

# Обновление технологий в российской электронной промышленности

**Производство средств информационной и вычислительной техники относится к высоким технологиям, требующим от специалистов высокой степени профессионализма. Безусловно, журнал, который вы держите в руках, может служить лишь введением в технологию электроники. Жизнь показывает, что успеха достигают лишь те специалисты-технологи, которые постоянно пополняют свою информационную базу, смело и обдуманно идут на эксперимент и в практике производства приобретают столь ценный опыт, позволяющий им уверенно чувствовать себя в управлении производством.**

**Аркадий Медведев,  
д. т. н.,  
профессор МАИ**

medvedevam@mtu-net.ru

## Введение

Со времен создания первых средств информационной и вычислительной техники (электронных, магнитных, релейных, пневматических, химических, оптических) главная тенденция развития этой техники состоит в стремлении к микроминиатюризации и повышению функциональности ее компонентов. Эта тенденция проявилась в изобретении транзисторов с последующей их интеграцией в микросхемы. Успехи технологии полупроводниковых микросхем создали для микроэлектроники приоритет перед другими принципами обработки информации и вычислений. Только в средствах коммуникации полупроводниковая электроника уступает волоконно-оптической технике. Но в обработке информации электронный принцип довлеет над другими.

Постоянное совершенствование микроэлектронной технологии, рост степени интеграции микросхем, увеличение функциональной насыщенности электронной аппаратуры и повышение производительности вычислительных процессов требуют постоянного роста плотности печатного монтажа, освоения новых технологий сборочно-монтажного производства, дальнейшего совершенствования технологического обеспечения надежности. Современные требования к электронным приборам и оборудованию заставляют все эти процессы идти со всевозрастающей скоростью.

Кардинально изменился подход к созданию электронной аппаратуры, которая должна одновременно обеспечивать высокое быстродействие, расширенный динамический диапазон, относительно малое энергопотребление, высокую чувствительность, повышенную стойкость к воздействию внешних факторов.

Постоянно увеличивается сложность конструкций средств информационной и вычислительной техники. При этом все более усложняются технологии их реализации. Совершенствование известных технологий сопровождается привлечением новых, без которых сегодня невозможно изготовить слож-

ный электронный узел. Растущие конструктивно-технологические требования к электронной аппаратуре особенно четко установлены именно в области информационной и вычислительной техники, поскольку увеличение производительности процессов обработки информации и вычислений находится в непосредственной зависимости от плотности межсоединений, так как время переключения элементов интегральных схем стало соизмеримым со временем задержки сигналов в линиях связи. Можно сказать, что основная тенденция развития технологий производства информационной и вычислительной техники — увеличение плотности межсоединений вслед за увеличением интеграции и миниатюризации электронных компонентов [1].

## Стратегия обновлений

В отечественной и зарубежной практике ведется непрерывный поиск новых и совершенствование известных методов межсоединений. Ежемесячно публикуются сотни патентов, описывающих новые процессы и операции, претендующие на новое слово в технологиях электронной аппаратуры. Среди достижений в технологии монтажа появлялись и методы, изобретение которых сопровождалось значительной рекламой, но на практике они либо оказались маловыгодными или ненадежными, либо нашли лишь ограниченное применение. Ежегодные международные конференции, симпозиумы по международной стандартизации способствуют в дискуссиях специалистов и практике использования отбору выверенных решений, на основе которых рождались базовые технологии. Именно для базовых общепринятых технологий разрабатываются и поставляются оборудование и материалы, создаются новые стандарты. На их основе строятся новые производства с многомиллионными вложениями капитала.

Конечно, как сказал один мудрец: «Если бы человечество придерживалось мнения большинства,

Земля до сих пор бы плавала на трех китах». Но технология — традиционно наиболее консервативная отрасль техники, она не терпит революций и развивается эволюционно. Промышленное освоение новых технологических принципов обходится слишком дорого, чтобы перестраивать под них производство без предварительного опробования в технологических лабораториях.

Сохранение конкурентоспособности продукции сегодня — далеко не простая задача. Гнет ценовой политики конкурентов, изменяющиеся стандарты, быстрое моральное устаревание изделий — вот только несколько факторов, определяющих конкурентоспособность электронных устройств на современном рынке. Чтобы сохранить на нем лидерство, необходимо предлагать дешевые изделия, легко подгоняемые под требования заказчика в процессе проектирования и пригодные для быстрого освоения крупносерийного производства.

Сегодня, в условиях рыночной экономики, особенно важно проявлять профессионализм в инвестировании производства, поскольку каждая даже, казалось бы, малозначительная ошибка может привести к большим экономическим потерям. В этом принципиальное отличие нашего времени от предыдущего периода затратной экономики, мало считавшейся с потерями ради дальнейшей цели. Поэтому, если задаваться целью модернизации производства с задумом на будущее, чтобы вложенные средства не обесценились уже на этапах завоевания рынка, нужно четко определить свои приоритеты в разделении производства рыночной продукции, а для этого нужно совершенно определенно знать современные достижения производства и тенденции его развития. Они не обязательно должны состоять в новых принципах технологий. Гораздо важнее проследить состояние принципов производства.

Например, что нового можно придумать в технологических принципах производства односторонних печатных плат? Согласитесь, все, как много лет назад. А принципы производства изменились до неузнаваемости для удешевления стоимости продукции. Достигается это полной автоматизацией процесса, начиная от загрузки плат в линию, высечки заготовки из листа, штамповки отверстий и пазов, трафаретной печати на всех операциях формирования рисунка и заканчивая валковым облуживанием монтажных элементов и упаковкой.

#### Тактика обновлений

Крупные мероприятия по комплексной модернизации, а тем более становлению производства, происходят не так уж часто, чтобы иметь для этого постоянно действующую специальную службу информационного обслуживания и импортных поставок оборудования. Информация о необходимых мероприятиях для проведения такой модернизации, как правило, черпается из нескольких внешних источников:

1. Изучение опыта других предприятий, которые уже произвели обновление технологической базы. Как правило, они видят в вас потенциальных конкурентов и не спешат делиться полной информацией.
2. Изучение рекламной информации, представляемой отечественными фирмами-поставщиками оборудования на внутрироссийских и международных семинарах, конференциях, выставках оборудования и материалов.
3. Выезд за рубеж для ознакомления с действующим производством. Но там после первых ваших вопросов сразу поймут, что имеют дело с профессионалами и потеряют желание делиться секретами.
4. Заказ технического проекта модернизации производства у инжиниринговой фирмы со всеми составляющими, свойственными инженерному проекту, такими как описание новых технологий, необходимое для их реализации дополнительное оборудование, материалы и инструмент, технологические планировки размещения оборудования, квалификационные требования к персоналу, технико-экономические показатели проекта (сбалансированный по производительности состав оборудования, объем капитальных затрат, себестоимость типовой продукции, маркетинг рынка, прибыль, рентабельность и окупаемость проекта).

На сегодняшний день выверенное решение по модернизации производства можно получить только от профессионального коллектива, повседневно занимающегося этими вопросами и отвечающего за конечный результат. Выбор профессионального партнера — наиболее сложная задача. В России проще назвать «флагманов» по напрасно затраченным финансовым ресурсам, вложенным в обновление производства без достижения обещанных результатов. Причиной таких неудач является отсутствие комплексного подхода к реконструкции производства и отсутствие ответственности партнеров за полученный результат после поставки оборудования. За этими неудачами следуют метания от одного партнера-поставщика оборудования к другому, излишнее дублирование оборудования на ответственных операциях, дополнительная покупка оборудования для исправления ошибок и неизбежное обращение, в конце концов, к профессиональному коллективу инжиниринговой фирмы.

Профессиональные фирмы-интеграторы не ограничивают свою деятельность поставкой оборудования, они поставляют технологический процесс, где оборудование является лишь составной частью комплексного проекта. Они владеют оценкой современного состояния и ближайшей перспективы развития технологий электронных изделий, чтобы при капитальных вложениях в развитие производства оптимизировать затраты на комплектование производства оборудованием — наиболее капиталоемкой составляющей инвестиций в обновление производства — с учетом задела на будущее.

Рост производства в российской электронной промышленности — неизбежный процесс, который уже начинают признавать и иностранные экономисты. Например, по оценкам общепризнанного американского специалиста-маркетолога Вальтера Кастинга [2], по темпам роста производства электроники Россия занимает второе место среди европейских стран — 8,2% в 2003 и 6,8% в 2004 году (на первом месте Чешская Республика — 11%), по объемам производства печатных плат Россия на третьем месте — \$465 млн (на первом месте Германия — \$958 млн, на втором Италия — \$482 млн). Конечно, Юго-Восточная Азия и по темпам роста, и по объемам производства электроники намного опережает Европу и США. Но интеллектуальный потенциал в развитии электроники остается приоритетом Запада, в том числе и России.

#### Место российского производства электроники на мировом рынке

Чтобы определить в своем положении на международном рынке разделения труда, россиянам приходится оглядываться и на Запад, и на Восток, чтобы правильно сориентироваться и использовать свои несомненные преимущества. В чем эти преимущества?

##### Первые

У нас остался еще инженерный потенциал, способный поднять и освоить в производстве любые сложные технологии. Это очень важно, что мы еще хорошо понимаем все новые технологические тонкости и готовы их осваивать при наличии соответствующего оборудования и материалов. При этом российские технологи мыслят более широко, воспринимая новые технологические принципы во всем комплексе проблем, что недоступно большинству иностранных специалистов (поверьте практике автора в общении с иностранными специалистами). В российских производствах в последнее время обнаруживается потребность в молодых кадрах с достойными предложениями зарплаты. И это вселяет надежду на дальнейшую поддержку и развитие нашего интеллектуального потенциала.

##### Вторые

В России относительно дешевые энергоресурсы и трудозатраты. Так, в цене продукта в Германии стоимость трудозатрат составляет 40%, в Китае 8%, в России 12–14%. Зато в Китае энергоресурсы составляют 36%, а у нас всего лишь 7–9%.

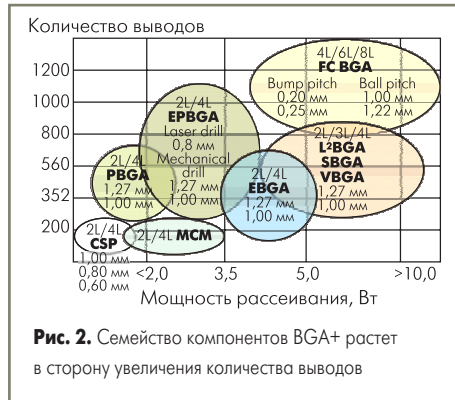
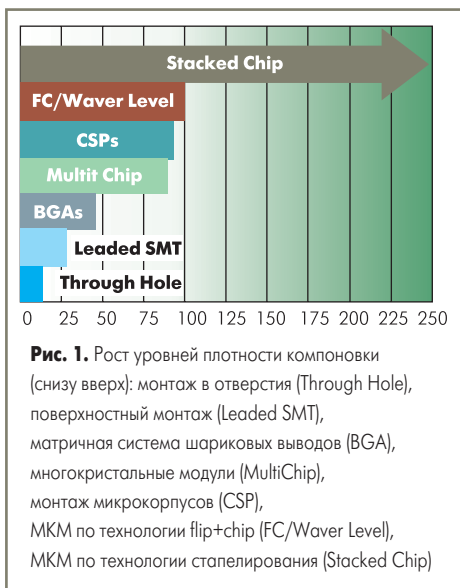
Тем не менее массовое производство электроники перемещается в Юго-Восточную Азию. Но структура продукции говорит о том, что сюда перемещается массовое производство относительно простой продукции. В США объемы производства электронных изделий упали с \$11,5 млрд в 2000 году до \$5,5 млрд в 2004, в Европе — с \$5,4 млрд до \$3 млрд за тот же период. В то же время в Юго-Восточной Азии наблюдается подъем с \$12 млрд до \$18 млрд — в основном за счет перемещения сюда простых продуктов массового спроса. Китай — просто большой сборочный цех. Хотя на самом деле, конечно, это очень не просто.

Можно попробовать соревноваться с Китаем в сборке электронных изделий, но судьба России не в этом. Пока в России не утрачен инженерный интеллект, лучшим продуктом наших предложений для рынка могут быть программно-аппаратные средства, в которых «железо» по стоимости составляет лишь 25%, остальное — программный продукт. Но если говорить только об электронной промышленности, то наше место — в производстве сложных изделий, недоступных европейцам и американцам по цене. Это возможно за счет наших дешевых энергоресурсов, относительно низких трудозатрат и высокого уровня образования. Такое положение России признают в откровенных беседах те же европейцы и китайцы, считая нас технологически более развитым.

**Общие задачи обновлений производства электронных изделий**

Проектные нормы печатных плат идут вслед за развитием элементной базы. Развитие микронных компонентов постоянно идет в направлении увеличения интеграции, производительности и функциональности. Этот процесс характеризуется увеличением плотности активных элементов на кристалле примерно на 75% в год, а это, в свою очередь, вызывает необходимость увеличения количества их выводов на корпусе на 40% в год [3]. Этим обуславливается постоянно растущий спрос на новые методы корпусирования, а вслед за этим — увеличения плотности межсоединений на печатной плате. На рис. 1 показаны направления развития технологий корпусирования, а на рис. 2 — пример развития корпусов с матричной системой выводов, из которого наглядно видна необходимость в уплотнении межсоединений на печатной плате, и в частности — в увеличении слойности и разрешения рисунка для размещения всех необходимых связей между монтажными элементами [4].

В результате общих тенденций площадь монтажных подложек уменьшается примерно на 7%, а физические размеры электронной аппаратуры — на 10–20% в год. Эта тенден-



ция поддерживается непрерывным увеличением плотности межсоединений за счет уменьшения элементов печатного монтажа: ширины проводников и зазоров, отверстий и контактных площадок, пространственного (послойного) распределения межслойных переходов за счет использования сквозных, глухих, слепых отверстий (рис. 3). Все это серьезно влияет на облик производства печатных плат: увеличивается стоимость основных фондов, объем прямых издержек, увеличивается временной цикл производства. В конечном итоге все это приводит к увеличению себестоимости плат. С другой стороны, условия конкуренции диктуют необходимость уменьшения рыночной стоимости плат.

Что касается технического уровня технологий печатных плат (ПП), сборки и монтажа компонентов, то они вынуждены развиваться параллельно и теми же темпами, что и за рубежом, поскольку эти технологии диктуются в первую очередь конструкциями корпусов компонентов. Это, конечно, не означает, что все производства будут перестраиваться под изготовление электронных изделий с высокой плотностью компоновки. Около 80% объемов будут загружены производством обычных, ставших уже привычными, изделий с использованием обычных компонентов. Направленность обновлений в этой части производства в основном будет состоять в снижении себестоимости продукции, в обновлении парка оборудования, подвергнувшегося физическому и моральному износу.

Но любое обновление, если на него выделяются средства, целесообразно строить из соображений создания высокотехнологичного производства, в котором можно было бы из-

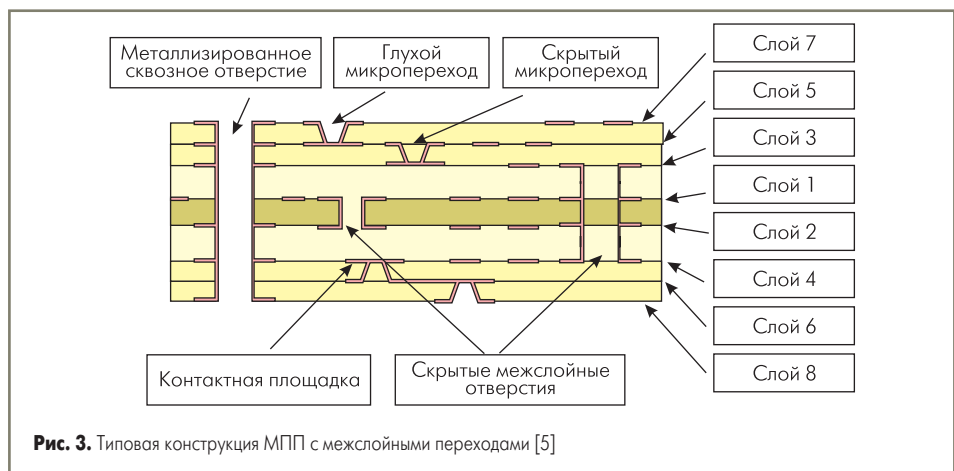
готавливать изделия по высоким проектным нормам, не доступным большинству конкурирующих предприятий. Поэтому производители электронных изделий рано или поздно сталкиваются с задачей перевооружения производства под новые потребности рынка.

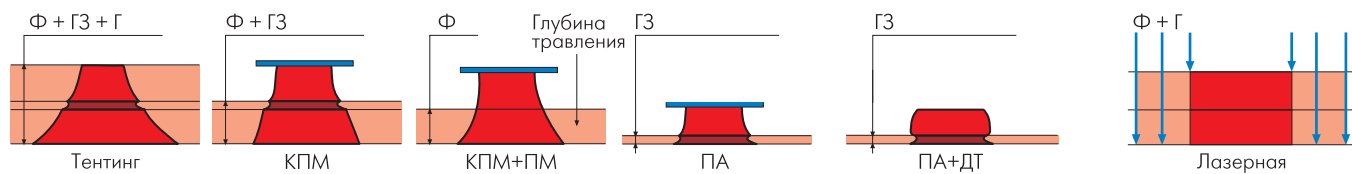
Чтобы сориентироваться в планах на будущее, рассмотрим наметившиеся тенденции развития технологий электронных изделий.

**Проектирование конструкций электронных изделий (CAD-CAM)**

Эта ответственная стадия создания изделий должна объединять усилия и знания профессионалов разного профиля: конструкторов, технологов, испытателей, специалистов по надежности, менеджеров. Концепция создания таких проектов впервые была провозглашена в 1996 году на международной конференции поверхностного монтажа (SMC — Surface Mount Council) и получила название DFX (Design For eXcellence). Позже ассоциация SMC выпустила документ SMC-WP-004, содержащий следующие блоки-разделы: Design for Success (Проектирование для обеспечения успеха), Design for Assembly (Проектирование с учетом требований сборки), Design for Fabrication (Проектирование с учетом требований производства), Design for Test (Проектирование с учетом требований контролепригодности), Design for Reliability (Проектирование для обеспечения надежности), Design for Environment (Проектирование для обеспечения устойчивости к внешним воздействиям). Авторы разделов — специалисты солидных фирм, сотрудничающих одновременно с IEC, IPC и SMC.

Концепции DFX устанавливают требования к сквозному проектированию, начиная от оптимизации выбора компонентов и проектирования печатных плат и заканчивая проектом внутрисхемного и функционального тестирования и испытаний с введением в конструкции плат дополнительных элементов для контактных щупов. В обстановке всемирной глобализации, когда проектировщик может быть географически или организационно удален от производителя, особенно важно установить общие правила и нормы проектирования, чтобы уменьшить издержки на отработку конструкторских решений применительно к реальному производству.





**Рис. 4.** Сопоставительная оценка разрешающей способности рисунка для различных технологических схем процессов:

Φ — толщина фольги, ГЗ — гальваническая затяжка (~ 6 мкм), Г — гальваническое меднение (~ 30 мкм), тентинг — общая металлизация по схеме тентинг-процесса, КПМ — комбинированный позитивный метод с использованием химической металлизации с гальванической затяжкой и металлизатора для защиты от травления, КПМ + ПМ — КПМ с системой прямой металлизации, ПА — полуаддитивный метод, ПА + ДТ — полуаддитивный метод с дифференциальным травлением (за счет разницы между глубиной травления и толщиной металлизации), лазерная — лазерное скрайбирование меди ультрафиолетовым лазером с дифференциальным травлением остатком меди в зазорах

Тем не менее в ходе подготовки производства неизбежно приходится адаптировать проекты заказчиков к реальным возможностям производства без ущерба качеству и функциональным характеристикам электронных изделий, которые заложены в выполненных с использованием САД-программ проектах заказчиков. При подготовке производства приходится использовать дополнительный пакет САД-САМ-программ, позволяющий проводить анализ проектов электронных изделий, чтобы обнаружить ошибки и оптимизировать проектные решения с учетом параметров конкретного производства и оборудования с ЧПУ.

САД-САМ-программы проверяют воспроизводимость в производстве конструктивных элементов, заложенных в проекте. Применительно к печатным платам, например, такими элементами являются зазоры между соседними элементами с учетом класса сложности ПП, недопустимые сужения проводников, нефункциональные контактные площадки (КП) на внутренних слоях, незавершенные цепи (зависающие проводники), неудобные для тонкого травления повороты проводников, слишком близкие сверления отверстий, которые могут вызвать поломку сверла. Необходимо проверить центрирование КП относительно сверлений, определить, соответствует ли диаметр КП диаметру сверления, есть ли такие металлизированные отверстия, которые могут вызвать короткое замыкание. Здесь перечислена лишь малая доля проверок, которые выполняет программа, чтобы гарантировать качество проектов у производителя.

Если к функциональному узлу предъявляются специфические требования, программа контроля проектов выполняет и эти проверки. Наиболее часто предъявляются требования по однородности волнового сопротивления открытых и закрытых двойных полосковых линий. Может подвергаться контролю реализация электромагнитной совместимости, распределение рассеиваемой мощности, контролепригодность электронного модуля для внутрисхемного тестирования и т. д.

Часто при проектировании печатных плат не выполняются специфические требования к поверхностному монтажу. Отсутствие в России общих стандартных норм проектирования (отсутствие соответствующих стандартов) приводит к многочисленным недоразумениям и конфликтам в контрактном производстве. Тема стандартизации сейчас очень

актуальна для российских специалистов (см. публикацию в этом выпуске).

Программы допроизводственного контроля проектов позволяют выявлять ошибки проектов на ранних стадиях подготовки производства и тем самым избежать значительных временных и финансовых издержек в ходе изготовления электронных изделий.

#### Схемы процессов изготовления ПП

Варианты схем выбирают, руководствуясь требуемым разрешением рисунка печатных плат [6]. Они во многом определяют реализуемые проектные нормы ПП и капитальные вложения в модернизацию производства. Об этом приходится говорить в связи с появлением моды на определенные схемы, например, на тентинг-процесс. Действительно, тентинг-процесс содержит меньше операций и, соответственно, требует меньше оборудования. Но издержки от осаждения и травления больших объемов меди и риска большого брака из-за возможных несовмещений рисунка пленочного фоторезиста с отверстиями заставляет осторожно оценивать его преимущества.

Так же трезво нужно относиться к процессам прямой металлизации. Сегодня, когда мы повсеместно используем субтрактивные методы (травление фольги), этот процесс прогрессивный. Избавление от необходимости химического меднения и гальванической затяжки, значительно большая надежность внутренних межсоединений в МПП создает ему большие преимущества. Но если кто-то связывает надежды с перспективой использования полуаддитивных методов для обеспечения лучшего разрешения рисунка, ему придется отказаться от процесса прямой металлизации и возвращаться к химическому меднению и к гальванической затяжке. В этом случае терять эти процессы на временном этапе использования субтрактивных методов не целесообразно, поскольку возврат к этим процес-

сам связан с дорогостоящей модернизацией химико-гальванической линии.

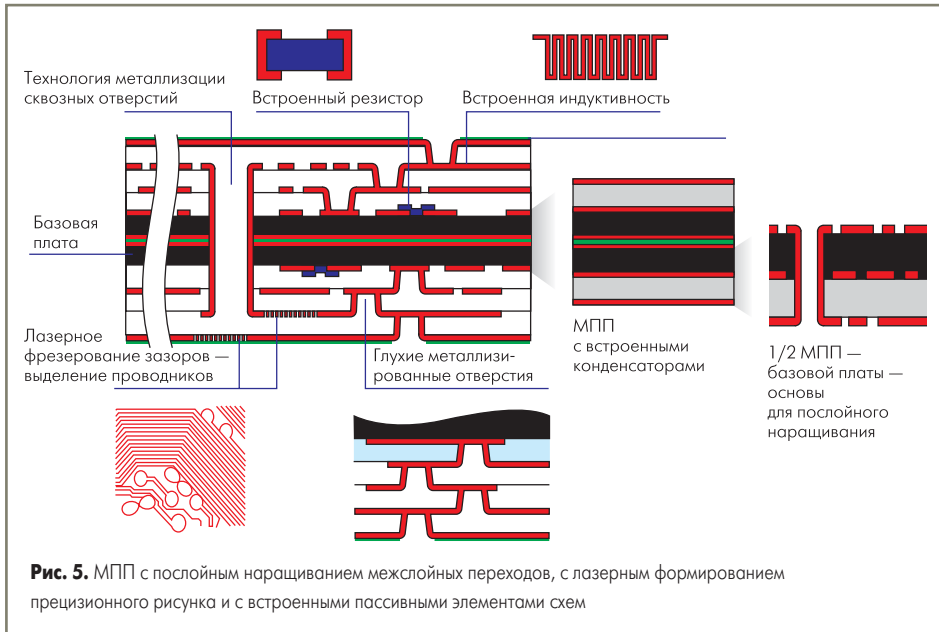
В последнее время началась техническая реализация лазерных методов формирования рисунка за счет испарения меди из зазоров. Этот процесс почти не связан с толщиной слоя меди, так как ему не свойственен эффект, связанный с боковым подтравливанием, величина зазора в рисунке определяется длиной волны и апертурой оптической системы, выделяющей из излучения область максимальной энергии. Надежда на распространение лазерного формирования рисунка поддерживается серийным выпуском соответствующих этой задаче ультрафиолетовых лазеров (в частности, Nd:YAG-лазеры с длиной волны 355 нм). Ультрафиолетовые лазеры позволяют воспроизвести в медном покрытии зазор шириной 20 мкм со скоростью 0,3 м/с [7]. Однако до конца (до основания) освободить зазор от меди не представляется возможным, поскольку по мере утончения фольги при ее испарении начинает нагреваться диэлектрик основания, что приводит к нежелательным эффектам — тепловому взрыву. Поэтому процесс испарения меди в зазорах не доводят до конца, оставляя 3...5 мкм металла, который окончательно химически вытравливают за счет разницы в толщине меди на проводниках и в зазоре (дифференциальное травление).

Оценка известных схем процессов с позиций воспроизводимости проводников и зазоров проиллюстрирована рис. 4. Их размер определяется глубиной травления (химический процесс подтравливания) и наличием гальванической пары: медь-металлизатор (электрохимический процесс подтравливания). Преимущества полуаддитивных методов в лучшем разрешении рисунка неоспоримы, но производители ПП долго еще постараются остаться на позициях субтрактивных методов, которые гарантируют большую устойчивость в обеспечении хорошей адгезии

**Таблица 1.** Сравнительные характеристики разрешения рисунка при использовании различных схем процессов

Обозначение схем процессов	Тентинг-метод	КПМ	КПМ+ПМ	ПА	ПА+ДТ	Лазер + ДТ
Химическое подтравливание	Есть	Есть	Есть	Незначительно	Незначительно	Незначительно
Электрохимическое подтравливание	Нет	Есть	Есть	Есть	Нет	Нет
Минимальные размеры: проводник/зазор, мм	0,15...0,2/0,2	0,12...0,15/0,15	0,10...0,12/0,10	0,07/0,07	0,05/0,05	0,03/0,04

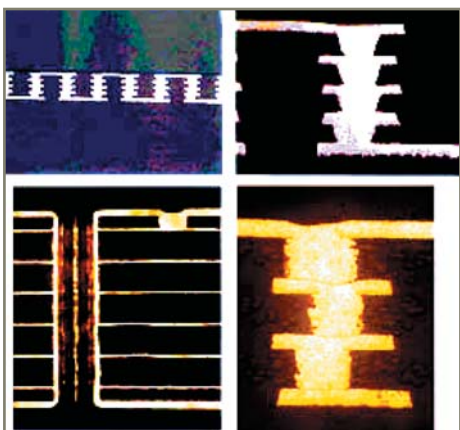
КПМ — комбинированный позитивный метод, ПМ — прямая металлизация, ПА — полуаддитивный метод, ДТ — дифференциальное травление



меди с подложкой — тем более, что намечается тенденция к использованию лазерного скрайбирования зазоров и пробельных мест лазерной сублимацией меди.

Существенное добавление к базовым процессам состоит в наращивании слоев с глухими металлизированными отверстиями (build-up), что позволяет многократно увеличить плотность межсоединений в МПП, как показано на рис. 5. Еще одно добавление — встраивание пассивных компонентов: резисторов, конденсаторов, индуктивностей — дает значительную экономию в сборочно-монтажных процессах, гораздо большую, чем издержки в производстве печатных плат. Отклонение от базовых процессов — лазерное формирование рисунка проводников в сплошном слое металлизации за счет сублимации меди из зазоров. Лазерное скрайбирование позволяет обойтись без химического травления и получить разрешение по проводникам и зазорам, соизмеримое с толщиной металла.

Двукратное увеличение плотности межсоединений достигается заполнением глухих отверстий металлом. Из рис. 6 можно видеть, что межслойные соединения в этом случае можно строить друг над другом, а не со сдвигом в сторону на один шаг, как если бы глухие отверстия не были бы заполнены металлом.



**Рис. 6.** Межслойные переходы, выполненные металлонаполненными глухими отверстиями

### Комплектование производства печатных плат

Централизованные поставки оборудования для химических и гальванических процессов, как правило, ориентированы на определенный набор химикатов, в первую очередь для процессов прямой металлизации, иммерсионных процессов и гальваники, а также других концентратов, применение которых избавляет производство от проведения всевозможных химических анализов, требующих профессиональных навыков химика (так называемые АВС-процессы) [8]. В производстве не происходят глобальные изменения, которые не были бы известны российским технологом. Но все же давайте зафиксируем сегодняшнее состояние технологий и немного заглянем в будущее, чтобы знать, к чему нам готовиться.

#### Фотошаблоны

Высокая производительность современных растровых лазерных фотоплоттеров позволяет обеспечить фотошаблонами трехсменную работу основного производства без репродукции, то есть изготавливать на них рабочие фотошаблоны, минуя фотооригиналы. Это тем более удобно, что текущие изменения в проектах могут быстро отслеживаться производством без потери темпов.

На российском рынке сейчас присутствуют два принципа изготовления фотошаблонов: лазерное гравирование  $\text{CO}_2$ -лазером полимерной пленки с масочным покрытием [9] и растровая засветка фотопленки лучом лазера или точечного источника света [10–12]. Оборудование, реализующее эти процессы, равноценно по разрешению и производительности. Разделение сфер использования в большой мере субъективно. Обычно лазерные гравировщики (Laser-Graver) используют конструкторские подразделения, если они самостоятельно поставляют фотошаблоны в производство и считают их составной частью конструкторской документации. Разнообразие температурно-влажностных условий среды помещений в КБ и в производстве

приводит к плавлению размеров фотошаблонов и неустойчивости на операциях совмещения элементов межсоединений. Технология Laser-Graver активно используется для изготовления фотоформ в полиграфическом производстве многоцветной продукции, где вопросы совмещения не менее важны, чем в производстве печатных плат. В связи с этим размерная стабильность основы «сухого» фотошаблона не должна вызывать сомнений.

Фотоплоттеры, как правило, используют цеховые подразделения. Тогда изготовление фотошаблонов находится в составе участка фотолитографии, где обязаны быть созданы однородные условия вакуумной гигиены: обеспыливание, термо- и влагостабилизация. Этим обеспечивается размерная стабильность полимерной основы фотопленки, особенно чувствительной к изменениям относительной и абсолютной влажности среды (0,001% на 1%).

#### Ламинирование фоторезиста

Альтернативные процессы нанесения фоторезиста — жидкого или пленочного — начинают сдвигаться в сторону жидких фоторезистов для воспроизведения линий шириной менее 100 мкм и щелочного вытравливания глухих отверстий в тонких полиимидных слоях МПП (вместо сверления). Равномерное нанесение тонких слоев жидкого фоторезиста обеспечивается валковым методом или медленным вытягиванием [12]. Очевидно, что присутствие пыли в воздухе производственных помещений сводит на нет все преимущества хорошего воспроизведения рисунка жидким фоторезистом. Для традиционных процессов фотолитографии с разрешением до 0,07/0,07 мм целесообразнее использовать сухие пленочные фоторезисты. Предлагаемые на рынке ламинаторы отличаются различным уровнем автоматизации процесса и наличием систем предварительного подогрева, обеспыливания, обрезания пленки и т. д. [13]. Множество устройств, входящих в состав ламинатора, — устройства предварительного центрирования, захвата, обрезки, вакуумная пластина и др. — оснащены микропроцессорным управлением.

#### Экспонирование

Воспроизводство тонкого рисунка с нормами «проводник/зазор» до 0,05/0,05 мм связано не столько с процессами проявления и травления (они даже не рассматриваются в ряду общих проблем), а с оптическими системами и фоторезистами. В тонком рисунке уже сказываются незаметные раньше явления: абберации, дифракции, рассеивание света в толще фоторезиста, недостаточная планаризация поверхности фоторезиста (рис. 7), недостаточная параллельность лучей, нагрев зоны экспонирования, который приводит к изменению размеров фотошаблона во время экспозиции, и ряд других. Для устранения этих эффектов создано новое поколение автоматических установок экспонирования, в которых автоматизировано все, даже совмещение фотошаблонов по реперным знакам (без пробивки базовых отверстий) с использованием элементов технического зрения.

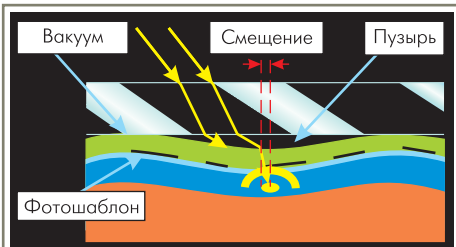


Рис. 7. Последствия плохой планаризации при экспонировании

Современные установки экспонирования отличаются конструкциями оптических систем, создающих рассеянный или коллимированный свет, точечный источник света. В этой же последовательности нарастает цена установок и степень разрешения рисунка. Наиболее совершенны установки, в которых автоматизированы загрузка и выгрузка, совмещение фотошаблонов двух сторон, вакуумный прижим, проверка совмещения после вакуумирования, экспозиция (рис. 8). Такие установки обеспечивают точность совмещения  $\pm 5$  мкм, разрешение  $\pm 2$  мкм и полностью лишены влияния человеческого фактора [8]. Например, автоматические светокопировальные рамы EXPOMAT HAE, AEX, HEX (PRINTPROCESS) с лампами высокого давления 6 кВт с особым оптическим отражателем (рассеянный источник света) обеспечивают получение проводников и зазоров в 50 мкм на фоторезисте толщиной 38 мкм, и это является условием контракта при поставке оборудования [14].

#### Прямое лазерное формирование рисунка

Прямое лазерное формирование рисунка на фоторезисте (Laser Direct Imaging, LDI) — начинающая распространяться альтернатива традиционной фотолитографии. Растровый рисунок экспонируется на фоторезисте непосредственно лучом лазера, минуя процессы изготовления фотошаблонов и экспонирования с фотошаблона. При двустороннем LDI-экспонировании автоматически совмещаются рисунки двух сторон. Производительность LDI-системы — 180 экспонирований в час для формата 457×609 мм, так что одна установка обеспечивает производство ДПП мощностью 25 м<sup>2</sup>/ч или МПП — 16 м<sup>2</sup>/ч. LDI-системы — дорогие установки, поэтому на меньших производительностях они не окупаются [15]. Если оценивать современ-

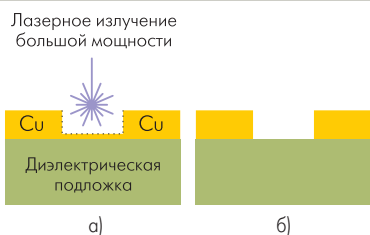


Рис. 9. Последовательность лазерного формирования рисунка с дифференциальным травлением: а — испарение меди из зазоров до толщины 3–5 мкм, б — вытравливание меди в зазорах за счет большей толщины меди проводника

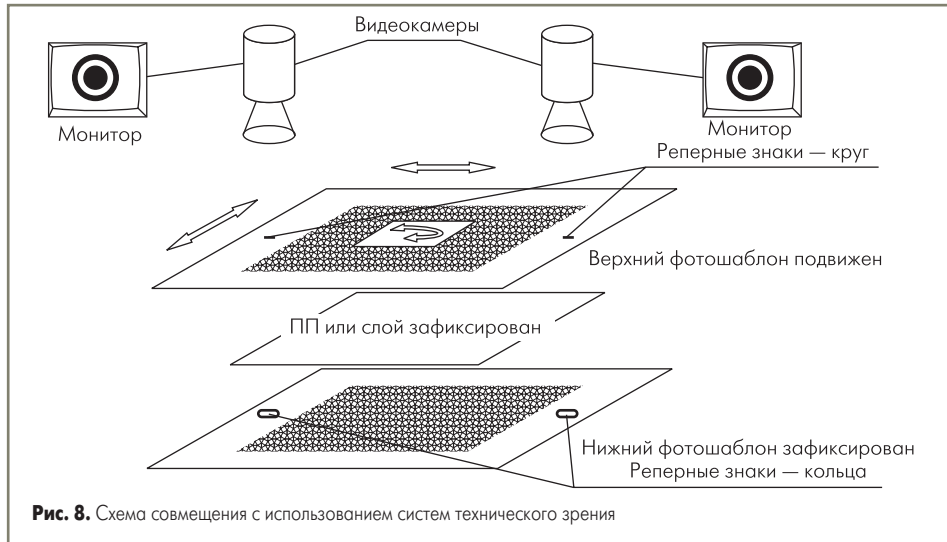


Рис. 8. Схема совмещения с использованием систем технического зрения

ное состояние LDI-процессов, то нужно отнести его к промежуточной стадии развития и подождать, когда этот процесс будет доведен до удаления масляного покрытия из пробельных мест, чтобы избавиться и от процесса проявления фоторезиста. Или дожидаться, когда лазерные LDI-системы формирования рисунка непосредственно по меди станут более совершенными и дешевыми. Уже сейчас тонкий рисунок проводников и зазоров (30/40 мкм) на прецизионных печатных платах выполняют лазерным гравированием с последующим химическим вытравливанием остатков меди в зазорах по схеме дифференциального травления (рис. 9–10).

#### Использование планшетных струйных принтеров

Высокий уровень рентабельности в многономенклатурном производстве имеют системы Ink Jet Printer — струйные принтеры для нанесения маркировки, рисунка резиста для травления рисунка или паяльной маски с разрешением 720 dpi [8, 16]. Установки нанесения прямого изображения резистами ультрафиолетового отверждения фирмы New System являются одними из последних разработок в производстве печатных плат. Применение этих принтеров позволяет значительно снизить сроки изготовления печатных плат, уменьшить количество основных операций, сократить производственные площади, уменьшить численность персонала и расход материалов, что в конечном итоге значительно уменьшает себестоимость продукции.

#### Струйная обработка

Проявление и удаление фоторезиста, проявление паяльной маски, травление рисунка — для всех этих процессов струйной обработки фирмы-поставщики предлагают собственные оригинальные решения, направленные на равномерное воспроизведение тонких линий. Фирма RESCO (Италия) предлагает систему TFS, устраняющую эффект накопления луж обрабатываемого раствора, попеременно меняя направления струй в противоположных направлениях. Фирма PILL (Германия) предлагала специальную систему отсоса отработанного раствора (фирма перестала существовать). Рабочие модули в линиях фирмы Scmid (Германия) обладают возможностью индивидуальной регулировки напора струй, так что можно настроить интенсивность травления с учетом неравномерности толщины вытравливаемого слоя. Трудно сказать, насколько эффективны эти методы в улучшении воспроизводимости тонкого рисунка. В реальном производстве больше ценится удобство эксплуатации: возможность обработки тонких слоев, хорошая химическая и термическая устойчивость конструкционных материалов и особенно швов и стыков, большая длина рабочих камер, полнота комплектации фильтрами, насосами, нагревателями, оптимальный уровень автоматизации, удобство обслуживания. Ценится также возможность сборки линии из модулей различного назначения, чтобы можно было организовать любую последовательность струйной обработки.

Особенность обработки фотопроявляемой жидкой паяльной маски состоит в том, что она может проникать в отверстия и вымывание ее из отверстий при проявлении требует дополнительных приемов. В связи с этим стрипп-машины дополняют второй секцией проявления, снабженной системой сопел высокого давления, так что вертикально направленные струи выбивают из отверстий остатки неэкспонированной маски.

#### Системы совмещения

Совмещение элементов межсоединений в многослойных структурах — процесс многофакторный. Можно получить хорошие результаты позиционирования элементов ри-

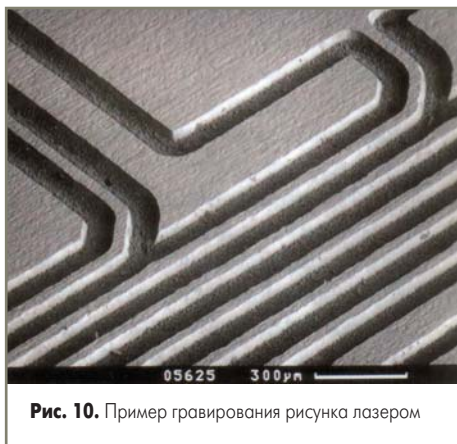


Рис. 10. Пример гравирования рисунка лазером

сунка на фотоплоттерах и сверлильных станках, но деформации пленочной основы фотошаблонов и слоев после травления и в процессе прессования могут свести на нет эти результаты, если используется непродуманная система совмещения. Системы базирования на штифтах с пробивкой базовых отверстий уже исчерпали свои возможности в обеспечении хорошей точности совмещения.

Прорыв в улучшении системы совмещения сделала швейцарская фирма PRINTPROCESS AG, обеспечив точность совмещения, соизмеримую с точностью сверления [8, 17]. Эта принципиально новая безбазовая система совмещения в многослойных структурах позволяет изготавливать прецизионные многослойные печатные платы по высоким проектным нормам. В отличие от систем, использующих базирование на штырях — PIN-LAM, эта система без базовых отверстий названа MAS-LAM. На эту систему базирования перешло большинство заводов Европы и Азии, российские заводы в Рязани, Чебоксарах и др. Заводу «ЭЛАРА» этот процесс позволил не только увеличить точность совмещения, но и перейти с размеров заготовки 300×400 мм на 530×610 мм.

Система MAS-LAM начинается с автоматической установки экспонирования с оптической системой совмещения фотошаблонов по реперным знакам (без пробитых баз). Следящая система автоматически совмещает фотошаблоны с точностью 5 мкм. После загрузки слоя и вакуумного прижима установка автоматически повторно проверяет совмещение и при удовлетворительных результатах включает экспозицию. Экспонирование производится «холодным» УФ-источником света, поэтому деформации фотошаблонов от нагрева во время экспозиции исключены.

После травления на установке автоматического совмещения в слоях высверливаются базовые отверстия с усреднением изменения размеров слоя. По этим отверстиям слои совмещаются на двух штифтах, перекладываются пре-прегом и после планаризации сшиваются (бондажируются в пакет слоев МПП) по периметру одним из известных способов: клепочной машиной, сваркой или склеиваются. Прессование происходит без традиционных пресс-форм и без штифтов.

После прессования на заготовке МПП производится вскрытие реперных знаков на внутренних слоях. Заготовка МПП поступает опять на установку центрирования баз, где после усреднения изменения размеров просверливаются два базовых отверстия для последующих операций: сверления, экспонирования рисунка внешних слоев, маски и маркировки. Процедура экспонирования внешних слоев и маски автоматическая, аналогичная экспонированию внутренних слоев. Результаты измерения позиционирования элементов рисунка вводятся в компьютерную память машины на всех этапах изготовления МПП и обрабатываются. Обработанная информация позволяет оператору использовать селективный подход к обработке заготовок в автоматическом режиме.

Система MAS-LAM обеспечивает большую точность совмещения, не требует пробивки баз, избавляет от необходимости использования пресс-форм, регистрирует и сохраняет результаты измерений, легко встраивается в автоматическое производство [8, 17].

#### Прессование

Требования к процессам прессования сегодня определяются высокой плотностью межсоединений, выполнением отверстий на внутренних слоях, необходимостью точного воспроизведения волнового сопротивления согласованных линий связи, более строгими требованиями к короблению (для поверхностного монтажа). Все эти требования могут быть удовлетворены только при условии использования систем вакуумного прессования с минимальными градиентами температур при нагреве и охлаждении, точности поддержания режимов давления и идеальной плоскостности плит. Расширяющиеся объемы использования полиимидных материалов нуждаются в более высоких температурах отверждения — порядка 400 °С. Современные гидравлические прессы для прессования МПП отвечают всем этим требованиям: параллельность плит сохраняется в пределах ±30 мкм, температурная точность — ±1 °С, точность поддержания давления — ±1 бар. Для уменьшения температурных градиентов во времени и пространстве используется, как правило, термомаслянный нагрев и охлаждение. Для предотвращения термодеструкции и испарения низкомолекулярных фракций масла для высоких температур прессования используется среда азота. Для эффективного выноса воздуха и летучих фракций из прессуемого пакета слоев применяется вакуумирование рабочей зоны прессы с остаточным давлением 5 миллибар в течение всего времени прессования.

Для отработки режимов прессования, для прототипного производства и, что самое главное, для испытаний новых партий препрега предлагаются лабораторные прессы.

Чтобы сократить время использования горячих прессов и экономии энергии, участки прессования дополнительно оснащают установками холодного прессования в соотношении горячий пресс/холодный пресс = 2/1. Тогда продолжительность цикла уменьшается с 150 до 100 мин. Нагрев горячих плит не отключается, загрузка пресс-форм производится в горячие прессы.

Вместе с прессами, как правило, предлагают опции, использование которых улучшает условия и производительность труда, устойчивость процессов: загрузочно-разгрузочные тележки, стеллажи-накопители с подъемным устройством, станции сборки пакетов и для технологии PIN-LAM — расштифовщики с устройством разборки прессформ.

Обязательным приложением к поставкам прессового оборудования является система визуализации параметров управления на базе персонального компьютера. Система обеспечивает выполнение трех отдельных функций: загрузку режимов прессования из архива и запись в архив новых отработанных режимов, а также диагностику оборудования для

выявления неисправностей. Стабильность свойств материалов импортных поставок с рекомендованными режимами прессования позволяют быстро найти в архиве соответствующие режимы применительно к этим рекомендациям и быстро запустить процесс.

#### Сверление

Современные сверлильно-фрезерные станки для сверления печатных плат объединены общими признаками технического исполнения:

- стол-основание из натурального камня или гранита;
- стандартный привод X-Y на линейных двигателях;
- перемещение по X-Y рабочих органов на воздушных подшипниках;
- малая масса рабочего стола за счет использования новых композиционных материалов, в частности углепластика;
- высокоскоростной шпиндель: 150 тыс. об/мин, высокочастотный шпиндель для микро-сверления — 180 тыс. об/мин;
- автоматическая смена инструмента;
- система лазерного контроля состояния инструмента до и в процессе работы;
- управляемый скоростной сервопривод по оси Z;
- контроллер компьютерного управления.

Благодаря удачной сбалансированности этих элементов конструкции создается хорошее сочетание точности позиционирования (до ±5 мкм) и производительности (до 400 отв/мин), возможность механического сверления отверстий с диаметром до 0,1 мм, точность глубины сверления до ±25 мкм (для станков KLG — ±7 мкм), высокая скорость перемещения: по осям X-Y с ускорением 10–15 м/с<sup>2</sup>, по оси Z — 3,6g. Автоматическая смена инструмента согласуется с производительностью станка — магазин сверл может загружаться сотнями-тысячами сверл десятка номенклатур.

#### Химическое сверление

Использование полиимидных пленок для наращивания слоев МПП позволяет вытравливать в них глухие отверстия в крепких горячих щелочах. Для этого первоначально в соответствующих местах вытравливаются окна в фольге, которая в данном случае играет роль маски. Этот групповой метод оформления отверстий, естественно, обладает высокой производительностью. Но отсутствие соответствующих установок со струйной обработкой горячими щелочами вынуждает использовать погружное травление, что влечет за собой нежелательное подтравливание диэлектрика под фольгой. Тем не менее при отсутствии соответствующего оснащения травление отверстий остается единственным способом выполнения глухих отверстий.

#### Лазерное сверление

Предлагается ряд совершенно новых решений для микросверления, основанных на использовании мощных лазеров. Лазерные системы позволяют сверлить сотни отверстий в секунду диаметром от 0,05 до 0,2 мм. Активная среда Cu-Vr-лазера, излучающего на длинах волн 511 и 578 нм, или Nd:YAG-лазера

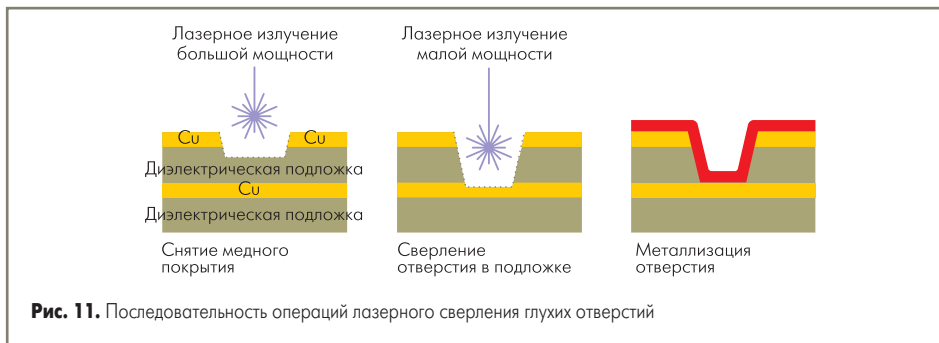


Рис. 11. Последовательность операций лазерного сверления глухих отверстий

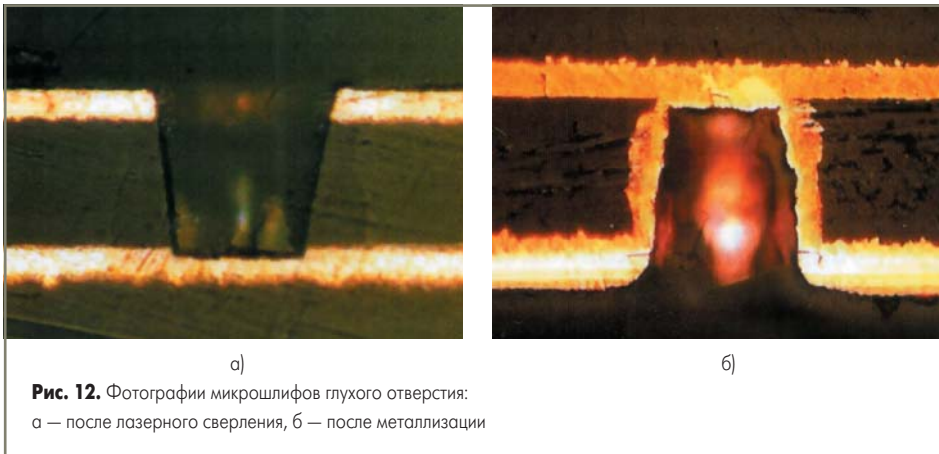


Рис. 12. Фотографии микрошлифов глухого отверстия: а — после лазерного сверления, б — после металлизации

с длиной волны на третьей гармонике 355 нм специально выбраны для хорошего поглощения энергии излучения медью в ультрафиолетовой области спектра. Необходимость использования таких систем обосновывается большим количеством микроотверстий в платах с высокой плотностью межсоединений (MLB-HDI). Плотность размещения таких отверстий в MLB-HDI-платах достигает 10 тыс. на 1 дм<sup>2</sup>.

Для сверления комбинации фольги и диэлектрика приходится варьировать мощность лазера так, чтобы сверление фольги производилось при плотности энергии 4 Дж/см<sup>2</sup>, а диэлектрической подложки — 0,1 Дж/см<sup>2</sup> (рис. 11 и 12) [7]. Аппаратное воплощение такой смены режимов в ходе сверления встретило затруднения. Поэтому в новых разработках пока планируется использовать два разнородных лазера, совмещенных в одной головке: CO<sub>2</sub>-лазер для сверления диэлектрика и «зеленый» эксимерный лазер для сверления меди. Лучи обоих лазеров сводят в одну точку так, что они одновременно или попеременно обрабатывают отверстие.

#### Химико-гальванические процессы

Направленность современных процессов металлизации состоит в решении проблем равномерности покрытий тонких глубоких сквозных отверстий и глухих переходов со слоя на слой. Немаловажны вопросы экологического характера: процессы металлизации наряду с процессами травления создают основной объем загрязненных промышленных стоков. Новации в области химических процессов состоят в основном в использовании процессов прямой металлизации вместо прежних процессов тонкой и среднетолщинной химической металлизации. В гальванических процессах начинают распространяться процессы импульсной металлизации.

#### Прямая металлизация

Сущность процесса прямой металлизации состоит в получении электропроводящего слоя для возможности дальнейшего осаждения меди электрохимическим способом, минуя процесс химической металлизации и гальванической затяжки, отсюда и термин — «прямая металлизация» [18].

В Европе, где к охране окружающей среды относятся жестко, процесс прямой металлизации используется довольно давно.

Примерно 70% зарубежных компаний используют при производстве ПП процесс «прямой металлизации», в то время как в отечественной промышленности это значение не превышает 40% [19, 20].

Для обеспечения электрической проводимости используется одна из трех систем:

- коллоидная система, содержащая палладий;
- суспензии на основе угля и его модификаций;
- процессы, основанные на осаждении токопроводящих полимеров.

При этом осаждение электропроводящего слоя осуществляется избирательно на диэлектрик. Это принципиально с точки зрения расхода палладия и образования разделительного слоя на стыках внутренних соединений в МПП.

Преимущества процессов прямой металлизации:

1. Получение равномерных покрытий.
2. Изъятие из процессов растворов формалина и сильных комплексообразователей.
3. Короткое время создания поверхностной проводимости диэлектрика — порядка 15 с.
4. Используемые в технологии растворы обладают высокой стабильностью.
5. Возможность создания поверхностной проводимости для широкого диапазона диэлектриков.
6. Отсутствие разделительного слоя на стыках металлизации отверстий с внутренними КП.

7. Хорошая рассеивающая способность при удовлетворительном обмене раствора в отверстиях.

8. Меньший объем химических анализов.

9. Отсутствие необходимости слива растворов, содержащих медь.

Коллоидные системы, содержащие палладий, позволяют получить самый лучший вариант прямой металлизации сквозных отверстий. От прежних процессов он отличается большей дисперсностью распределения палладия в тонкой покровной пленке и тем, что вместо химического восстановления здесь медь восстанавливается контактным методом, образуя тонкий слой с устойчиво хорошей электропроводностью. С позиций стоимости химических компонентов процесс прямой металлизации на основе использования углеродных суспензий (Black Hole) дешевле, но техническая реализация процесса Black Hole сложнее и стоимость оборудования выше, чем для палладиевой системы, где можно использовать обычные погружные системы. Это обусловлено тем, что в линию Black Hole-процесса приходится вводить дополнительные устройства:

- для предотвращения расслаивания раствора — ультразвуковое эмульгирование графитовой суспензии;
- для предотвращения уноса суспензии — двойные отжимные ролики на входе и выходе из камеры обработки;
- для предотвращения неравномерности покрытия — специальная конструкция трубопроводов подачи раствора;
- для предотвращения засорения отверстий для подачи суспензии — специальные щелевые напорные трубопроводы;
- для обеспечения устойчивости покрытия отверстий — система мягких роликов, принудительно вдавливающих суспензию в отверстия;
- для повышения эффективности сушки — роликовая сушка с двумя воздушными ножами, один из которых продувает отверстие, другой отсасывает остатки раствора и воды, новая сушка для маленьких отверстий.

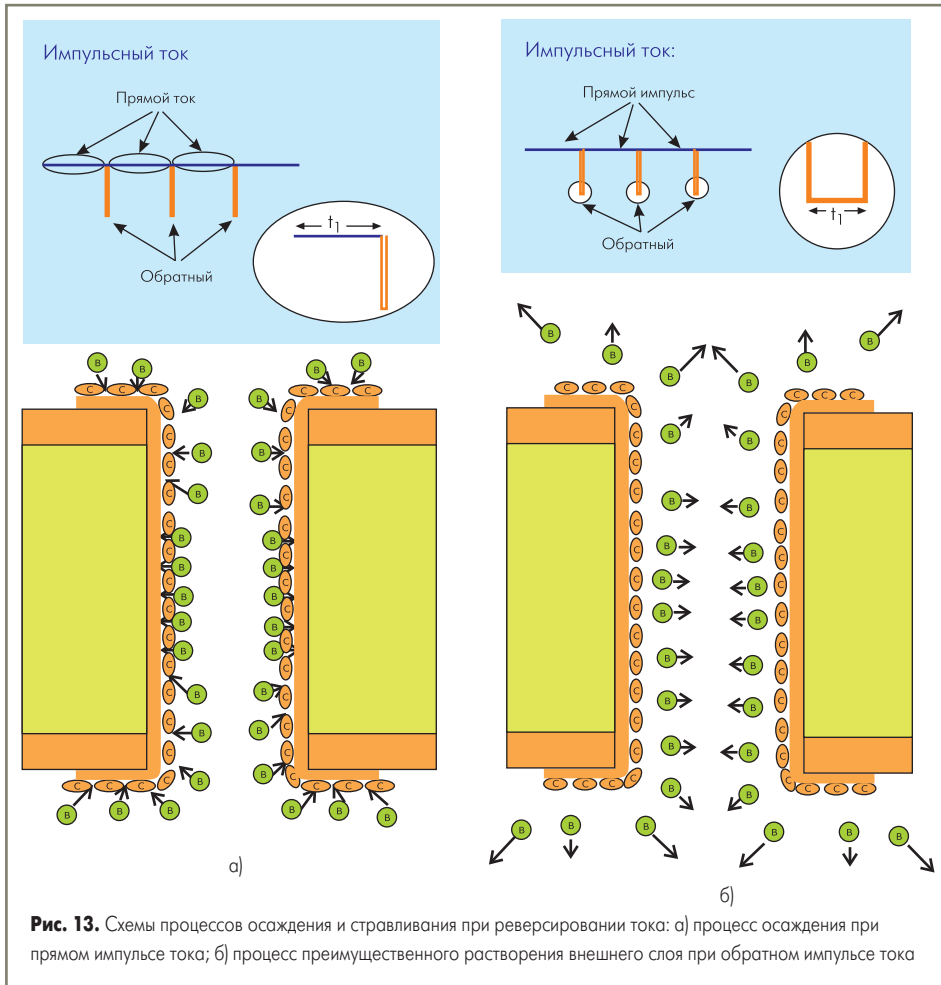
Российские предприятия, первоначально освоившие систему Black Hole, отказываются от нее в пользу палладиевых систем.

#### Электрохимическая металлизация

В оборудовании гальванической металлизации решаются главные задачи — интенсификация процессов обмена электролита в глубоких и глухих отверстиях. Для этого, в дополнение к покачиванию и барботажу, используются вибраторы, располагающиеся по краю или по центру катодных штанг. Вибрация освобождает тонкие отверстия от пузырьков воздуха и способствует интенсивному обмену раствора в отверстиях. Для металлизации глубоких отверстий в электролитах с выравнивающими добавками вибрация позволяет увеличить плотность тока с 0,5 до 2,5 А/дм<sup>2</sup>, за счет чего увеличивается производительность процесса.

Чтобы улучшить обмен электролита в тонких отверстиях и избавиться от эффекта «парусности» используется покачивание





с захватом заготовки не только сверху (как обычно), но и снизу. Для обеспечения равномерности покрытия по площади заготовки в состав линий вводятся экраны. Наиболее эффективное новшество — импульсная металлизация, позволяющая не просто выровнять толщину металлизации в отверстиях и на поверхности, но и при определенных режимах получить обратный эффект: толщина осаждения на поверхности меньше, чем в отверстиях — при обратном токе анодное растворение поверхности идет более интенсивно, чем в отверстиях или углублении (рис. 13).

Ряд фирм предлагает горизонтальные линии химической обработки: очистки отверстий от продуктов сверления, прямой и электрохимической металлизации. В линиях используется система принудительного продавливания рабочих растворов в отверстия малого диаметра, за счет которой успешно металлизуются сквозные и глухие отверстия диаметром до 0,1 мм. Предусмотрены системы автоматического дозирования технологических растворов.

Конструкции вертикальных (погружных) линий, которые представляет, например, фирма PAL-Galvaug, по-другому решают задачу металлизации тонких отверстий. Они имеют лазерную систему позиционирования операторов, более 300 вариантов технологических маршрутов с возможностью программирования новых вариантов, импульсные источники тока для уменьшения толщины металлизации на поверхности пла-

ты, пластиковые защитные экраны для выравнивания толщины металлизации по площади заготовки, специальные захваты подвески снизу для устранения «парусности» тонких заготовок, русифицированное программное обеспечение. В сочетании с использованием химических концентратов фирмы J-Kem линии PAL-Galvaug позволяют металлизировать сквозные и глухие отверстия диаметром до 0,1 мм. В настоящее время в мире успешно работает более тысячи единиц химико-гальванического оборудования PAL-Galvaug в производстве фирм Ericsson (Швеция), Nokia (Финляндия), Volvo (Швеция), Scania (Швеция) и др.

#### Финишные покрытия

Большое разнообразие финишных покрытий говорит об отсутствии выбора в пользу какого-либо одного-двух, удовлетворяющих всем требованиям по стоимости, смачиваемости, долговременности и т. д. Перечень их широк: OSP (Organic Solderability Preservative), NiAu (ENIG — Electroless Ni & Immersion Gold — химический никель и иммерсионное золото), ImAg (Immersion Ag), ImBi (Immersion Bi), Pd (Electroplate or Electroless Pd — химический или гальванический палладий), NiPd (Electroless Ni & Immersion Pd), NiPdAu (Electroless NiPd & Immersion Au), ImSn (Immersion Sn), NiSn (Electroplate Ni&Sn), SnAg (Electroplate Sn&Ag), HASL (Hot-Air Solder Leveling). В этом широком ряду лидирующими покрытиями печатных плат являются OSP, ENIG, ImAg, ImSn и HASL [21].

HASL-процесс горячего облуживания плат состоит в погружении плат на ограниченное время в ванну с расплавленным припоем, во время быстрой выемки плат их обдувают струи горячего воздуха, которые сдувают излишки припоя и выравнивают покрытие. Но наплывы припоя неизбежно остаются, особенно много их на развитых металлических поверхностях. В последующей сборке наплывы мешают установке мелких компонентов, что ограничивает применение HASL. Но с точки зрения качества покрытия и его исключительной способности к пайке ему нет равных. Поэтому там, где изготовление плат и сборка происходят в одном производстве, находят компромиссы, чтобы использовать HASL.

Еще один существенный недостаток HASL — жесткий термоудар, который испытывают платы при погружении в расплавленный припой. И чем выше рабочая температура припоя, тем серьезнее проблема обеспечения надежности межсоединений. Ряд предприятий не использует HASL для многослойных плат, считая, что они уменьшают надежность внутренних межсоединений от таких термоударов.

OSP обеспечивает защиту медной поверхности от окисления в процессе хранения и пайки. В конце пайки этот слой, выполнив свою функцию, теряет способность обеспечить последующие процессы пайки. В Японии это дешевое покрытие используется больше 20 лет. Но чтобы процесс пайки проходил в одну стадию группового нагрева, конструкторы изделий учитывают эту особенность в целях снижения себестоимости. OSP — хорошая альтернатива HASL. Но OSP имеет короткий жизненный цикл, что негативно сказывается на технологической надежности, не обеспечивает многократную пайку, тем более при высоких температурах. Чтобы избежать этих затруднений, приходится использовать нейтральную среду пайки (азот) [22].

ENIG (~4 мкм Ni + ~0,1 мкм Au) — другая альтернатива HASL-процессам. Это покрытие свободно от ионных загрязнений, способно к многократной пайке при высоких температурах, так как тонкий слой золота защищает никель от окисления, а никель — барьер, предотвращающий взаимную диффузию золота и меди. Характерный для ENIG дефект — черные контактные площадки, случающиеся из-за выделения на поверхность никеля фосфора, присутствующего в химическом процессе его восстановления. Во время пайки золото растворяется в припое и обнажает плохо паяемый слой фосфора. Припой скатывается с поверхности фосфора, в чем и проявляется эффект черной контактной площадки. Черные контактные площадки могут возникать также при передержке процесса пайки, интенсифицирующей образование интерметаллидов олова с никелем и олова с фосфором, внедренным в никель. Выделение фосфора на поверхности никеля может вызвать также процесс золочения. Осаждение защитного покрытия

золотом из нейтральных электролитов уменьшает вероятность этих явлений [23].

ENIG капризен в выборе флюсов, его цена примерно на 25% выше, чем у OSP. Преимущества ENIG: жизнеспособность более года, плоская контактная поверхность, хорошая смачиваемость припоем при правильном подборе флюса, неокисляемая поверхность для контактирования (нажимные и скользящие контакты) [23].

*Иммерсионное олово (ImSn)* — еще одна альтернатива HASL-процессам. Популярность ImSn растет за счет хорошей смачиваемости, которую он обеспечивает, и простоте процесса осаждения. ImSn демонстрирует лучшую паяемость, чем ENIG. Но существует два ограничения для его применения: самопроизвольные нитевидные кристаллические образования (whiskers — усы), которые могут приводить к КЗ, и образование интерметаллических соединений  $Cu_3Sn_4$ . Поскольку толщина иммерсионного олова не превышает 1 мкм и  $Cu_3Sn_4$  быстро поглощает этот тонкий слой, способность к пайке исчезает. В последнее время возможность этого явления устраняют введением барьерного подслоя различного содержания — металлоорганика и др. Перспектива использования ImSn состоит в низкой стоимости процесса осаждения, хорошей паяемости, плоской поверхности покрытия (в отличие от HASL), хороших условиях для обеспечения беспаянных соединений Press-Fit (впрессовывание штырей-хвостовиков разъемов в металлизированные отверстия плат).

*Иммерсионное серебро.* Толщина ImAg не превышает 200 нм, поэтому расходы на реализацию этого покрытия незначительны.

Жизнеспособность ImAg гораздо выше, чем OSP, но несколько меньше, чем ENIG. Пожелтение покрытия в процессе хранения, сборки и пайки — результат загрязнения воздушной среды сульфатами, хлоридами. Пожелтение не сказывается на свойствах ImAg, но его декоративность страдает. Консервирующие покрытия антиокислителями тормозят процесс пожелтения и продлевают жизнеспособность покрытия. ImAg менее популярно в Европе, чем в США, где оно более доступно [24, 25].

#### **Тестирование печатных плат**

Для современного состояния тестирующих систем характерно использование контактирования «летающими» щупами вместо контактного поля (матриц контактов). Малую производительность этих систем компенсируют специальными приемами быстрого опроса состояния межсоединений по емкости проводников и их групп. Преимущества двух систем использует фирма New System (Италия): в ее тестерах применяются «летающие матрицы» контактов, за счет чего производительность тестера увеличивается на порядок. Добавление к этому специальных приемов быстрого опроса делает производительность тестеров New System соизмеримой с проверкой контактным полем и транзисторным перебором сочетаний точек контактирования (см. статью В. Городова на эту тему в этом номере).

Применение автоматических тестеров фирмы New System с патентованной технологией «летающих матриц» позволяет проводить 100-процентное электрическое тестирование жестких и гибких печатных плат с одной или одновременно с двух сторон. При тестирова-

нии используется стандартный резистивный и ускоренный емкостный метод испытаний. Для базирования тестируемой платы или мультиплицированной заготовки используется оптическая система, позволяющая компенсировать возможную усадку материала или рассовмещение наружных слоев.

*Испытания.* Для испытаний на российском рынке вновь появились малоразмерные климатические камеры, представленные, например, фирмой Tabai и хорошо зарекомендовавшие себя еще с советских времен [8].

Набор всевозможных цифровых измерительных приборов, например фирмы Fluke, позволяет измерить любые электрические характеристики печатных плат и базовых материалов: электрические сопротивления изоляции и проводников, волновое сопротивление линий связи в платах, погонные емкости проводников и др. Отличительный признак цифровой измерительной техники — длительный срок работы без проверки.

Набор лабораторного оборудования для металлографии, представляемый индийской фирмой Metatech, позволяет получить качественный микрошлиф через 17 минут после поступления платы на анализ. Набор для экспресс-анализа содержит рычажный пресс для высечки образца, настольный горячий пресс для опрессовки образца быстро твердеющей пластмассой, дисковую пилу для реза вдоль осей отверстий, полировочную машинку для доводки поверхности образца до нужной чистоты, металлографический микроскоп с видеокамерой (опция), принтер для регистрации данных анализа.

**Окончание следует**