

ПЕЧАТНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

ЧТО ЭТО ТАКОЕ, КАК ОНА СОЗДАЕТСЯ, ЧЕГО ОТ НЕЕ ЖДАТЬ? ЧАСТЬ I



В.Шурыгина

Возможность применения процессов полиграфии для изготовления электронных компонентов (беспроводных устройств, таких как радиочастотные идентификаторы, компоненты дисплеев, микросхем) исследуется с начала этого столетия многими частными компаниями, государственными научными организациями, вузами. Эти процессы для мира электроники, безусловно, новы, и технологии формирования компонентов отличаются от традиционных. Правда, технология "печати" изображения, травления и гравировки уже широко используется при производстве печатных плат. Совместное применение новых так называемых функциональных чернил (со свойствами проводников, полупроводников и диэлектриков) и современных полиграфических платформ (глубокой, флексографской, струйной печати, гравировки) позволяет существенно снизить стоимость изделий электронной техники, увеличить эффективность их производства, создавать гибкие приборы с улучшенными рабочими характеристиками, повышенной надежностью и экологической безопасностью. Сегодня в мире уже более 3000 компаний, специализирующихся в области печати, электроники, материалах, средств упаковки, разрабатывают печатные и тонкопленочные электронные компоненты и устройства. Некоторые из этих изделий (такие как устройства преобразования световой или солнечной энергии в электроэнергию) уже представлены на рынке, и спрос на них непрерывно растет. Другие же, например печатные транзисторы, которые разрабатываются более 500 организациями мира, только-только появляются на рынке. Что же достигнуто в области печатной электроники, и какие препятствия стоят на пути развития этой новой отрасли, которая, по мнению многих экспертов, по объему производства может превзойти полупроводниковую промышленность?

ТЕХНОЛОГИЯ ПЕЧАТИ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

Печатная технология формирования полупроводниковых приборов, которая основана на разнообразных и отработанных методах печати, позволяет значительно увеличить производительность их изготовления. Но в то время как традиционная печатная техника создает изображения, хорошо воспринимаемые невооруженным глазом, при изготовлении электронных устройств необходимо получать их требуемые электрические, механические и оптические свойства. Независимо от метода печати для изготовления печатных электронных приборов нужны самые современные технологии и оборудование. Практически любая техника печати пригодна для изготовления печатной электроники, но при этом для различных типов приборов существуют предпочтительные методы и материалы. Возможно объединение нескольких методов для создания прибора. Но каждая техника имеет свои достоинства и недостатки.

Струйная печать – одна из самых популярных технологий создания печатной электроники. Поскольку это цифровая технология, для формирования электронного устройства достаточно иметь задающий печать файл, описывающий его конструкцию. Эта технология перспективна для быстрого производства опытных образцов и партий специализированных приборов, хотя она и пригодна для массового производства печатной электроники. К достоинствам струйной печати относятся достаточно высокое разрешение (80–100- $\frac{1}{4}$ m линий), гибкость, относительно низкая стоимость и совместимость почти с любым типом подложек. Ожидается, что совершенствование оборудования струйной печати позволит формировать элементы с разрешением 20 $\frac{1}{4}$ m линий. В результате струйная печать будет все шире использоваться для создания печатной электроники.

Трафаретная печать – еще одна популярная технология, применяемая для изготовления печатных электронных устройств путем продавливания пасты через соответствующий трафарет. Эта технология может использоваться для нанесения пленок относительно большой толщины на разнообразные подложки за один этап. Но она не позволяет получать

очень тонкие пленки. Долгое время считалась, что разрешение трафаретной печати невелико, однако современное оборудование позволяет изготавливать элементы размером до 40 \AA . При этом края линий более четкие, чем у линий, формируемых струйной печатью.

Нанолитография – относительно новая технология, основанная на традиционной фотолитографии. На подложку методом центрифугирования или осаждения наносится жидкий резист, на котором с помощью трехмерного штампа формируется требуемый рисунок элементов (рис.1а). Пленка резиста отверждается либо путем нагрева, либо с помощью УФ-излучения (рис.1б). После удаления штампа отвержденный резист сохраняет его форму (рис.1в), а оставшаяся пленка стравливается (рис.1г). Структурированный резист может использоваться либо в качестве шаблона для формирования рисунка последующих слоев прибора, либо как функциональный слой прибора. Разрешение этой технологии ограничено лишь разрешением процесса изготовления штампа. Ширина линий может составлять 20 нм. Основная трудность – формирование резистивных материалов с нужными электрическими и оптическими свойствами.

МАТЕРИАЛЫ ПЕЧАТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Неорганические материалы

Современная промышленная технология печати позволяет получать рисунок на любых подложках – от стеклянных достаточно большой толщины до тонких пластмассовых листов шириной 2 м и длиной до нескольких километров – и даже на бумаге. Хотя, как правило, понятие "печатная электроника" считают синонимом органической электроники, для изготовления печатных компонентов могут использоваться как органические, так и неорганические материалы, а также и те, и другие совместно (рис.2). К числу неорганических материалов, пригодных для создания печатных элементов, относятся металлические наночастицы, например серебра, растворенные в жидком носителе квантоворазмерные частицы крем-

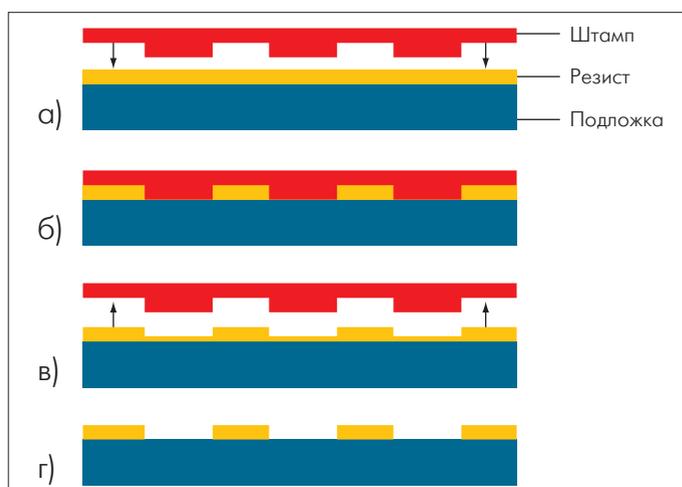


Рис. 1. Последовательность операций нанолитографии

Назначение пленки	Логические схемы	Схемы памяти	Фото-вольтаика	Батареи	Датчики	Дисплеи	
						Излучающие	Не излучающие
Полу проводник	Dark Green	Dark Green	Dark Green	Red	Dark Green	Dark Green	Red
Диэлектрик	Dark Green	Dark Green	Dark Green	White	White	Dark Green	Red
Электролит	White	White	White	Dark Green	White	White	White
Проводник	Dark Green	Dark Green	Dark Green	Dark Green	Dark Green	Dark Green	Dark Green
Пассивация / защита	Dark Green	Dark Green	Dark Green	Red	Red	Red	Red
Подложка	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red

Рис. 2. Применение материалов для изготовления основных элементов печатной электроники. Темно-зеленым цветом обозначены элементы, для которых наиболее перспективны неорганические материалы, светло-зеленым – элементы для которых перспективны гибридные решения с использованием органических и неорганических материалов и красным цветом – элементы на органических материалах

ния, пасты на основе их сплавов. Эти неорганические материалы, позволяют формировать печатные схемы, которые стоят во много раз меньше, чем традиционные устройства, отличаются низким удельным сопротивлением и большей стабильностью параметров. Неорганические материалы уже достаточно широко используются в печатной электронике: металлические пасты – для создания проводников обогреваемых ветровых стекол, в мембранных клавиатурах и печатных платах, а также в датчиках тест-полосок для измерения содержания глюкозы в крови, ежегодный объем продаж которых превышает много миллиардов штук. В 2009 году возросло применение неорганических материалов при изготовлении электрофоретических, электролюминесцентных и электрохромных индикаторов, ламинированных батарей, тонкопленочных фотофольтаических компонентов на основе диселенида галлия-индия-меди (CuInGaSe_2) или теллурида кадмия.

Большое внимание сейчас уделяется оксидам металла, в частности оксиду цинка, для изготовления печатных электронных компонентов. Согласно данным ученых Кембриджского университета, представленным на крупнейшей европейской конференции Printed Electronics Europe, которая прошла в начале апреля 2010 года в Дрездене (Германия), соотношение рабочие характеристики – стоимость приборов на основе оксидов металла весьма привлекательно, хотя пока такие приборы могут быть несколько дороже устройств, выполненных на органических материалах (рис.3). Но возможно, в будущем не нужен будет высокотемпературный отжиг подложек из оксида металла, приводящий к их удорожанию, тогда как останутся такие весьма перспективные свойства выполненных на их основе приборов, как высокие значения подвижности носителей и отношение токов в состояниях включено–выключено.

Сейчас отмечают ученые Кембриджского университета, освоено первое поколение технологии применения оксидов металла в печатной электронике: формирование прозрачных проводящих покрытий при изготовлении пассивных мат-

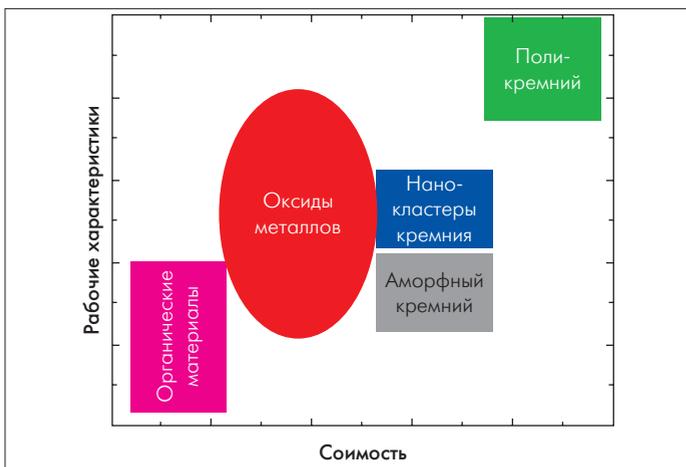


Рис.3. Соотношение рабочие характеристики—стоимость различных материалов, предназначенных для изготовления электронных компонентов

риц ЖКД и солнечных элементов (СЭ). В дальнейшем оксиды металлов найдут применение при изготовлении прозрачных компонентов и систем (рис.4). Особый интерес разработчиков печатной электроники вызывает оксид цинка, который иногда называют полупроводниковым соединением А2В6. Хотя рассматривать этот материал как "новый кремний" рано, возможности его применения как для изготовления печатных транзисторов, так и тонкопленочных нанокристаллических пьезоэлектрических компонентов уже очевидны.

Интерес представляют разработанные в 2009 году компанией NanoGram кремниевые чернила, формируемые с помощью запатентованного метода лазерного пиролиза. Аддитивный процесс печати с использованием чернил на основе наночастиц кремния позволяет получать тонкие пленки кремния большой площади, пригодные для создания кремниевых батарей и транзисторов. Компании удалось решить задачу формирования стабильных неагломерированных наночастиц заданных размеров и с заданным разбросом их значений. Исключена возможность окисления частиц. Разработаны методы контролируемого легирования кремниевых частиц. Разработчики сообщают, что по подвижности носителей транзисторы на основе таких пленок кремния превосходят устройства на аморфном кремнии. Предполагается, что им удастся по-



Рис.4. Перспективы применения оксидов металла для формирования прозрачных электронных устройств

лучить подвижность, равную $100 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, хотя такая подвижность и не нужна для транзисторов системных плат дисплеев, которые компания намерена изготавливать с использованием этих кремниевых чернил. Компании и организации, занимающиеся получением пригодных для печати кремниевых чернил, считают, что преемником кремния станет... кремний.

Не меньше усилий прилагают различные компании и организации к изучению возможностей применения в печатной электронике нанопроводов оксида цинка, которые, по мнению многих исследователей, позволят улучшить характеристики СЭ на основе сенсibilизированных красок, выполняемых сейчас на пленках TiO_2 . Тонкие пленки ZnO -нанопроводников смогут стать накопителями пьезоэлектрической энергии, пригодными для применения в микроэлектромагнитных системах. Нанопровода оксида цинка используются и для создания тонкопленочных лазеров. Имеются сведения о разработке ламинарного лазера на основе оксида цинка, выращенного на специально обработанном подстилающем слое поликристаллического материала, с изолированными границами зерен. Ведутся работы по созданию лазеров на SiO_2/ZnO .

Для формирования печатных проводящих линий с хорошими характеристиками чаще всего применяют серебряные пасты с размером частиц всего в 3 нм. Такие пасты позволяют сократить объем используемого серебра и температуру отжига, благодаря чему можно применять дешевые полимерные подложки. Серебряные проводящие линии используются в печатных схемах клавиатур, устройств для испытания аккумуляторов, одноразовых медицинских предметах ухода, разнообразных гаджетах: "говорящих" скатертях, встроенных в подушки радиоприемниках, интерактивных игровых приставках.

Однако сейчас разработчики элементов печатной электроники все больше внимания уделяют медным печатным линиям. Так, в 2009 году американские компании NovaCentrix и Applied Nanotech Holdings предложили чернила для формирования медных проводящих линий, которые позволяют исключить образование на них изолирующих пленок оксидов. К тому же таким чернилам не свойственны убийственно высокие цены серебряных паст. На конференции Printed Electronics Asia, состоявшейся в октябре 2009 года, компания Hitachi Chemical сообщила о разработке чернил, содержащих медные частицы размером 10–100 нм, которые пригодны для струйной печати и не требуют для нее специальных условий. Удельное сопротивление позолоченных медных пленок, напечатанных с помощью таких чернил, составляет 6 Ом·см, что близко к значению удельного сопротивления объемной меди — 1,7 Ом·см. Процесс отжига мост проводится при температуре ниже 200°C, а иногда и ниже 100°C.

Компания Intrinsic Materials в апреле 2010 года объявила о выпуске стабильных чернил с содержанием меди 12% по массе. Чернила отверждаются на воздухе при комнатной темпе-

ратуре в результате фотоионизации. Их можно использовать с стандартными установками струйной печати для печати на разнообразных подложках, в том числе на бумаге, полиимидных подложках и на подложках с пленками FR4. При этом по значению получаемого удельного сопротивления покрытия они не уступают серебряным чернилам с большим содержанием металла. Массовое производство новых чернил планируется на середину 2010 года.

Здесь стоит рассмотреть требования к подложкам, предназначенным для изготовления печатной электроники на основе неорганических материалов. Считается, что практически для всей печатной электроники нужны относительно недорогие, гибкие подложки высокой степени чистоты, с гладкой поверхностью и высокими температурными характеристиками. Широкое применение бумаги, пленок целлюлозы и полипропиленового упаковочного материала в качестве подложек ожидается не ранее, чем лет через десять. Это объясняется тем, что многие процессы формирования печатных электронных компонентов с помощью неорганических чернил предусматривают высокие температуры отжига. Вот почему сейчас основное внимание уделяется подложкам из нержавеющей стали или полиимида, тогда как даже применение стеклянных подложек вызывает затруднения.

Но возможно эти прогнозы не оправдаются. Сегодня активно разрабатываются не требующие высокотемпературного осаждения или отжига новые чернила и процедуры печати, такие как ВЧ-напыление при температуре окружающей среды или УФ-отжиг. Так, в 2010 году отделение материалов микросхем компании Dupont выпустило серебряные чернила марки 7723 с низкой температурой обжига, пригодные для печати на стеклянной подложке, и чернила марки 9169 с высокой удельной проводимостью и хорошей адгезией к гибким подложкам с слоем оксида индия и олова. Чернила предназначены для изготовления элементов сенсорных экранов и органических светодиодов (OLED). Температура формирования проводящих линий с помощью чернил на основе серебра, разработанных компанией Xerox и названных "серебряной пулей", составляет всего 140°C (температура плавления распространенных полимеров – полипропилена или поливинилхлорида – составляет 175 и 150°C соответственно). Таким образом, появилась возможность печати электронных схем практически на любом материале, включая ткань, пластиковые листы и полимерную пленку. Xerox уже выпустила первые образцы новых чернил и сейчас ведет переговоры с производителями электронных устройств о коммерческих поставках нового материала.

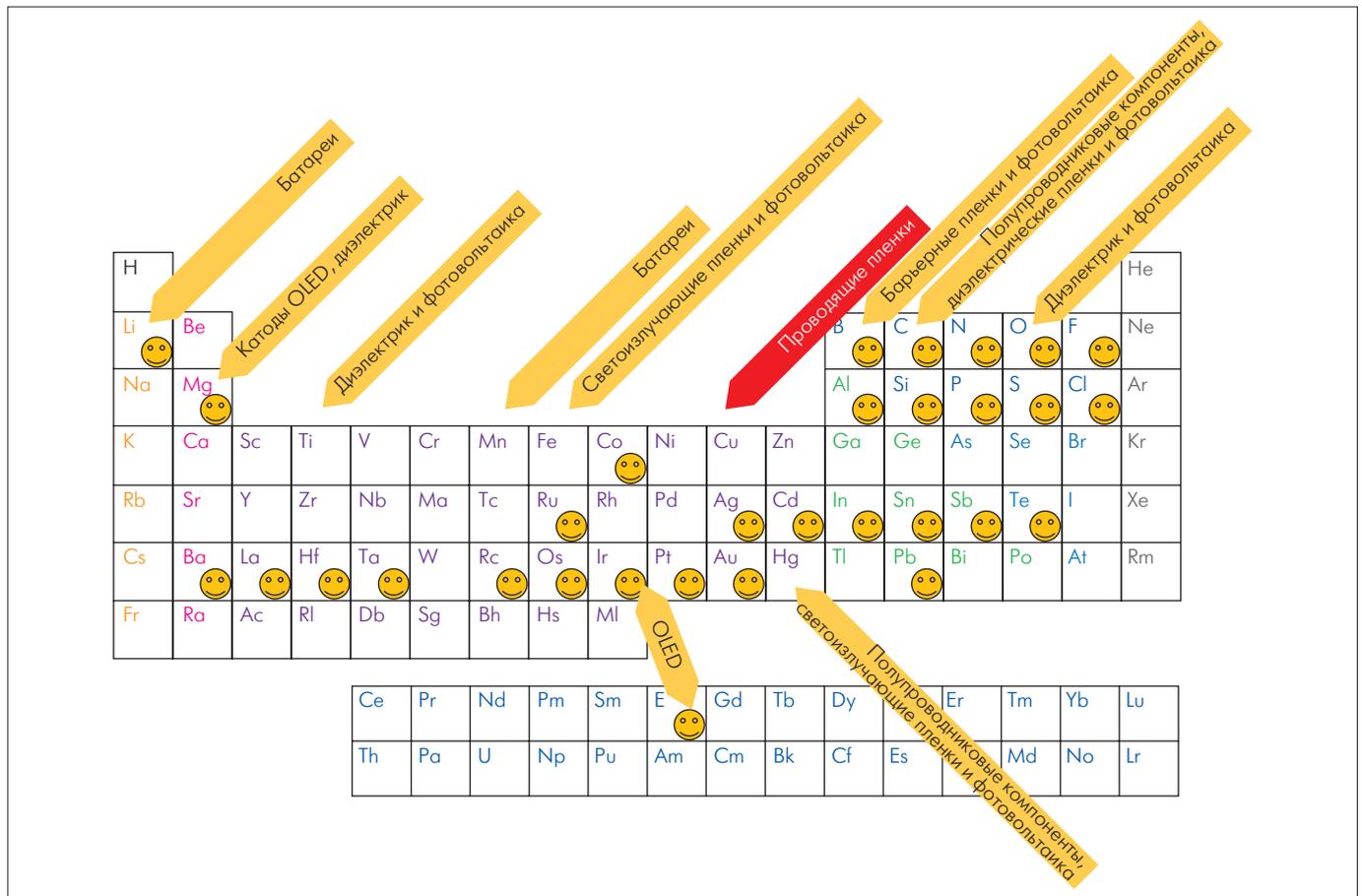


Рис.5. Наиболее широко используемые в печатной электронике материалы (стрелки желтого цвета указывают элементы, используемые элементы, применяемые в соединениях и в качестве примесей при изготовлении указанных компонентов, красная стрелка – элементы, применяемые при изготовлении компонентов)

Компания NovaCentrix в конце 2008 года на выставке Printed Electronics USA продемонстрировала систему PulseForge, позволяющую отжигать даже металлические пленки, напечатанные на бумаге. Технология, получившая название "мгновенного" отжига (flash annealing), заключается в поглощении пленкой достаточно большой энергии при кратковременном (менее чем 50 нс) освещении комплектом ламп нужных участков. В результате активизировались работы по созданию печатной электроники на бумаге.

Неорганические материалы находят применение и в органических печатных компонентах:

- оксиды и нитриды бора, алюминия, титана – в качестве барьерных слоев, препятствующих проникновению воды и кислорода в прибор;
- алюминий, медь, серебро, оксид индия и олова – для формирования проводящих линий;
- кальций и магний – как материалы катодов;
- CoFe – для получения нанодотов;
- иридий и европий – для создания светоизлучающих слоев (рис.5).

Многие компании, чтобы снизить стоимость печатной электроники, разрабатывают устройства, содержащие как печатные транзисторы на основе оксидов металла, так и органические транзисторы. К таким компаниям, "сидящим на двух стульях", относятся Toppan Printing и Samsung. С целью завоевания многомиллиардного рынка печатной электроники, многие компании, в том числе Kodak, Merck Chemical, Solvay, Agfa и Ваег при содействии Кембриджского университета и Университета Токио значительно расширяют номенклатуру своей продукции и выпускают как неорганические, так и органические материалы, а также их соединения, пригодные для изготовления печатной электроники.

По данным компании IDTechEx (Великобритания), в 2019 году на долю "чистых" и композиционных (в сочетании с органическими материалами) неорганических материалов придется ~50,7% (или ~28,98 млрд. долл.) всего рынка печатной электроники, равного 57,16 млрд. долл. Таким образом, очевидно значение неорганических материалов для печатной электроники и возможности, открывающиеся перед компаниями, которые их разрабатывают.

Органические материалы

Органическая печатная электроника своим появлением обязана открытию в 70-е годы прошлого столетия полупроводниковых свойств сопряженных полимеров*. В отличие от обычных полупроводников, пленки таких полимеров представляют собой смесь химических веществ с дырочной и электронной проводимостью, границы раздела которых распределены по

* За исследования в области структуры и механизмов проводимости в органических проводниках Алан Хигер, Алан Мак-Диармид и Хидэки Сиракава в 2000 году были удостоены Нобелевской премии по химии.

всему трехмерному объему пленки. Органические материалы легче, эластичнее и дешевле неорганических материалов. Для формирования электронных устройств с помощью стандартной струйной печати при комнатной температуре и атмосферном давлении их можно переводить в жидкое состояние. Они отличаются механической гибкостью, возможностью регулировки функциональных свойств прибора (например, изменение цвета излучения органических светодиодов) за счет модификации химического состава. Органическая электроника – перспективный и инновационный раздел электроники, который в первую очередь позволит коренным образом изменить разработку и производство устройств отображения информации и быстро, с минимальными затратами, наладить серийный выпуск легких и гибких дисплеев. Органические материалы перспективны и для изготовления многих новых печатных электронных устройств, которые не могут быть созданы с помощью традиционных технологий (например, электронную бумагу, интеллектуальные/гибкие окна и т.п.) и к производительности которых не предъявляются высокие требования. Ожидается, что органические проводящие полимеры будут играть важную роль в такой новейшей науке, как молекулярная компьютерная техника.

Сегодня существуют разнообразные пригодные для печати органические материалы с проводящими, полупроводниковыми и диэлектрическими свойствами. Наиболее широко в печатной электронике используются молекулы малых размеров, полимеры, олигомеры. Наиболее популярный материал, относящийся к классу молекул малых размеров, – пентацен, который используется при создании OLED. Однако этот материал трудно получать в виде чернил, в результате чего более 90% OLED изготавливаются с помощью вакуумного осаждения малых молекул.

На основе материалов класса малых молекул изготавливаются и органические полевые транзисторы, подвижность носителей которых составляет $5 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

Полимеры – материалы с большим молекулярным весом – состоят из длинных цепей повторяющихся звеньев макромолекул, которые предоставляют широкие возможности управления электронными и химическими свойствами материала. Возможность печати и универсальность этих материалов обуславливают перспективность их применения в печатной электронике.

К недостаткам полимеров относятся на порядок меньшая, чем у малых молекул подвижность носителей заряда и трудности очистки. Из-за недостаточно безупречного контроля процессов полимеризации в них часто присутствует остаточный катализатор полимеризации или примеси.

Чаще всего полимеры используются для формирования проводящих линий, хотя по значению проводимости они близки к полупроводникам. Поэтому их в основном применяют в устройствах, в которых для получения токопроводящих

соединений традиционно используется поликремний – датчиках и транзисторах (для соединительных панелей дисплеев и RFID-устройств).

Интерес представляет разработанный учеными Принстонского университета метод восстановления проводимости полимеров, которая уменьшается при приготовлении раствора для струйной печати. Путем обработки полученных струйной печатью слоев специальной кислотой утраченные внутренние связи полимера восстанавливаются, и тем самым восстанавливается его проводимость. С помощью разработанной технологии в университете созданы пластмассовые транзисторы со встречно-гребенчатой структурой областей истока и стока.

Олигомеры представляют собой короткоцепные полимеры с хорошими молекулярными характеристиками и малым молекулярным весом. Этот материал пригоден как для печати, так и для вакуумного осаждения. Однако пока олигомеры не находят широкого применения в печатной электронике

Органические материалы, особенно полимеры, в отличие от неорганических, непригодны для формирования слоев с высоко упорядоченными структурой и границами раздела. В результате проводимость и подвижность носителей заряда печатных органических полупроводниковых компонентов ниже, чем у устройств на неорганических материалах. К тому же в большинстве органических полупроводниковых материалах подвижность дырок намного выше, чем электронов. В результате до последнего времени на основе органических материалов удавалось изготавливать лишь р-канальные МОП-транзисторы.

Задачу получения органических материалов с электронной проводимостью и создания n-канальных МОП-транзисторов первой удалось решить компании Polyera (США). Исследовательская группа компании получила полимер с высоко упорядоченной основной цепью молекул, обеспечивающей эффективный перенос носителей в полимерной структуре. Подвижность электронов органического полевого транзистора на основе нового полимера составляет $3 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Полимер хорошо взаимодействует с органическим растворителем, что позволяет получать жидкую субстанцию, пригодную для струйной и глубокой печати органических компонентов на пластмассовую подложку и даже на бумагу. Он характеризуется высокой стабильностью при эксплуатации и не подвержен воздействию окружающей среды. Его можно сочетать с другими органическими материалами для создания печатных КМОП-микросхем.

Компания уже предлагает новые чернила под торговой маркой ActiveInk N-series. Разработчики отмечают, что появление микросхем для ПК и мобильных телефонов на основе нового органического полупроводника маловероятно. Его основные области применения, прежде всего, устройства радиочастотной идентификации (RFID), органические дисплеи и датчики.



Рис.6. Возможности применения неорганических (слева) и органических (справа) материалов в печатной электронике

Таким образом, перед разработчиками материалов для печатной электроники стоит дилемма: надо ли искать новые неорганические материалы или стоит сосредоточиться на улучшении свойств существующих органических материалов. Компании принимают различные решения. Но обе технологии со своими достоинствами и недостатками существуют совместно (рис.6).

С точки зрения перспективности для выполнения разнообразных печатных устройств все больше внимания сегодня уделяется графену и другим структурам углерода (рис.7). Многие фирмы активизируют работы по увеличению удельной проводимости графена – дешевого органического материала. Цель этих работ – существенно снизить стоимость формирования проводящих линий за счет применения графена вместо серебряных чернил.

Углеродные нанотрубки (УНТ) могут служить альтернативой органическим и неорганическим пленкам с полупроводниковыми свойствами. Правда, сейчас их широкому применению препятствует высокая стоимость. Но этот показатель с появлением новых достаточно дешевых процессов массового производства будет быстро снижаться. Первоначально УНТ, характеризующиеся высокой проводимостью, найдут применение при создании проводящих линий печатных элект-

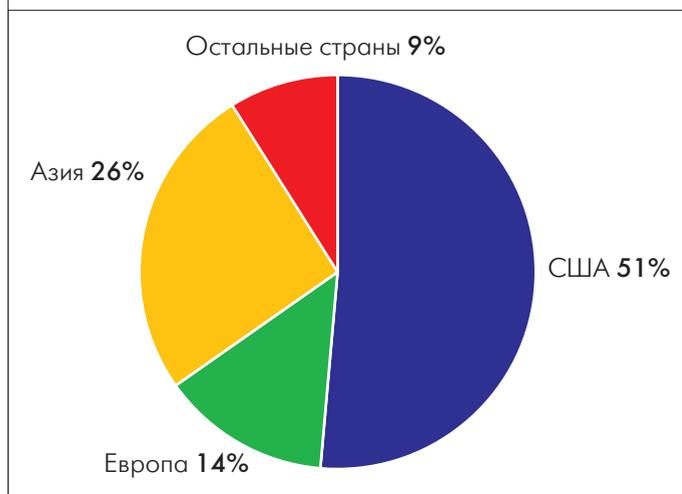


Рис.7. Распределение мировых компаний, работающих в области применения углеродных трубок и графена в печатной электронике

ронных схем. А поскольку УНТ могут быть прозрачными, гибкими и даже эластичными, они смогут заменить оксид индия и олова в сенсорных экранах, фотоэлектрических устройствах, а также использоваться в качестве шин объединительных плат дисплеев.

Интерес к УНТ обусловлен и значительно более высокой подвижностью носителей, чем у кремния, благодаря чему они перспективны для изготовления транзисторов с высокой скоростью переключения. Возможность получения пригодных для печати растворов на основе УНТ позволит производить с низкими затратами электронные устройства с высокими характеристиками на подложках больших размеров. Правда, пока необходимо улучшить свойства, используемого для получения УНТ материала, который отличается низкой кристаллическостью, малой чистотой и достаточно высокой плотностью дефектов упаковки. Необходимо также усовершенствовать процессы изготовления конкретных электронных устройств, в том числе методы разделения пленок УНТ с металлическими и полупроводниковыми свойствами, которые сосуществуют вместе после синтеза, а также обеспечить хорошую дисперсию в растворе и способы удаления из нанесенной пленки поверхностно-активных присадок. Стоит и задача получения подходящих диэлектриков. Однако УНТ сулят большие возможности. Сейчас ряд фирм продают УНТ с металлическими и полупроводниковыми свойствами, выращенные различными методами. Правда, как правило, это необработанный материал, поставляемый малыми партиями.

По данным IDTechEx, опрошенные ею 78 компаний и академических институтов, исследующих возможности применения УНТ и графена, ожидают, что объем разработок приборов на основе УНТ в последующие пять лет возрастет на 300%.

Компании Северной Америки основное внимание уделяют изучению однослойных УНТ, тогда как компании азиатских и европейских стран – многослойным трубкам. При этом первое место занимают японские компании, в том числе Showa Denko, Mitsui и Hodogaya Chemical, второе место – китайские производители.

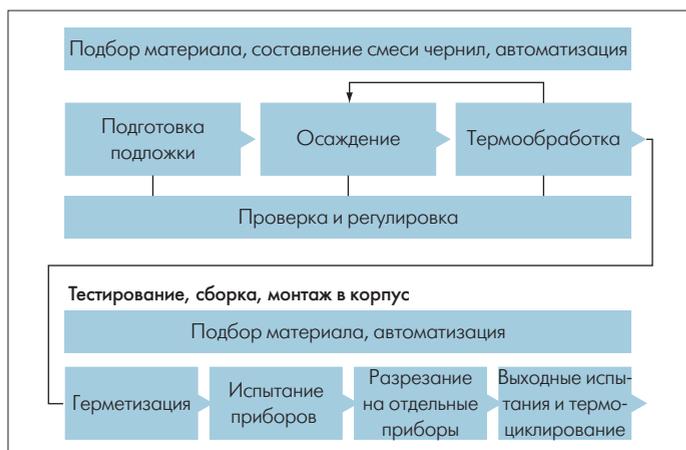


Рис.8. Процесс производства печатной полупроводниковой схемы

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Основные процессы производства печатных полупроводниковых приборов аналогичны традиционным. Но вместе с тем они выполняются гораздо быстрее и проще. К тому же они "зеленее". Для производства прибора печатной электроники требуется бригада из десятка людей и несколько часов или дней, а затраты составляют лишь незначительную долю затрат на производство традиционного устройства.

Процесс производства начинается с составления пригодных для печати чернил на основе материалов, обеспечивающих требуемые механические, электрические и оптические свойства печатных элементов. Этот процесс аналогичен операции легирования при изготовлении полупроводникового прибора, но намного проще и гибче. При составлении состава для струйной печати особое внимание уделяется его вязкости и поверхностному натяжению с тем, чтобы чернила не прилипали к соплу. При трафаретной печати вязкость чернила должна быть невысокой. При этом вязкость и поверхностное натяжение необходимо регулировать так, чтобы попадающие на поверхность подложки чернила хорошо связывались с ее поверхностью и формировали пленку с гладкой поверхностью и требуемым сопротивлением.

Функциональные слои последовательно наносятся на соответствующим образом обработанную подложку (рис.8), причем перед нанесением следующего слоя напечатанный слой сушится. Для ускорения процесса сушки и улучшения электрических характеристик каждый слой отжигается, что особенно важно при печати проводящих серебряных чернил, содержащих частицы серебра, заключенные в полимере.

Готовые печатные электронные устройства герметизируются, тестируются и разделяются на отдельные приборы с помощью автоматизированной лазерной системы или системы резки стекла. Процесс изготовления завершается выходным контролем и термоциклированием.

Особый интерес для производителей печатной электроники представляет процесс печати с рулона на рулон. Этот известный типографский процесс печати газет при использовании новых материалов перспективен для массового производства нового класса дешевых изделий – тонких, как бумага, батарей, OLED, схем памяти, RFID-меток, СЭ и панелей, способных генерировать энергию до 1,5 кВт.

Наибольших успехов в освоении техники печати электронных устройств с рулона на рулон добилась, пожалуй, компания PolyIC, объявившая о печати с рулона на рулон устройства памяти емкостью 20 бит. При этом компания использовала технологию норвежской фирмы Thin Film Electronics (ThinFilms), разрабатываемую с 1994 года. Все разработки в этой области весьма любопытны, хотя, по мнению ряда экспертов, печать электронных устройств с рулона на рулон еще требует доработки.

Правда, на последней конференции Printed Electronics Europe 2010 компания Coatema Coating Machinery представила

вила многофункциональное оборудование для экономически эффективной печати с рулона на рулон малых партий устройств, созданных в ходе НИОКР. В установку, названную Smartcoater, входят такие средства нанесения покрытий и печати, как ракель, щелевая экструзионная головка, вращающийся барабан, гравированный валик, ламинатор. Ширина рабочей площадки установки составляет 100 мм, что позволяет минимизировать потребление чернил при выполнении НИОКР. Установка также содержит взрывозащищенное 350-мм сушильное устройство с обдувом горячим воздухом. Наличие трех-четырех электромоторов, загрузочных ячеек и возможность работы с обратным ходом позволяет легко осваивать производство небольших партий устройств.

Усилия разработчиков новых органических и неорганических материалов, чернил, производственных процессов и оборудования привели к появлению разнообразных гибких, малогабаритных печатных компонентов и схем. Последние достижения в области печатной электроники будут рассмотрены в следующем номере журнала.