

Проблемы печатных и одноразовых чипов

Почему новые чернила и новые подходы к печати открывают новые возможности для электроники — и создают множество новых проблем.

**Сьюзен Рэмбо
(Susan Rambo)
Эд Сперлинг
(Ed Sperling)**

**Перевод:
Сергей Шихов**

sergey@aconf.ru

Печать недорогих чипов по технологии, разработанной для газет и журналов, обретает все большую популярность в самых различных приложениях — от фотоэлектрических элементов до датчиков на гибкой подложке. Впрочем, и добавляет множество новых проблем, уникальных для этого метода.

Мир гибкой гибридной электроники (FHE) — печать интегральных микросхем, или прикрепление тонких микросхем на гибкую подложку, — весьма далек от обсуждений разработок толщиной 3 нм и производственных методов, и даже от чипов со смешанным сигналом в одном корпусе. Вероятно, печатные чипы никогда не заменят сложные SoC или не смогут справиться с задачами вычисления, которые легко решают старые кремниевые технологии. Но все же это не просто научный эксперимент. Печатные чипы уже не только используются повсюду — от мониторинга температуры и вибрации в производственных операциях до гибких датчиков, которые крепятся к коже, но и тестировались для таких устройств, где не подходят жесткие чипы или их сложно заменить.

То, насколько далеко продвинулось развитие технологии печатных чипов, во многом зависит от сегмента рынка и типа применяемой технологии печати. Следующая задача состоит в том, чтобы добавить процессы, позволяющие использовать полупроводники в приложениях, для которых критически важными являются миссия и безопасность.

«Существует идея, что вскоре каждый объект будет иметь свой датчик, — говорит Мэтью Дайсон, специалист по технологиям в IDTechEX. — У вас будут датчики на фабриках для отслеживания температуры или для чего угодно, что вы пожелаете, и это будет относительно дешево. Например, у вас есть коробка с таблетками, и вы хотите отслеживать их температуру или потребление. Вы ставите на упаковку маленький датчик, и он записывает температуру и то, приняли ли вы таблетку. Теперь вопрос в том, сколько возможностей обработки вы вкладываете в продукт и сколько во что-то еще. То есть возникает компромисс, поскольку если вы отдаете большую часть обработки датчику, его исполнение становится дороже, и тогда вам нужно передавать меньше данных. А если вы только собираете данные и ничего с ними не делаете, тогда вам надо отправить всю информацию куда-то еще. А каждый бит пересылаемой инфор-

мации требует энергии, и откуда тогда вы получите всю эту энергию?»

Сегодня печатные чипы становятся все более важным элементом, и потребность в них только возрастает. В настоящее время по всему миру ведется работа, цель которой — найти оптимальный компромисс между обработкой на месте и обработкой в облаке.

Инновационные технологии

Многие из этих подходов полагаются на существующие печатные технологии. Струйная печать превалирует в небольших объемах устройств, где она доказала свою экономичность, но это относительно медленный вариант. Известны такие технологии, как офсетная и глубокая печать, которые обрели популярность благодаря возможности печатать точные слои в больших объемах. Технология глубокой печати, использующая изображения, выгравированные на пластинах, восходит к 1800-м годам, когда с ее помощью создавались высококачественные художественные репродукции. Офсетная печать долгое время была распространена в газетном деле. Кроме того, существующее оборудование применялось для литографии чипов при создании более сложных структур на гибкой подложке.

Но настоящая инновация касается не столько печатных процессов, сколько химического состава и стабильности чернил и их соединения с подложкой. Как и во всех полупроводниках, основной упор делается на повторяемость, согласованность и экономию на масштабе, и такие усилия выходят далеко за рамки простой печати чернилами. Это касается и того, как чипы нарезаются, как соединяются с подложкой и насколько точно и надежно они откалиброваны.

«Глубокая и офсетная печать быстрые и имеют отличное качество кромки, а аэрозольные чернила хороши для прототипирования, — говорит Натан Преториус, инженер по прототипированию и автоматизации в NextFlex. — Но мы выяснили, что калибровка должна выполняться после установки кристаллов. Если вы печатаете что-то, сама печать может создавать нагрузку для устройства и удерживать его в этом состоянии, а потому вам необходимо откалибровать чип. Для ВЧ-кристалла нужно реорганизовать линию передачи, и сделать это на гибкой подложке».

Окисление создает еще одну проблему. «Вам необходим материал, который не будет создавать окисную пленку, — говорит Преториус. — То есть у вас не должно быть отверстий под кристаллом».

Все это оказывает влияние на производство данных устройств и их дальнейшее использование. Например, исследовательская лаборатория BBC совместно с UES Inc. разрабатывает датчики для мониторинга газов на постоянной основе, а не просто для измерения кумулятивного воздействия, как большинство современных подобных устройств.

«Требования были таковы, что это должен был быть металлооксидный датчик, обязательно гибкий и с конформной полосой, — отметил Майкл Бродерс, технический программный менеджер в UES. — Если вы посмотрите на многие сегодняшние датчики, то увидите, что они большие и требуют много энергии. Существует острая необходимость в гибких носимых датчиках, в основном одноразовых, крупную партию которых можно создать за несколько часов в одноразовых форм-факторах. Они должны работать примерно на 100 мВ и обнаруживать органические растворители, а диэлектрики должны быть устойчивыми».

В UES есть много направлений деятельности в этой сфере. Другим примером того, какими маленькими могут быть подобные устройства, является пластиковый датчик для подмышечной впадины Arm, который разрабатывался последние пару лет. Компания Arm создала органический полевой транзистор, реагирующий на органические соединения, такие как запах тела. «Если вы установите несколько подобных устройств и добавите машинное обучение, оно может классифицировать запах как одну из характеристик», — заметил Джон Биггс, соучредитель компании Arm и консультант по исследованиям и разработкам.

То, насколько данная технология может быть маленькой и тонкой, лишь один из множества вопросов, стоящих перед гибкой технологией. Другая проблема в том, насколько плотно можно напечатать линии и зазоры. Чем больше можно установить на гибкую подложку, тем полезнее будут эти устройства для множества различных приложений, от сложных датчиков со встроенной обработкой до одноразовых применений.

«Если вы смотрите на 32-битный микропроцессор, то это все еще сложно для печатной электроники, — говорит Биггс. — Использование тонких пленок на подложке все еще отстает от кремния на три-четыре десятилетия. Поэтому давайте о чипах в 1 мкм и 3–4 В. Даже если пластиковая электроника следует закону Мура, она не будет работать совершенно таким же образом».

Для некоторых приложений это не имеет значения. «Прямо сейчас вы можете установить трекер для занятий спортом или нанести «умную» маркировку на продукты питания или вино, чтобы продать до определенной даты, — говорит Биггс. — Но некоторые продукты питания портятся быстрее в зависимости от того, хранятся ли они в тени или на солнце».

Как убедиться, что эти устройства работают

Существуют значительно более сложные показатели, чем просто дата или цена продукта, для чего в основном используются сегодня такие чипы. Но это и значительно менее дорогой способ обеспечить качество на протяжении длительного времени, отсюда возникла необходимость исследования, что же по своей сути представляют одноразовые чипы?

«Мы пытаемся взять у сообщества печатных плат столько, сколько можем, — говорит Уилл Стоун, директор по печатной электронике в Brewer Science. — Мы создаем физическую нагрузку и нагрузку окружающей среды. Здесь есть две основные проблемы. В печатных платах вы пытаетесь сделать такие соединения — будь то проводящий эпоксидный припой или что-то еще, — которые могут выдержать движение, поскольку очевидно, что они не созданы для подобных целей. А второе — это сами дорожки. Простым сгибанием вы можете создать микротрещины. Мы проводим стандартный набор испытаний, в том числе в камерах окружающей среды и нагрузки, и выполняем тысячи или миллионы циклов сгибаний просто для того, чтобы убедиться в целостности устройства».

Впрочем, не все должно быть гибким. Даже без печати чего-либо на гибкую подложку чипы могут быть и достаточно маленькими, и достаточно тонкими, чтобы их можно было использовать во многих приложениях. Поэтому здесь понадобится металлооксидная литография, и если дорожки и зазоры относительно велики по сравнению с продвинутыми кремниевыми чипами, то это очень хорошо для множества приложений и устройств.

«Привлекательно то, что это дешево, — сказал Дайсон из IDTechEX. — Можно просто сделать вакуумное напыление и не использовать материалы, более гибкие, чем кремний, поскольку не придется проходить все стадии процесса получения пластины высокой чистоты. С обычным кремнием все иначе: сначала необходимо его добыть, затем довести до действительно высокой чистоты, сделать заготовки и нарезать их. А с напылением все гораздо проще — нужно просто иметь достаточно металлооксидных транзисторов, чтобы нанести RFID-метки, для которых предусмотрены крошечные кремниевые чипы. Они не гибкие, но это и неважно».

То же происходит и с MEMS-устройствами. Преториус из NextFlex отмечает, что для приложений последних поколений (высоких G) уменьшение толщины устройства с 700 до 450 мкм снижает его массу почти вдвое, что полезно для устройств, где нет традиционных чипов. «Они не совсем гибкие, но легче по весу, — говорит он. — Но мы обнаружили, что для устройств MEMS уменьшение толщины не может быть выполнено после обработки».

Компания NextFlex также экспериментировала с различными способами нарезки таких чипов, от самонарезки до применения лазера. Однако у каждого из этих способов есть

проблемы. Так, в многослойных устройствах лазеры могут блокироваться различными металлическими слоями. В других методах используется инструмент для нарезки (не очень пригодный для MEMS-чипов с вентиляционными отверстиями) и лазерная абляция, которая работает, но не является чистым решением.

При соединении тонких полужестких чипов с гибкой подложкой тоже возникают трудности. Например, есть такой вариант, как формирование столбиковых выводов, но получить качественное соединение между гибкой подложкой и столбиковым выводом, не нанеся вреда, очень сложно.

Уилл Стоун из Brewer говорит о похожих проблемах. «Чернила обычно достаточно стабильны, когда вы запускаете процесс, — отмечает он. — Мы используем эпоксидные припои, и многие из них были разработаны совсем не для гибких технологий. Мы действуем в «жестком» мире и пытаемся сделать его «гибким». Но в итоге это оказывается не очень просто. Любые из этих соединений становятся сильнейшей головной болью».

Стандарты, цепи поставок, тестирование

В настоящее время группы отраслевых стандартов занимаются подготовкой стандартов для гибкой гибридной электроники. «Для нее нет четких стандартов, — говорит Дайсон из IDTechEX. — Если вы хотите установить такое устройство в самолет, тогда да, стандарты существуют. Или вам нужно установить устройство в медицинское оборудование, спутник или куда-то еще — вы тоже найдете множество стандартов. Но это для системного уровня».

Отрасль гибкой гибридной электроники только зарождается и все еще находится на стадии венчурного/государственного финансирования. «Компании, занимающиеся гибкой гибридной электроникой, пока не зарабатывают никаких денег. Вы можете купить их продукцию, поскольку они выпускают крошечные объемы в качестве образцов, чтобы протестировать их и попытаться принять. Такие фирмы существуют за счет венчурных капиталов или грантов. Гибкие интегральные схемы — вы не можете просто пойти и купить их. Сможете ли вы приобрести их через пять лет? Скорее всего, да».

По этой причине сейчас сложно создать надежную и безопасную цепь поставок с множеством продавцов, предоставляющих качественные материалы. «Если вы делаете устройства, это значит, что вы не можете создать полную цепь поставок, потому что ваша цепь — это одна компания, — говорит Дайсон. — И эта компания заявляет: «Мы сделали продукт с X возможностями», и вы отвечаете: «Отлично, мы все оптимизируем и настроим наши процессы для этого». И тут компания банкротится. Вы у разбитого корыта. Тогда как если у вас есть стандарты, вы скажете: «ОК, нет проблем, я просто куплю это у кого-то другого». Если вы хотите про-

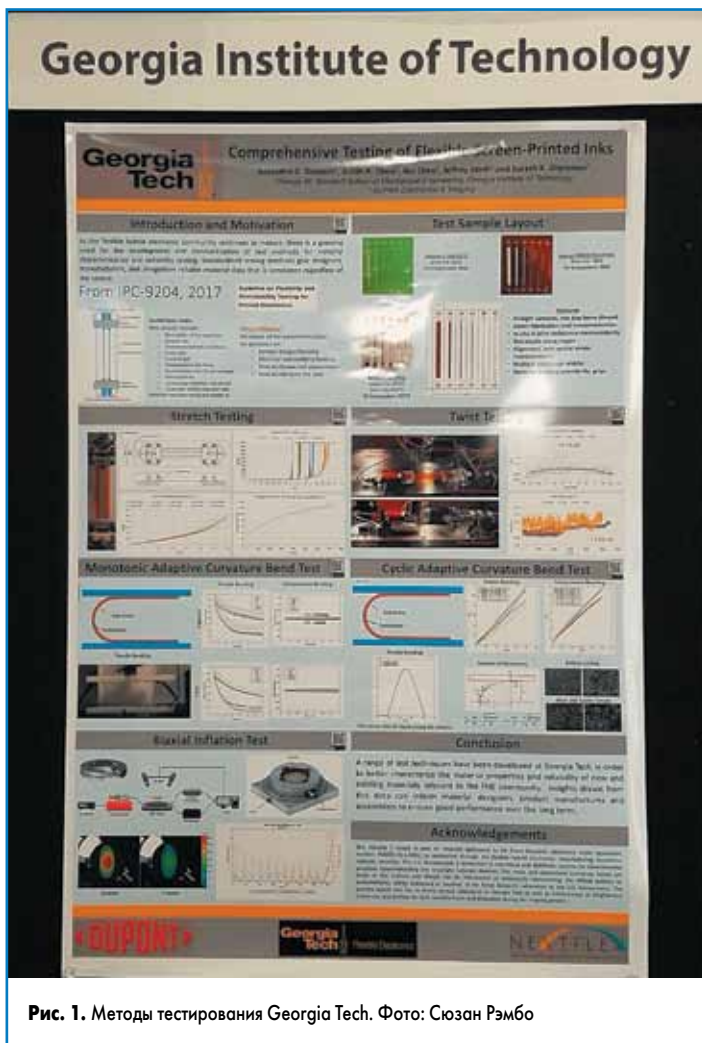


Рис. 1. Методы тестирования Georgia Tech. Фото: Сюзан Рэмбо

изводить в больших объемах и собираетесь инвестировать миллионы в производственную линию, вам следует знать, что вы сможете купить все материалы у кого угодно. Вам нужны стандартизированные материалы».

Стандарты корректируются отраслью. «Есть огромное количество устройств: некоторые из них очень нишевые, некоторые выпускаются массово, — поясняет Дайсон. — Есть гигантская разница между датчиками на моей одежде и датчиками на стеллажах. Это относительно небольшой по объему массовый рынок с дешевыми маленькими датчиками. А для какого-то миниатюрного гибкого устройства, которое установят внутри оружия, требования будут совершенно другие».

Даже для военных, которые покупают относительно небольшое количество специализированных продуктов, недостаток стандартов становится проблемой. «Надежность гибкой гибридной электроники очень ограничена. Многие из того, что есть, запатентовано. Это все очень усложняет, — говорит Джеймс Зунино, специалист по материалам Департамента инженерного анализа и производства вооружений Командного центра вооружений по развитию боевых возможностей США (CCDC AC). — Требуется много информации — материалы, чернила, подложки, покрытия, фактические устройства и условия окружающей среды, а также упаковка и межсоединения. Мы пытаемся поделиться большей частью этой информации, но пока она еще не очень хорошо распространяется».

Министерство обороны США предпочитает быть в курсе, откуда все приходит и кто имел с этим дело. «Для гибкой гибридной электроники есть очевидная нехватка всего, что касается квалификации и сертификации. А вам необходимо квалифицировать и сертифицировать материалы, оборудование, процессы и оператора. И если хоть один из них не известен или не вызывает доверия, то ваш конечный компонент никогда не будет необходимого вам качества, чтобы он мог использоваться безопасно, надежно и многократно, — говорит Зунино. — Как известно, Министерство обороны делает солидные инвестиции в гибкую гибридную электронику, производственные технологии и систе-

мы. Но повторю, механизмы отказов, интенсивность отказов, все протоколы исследований и все данные не определены должным образом, поэтому мы не делаем хорошую работу, рассказывая людям о том, что мы на самом деле хотим, так как мы сами еще не совсем уверены в том, что мы в точности хотим. Эта отрасль и технологии еще не прошли тот долгий путь, как другие продукты, которые мы выпускали в последние 100–150 лет. Поэтому модели для расчета надежности устройств гибкой гибридной электроники еще не до конца проработаны. Мы продолжаем создавать новые материалы, новые технологии и увеличивать разнообразие этих проблем, моделей, программного обеспечения и инструментария».

Конечно, военные имеют определенные жесткие требования. «У нас в Министерстве обороны есть дополнительные военные проблемы. Условия хранения и транспортировки Министерства обороны значительно отличаются от того, что принято в отрасли. У нас очень высокие перегрузки, иногда они составляют 50 000–150 000g. Сейчас мы приносим в нашу электронику целый гиперзвуковой мир с экстремальными температурами и влажностью. Поэтому нам нужны продукты, функционирующие и при -45 , и при -50 °C, и при экстремальной жаре $+76$ °C, где приходится работать нашим солдатам. Существуют такие места, где нашим солдатам приходилось работать при температуре $+79$ °C. И затем вы приносите гиперзвуковую систему, где вы теперь можете видеть температуры до $+1930$ °C, и вся электроника должна выдерживать это окружение при высокой ударной и вибрационной нагрузке. То есть если вы стреляете во что-то при 50 000g и это ударяет по чему-то, то возникает экстремальная ударная нагрузка, которую очень сложно протестировать или предсказать каким-то иным способом. И очень часто мы хотим, чтобы наши сотрудники просидели над чем-то 30 лет прежде, чем мы выстрелим во что-то при 50 000g, и это должно сработать».

Компания NextFlex, факультет машиностроения Georgia Tech имени Джорджа Вудраффа, штат Джорджия, США, компания Dupont и исследовательская лаборатория ВВС США работают над стандартами тестирования. «Действительно очень важно иметь стандарты для того, чтобы знать, как вы квалифицируете и оцениваете надежность материалов подобного типа», — говорит Бенджамин Стюарт, кандидат наук в области машиностроения в Georgia Tech, который работает над подготовкой стандартов для тестирования гибкой гибридной электроники и помогает создавать новые тестовые установки для гибких схем.

«Один человек говорит: «Мы увеличили производительность чернил на 30% и оценили этот уровень эффективности». Другой человек может



Рис. 2. Бенджамин Стюарт из Georgia Tech (выступление на конференции SEMI's FLEX/MEMS&Sensors в Сан-Хосе, Калифорния, 26 февраля 2020 года) рассказывает о новой тестовой установке, которую создал университет с партнерами. Установка позволяет проводить стандартизированное тестирование гибкости по одно- и двусосному растяжению гибких схем, чтобы измерить проводимость схемы при нагрузке. Университет Georgia Tech обнаружил, что одноосное растяжение меньше снижает проводимость, чем двусосное. Фото: Сюзан Рэмбо

Сергей ШИХОВ,
технический директор
«А-КОНТРАКТ»



В последнее время наблюдается бурное развитие всевозможных аддитивных технологий. Печатная электроника не исключение. Хорошо известны методы печати, используемые в типографиях, применение их в производстве электроники очень заманчиво. Пока данное направление делает первые шаги, но ведь и 3D-принтеры когда-то были не более чем игрушкой для техно-гиков. А сейчас 3D-принтеры широко используются для производства, в том числе и изделий ответственного применения (детали ракетного двигателя носителя Falcon тому пример).

выполнить иной похожий тест и получить совсем другие результаты, так как стандарты очень расплывчаты, — отметил Стюарт, подчеркнув, что свободные стандарты — признак незрелости сферы: — Мы сейчас находимся на ранней стадии зрелости. Так, один стандарт для использования в этой сфере называется «Руководство МПК по тестированию гибкости/растяжимости» (IPC guide line on flexibility/stretchability testing). Сейчас в этом руководстве написано: «Если вы хотите провести тест, просто расскажите нам все о вашем тестировании. Если возможно, опишите, как выглядит ваш образец. Каков его размер? Как много образцов вы будете тестировать? Какую скорость деформации вы использовали? Покажите нам ваши данные электрического теста относительно процента растяжения». То есть они просто говорят: «Скажите нам все, потому что мы не хотим говорить вам то, что важно. Просто скажите, что вы сделали, и мы можем посмотреть на это». То, чего здесь не хватает и что каждый действительно пытается понять (и это часть фокуса нашей группы), — это реально недостающие

рекомендованные параметры для каждого из этих пунктов. То есть если вы хотите быть в этом диапазоне скоростей деформации, если вы заинтересованы в этой области физики, если это ваше устройство, нужно сказать вам, какую скорость деформации вы должны использовать, какого размера должен быть ваш образец, и назвать другие данные».

Технологический институт Georgia Tech работает над определением того, как нужно проводить тестирование и каким стандартам важно соответствовать, включая создание тестовых образцов и тесты на растяжение, которые не будут загрязнены из-за проблем с соединителями (рис. 1). Факультет разработал тестовую установку для двусосного растяжения, которая создает стандарты растяжения и измерения результатов проводимости/сопротивления (рис. 2).

И наконец...

И наконец, то, что чипы дешевы, не означает, что они легко утилизируются. Большой вопрос в том, что делать с этими устройствами, когда они отработали свой ресурс.

«Это касается идеи прикреплять датчики на все, — говорит Дайсон из IDTechEx. — Если я установлю датчик на свою чашку для кофе, он, по идее, должен быть биоразлагаемым. Мне бы не хотелось тратить свое время на его разборку и хранить весь мой отработанный кремний в отдельной коробке. Это просто глупо. Поэтому вы должны иметь возможность переработать его. Но как вы это сделаете, ведь там столько различных материалов? Очень сложно перерабатывать вещи из различных материалов. Ваш кремний не будет биоразлагаемым. Оксид металла тоже не разлагается. Вы хотите, чтобы это было настолько дешево, что его можно просто выкинуть. И тогда возникают вопросы этики. Этично ли выбрасывать очень небольшое количество кремния? Люди беспокоятся по поводу биоразлагаемых подложек. Но они не беспокоятся по поводу биоразлагаемых чипов. До этого еще очень далеко».