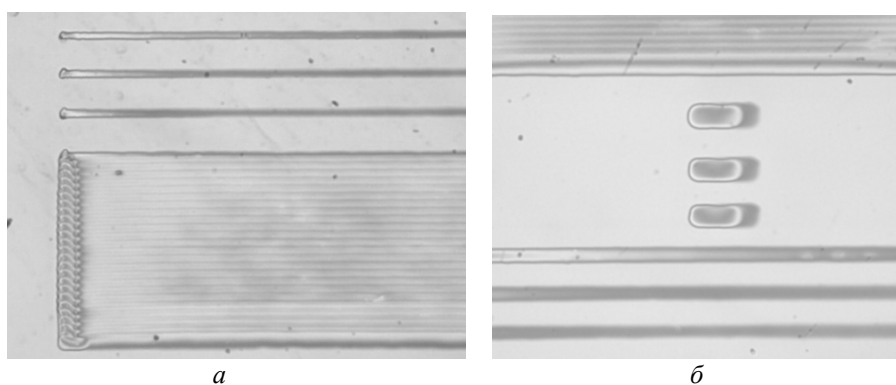


Рис. 3. Микрофотография напечатанного слоя: *а* – линии и полигоны; *б* – полигоны, субпиксели, линии

Тем не менее, как видно из рис. 3, плоттер обеспечивает достаточную для практических целей повторяемость печати. Толщина пленки для одиночных линий и субпикселей находится на уровне 80–90 нм, средняя толщина пленки полигона – на уровне 120 нм, что превышает необходимое значение в два раза. Поэтому была проведена отработка технологических режимов нанесения пленок PEDOT:PSS путем изменения параметров работы плоттера. Вариация скорости перемещения дозатора и изменение расстояния между наносимыми линиями при значении действующего напряжения на пьезоэлементе, равном 1 В, позволили получить среднюю толщину пленки PEDOT:PSS около 60 нм. Оптимальными параметрами образования пленки для печати полигона оказались печать перекрывающихся линий с шагом 20 мкм при скорости перемещения дозатора 100 мм/с. Этот результат обеспечивает хорошее приближение к требованиям по толщине транспортного слоя, предъявляемым при изготовлении органических светодиодов.

Печать активных (светоизлучающих) слоев. Аналогично обработке описанной технологии нанесения транспортного слоя были проведены экспериментальные исследования печати активных слоев, представляющих пленку органического полупроводника с электронным типом проводимости. Печать выполнялась на поверхность подложки из кварцевого стекла с предварительно нанесенными слоями ITO и PEDOT:PSS. В связи с полученными данными о высокой степени смачиваемости раствора PF64 скорость движения дозатора увеличивалась до 300 мм/с. Установлено, что ширина пленок во всем диапазоне скоростей движения дозатора составляла 320±20 мкм при толщине 5–8 нм (диаметр выходного отверстия капилляра дозатора был 60 мкм). Этот результат является следствием высокой смачиваемости пленки PEDOT:PSS чернилами PF64.

Очевидным путем уменьшения ширины пленок и увеличения их толщины является оптимизация реологических и физико-химических свойств растворов чернил активных слоев. В первую очередь оптимизации должны подвергаться такие параметры чернил, как вязкость, поверхностное натяжение и интенсивность испарения. Модификация раствора активного слоя PF8 проводилась сотрудниками НИ ТГУ в смеси толуола и линейного алкилбензола в соотношении 1:3. При концен-

трации PF8 10 мг/мл вязкость при температуре 20 °С составила 2,455 сП. Плотность раствора около 0,9 г/мл.

Печать изолирующего слоя (диэлектрика). Одним из ключевых вопросов в технологии производства светодиодных матриц и других устройств является обеспечение электрической изоляции между соседними пикселями, между анодными и катодными электродами, а также между соседними электродами одного потенциала. Получение изолирующих слоев может решаться традиционно, т.е. путем напыления тонких пленок диэлектриков на различных стадиях. Перспективным представляется технологический процесс печати органических диэлектриков, тем более что он полностью совместим с остальными процессами печати органических слоев матриц. Для этих целей была проведена серия экспериментов по печати изолирующих слоев на базе полиметилметакрилата растворами:

- раствор 1 (PMMA) – Poly(methylmethacrylate) в концентрации 7 мг/мл;
- раствор 2 (PMMA w 15% POSS) – Poly[(propylmethacryl-heptaisobutyl-PSS)-co-(t-butyl methacrylate)] 15% wt POSS в концентрации 7 мг/мл.

Наносились пленки одиночных линий с использованием растворов 1 и 2. В результате измерений профилограмм сделан вывод о том, что применяемая технология печати обеспечивает получение как отдельных линий шириной 250–300 мкм и толщиной 20–30 нм, так и обеспечивает однородную заливку поверхности с толщиной слоя на уровне 100 нм. Это позволяет прогнозировать использование операции печати диэлектрических слоев при производстве компонент электроники.

Для определения электрических характеристик полученных пленок были изготовлены макеты тонкопленочных структур ITO-PMMAw 15% POSS – Al с топологическими размерами 2,54×5 мм. Для изготовленных макетов были измерены значения сопротивлений изоляции при значении постоянного напряжения 50, 100 и 200 В. Среднее значение сопротивления изоляции пленки PMMAw 15% POSS составило 5 МОм. Толщина пленки диэлектрика PMMAw 15% POSS составляла около 100 нм.

Печать проводящего (металлического) слоя. Одним из перспективных применений использования печатной технологии при создании элементов электроники является получение проводящих дорожек с использованием серебросодержащих чернил. Было проведено несколько экспериментов по нанесению слоя проводящих чернил марки ANP DGP 40TE-20C с шагом 20 мкм.

В результате экспериментальных исследований получены проводящие пленки толщиной 100 нм (для одиночных линий) и 168 нм (для сплошных полигонов). Сопротивление пленок составило порядка 3–5 Ом/□. Полученные проводящие пленки могут применяться:

- для уменьшения контактного сопротивления в области подключения к анодным электродам матрицы;
- для уменьшения потерь тока в проводниках анода путем шунтирования прозрачного анодного электрода узким проводником (30 мкм и менее), имеющим меньшее сопротивление;
- для обеспечения коммутации элементов катодных электродов, полностью либо частично заменить собой проводящие пленки алюминия.

Влияние параметров отжига на электрическое сопротивление элементов печатной электроники исследовано в работе [39].

Измерение электрических параметров функциональных элементов неорганической и органической электроники. Развитие аддитивных технологий в электронике в значительной степени потребовало от разработчиков сосредоточить усилия на измерении подчас специфических параметров функциональных элементов, получаемых с помощью принтерных технологий. В работах [40] рассматривается автоматизированный стенд для измерения и диагностики электрических параметров элементов топологии матриц, изготовленных с применением плоттерной технологии. Учитывается, что наличие дефектов в проводниках матрицы может проявляться в виде нарушения целостности проводника, короткого замыкания смежных проводников, отклонения формы и рельефа проводника от заданной. Все эти дефекты отражаются на работоспособности пикселей матрицы ОСИД. Было применено конструктивное решение в виде прижимного контакта. Максимальная размерность информационного поля опытных образцов матриц 30×30 мм при количестве анодных и катодных электродов не более 48. Преимущество автоматизированного стенда заключается в том, что при однократном размещении исследуемой матрицы в держателе можно за счет программного управления коммутатором поочередно измерить параметры всех электродов матрицы. При этом

устраняется проблема традиционного подхода измерения сопротивления каждого проводника с использованием омметра, заключающаяся в сложности отыскания электродов малых размеров, выполненных из практически прозрачных материалов. Был разработан коммутатор, обеспечивающий следующие характеристики:

- 1) количество пикселей ОСИД-матрицы 16×16 (RGB-вариант),
48×48 (монохромный вариант);
- 2) линейные размеры ОСИД-матрицы 50×50 мм;
- 3) схема измерения параметров четырехпроводная;
- 4) диапазон тестовых напряжений до 175 В;
- 5) максимальный постоянный ток 1 А.

Коммутатор может использоваться как автономно для демонстрации режимов свечения изготовленных образцов, так и в составе измерительного стенда.

Разработанный стенд включает в себя представленный коммутатор и измеритель Keithley 2601В, который сочетает в себе источник питания, источник тока, цифровой мультиметр, генератор произвольных сигналов, импульсный генератор напряжения или тока, электронные нагрузки. Для автоматизированного управления данным прибором и коммутатором через ПК было разработано соответствующее программное обеспечение в среде программирования NI LabVIEW 11.

Применение измерительного стенда позволяет проводить измерение сопротивления анодного слоя и других параметров ОСИД-матриц, а также характеризацию устройств органической и неорганической электроники.

Одним из важных параметров в органической электронике является равномерность рельефа получаемых пленок, так как толщина пленки влияет на функциональные свойства создаваемых устройств. На данный момент контроль рельефа осуществляется оптическими методами измерения. При этом для снятия профилограммы протяженных элементов топологии необходимо проводить сканирование всей поверхности пленки, что увеличивает время контроля. Однако учитывая, что электрическое сопротивление пленки определяется ее геометрическими параметрами, представляется возможным по сопротивлению протяженных проводников оценивать равномерность их нанесения. Для этих целей применимы импульсные методы измерения сопротивления [41, 42].

В работе [43] описан измерительный комплекс для исследования электрических и оптических характеристик органических светодиодных матриц. Подчеркивается актуальность разработки для обеспечения работ по созданию отечественной технологии изготовления ОСИД-матриц с использованием метода принтерной печати. Измерительный комплекс был разработан коллективом СКБ «Смена» (ТУСУР).

Комплекс функционирует под управлением разработанного программного обеспечения OLED IV Analyzer и позволяет в автоматизированном режиме проводить измерения вольт-амперных и вольт-яркостных характеристик ОСИД-матриц, а также исследовать процесс деградации элементов матриц с течением времени в зависимости от режима их функционирования.

На рис. 4 приведены общий вид разработанного стенда и его состав.

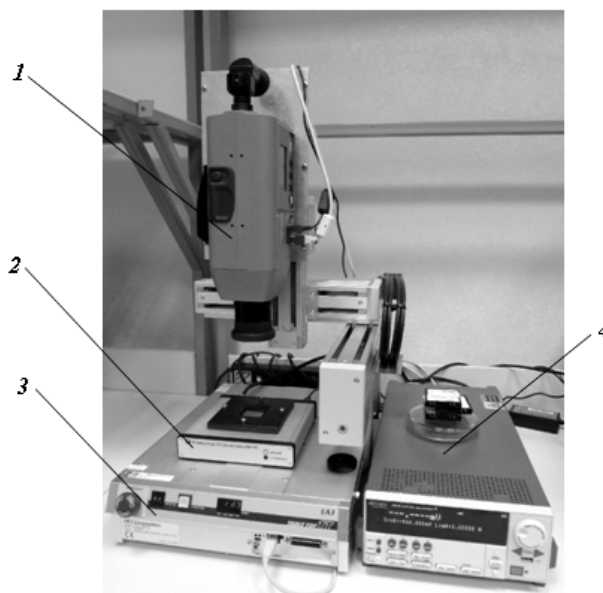


Рис. 4. Измерительный стенд для анализа вольт-амперных и вольт-яркостных характеристик ОСИД-матриц:

- 1 – измеритель яркости и цветности KonicaMinolta CS-200;
- 2 – коммутатор ОСИД КМ-48;
- 3 – трехкоординатная система позиционирования IAI-C3-2020-10В;
- 4 – измеритель ВАХ KEITHLEY 2601 В

Проведены экспериментальные исследования с использованием разработанного комплекса макетов монохромных ОСИД размерностью 6×6 пикселей конструкции и монохромных и RGB-матриц размерностью 48×48 пикселей.

На рис. 5 представлены результаты измерения вольт-амперных и вольт-яркостных характеристик пикселя матрицы синего цвета.

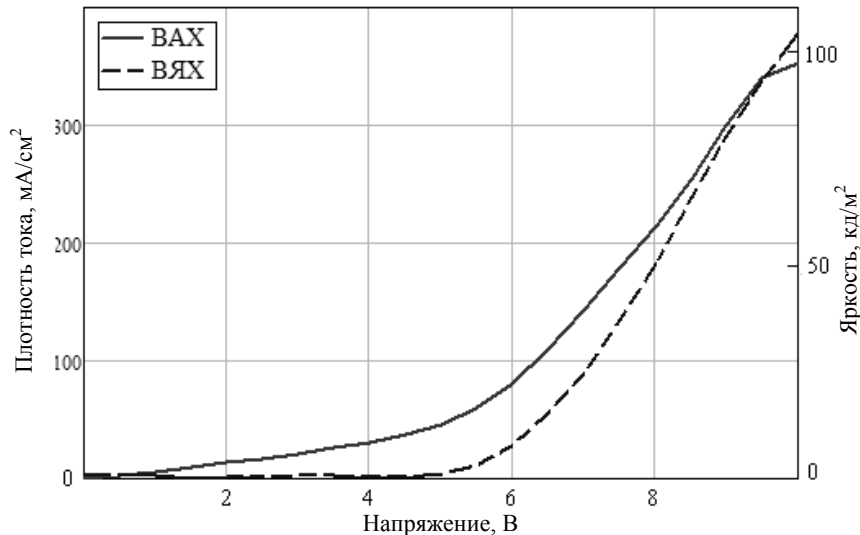


Рис. 5. Измеренные вольт-амперные и вольт-яркостные характеристики пикселя матрицы синего цвета

На рис. 6 показаны характеристики экспериментального образца с разной толщиной слоев. Из полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что яркость свечения пикселей, активные слои которых выполнены путем печати раствора PF64, зависят от толщины излучающего слоя. При этом наилучший результат достигается для варианта нанесения Т-2, что соответствует толщине порядка 60 нм. В этом режиме яркость свечения отдельных пикселей достигает 3000 кд/м² при напряжении равном 10 В.

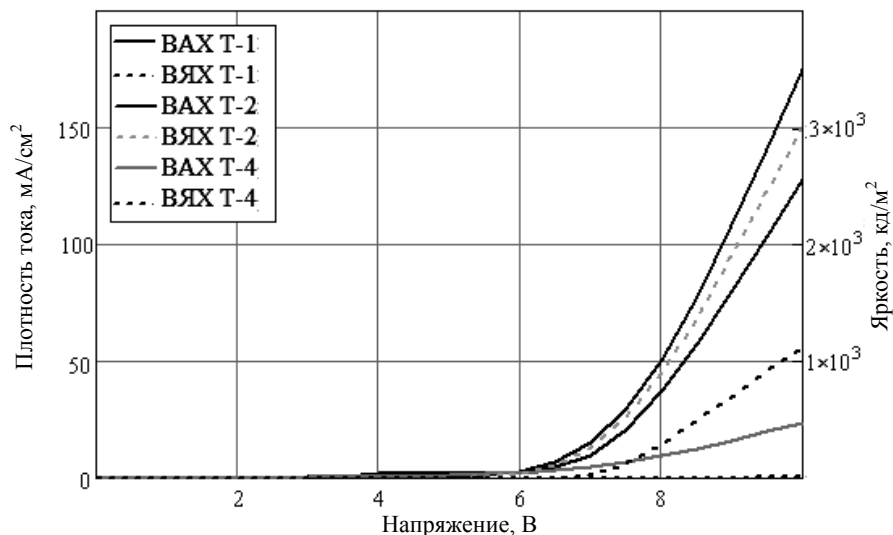


Рис. 6. Измеренные вольт-амперные и вольт-яркостные характеристики матрицы с разными активными слоями

В [43] проведена экстракция параметров светодиодов, составляющих матрицу, на основе данных измерений вольт-амперных и вольт-яркостных характеристик. В результате может быть получена эквивалентная схема ОСИД-матрицы, описанная через параметры входящих в нее светодиодов, после чего не составляет труда рассчитать оптимальные значения напряжений между каждой из пар «анод–катод», обеспечивающие равные токи через светоизлучающие элементы ОСИД-матрицы.

Усовершенствование плоттеров. Как отмечалось ранее, плоттерные системы имеют ряд недостатков, которые снижают их эффективность. В работах [44–46] рассмотрено решение двух задач, направленных на усовершенствование плоттерной системы печати. Первая задача – определение степени наполненности раствором капиллярного дозатора. В процессе отработки технологии печати на плоттере был сделан вывод, что для повышения стабильности и повторяемости печати необходимо осуществлять постоянный контроль уровня раствора в дозаторе. Проведены экспериментальные исследования чувствительности частотных характеристик дозатора плоттерной системы к степени наполненности капилляра раствором. Для этих целей были использованы стенд и установка, описанные в [40, 43]. Для автоматизированного съема и обработки экспериментальных данных создано программное обеспечение IDR 1.0 (Ink Dispenser Research). Для трёх состояний наполненности капилляра были измерены частотные характеристики комплексного сопротивления пьезоэлемента дозатора в полосе частот 400–450 кГц. На рис. 7 приведены результаты измерений.

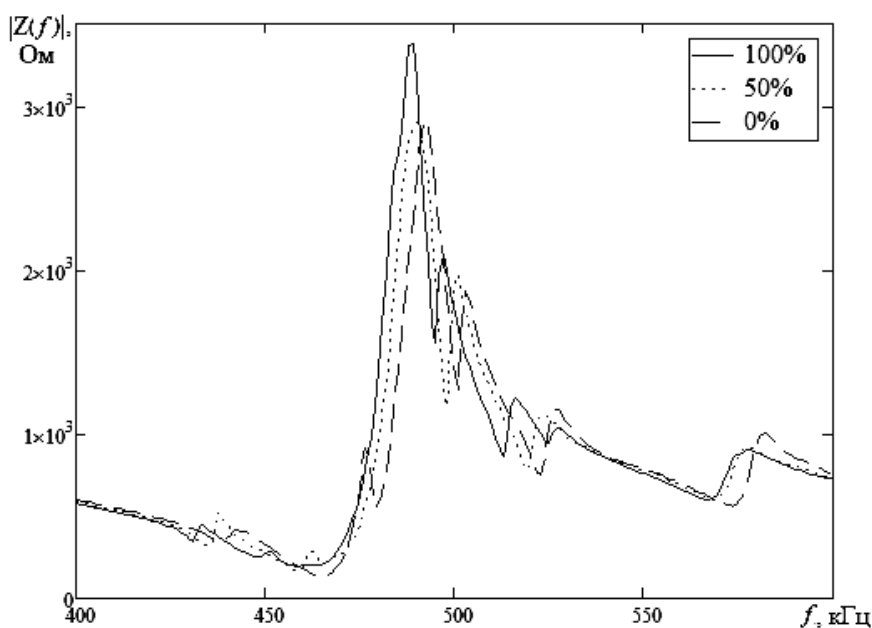


Рис. 7. Зависимость модуля импеданса от частоты

Из анализа полученных характеристик следует, что с изменением уровня наполненности капилляра изменяются частотные характеристики пьезоэлемента. Наблюдается смещение резонансной частоты вверх с уменьшением степени наполненности капилляра, а также изменяется добротность резонансной системы. В задачи последующих исследований входит анализ достижимых метрологических характеристик предложенного способа оценки степени наполненности капилляра плоттерной системы.

Основным недостатком плоттерной системы, применявшейся при отработке технологии печати, является изменение концентрации активного вещества в чернилах вследствие испарения растворителя. Это связано с тем, что печать осуществляется из открытого капилляра, а забор чернил выполняется из открытой кюветы. Для решения проблемы стабилизации параметров чернил в процессе печати и заправки дозатора предложено и реализовано техническое решение, основанное на заправке капиллярного дозатора из вертикально расположенной трубки, уровень раствора в которой максимален в процессе заправки и минимален в режиме ожидания следующего цикла заправки [44, 45, 47].

Заключение. Приведенные материалы отражают первые положительные результаты реализации принтерной технологии авторами работы. Распространение принтерной технологии идет быстрыми темпами, что видно по ссылкам лишь на весьма небольшую часть публикаций о развитии аддитивных технологий в электронике. Очевидно, что принтерные технологии, несмотря на все еще серьезные трудности их промышленного освоения, найдут свое место в электронной промышленности. История освоения субтрактивной промышленной технологии при изготовлении монтажных плат, берущая начало с 40-х годов прошлого века, убеждает в том, что пройдет совсем немного времени (примерно 10–15 лет) и принтерные методы в электронике будут отработаны на новом оборудовании промышленного уровня.

Благодарности. Авторы считают своим долгом выразить искреннюю благодарность сотрудникам Национального исследовательского Томского государственного университета Т.Н. Копыловой, К.М. Дегтяренко, Р.М. Гадирову, Е.Н. Тельминову, Т.А. Солодовой, С.Ю. Никонову, Е.Н. Никоновой за выполнение работ по подготовке растворов (чернил), подложек, осуществление операций спин-коатинга, напыления при изготовлении матриц ОСИД и получения профилограмм пленок, сотрудникам НИИ ПП А.А. Пономареву, В.И. Юрченко за помощь в проведении испытаний макетных образцов.

Считаем своим долгом выразить слова признательности коллективу лаборатории полимерных наноматериалов и композиций для оптических сред ИВС РАН, заведующему лабораторией доктору химических наук А.В. Якиманскому в деле обеспечения работ отечественными электролюминесцирующими материалами.

Литература

1. Казмирчук К. Аддитивные технологии в российской промышленности. АФ-технологии – эффективное звено современного производства / К. Казмирчук, В. Довбыш [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://konstruktor.net/podrobnnee-det/items/additivnyye-tehnologii-v-rossijskoj-promyshlennosti.html>], свободный (дата обращения: 15.12.2015).
2. Довбыш В.М. Аддитивные технологии и изделия из металла / В.М. Довбыш, П.В. Забеднов, М.А. Зленко [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://nami.ru/uploads/docs/centr_technology_docs/55a62fc89524bAT_metall.pdf, свободный (дата обращения: 15.12.2015).
3. Каблов В.Е. Применение 3D-принтеров в промышленности. Аддитивные технологии: перспективы 3D-печати в промышленности // Атомный эксперт. – 2014. – № 5–6. – С. 56–61.
4. Зленко М. Аддитивные технологии в опытно-литейном производстве. Технологии литья металлов и пластмасс с использованием синтез-моделей и синтез-форм / М. Зленко, П. Забеднов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://3d_print.jofo.ru/503562.html, свободный (дата обращения: 15.12.2015).
5. Бочкарев М.Н. Оптические светоизлучающие диоды / М.Н. Бочкарев, А.Г. Витухновский, М.А. Каткова. – Нижний Новгород: Деком, 2011. – 359 с.
6. Пономаренко С.А. Достижения и проблемы современной органической электроники // Междисциплинарный семинар МГУ «На стыке наук и идей» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.nanometer.ru/2013/04/09/konferencia_331195.html, свободный (дата обращения: 15.12.2015).
7. Витухновский А.Г. Органическая фотоника: успехи и разочарования // УФН. – 2013. – Т. 183, № 6. – С. 653–657. – DOI: 10.3367/UFN.0183.201306g.0653.
8. Алешин А.Н. Органическая оптоэлектроника на основе композитных (полимер-неорганические наночастицы) материалов // УФН. – 2013. – Т. 183, № 6. – С. 657–664. – DOI: 10.3367/UFN.0183.201306i.0657.
9. Jiyoul Lee. Reliable and Uniform Thin-Film Transistor Arrays Based on Inkjet-Printed Polymer Semiconductors for Full Color Reflective Displays / Jiyoul Lee, Do Hwan Kim, Joo-Young Kim et al. // *Advanced Materials*. November 6, 2013. – Vol. 25, Issue 41. – P. 5886–5892. – DOI: 10.1002/adma.201301257.
10. Ефремов А.А. Печатная электроника / А.А. Ефремов, Ю.В. Кохтина, А.В. Нисан, Н.И. Павлов // М.: Изд-во ЗАО «НИИИТ», 2013. – 56 с.
11. Копылова Т.Н. Органическая электроника в Томске / Т.Н. Копылова, Р.М. Гадиров, Е.Н. Никонова и др. // *Электронная промышленность*. – 2014. – №1. – С. 96–99.
12. Копылова Т.Н. Спонтанное и вынужденное излучение сополифлуоренов при фото- и электровозбуждении. / Т.Н. Копылова, Р.М. Гадиров, К.М. Дегтяренко и др. // *Высокомолекулярные соединения*. Сер. Б. – 2014. – Т. 56, № 4. – С. 355–370.
13. Туев В.И. Развитие аддитивной принтерной технологии в электронике: технологии получения тонких пленок органических полупроводников, металлических проводников, диэлектриков и образовательные ресурсы на их основе / В.И. Туев, Н.Д. Малютин, Т.Н. Копылова и др. / 25-я Международная конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»: матер. конф., 6–12 сентября 2015 г. – Севастополь, Крым, Россия, 2015. – С. 679–682.
14. Туев В.И. Развитие аддитивных принтерных технологий в электронике / В.И. Туев, Н.Д. Малютин, Т.Н. Копылова и др. / под ред. Н.Д. Малютина. Томск: Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2015. – 69 с.
15. CD «Образовательная программа профессиональной переподготовки и учебно-методический комплекс в области формирования покрытий и материалов методами струйной принтерной печати» / рук. Н.Д. Малютин. – Томск, 2014.

16. Технологии органической и печатной электроники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cyclone-oled.com/>, свободный (дата обращения: 15.12.2015).
17. Ink Print технология [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.akkolab.ru/ru/specialization/lnk-print-tehnologija.html>, свободный (дата обращения: 15.12.2015).
18. Российская научно-техническая конференция с международным участием «Гибкая электроника» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.eltech.ru/ru/universitet/konferencii-forumy-seminary/gibkaaya-elektronika-2015>, свободный (дата обращения: 15.12.2015).
19. Sun Innovations [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sunrussia.com/about/>, свободный (дата обращения: 15.12.2015).
20. Пат. № 2310676 РФ М. кл. C09K11/06, C07F3/06, C07D215/24 Электролюминесцентный материал, содержащий органическое люминесцентное вещество / И.К. Якущенко, М.Г. Каплунов, С.С. Красникова. Оpubл. 20.11.2007.
21. Патент № 2368641. РФ М. кл. C09K11/06, C07D263/57, C07D277/66, C07F3/06 H05B33/14. Электролюминесцентный материал, содержащий органическое люминесцентное вещество / И.К. Якущенко, М.Г. Каплунов, С.С. Красникова. Оpubл. 27.09.2009.
22. Красникова С.С. Эксплексные спектры электролюминесценции в новых органических материалах на основе цинковых комплексов с сульфаниламинозамещенными бензотиазолами и хинолинами / С.С. Красникова, М.Г. Каплунов, С.Л. Никитенко, И.К. Якущенко // Всерос. конф. «Фотоника органических и гибридных наноструктур». Черноголовка, 5–9 сентября 2011 г.: тезисы докл. Черноголовка, 2011. – 84 с.
23. Каплунов М.Г. Эксплексное излучение светодиодов на основе цинковых комплексов с сульфаниламинозамещенными лигандами / М.Г. Каплунов, С.С. Красникова, С.Л. Никитенко, И.К. Якущенко // Российские нанотехнологии. – 2012. – № 7–8. – С. 91–95.
24. Лупонос Ю.Н. Разветвленные олигомеры на основе трифениламина для органической электроники / Ю.Н. Лупонос, А.Н. Солодухин, С.А. Пономаренко // Высокомолекулярные соединения. Сер. С. – 2014. – Т. 56, № 1. – 111 с.
25. Борщёв О.В. Самоорганизующиеся органические полупроводники для монослойных полевых транзисторов / О.В. Борщёв, С.А. Пономаренко // Высокомолекулярные соединения. Сер. С. – 2014. – Т. 56, № 1. – 33 с.
26. Переверзев А.Ю. Кинетика фотолуминесценции кристаллических пленок олиготиофен-фениленсилана / А.Ю. Переверзев, Н.С. Иовлев, А.В. Власова и др. // Вестник Моск. ун-та. Сер. 3: Физика. Астрономия. 2012. – № 4. – С. 86–89.
27. Балашова И.О. Материалы для органических светоизлучающих диодов на основе производных 1,3,4-оксадиазола [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.isuct.ru/book/archive/xmlui/bitstream/handle/123456790/10192/04291234.doc?sequence=2>, свободный (дата обращения: 15.12.2015).
28. Patent: 6,874,699 US Int.cl. B05B 1/08. Methods and apparatus for precisely dispensing microvolumes of fluids / B.J. Larson, C.H. Lee, A. Lal, and M.G. Lagally – data of Patent 05.04.2005.
29. Прохоренко П.П. Ультразвуковой капиллярный эффект / П.П. Прохоренко, Н.В. Дежкунов, Г.Е. Коновалов; под ред. В.В. Клубовича. – Минск: Наука и техника, – 1981. – 135 с.
30. Cheun H. Polymer light emitting diodes and poly(di-n-octylfluorene) thin films as fabricated with a microfluidics applicator / H. Cheun, P.P. Rugheimer, B.J. Larson et al. // Journal of Applied Physics 100. – 2006. – 073510.
31. Larson B.J. Controlled deposition of picoliter amounts of fluid using an ultrasonically driven micropipette / B.J. Larson, S.D. Gillmor, and M.G. Lagally // Review of Scientific Instruments 75. – 2004. – P. 832–836.
32. Larson B.J. New technologies for fabricating biological microarrays: Ph.D. thesis. – Madison, Wisconsin, USA: University of Wisconsin-Madison, 2005.
33. Yang B. Template-directed carbon nanotube network using self-organized Si-nanocrystals / B. Yang, M.S. Marcus, D.G. Keppel et al. – Applied Physics Letters. – 2005. – 86. – 263107.
34. Barnes D. Deposition of sample sand sample matrix for enhancing the sensitivity of matrix-assisted laser desorption / D. Barnes, M. Vestling, B.J. Larson and M.G. Lagally / Ionization mass spectrometry. – USPTO Application. – # 11/025,349.
35. Cheun H. Nearterm aging and thermal behavior of polyfluorene in various aggregation states / H. Cheun, B. Tanto, W. Chunwaschirasiri et al. // Applied Physics Letters. – 2004. – № 84. – P. 22–24.
36. Johnson P. GIX Microplotter II: Manual // USA: SonoPlot. – 2011. – 71 p.

37. SonoPlot Microplotter GIX II. URL [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.sonoplot.com/products/Gix-Microplotter-II, свободный (дата обращения: 25.05.2013).
38. Здрок А.Е. Исследование технологии плоттерной печати изделий полимерной электроники // Научная сессия ТУСУР–2014: матер. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 14–16 мая 2014 г.: в 5 ч. – Томск: В-Спектр, 2014. – Ч. 1. – С. 180–183.
39. Artishchev S.A. Analysis of influence of annealing parameters on electrical resistance of printed electronics elements / S.A. Artishchev, A.E. Zdrok, A.G. Loschilov, N.D. Maljutin // *Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo)*, 2014. 24-th International Crimean Conference. Sevastopol. – 2014. – P. 690 – 691 (engl.,rus.). – DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959587. IEEE Conference Publications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=6959587&queryText%3DMalyutin+N.D>.
40. Артищев С.А. Измерительный стенд для контроля электрических параметров функциональных слоев изделий органической электроники / С.А. Артищев, А.А. Бомбизов, А.Е. Здрок, А.Г. Лошилов // *Электронные средства и системы управления: матер. докл. X Междунар. науч.-практ. конф. (12–14 ноября 2014 г.): в 2 ч. – Ч. 2.* – Томск: В-Спектр, – 2014. – С. 208–212 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tusur.ru/ru/science/events/conferences/archive/>, свободный (дата обращения: 15.12.2015).
41. Туев В.И. Измерение сопротивлений двухполюсников с применением импульсного сигнала // *Изв. Том. политех. ун-та.* – 2006. – № 1. – С. 178–182.
42. Семёнов Э.В. Нелинейная рефлектометрия с применением видеоимпульсных тестовых сигналов // *Изв. Том. политех. ун-та.* – 2006. – Т. 307, № 3. – С. 153–155.
43. Лошилов А.Г. Измерительный комплекс для исследования электрических и оптических характеристик органических светодиодных матриц / А.Г. Лошилов, М.А. Лазько, А.А. Бомбизов и др. // *Электронные средства и системы управления: матер. докл. X Междунар. науч.-практ. конф. (12–14 ноября 2014 г.): в 2 ч. – Ч. 2.* – Томск: В-Спектр, – 2014. – С. 209–214. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tusur.ru/ru/science/events/conferences/archive/>, свободный (дата обращения: 15.12.2015).
44. Allanurov A.M. Problem of Ink Evaporation while using Plotter Systems to Manufacture Printed Electronic Products / A.M. Allanurov, A.Ye. Zdrok, A.G. Loschilov, N.D. Malyutin // *Procedia Technology.* – 2014. – Vol. 18. – P. 19–24. – Elsevier Ltd. DOI:10.1016/j.proty.2014.11.006 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.sciencedirect.com. International workshop on Innovations in Information and Communication Science and Technology, ICST 2014, 3–5 September 2014, Warsaw, Poland (engl.).
45. Аллануров А.М. Проблема испарения чернил при эксплуатации плоттерных систем изготовления изделий печатной электроники / А.М. Аллануров, А.Е. Здрок, А.Г. Лошилов, Н.Д. Малютин // *Электронные средства и системы управления: матер. докл. X Междунар. науч.-практ. конф. (12–14 ноября 2014 г.): в 2 ч. – Ч. 2.* – Томск: В-Спектр, 2014. – С. 218–223 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tusur.ru/ru/science/events/conferences/archive/>, свободный (дата обращения: 15.12.2015).
46. Здрок А.Е. Исследование электрических характеристик пьезоэлектрического дозатора плоттерной системы печати / А.Е. Здрок, А.Г. Лошилов, С.А. Артищев // *Электронные средства и системы управления: матер. докл. X Междунар. науч.-практ. конф., Томск 12–14 ноября 2014 г.* – Томск: В-Спектр, 2014. – Ч. 2. – С. 214–217 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tusur.ru/ru/science/events/conferences/archive/>, свободный (дата обращения: 15.12.2015).
47. Решение о выдаче патента на полезную модель от 20.07.2015 по заявке №2015106378/12(010359) от 25.02.2015. Устройство плоттерной печати / Здрок А.Е., Аллануров А.М., Лошилов А.Г., Малютин Н.Д., Гумерова Г.И., Штенина Л.С.

Туев Василий Иванович

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф.

радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга (РЭТЭМ) ТУСУРа

Тел.: +7 (382-2) 70-15-06

Эл. почта: tvi_retem@main.tusur.ru

Малютин Николай Дмитриевич

Д-р техн. наук, профессор, директор НИИ Систем электрической связи ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 52-79-42
Эл. почта: ndm@main.tusur.ru

Лоцилов Антон Геннадьевич

Канд. техн. наук, зав. каф. конструирования узлов и деталей РЭА ТУСУРа
Тел.: +7-906-947-69-20
Эл. почта: yogl@main.ru

Артишев Сергей Александрович

Мл. науч. сотрудник специального конструкторского бюро «Смена» ТУСУРа
Тел.: +7-952-805-11-97
Эл. почта: 824tusur@mail.ru

Здрок Анна Ефимовна

Инженер специального конструкторского бюро «Смена»
Тел.: +7-952-888-68-83
Эл. почта: kunder@mail.ru

Аллануров Артем Мурадович

Инженер каф. конструирования узлов и деталей РЭА ТУСУРа
Тел.: +7-923-425-92-60
Эл. почта: gogzarh@mail.ru

Бомбизов Александр Александрович

Мл. науч. сотрудник специального конструкторского бюро «Смена»
Тел.: +7-903-951-15-24
Эл. почта: uncllelab@gmail.ru

Караульных Сергей Павлович

Инженер специального конструкторского бюро «Смена»
Тел.: +7-952-805-11-99
Эл. почта: ksgmo289@gmail.ru

Макаров Илья Михайлович

Инженер специального конструкторского бюро «Смена»
Тел.: +7-952-886-59-40
Эл. почта: videi@mail.ru

Убайчин Антон Викторович

Ст. науч. сотрудник специального конструкторского бюро «Смена»
Тел.: +7-952-883-67-67
Эл. почта: dualog@mail.ru

Tuev V.I., Malyutin N.D., Loschilov A.G., Artischev S.A., Zdrok A.E., Allanurov A.M.,
Bombizov A.A., Karaulnykh S.P., Makarov I.M., Ubaychin A.V.

Application of the additive printer (plotter) technology in electronics to form films from organic and inorganic materials

The state-of-the-art review about the use of printer (plotter) technologies in electronics has been carried out. The features of producing metal conductors, organic semiconductors films and dielectrics are considered. The classification and short description of processing equipment used for printing with inorganic and organic solutions (inks) are given. The printing technologies for transport and light-emitting layers, isolating films and conductive metal layers are described. The special attention is paid to the means to measure the films parameters and the functional printed electronics devices. The information on plotters improvement is provided.

Keywords: printer technologies, metal conductors printing technology, organic semiconductors films, plotters for contact way films deposition, transport layers printing technology, light emitting layers printing technology, dielectric films printing technology, films parameters and printing electronics devices measurements, of plotters modernization.