

Печатные платы — линии развития

*Лучший способ догадаться, что будет, — припомнить, что уже было.
Маркиз Галифакс*

Кто из нас не мечтал заглянуть в будущее? К сожалению, сколько бы мы ни смотрели на ладонь, нам, скорее всего, не удастся угадать, каким путем пойдет развитие, к примеру, автомобиля или сотового телефона. А очень хочется. Ведь тот, кто сможет предугадать, в каком направлении станет развиваться определенная техническая отрасль, вероятно, и победит. Но..., в последние годы «технической хиромантией» начали активно заниматься ведущие мировые корпорации, работающие в области электроники, — Samsung, LG и другие. Причем в своей предсказательской деятельности они довольно успешно используют законы развития технических систем. Те самые законы, которые когда-то были сформулированы Г. С. Альтшуллером в рамках созданной им теории решения изобретательских задач (ТРИЗ). Автор данной статьи делает попытку проследить закономерности развития основного конструктивного элемента современной радиоэлектронной аппаратуры (печатных плат) и в какой-то мере спрогнозировать пути их дальнейшего развития.

**Владимир Уразаев,
к. т. н.**

urazaev@yandex.ru

Историческая справка

Печатная плата — пластинка из электроизоляционного материала (гетинакса, текстолита, стеклотекстолита и др.), на поверхности которой каким-либо образом (например, фотохимическим) нанесены тонкие электропроводящие полоски (печатные проводники) с контактными площадками для подсоединения навесных электро- и радиоэлементов, в том числе модулей и интегральных схем. Эта формулировка дословно взята из политехнического словаря [1]. Однако более универсальной представляется формулировка, предложенная в монографии [2]. Под печатной платой понимается конструкция электрических межсоединений на изоляционном основании.

Главные конструктивные элементы печатной платы — основание (подложка) и проводники. Эти элементы необходимы и достаточны для того, чтобы печатная плата была печатной платой. Круг второстепенных элементов несколько шире: контактные площадки, переходные металлизированные и монтажные отверстия, ламели для контактирования с разъемными участками для осуществления теплоотвода и т. п.

Переход к печатным платам ознаменовал качественный скачок в области конструирования радиоэлектронной аппаратуры. Печатная плата совмещает функции носителя радиоэлементов и электрического соединения таких элементов. Последняя функция невыполнима, если между проводниками и иными проводящими элементами печатной платы не будет обеспечен достаточный уровень сопротивления изоляции. Следовательно, подложка печатной платы должна выполнять и функцию изолятора.

Говорят, первенство в разработке печатных плат принадлежит немецкому инженеру Альберту Паркеру Хансону [3]. Хансон предложил формировать рисунок печатной платы на медной фольге вырезанием или штамповкой. Далее элементы проводящего рисунка приклеивались к диэлектрику, например к пропарафиненной бумаге. Первая заявка в патентное ведомство Германии была подана Хансоном в 1902 году. С тех пор прошло больше ста лет. Все эти годы конструкции и технологии изготовления печатных плат постоянно совершенствовались. В данном процессе принимало участие великое множество изобретателей, в том числе Томас Эдисон (и гораздо менее известный изобретатель — автор настоящего исследования). Томас Эдисон предложил формировать токопроводящий рисунок посредством адгезивного материала, содержащего графитовый или бронзовый порошок. В другом варианте токопроводящий рисунок наносился раствором азотнокислого серебра, которое затем восстанавливалось до металла.

В 1920–1930-х годах было выдано множество патентов на конструкции печатных плат и способы их изготовления. Первые методы изготовления печатных плат оставались преимущественно аддитивными (развитие идей Томаса Эдисона). Но в современном виде печатная плата появилась благодаря использованию технологий, заимствованных из полиграфической промышленности. Печатная плата — прямой перевод с английского полиграфического термина *printing plate* («печатная форма», или «матрица»). Поэтому подлинным «отцом печатных плат» считается австрийский инженер Пауль Эйслер. Он первым пришел

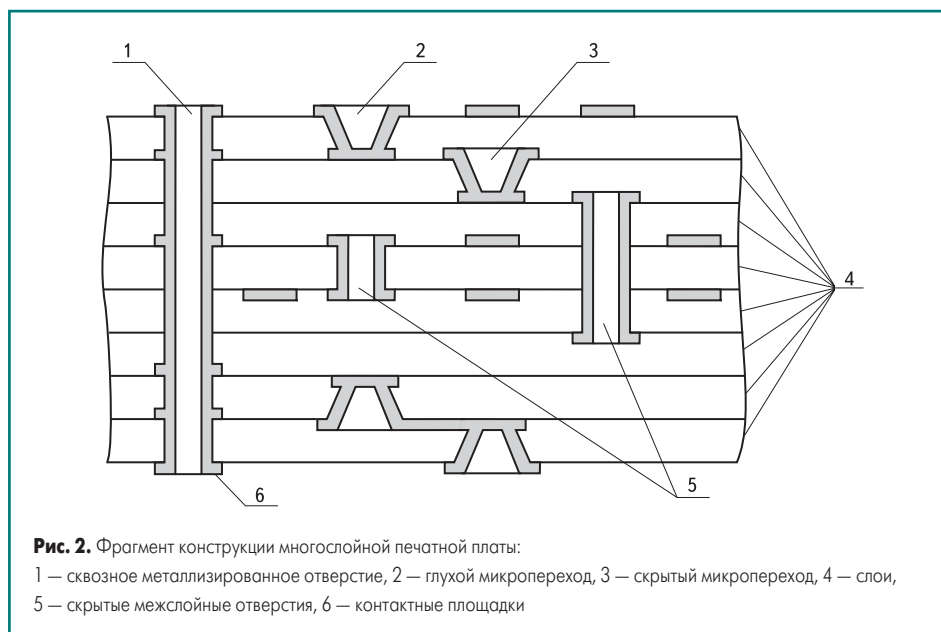
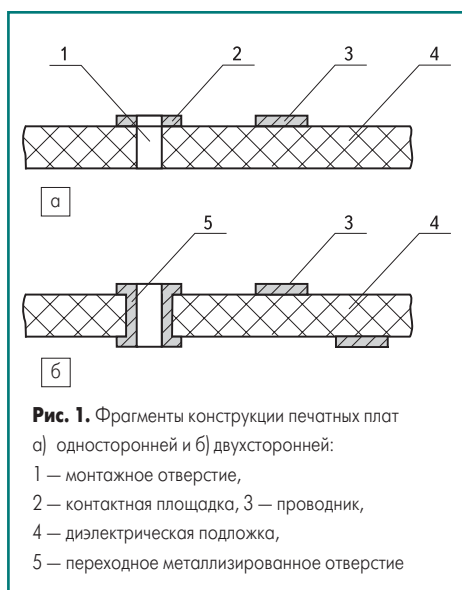
к выводу, что полиграфические (субтрактивные) технологии можно использовать для массового производства печатных плат. В субтрактивных технологиях изображение формируется путем удаления ненужных фрагментов. Пауль Эйслер отработал технологию гальванического осаждения медной фольги и ее травления хлорным железом. Технологии массового производства печатных плат оказались востребованными уже во время Второй мировой войны. А с середины 1950-х началось становление печатных плат как конструктивной основы радиоаппаратуры не только военного, но и бытового назначения.

Точка — линия — плоскость — объем — ?..

Начнем с линии. Самый далекий предшественник печатных плат — обычный провод, чаще всего изолированный. Все функции печатной платы он выполнять не мог. Поэтому «для оказания технической помощи» привлекались еще какие-либо носители, на которые устанавливались радиоэлементы. Все вместе называлось объемным монтажом.

В печатных платах был осуществлен переход от линии (линий) к плоскости. Односторонняя печатная плата — это пластина, на одной стороне которой размещены проводники, выполненные печатным способом. В двухсторонних печатных платах проводники заняли и пустующую изнаночную сторону пластины. А для их соединения были предложены разнообразные варианты, среди которых наибольшее распространение получили переходные металлизированные отверстия. Фрагменты конструкции самых простых односторонних и двухсторонних печатных плат приведены на рис. 1.

Использование двухсторонних печатных плат вместо односторонних было первым шагом на пути перехода от плоскости к объему. Если абстрагироваться (мысленно отбросить подложку двухсторонней печатной платы), то получится объемная конструкция проводников. Кстати, этот шаг был сделан довольно быстро. В заявке Альберта Хансона уже ука-



зывалось на возможность размещения проводников по обеим сторонам подложки и соединения их с помощью сквозных отверстий.

Окончательный переход к объему произошел после того, как началось применение многослойных печатных плат. Фрагмент конструкции современной многослойной печатной платы приведен на рис. 2. Проводники в таких печатных платах размещаются не только на поверхности, но и в объеме подложки. При этом сохранилась слоистость расположения проводников относительно друг друга (следствие использования планарных полиграфических технологий). Слоистость неизбежно присутствует в названиях печатных плат и их элементов — односторонняя, двухсторонняя, многослойная и др. Слоистость реально отражает конструктив и соответствующее этому конструктиву технологии изготовления печатных плат.

Планарные (плоскостные) технологии стали основой и изделий микроэлектроники — изделий, носителями которых являются современные печатные платы. По скорости реализации процессов микроминиатюризации микросхемы существенно опережают своих прародителей. Поэтому, прежде чем заглядывать в будущее печатных плат, целесообразно посмотреть, в каком направлении развиваются современные пространственные конфигурации лидеров. В области микроэлектроники реалии таковы: намечается уход от планарных технологий и, соответственно, планарных конструкций. Первый звонок прозвучал несколько лет назад: МОП-транзисторы верой и правдой служили с начала 1960-х, а в конце 2001 года разработчики фирмы Intel доказали возможность изготовления таких транзисторов с минимальными размерами элементов 15 нм, одновременно сделав вывод, что это — предел, дальнейшее уменьшение размеров физически невозможно. Однако чуть позже решение все же удалось найти: был осуществлен прыжок из плоскости в трехмерное пространство [4]. Трехзатворный транзистор представляет собой трехмерный прибор, в котором затвором служит приподнятая

область с токопроводящими линиями, нанесенными на три ее стороны. Данная структура позволила практически втрое увеличить область пропускания тока, не занимая при этом лишнюю площадь кристалла. Кроме того, благодаря трехмерной структуре ток утечки у подобных транзисторов стал меньше, чем у обычных планарных транзисторов такого же размера.

Сотрудники Шанхайского института оптики и точной механики также ушли от традиционной планарной технологии и разработали принципиально новую технологию изготовления трехмерных микросхем [5]. В ходе экспериментов ученые добавили в состав стекла золото в концентрации один к десяти тысячам. Далее, фокусируя короткий лазерный импульс на определенных частях стеклянного блока, смещали атомы золота с их начальных позиций. На завершающем этапе при нагревании до 550 °С получалась сложная пространственная структура из крошечных золотых шариков. Оказалось, что полученные таким образом трехмерные структуры можно «стирать», используя излучение другого лазера, разрушающего золотые микросферы на части. Подобная технология может быть применена и для хранения данных — наличие или отсутствие микросферы в определенной точке будет задавать значение соответствующего бита. На демонстрации возможностей этой технологии было представлено изображение бабочки, состоящее из миллионов крошечных золотых гранул диаметром 7 нм каждая.

Разработчики утверждают, что такая нанотехнология пригодна для формирования проводников, электрических цепей и даже модулей памяти. Использование новых технологий позволит уйти от некоторых ограничений, накладываемых на существующие конструкции трехмерных электронных чипов, получаемых послойным наращиванием плоских микросхем, снизить их себестоимость и выпускать объемные элементы в массовом порядке.

Развитие конструкций и технологий в микроэлектронике идет в соответствии с объективно существующим законом развития

технических систем: задачи, связанные с размещением или перемещением объектов, решаются переходом от точки к линии, от линии к плоскости, от плоскости к трехмерному пространству. (Интересно, а что будет дальше?) Думаю, что и печатным платам придется подчиниться этому закону. Потенциальная возможность реализации таких многоуровневых (бесконечноуровневых) печатных плат имеется. Об этом свидетельствуют богатый опыт использования в производстве печатных плат лазерных технологий, не менее богатый опыт применения лазерной стереолитографии для формирования трехмерных объектов из полимеров, тенденция к увеличению термостойкости базовых материалов и т. д. Очевидно, такие изделия придется и назвать как-то иначе. Поскольку термин «печатная плата» уже не будет отражать ни их внутреннего содержания, ни технологии изготовления.

Динамизация

Революционные преобразования в конструктивном исполнении печатных плат не ограничиваются объемными (статическими) преобразованиями. Хотя придание динамичности внутреннему содержанию этого объема — один из вариантов ответа на вопрос: «Что же будет дальше?» Перейдем к другой, более простой динамике. Для большинства людей печатная плата — это просто жесткая пластинка. Иногда для такой пластинки находят и другие применения, например, используют в качестве подставки для чашечки кофе. Настоящее надругательство над продуктом современной электроники!

Жесткие печатные платы — самый массовый продукт, используемый в радиоэлектронике, о котором знают практически все. А о том, что существуют еще и гибкие печатные платы, известно преимущественно специалистам. Пример — так называемые гибкие печатные кабели. Подобные печатные платы выполняют ограниченный объем функций (исключается функция подложки для радиоэлементов). Они служат для объединения обычных печатных плат, заменяя жгуты. Гибкие печатные платы приобретают эластичность благодаря тому, что их полимерная «подложка» находится в высокоэластическом состоянии. Гибкие печатные платы имеют две степени свободы. Их можно свернуть даже в ленту Мебиуса. Необходимость увеличения степеней свободы печатных плат диктуется не только объективными законами развития техники, но и субъективными факторами. Так, компания Nokia провела конкурс на оригинальный дизайн мобильного телефона будущего. Победила концепция гибкой пластины, которой можно придавать практически любую форму (скручивать в трубку, изгибать змейкой, дугой и т. д.) [6]. Как следствие, в таком телефоне должна быть предельно гибкая (жидкая?) батарея, эластичный дисплей... и гибкая печатная плата!

Одну или даже две степени свободы, но очень ограниченной свободы, можно придать и обыч-

ным жестким печатным платам, в которых полимерная матрица подложки находится в жестком — стеклообразном состоянии. Это достигается путем уменьшения толщины подложки. Одним из преимуществ рельефных печатных плат, изготавливаемых из тонких диэлектриков, называют возможность придания им «округлости». Тем самым появляется возможность согласовать их форму и форму объектов (ракет, космических объектов и др.), в которые их можно поместить. Результат — существенная экономия внутреннего объема изделий.

Промежуточное положение между жесткими и гибкими печатными платами занимают «древние» печатные платы, состоящие из жестких элементов, складываемых подобно гармошке [3]. Такие «гармошки», вероятно, и навели на мысль о создании многослойных печатных плат. Современные гибко-жесткие печатные платы реализованы иным способом. Речь идет преимущественно о многослойных печатных платах. В них можно совместить жесткие и гибкие слои. Если гибкие слои вывести за пределы жестких, можно получить печатную плату, состоящую из жесткого и гибкого фрагментов. Другой вариант — соединение двух жестких фрагментов гибким.

Классификация конструкций печатных плат, основанная на слоистости их проводящего рисунка, охватывает большую часть конструкций печатных плат, но не всех. Например, для изготовления тканых монтажных плат или шлейфов оказалось пригодным не печатное полиграфическое, а ткацкое оборудование [7]. Такие «печатные платы» уже имеют три степени свободы. Так же, как и обычная ткань, они могут принимать самые причудливые очертания и формы.

По ряду причин тканые печатные платы пока не получили широкого распространения. А вот их «наследников» ожидает большое будущее. Это... пригодная для носки тканая материнская плата компьютера [8]. Получить ткань, содержащую токопроводящие и/или оптические волокна, оказалось не так уж и трудно. Сложнее было встроить в нее датчики давления, температуры, чипы с датчиками вибрации и другое. Не оставили без внимания «умную ткань» и разработчики электронных компонентов. Реальностью сегодня стали полимерные транзисторы, изготавливаемые непосредственно на волокнах ткани. Такая же реальность — задачи совместимости процессоров и контроллеров различных «умных тканей» по отношению друг к другу, совместимости их программного обеспечения и т. д. В будущем из подобных «печатных плат» планируется делать форму для американских солдат. Токопроводящие нити, вплетенные в такую ткань, смогут подводить энергию к датчикам, исполнительным механизмам и микроконтроллерам, вплетенным в ту же ткань. Программное обеспечение будет управлять связью внутри «тканой сети» (on-fabric network) и поддерживать передачу радиосигналов ПК, карманному компьютеру или Интернет.

Что же дальше?

Традиционные гибкие печатные платы легко изменяют свою форму, но не размеры (точнее, соотношение размеров). Следующим этапом повышения их гибкости может быть появление гибких печатных плат, способных не только изгибаться, но и растягиваться. А как же медные проводники? А почему они должны быть обязательно медными (металлическими)? Аналоги в ближайшей к печатным платам области уже известны. Это растягиваемая портативная клавиатура (Vario Keyboard), предложенная компанией Rast Associates. Данная клавиатура может не только принимать самые разнообразные формы, но и растягиваться. В самом компактном состоянии она не больше почтовой марки, а при необходимости растягивается почти в 10 раз.

Материал подложки традиционных печатных плат находится в стеклообразном состоянии. Материал подложки гибких печатных плат должен находиться в высокоэластичном состоянии (промежуточном между стеклообразным и жидким состояниями полимеров). Вероятно, следующий шаг — переход от высокоэластического состояния к жидкому. Свернуть — некуда. Биологический аналог такой печатной платы — человеческий мозг. Если же объединить воедино «умную ткань» и «умную броню», то можно получить чуть более близкий аналог (прототип?). «Умная броня» — это ткань, пропитанная специальной жидкостью STF (Shear Thickening Fluid). Эластичность такой ткани является функцией от скорости механического воздействия на нее. Соответственно, она может быть и жесткой, и мягкой. Обычно — мягкой, иногда (если необходимо) — жесткой [9].

Преодоление противоречий

История развития печатных плат, так же как и история развития техники вообще, есть история неравномерного развития, история появления и разрешения противоречий. Вот ее некоторые подробности.

Печатные платы, изготавливаемые методом металлизации сквозных отверстий, несмотря на их широчайшее применение, обладают очень серьезным недостатком. С конструктивной точки зрения самое слабое звено таких печатных плат — места соединения металлизированных столбиков в переходных отверстиях и проводящих слоев (контактных площадок). Соединение металлизированного столбика и проводящего слоя идет по торцу контактной площадки. Длина соединения определяется толщиной медной фольги и обычно составляет 35 мкм и менее. Гальванической металлизации стенок переходных отверстий предшествует стадия химической металлизации. Химическая медь в отличие от гальванической меди более рыхлая. Поэтому соединение металлизированного столбика с торцевой поверхностью контактной площадки происходит через промежуточный, более слабый по прочностным характеристикам подслою химической меди. Коэффициент термического расширения стеклотекстолита гораздо больше, чем у меди. При переходе через темпера-

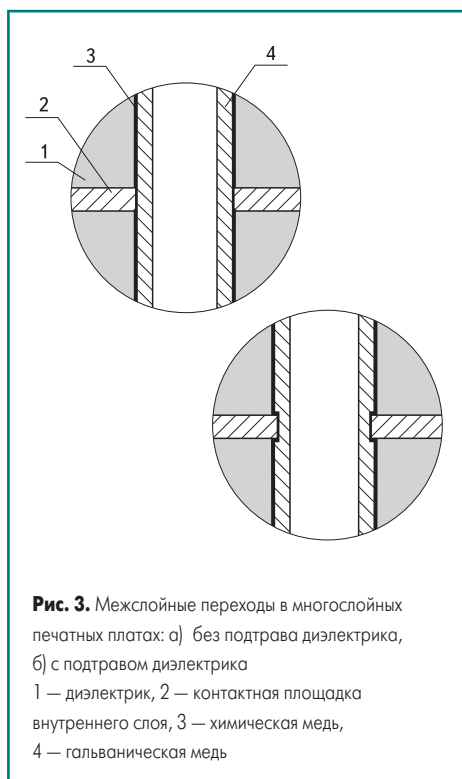


Рис. 3. Межслойные переходы в многослойных печатных платах: а) без подтрава диэлектрика, б) с подтравом диэлектрика
1 — диэлектрик, 2 — контактная площадка внутреннего слоя, 3 — химическая медь, 4 — гальваническая медь

туру стеклования эпоксидной смолы разница резко возрастает. При термических ударах, которые по самым разным причинам испытывает печатная плата, соединение подвергается очень большим механическим нагрузкам и... рвется. Как следствие, разрывается электрическая цепь и нарушается работоспособность электрической схемы.

В многослойных печатных платах повышение надежности внутренних переходов можно достичь введением дополнительной операции — подтрава (частичного удаления) диэлектрика в переходных отверстиях перед проведением металлизации. В таком случае соединение металлизированных столбиков с контактными площадками осуществляется не только по торцу, но и частично по внешним кольцевым зонам этих площадок (рис. 3).

Более высокой надежности металлизированных переходов многослойных печатных плат удалось добиться при использовании технологии изготовления многослойных печатных плат методом послойного наращивания (рис. 4). Соединения между проводящими элементами печатных слоев в этом способе осуществляются гальваническим наращиванием меди в отверстия слоя изоляции. В отличие от метода металлизации сквозных отверстий в данном случае переходные отверстия заполняются медью целиком. Площадь соединения между проводящими слоями становится гораздо больше, да и геометрия иная. Разорвать такие соединения не так-то просто. И все-таки эта технология тоже далека от идеальной. Переход «гальваническая медь — химическая медь — гальваническая медь» все равно остается.

Печатные платы, изготовленные методом металлизации сквозных отверстий, должны выдерживать не менее четырех (многослойные не менее трех) перепаек. Рельефные печатные платы допускают гораздо большее число перепаек (до 50). По мнению разработчиков,

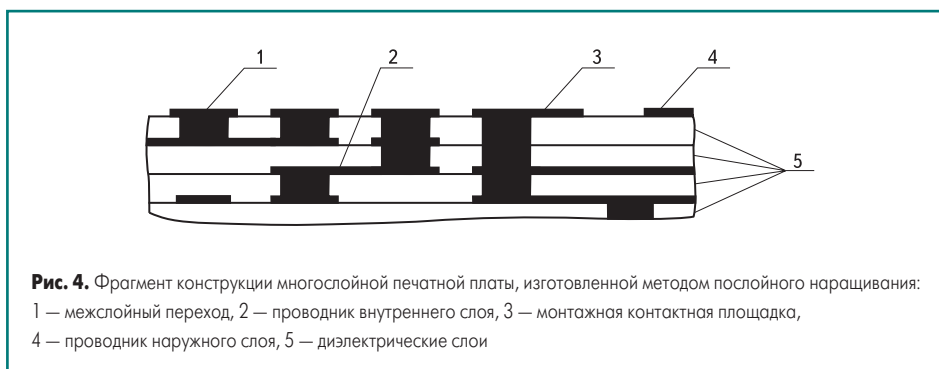


Рис. 4. Фрагмент конструкции многослойной печатной платы, изготовленной методом послойного наращивания:
1 — межслойный переход, 2 — проводник внутреннего слоя, 3 — монтажная контактная площадка, 4 — проводник наружного слоя, 5 — диэлектрические слои

металлизированные переходы в рельефных печатных платах не понижают, а повышают их надежность. Чем же вызван такой резкий качественный скачок? Ответ прост. В технологии изготовления рельефных печатных плат проводящие слои и соединяющие их металлизированные столбики реализуются в едином технологическом цикле (одновременно). Поэтому отсутствует переход «гальваническая медь — химическая медь — гальваническая медь». Но такой высокий результат был получен в результате отказа от самой массовой технологии изготовления печатных плат, в результате перехода к другому конструктиву. Отказаться от метода металлизации сквозных отверстий по многим причинам нежелательно. Как же быть?

Ответственность за образование барьерного слоя на стыке торцов контактных площадок и металлизированных пистонов в основном ложится на технологов. Они же эту проблему смогли и разрешить. Революционные изменения в технологию изготовления печатных плат внесли методы прямой металлизации отверстий [10], которая исключает стадию химической металлизации, ограничиваясь только предварительной активацией поверхности. Причем процессы прямой металлизации реализуются таким образом, что проводящая пленка возникает только там, где это нужно — на поверхности диэлектрика. Как следствие, барьерный слой в металлизированных переходах печатных плат, изготовленных методом прямой металлизации отверстий, просто отсутствует. Не правда ли, красивый способ разрешения технического противоречия?

Используя терминологию ТРИЗ, можно сказать, что в данном случае техническое противоречие задачи было разрешено стандартным методом (разнесение противоречивых требований в пространстве). С помощью того же метода удалось преодолеть техническое противоречие другой изобретательской задачи, также имеющей отношение к металлизации переходных отверстий [11]. Металлизируемые отверстия могут стать слабым звеном печатных плат по другой причине. Толщина покрытия стенок переходных отверстий в идеале должна быть равномерной по всей их высоте. Иначе вновь возникают проблемы с надежностью. Физико-химия процессов нанесения гальванических покрытий противодействует этому. Идеальный и реальный профиль покрытия в металлизированных переходных отверстиях приведены на рис. 5. Толщина по-

крытия в глубине отверстия обычно меньше, чем у поверхности. Причины самые разные: неравномерная плотность тока, катодная поляризация, недостаточная скорость обмена электролита и др. В современных печатных платах диаметр переходных металлизированных отверстий уже перешагнул отметку 100 мкм, а соотношение высоты к диаметру отверстия в отдельных случаях достигает 20:1. Ситуация предельно усложнилась. Физические методы (использование ультразвука, увеличение интенсивности обмена жидкости в отверстиях печатных плат и т. д.) уже исчерпали свои возможности. Начинает играть существенную роль даже вязкость электролита. Как быть?

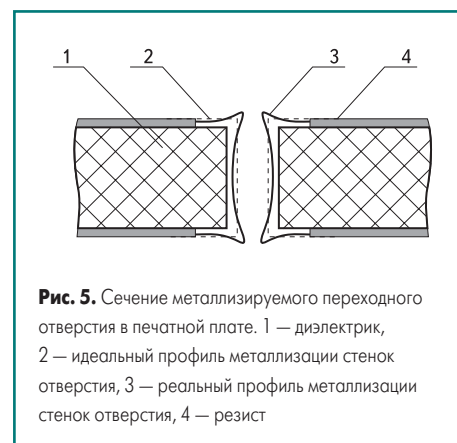


Рис. 5. Сечение металлируемого переходного отверстия в печатной плате. 1 — диэлектрик, 2 — идеальный профиль металлизации стенок отверстия, 3 — реальный профиль металлизации стенок отверстия, 4 — резист

Традиционно эта задача решалась благодаря использованию электролитов с выравнивающими добавками, которые адсорбируются в тех областях, где выше плотность тока. Сорбция таких добавок пропорциональна плотности тока. Добавки создают барьерный слой, противодействуя избыточному осаждению гальванического покрытия на острых кромках и прилегающих к ним областях (ближе к поверхности печатной платы).

Иное решение данной задачи теоретически известно давно, а практически его удалось воплотить совсем недавно — после того как был освоен промышленный выпуск импульсных источников питания большой мощности. Этот способ основан на использовании импульсного (реверсного) режима питания гальванических ванн. Большую часть времени подается прямой ток. При этом происходит осаждение покрытия. Меньшую часть времени подается обратный ток. Одновременно происходит растворение осажденного покрытия. Неравномерная плотность тока (больше у острых углов) в данном случае приносит только пользу. По этой причине растворение

покрытия происходит в первую очередь и в большей степени у поверхности печатной платы. В этом техническом решении применяется целый «букет» приемов разрешения технических противоречий: использовать частично избыточное действие, обратив вред в пользу, применить переход от непрерывного процесса к импульсному, сделать наоборот и др. Да и полученный результат соответствует этому «букету». При определенном сочетании продолжительности прямых и обратных импульсов даже появляется возможность получить толщину покрытия в глубине отверстия больше, чем у поверхности печатной платы. Вот почему такая технология оказалась незаменимой для заполнения металлом глухих переходных отверстий (достояния современных печатных плат), благодаря которым плотность межсоединений в ПП увеличивается примерно вдвое.

Проблемы, связанные с надежностью металлизированных переходов в печатных платах, носят локальный характер. Следовательно, противоречия, возникающие в процессе их развития, по отношению к печатным платам в целом также не носят всеобщего характера. Хотя такие печатные платы и занимают львиную долю рынка всех печатных плат.

Всеобщий характер носят другие противоречия, с которыми уже в течение столетия с переменным успехом сражаются разработчики и изготовители печатных плат. Эти противоречия возникают в процессе микроминиатюризации печатных плат — линии развития печатных

плат, вытекающей из действия закона перехода технических систем на микроуровень. ■

Продолжение следует.

Литература

1. Политехнический словарь. Редкол.: Ишлинский А. Ю. и др. М.: Советская энциклопедия. 1989.
2. Медведев А. М. Печатные платы. Конструкции и материалы. М.: Техносфера. 2005.
3. Из истории технологий печатных плат // Электроника-НТБ. 2004. № 5.
4. Новинки электронной техники. Фирма Intel возвещает эру трехмерных транзисторов. Альтернатива традиционным планарным приборам // Электроника-НТБ. 2002. № 6.
5. Истинно трехмерные микросхемы — первое приближение // Компоненты и технологии. 2004. № 4.
6. <http://dk.compulenta.ru/231626/>
7. Мокеев М. Н., Лапин М. С. Технологические процессы и системы производства тканых монтажных плат и шлейфов. Л.: ЛДНТП. 1988.
8. Володарский О. Мне идет этот компьютер? Электроника, вплетенная в ткань, становится модной // Электроника-НТБ. 2003. № 8.
9. <http://www.news.pravda.ru/index.html>
10. Медведев А. М. Технология производства печатных плат. М.: Техносфера. 2005.
11. Медведев А. М. Импульсная металлизация печатных плат // Технологии в электронной промышленности. 2005. № 4.