

# Печатные платы — линии развития

Владимир Уразаев,  
к. т. н.

urazaev@yandex.ru

## Переход на микроуровень

Согласно фундаментальному закону термодинамики энтропия (мера упорядоченности) замкнутой системы не может убывать. В соответствии с этим законом зарождение Земли и появление человека, как это ни печально, есть случайные отклонения от общей генеральной тенденции (флуктуации). Использовать дробление — один из 40 общих способов (принципов) разрешения технических противоречий, выявленных Г. С. Альтшуллером полвека тому назад в процессе анализа закономерностей развития техники. Сформулированный позже на его основе закон перехода технических систем на микроуровень очень хорошо согласуется с базовыми основами термодинамики.

Печатные платы также не остались в стороне от общей тенденции. «Микроминиатюризация» — ключевое слово современной электроники. Вдумайтесь в смысл этого слова. Оно состоит из двух похожих по смыслу частей: микро и мини. Видимо, не просто так они объединились в одном слове. Линии развития печатных плат есть линии уменьшения, уменьшения и уменьшения ее элементов; линии уплотнения — уплотнения и уплотнения их расположения. Под «элементами» в данном случае следует понимать как собственное достояние печатных плат (проводники, переходные отверстия и др.), так и элементы из надсистемы (печатного узла) — радиоэлементы. Последние по скорости осуществления микроминиатюризации идут впереди печатных плат. Микроэлектроника — их родная наука. Микротехнологии используются для их изготовления. Причем радиоэлементы уменьшаясь — увеличиваются. Уменьшаются их габаритные размеры, а увеличиваются размеры электрических схем, «запрятанных» в их объем. Печатные платы вынуждены быть вторыми — подстраиваться под заданный лидерами темп.

Увеличение плотности расположения элементной базы требует того же самого от проводников печатной платы — носителя данной элементной базы. В связи с этим возникает множество задач, требующих решения. О двух таких задачах и способах их решения мы и поговорим подробнее.

Первая проблема затрагивает область профессиональных интересов автора. Как обеспечить изоляцию в таких сверхупакованных печатных платах? Уровень изоляции однозначно связан с расстоянием между токопроводящими элементами. Чем оно меньше, тем выше должны быть абсолютные характеристики диэлектрических свойств подложки. А они уже сейчас на пределе. Кроме того, эти же диэлект-

рические характеристики также однозначно связаны с влажностью окружающей среды. Влага неизбежно присутствует в окружающей среде. Чем выше влажность, тем диэлектрические характеристики хуже. Причем при переходе «вниз» эта чувствительность повышается. Печатные платы превращаются в своеобразные датчики влажности окружающей среды. Как быть?

Первые способы изготовления печатных плат были основаны на приклеивании проводников из медной фольги к поверхности диэлектрической подложки. Предполагалось, что ширина проводников и зазоры между проводниками измеряются миллиметрами. В этом варианте такая технология была вполне работоспособной. Последующая миниатюризация электронной техники потребовала создания иных методов изготовления печатных плат, основные варианты которых (субтрактивные, аддитивные, полуаддитивные, комбинированные) используются и поныне. Применение таких технологий позволило реализовать печатные платы с размерами элементов, измеряемых десятками долями миллиметра.

Достижение уровня разрешения в печатных платах примерно 0,1 мм (100 мкм) стало знаковым событием. С одной стороны, произошел переход «вниз» еще на один порядок. С другой — своеобразный качественный скачок. Почему? Диэлектрической подложкой большинства современных печатных плат является стеклотекстолит — слоистый пластик с полимерной матрицей, армированной стеклотканью. Уменьшение зазоров между проводниками печатной платы привело к тому, что они стали соизмеримы с толщиной стеклянных нитей или толщиной узлов переплетения этих нитей в стеклоткани. И ситуация, при которой проводники «замыкаются» такими узелками, стала вполне реальной. Как следствие, стало реальным и образование своеобразных капилляров в стеклотекстолите, «замыкающих» данные проводники. В условиях повышенной влажности капилляры, в конечном счете, приводят к ухудшению уровня изоляции между проводниками печатных плат. А если точнее, это происходит даже в условиях обычной влажности. Конденсация влаги в капиллярных структурах стеклотекстолита отмечается и в нормальных условиях. Влага всегда снижает уровень сопротивления изоляции.

Поскольку в современной радиоэлектронной аппаратуре такие печатные платы стали явлением обычным, можно сделать вывод, что эту проблему разработчикам базовых материалов для печатных плат все же удалось разрешить традиционными методами. Но справятся ли они со следующим знаковым событием? Очередной качественный скачок уже произошел.

В работе [12] сообщается о том, что специалистами компании Samsung освоена технология изготовления печатных плат с шириной проводников и зазорами между ними 8–10 мкм. А ведь это уже толщина не стеклянной нити, а стекловолокна! Разнопотенциальные проводники в таких печатных платах могут «закрываться» уже капиллярами, реализованными на границе раздела этих волокон и полимерной матрицы стеклотекстолита. Такова проблема сегодня.

Какой же следующий качественный скачок нам следует ожидать в ближайшем будущем? Если развитие в области конструирования базовых материалов для печатных плат не пойдет по иному сценарию, то ответ очевиден. Очередной переход количества в качество может произойти, когда зазоры между проводниками печатных плат сравниваются с линейными размерами элементов надмолекулярной структуры полимерной матрицы. На первый взгляд, не совсем понятно, о какой надмолекулярной структуре можно вести речь в трехмерных полимерах. В качестве полимерной матрицы в стеклотекстолитах используются пространственные (сшитые) полимеры с молекулярной массой, близкой к бесконечности. Но механизм их образования таков, что предполагает наличие в конечном полимере областей с большей и с меньшей упорядоченностью и/или разряженностью полимерной сетки [13]. Причем чаще всего реализуются такие структуры, где своеобразные ядра имеют более высокую степень сшивки, а разделяющие их прослойки — меньшую. В образовании неоднородностей полимерной сетки дополнительный вклад вносят и дефектность структурообразования, свойственная всем реальным полимерам.

Рискнем заявить, что уже существуют возможные варианты нетрадиционного решения рассмотренных проблем. Это собственные разработки автора по полимеризационному наполнению диэлектрических подложек печатных плат. Суть технологии заключается в том, что макро- и микродефекты в диэлектрической подложке печатной платы заполняются жидкостью, которая при последующей термообработке способна превращаться в диэлектрик (полимер) с отличными электроизоляционными свойствами [14, 15]. Соответственно, улучшаются и диэлектрические характеристики подложки в целом. Полимеризационное наполнение позволяет устранить (заполнить) дефектные полости, локализованные на границе раздела «стекло–эпоксидная смола» в диэлектрических подложках печатных плат. Оказалось, что оно возможно и на большие «подвижки». С таким же успехом полимеризационное наполнение устраняет дефекты надмолекулярной структуры эпоксидной полимерной матрицы, те самые, которые будут лимитировать уровень диэлектрических свойств печатных плат завтрашнего дня.

Задача обеспечения изоляции в сверхмалых зазорах между проводниками настоящих и особенно будущих печатных плат сложна. Какими методами она будет решаться — традиционными либо нетрадиционными — и будет ли решена — покажет время. Не менее сложна

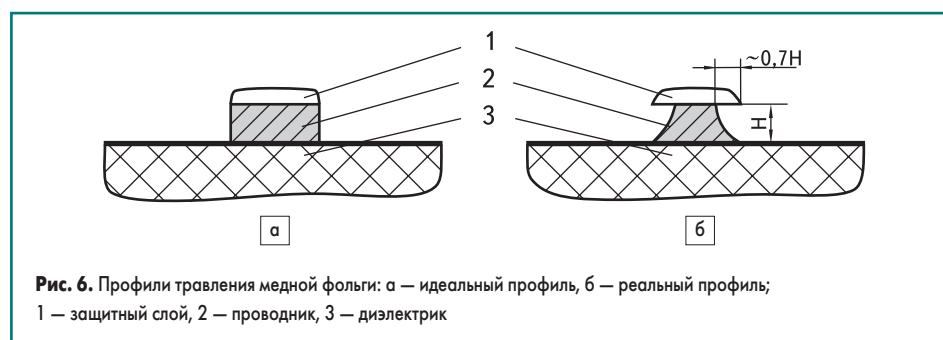


Рис. 6. Профили травления медной фольги: а — идеальный профиль, б — реальный профиль; 1 — защитный слой, 2 — проводник, 3 — диэлектрик

другая задача: как получить в печатных платах сверхмалые (сверхузкие) проводники. По многим причинам в технологиях изготовления печатных плат массовое распространение получили субтрактивные методы. В субтрактивных методах рисунок электрической схемы формируется путем удаления ненужных фрагментов фольги. Еще в годы Второй мировой войны Пауль Эйслер отработал технологию травления медной фольги хлорным железом. Соавтором этой технологии, очевидно, была его жена. Все эксперименты по отработке технологии проводились на кухне — на ее рабочем месте. Столь неприязнительная технология используется радиолюбителями до сих пор. Промышленные технологии недалеко ушли от этой «кухонной» технологии. Разве что изменился состав травильных растворов и появились элементы автоматизации процесса.

Принципиальный недостаток абсолютно всех технологий травления заключается в том, что травление идет не только в желаемом направлении (по направлению к поверхности диэлектрика), но и в нежелаемом поперечном направлении. Боковой подтрав проводников соизмерим с толщиной медной фольги (около 70%). Обычно вместо идеального профиля проводника получается грибовидный профиль (рис. 6). Когда ширина проводников велика, а в самых простых печатных платах она измеряется даже миллиметрами, на боковой подтрав проводников попросту закрывают глаза. Если же ширина проводников соизмерима с их высотой или даже меньше ее (реалии сегодняшнего дня), то «боковые устремления» ставят под сомнение целесообразность применения таких технологий.

На практике величину бокового подтрав печатных проводников удается уменьшить в какой-то степени. Это достигается увеличением скорости травления; использованием струйного облива (струи травителя совпадают с желаемым направлением — перпендикулярно плоскости листа), а также другими способами. Но когда ширина проводника приближается к его высоте, эффективность таких усовершенствований становится явно недостаточной.

В технологиях изготовления печатных плат шаг вперед позволило сделать использование базовых материалов с тонкомерной фольгой, например СТПА-5. Противоречивые требования к толщине фольги (должна быть толстой и должна быть тонкой) в данном случае удалось разрешить благодаря разнесению этих требований во времени. В момент травления толщина маленькая, следовательно, подтрав

проводников невелик. Необходимая по конструктивным требованиям толщина проводника получается в результате последующего гальванического наращивания меди. Уменьшение толщины медной фольги от обычной (35–50 мкм) до 5 мкм позволило реализовать технологию изготовления печатных плат 4–5 классов точности. (4 классу точности соответствует ширина проводников и зазоров между ними 0,15 мм, 5 классу точности — 0,10 мм).

На практике боковой подтрав проводников в печатных платах получается чуть больше, чем в идеальном случае. Причина в том, что необходимо гарантированно удалить медь со всех «пробельных» мест печатной платы. Поэтому процесс травления приходится проводить чуть дольше, чем нужно. Увеличение времени травления, а следовательно, и увеличение подтрав проводников, связано и с другой реальностью. Установлено, что при травлении печатных плат методом струйного облива травящая жидкость распределяется на поверхности печатной платы неравномерно. В центре печатной платы образуется своеобразная лужица. Соответственно, на периферии печатной платы или групповой заготовки получается недотрав, а в центре — перетрав. Недавно появились сообщения о разработке высокоинтеллектуальных установок травления, в которых применяется селективное струйное травление печатных плат. Подача травильной жидкости в отдельных форсунках регулируется с учетом образов печатных плат и их расположения в камере, заранее заложенных в память компьютера. На центральную часть заготовки подается меньше травящей жидкости, чем в периферийные зоны. Использование таких «умных» установок, очевидно, поможет еще на 10–20% уменьшить конечную величину бокового подтрав проводников. А как же быть с 6 и 7 классами точности изготовления печатных плат?

Идеальный вариант — искать решение на стороне. Почему бы не получить такую медную фольгу, скорость травления которой во взаимоперпендикулярных направлениях различна? Можно рассмотреть несколько вариантов решения задачи. К примеру, реализовать анизотропную кристаллическую структуру меди в фольге. Но, увы, такой подход пока еще не реализован. Другой вариант — использовать анизотропные травители (anisotropic etching), ставшие сегодня реальностью [16] в микроэлектронике.

Одно из решений данной задачи было предложено в СССР Ф. П. Галецким еще в 1982 году [17]. Речь идет о технологии изготовления пе-

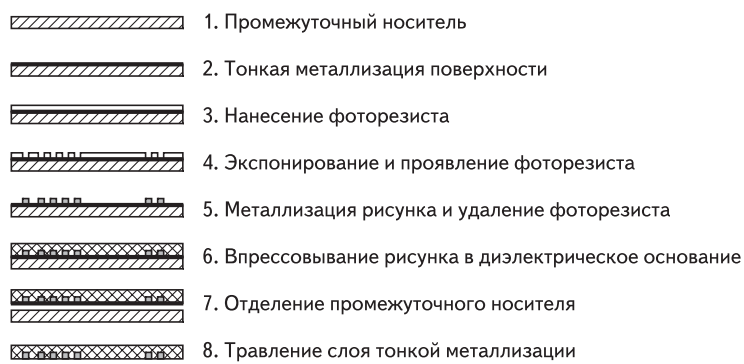


Рис. 7. Технологическая схема получения слоев печатных плат методом переноса

чатных плат методом ПАФОС (полностью аддитивное формирование отдельных слоев). В этой технологии используется метод переноса. Проводящий рисунок сначала формируется на «посреднике» — временных носителях, поверхность которых покрывается гальванически осажденной медной шиной. В качестве посредника применяются листы из нержавеющей стали — на них и формируется защитный рельеф пленочного фоторезиста. Проводники получают гальваническим осаждением тонкого слоя никеля и меди во вскрытые в фоторезисте рельефы. После удаления пленочного фоторезиста проводящий рисунок впрессовывается в диэлектрик. Прессованный слой вместе с медной шиной механически отделяется от поверхности временных носителей. В слоях без межслойных переходов медная шина стравливается. При изготовлении двухсторонних слоев с межслойными переходами (двухсторонних печатных плат) перед травлением медной шины создаются межслойные переходы посредством металлизации отверстий.

Преимущество метода заключается в том, что проводящий рисунок, утопленный в диэлектрик и защищенный сверху слоем никеля, при удалении медной шины не подвергается травлению. Поэтому форма, размеры и точность проводящего рисунка определяются рисунком рельефа, который использовался для получения проводников, то есть процессами фотолитографии. Профиль проводников, получаемых по этой технологии, близок к идеальному. При решении задачи в соответствии с данной технологией центр тяжести смещается из области химии, а травление (химический процесс) — в область фотолитографии. Достижения в области фотолитографии и лазерного экспонирования позволяют реализовать в печатных платах проводники и зазоры между ними величиной 50 мкм и менее. Работы Ф. П. Галецкого в какой-то степени опередили свое время. Упомянутая технология (8–10 мкм) компании Samsung как две капли воды похожа на метод ПАФОС.

Основные стадии этих технологий-близнецов показаны на рис. 7.

Еще более высокий уровень разрешения можно получить, используя иные физические или физико-химические методы, широко распространенные в микроэлектронике: это сфокусированные лучи — электронный (Electron Beam Machining), лазерный (Laser Beam Machining),

ионный (Ion Beam Machining), а также микроэлектроэрозионная (Micro Electro Discharge Machining) или микроэлектрохимическая (Micro Electro Chemical Machining) обработка [16]. Лазерное гравирование уже используется в технологиях изготовления печатных плат, но из-за дороговизны процесса это пока лишь экзотика.

#### Местное качество

Прием разрешения технических противоречий — «использовать местное качество» — в отличие от других, более удачливых методов не поднялся до уровня закона развития технических систем. Но еще не вечер...

Чаще всего обращение к этому приему диктуется экономическими факторами. Он широко используется изготовителями базовых материалов (диэлектрических подложек) для печатных плат, стремящимися удешевить свою продукцию. Подобное стремление реализуется следующим образом: материалы (компоненты) улучшенного качества используются там, где это больше всего нужно. Так, в стеклотекстолитах стеклоткань применяется только в поверхностном слое, а для наполнения внутренних слоев предназначен более дешевый стеклохолст. Другой вариант — ближе к поверхности используется стеклоткань более высокого качества, чем во внутренних слоях, и т. д.

В современных многослойных печатных платах для изготовления наружных слоев используются диэлектрики с иным полимерным связующим (полиимид), чем во внутренних слоях (эпоксидная смола). В данном случае причины реализации именно такого технического решения диаметрально противоположны. Это решение удорожает печатную плату, но... предоставляет множество полез-

ных преимуществ, имеющих прямое отношение к таким понятиям, как микроминиатюризация и интеграция.

Отнюдь не экономическими причинами руководствовался и автор, разрабатывая технологию полимеризационного наполнения подложек печатных плат. Получение технического эффекта было главной целью этой разработки. Если точнее — получение максимального эффекта при минимальных затратах, минимальных изменениях в технической системе. Полимеризационное наполнение значительно улучшает диэлектрические характеристики подложки печатной платы. Всегда ли, а точнее, везде ли это нужно? В одно и/или двухсторонних печатных платах за обеспечение необходимого уровня сопротивления изоляции максимальную ответственность несет поверхностный слой стеклотекстолита. Обеспечение максимального уровня поверхностного сопротивления изоляции гораздо важнее, чем обеспечение максимального уровня объемного сопротивления изоляции. Исходя из этого, изготовители базовых материалов экономят на качестве материалов, предназначенных для «внутренней начинки». Полимеризационное наполнение можно использовать также для «улучшения» только поверхностного слоя диэлектрической подложки. Распределение полимера-наполнителя по толщине диэлектрической подложки печатной платы показано на рис. 8.

В многослойных печатных платах очень важно обеспечить высокий уровень сопротивления изоляции между питающими слоями и пронизывающими их металлизированными переходными отверстиями. С учетом этого полимеризационное наполнение может осуществляться на стадии, предшествующей металлизации отверстий. Причем «усиление» диэлектрической подложки происходит вновь избирательно в кольцевых зонах вокруг переходных отверстий — именно там, где это больше всего нужно. Можно привести множество подобных примеров, но собственные технические решения, думаем, гораздо убедительнее.

Ну а теперь хотелось вернуться к тому, с чего начинался этот раздел: не пора ли подумать о повышении статуса приема разрешения технических противоречий?

#### Повышение идеальности

Действие закона повышения идеальности технических систем прекрасно иллюстрируют современные тенденции развития оборудования для прессования многослойных печатных

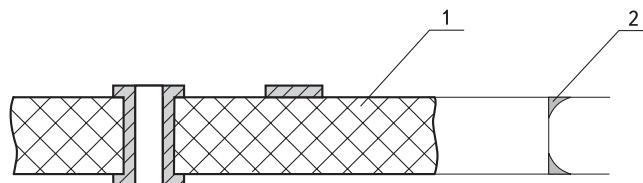


Рис. 8. Распределение полимера-наполнителя по толщине диэлектрической подложки печатной платы:

- 1 — диэлектрическая подложка печатной платы,  
2 — относительное содержание полимера-наполнителя по толщине подложки

плат. Для печатных плат это надсистема, но все же... Так в работе [18] отмечается, что наблюдается постепенный переход к прессованию многослойных печатных плат без пресс-форм. Это позволяют делать системы совмещения слоев с бандажированием пакета слоев: пресс-формы нет, а функция выполняется. Появилась новая система нагрева — нагрев непрерывной ленты фольги внешних слоев многослойной печатной платы, по которой пропускают большие токи (до 2000 А). В данном случае задействованы внутренние ресурсы системы: нагревателя как такового нет, а нагрев происходит.

Повышение идеальности наблюдается и в самих печатных платах. Увеличивается их функциональность. В соответствии с законом повышения идеальности технических систем отмечается процесс сращивания (интегрирования) печатных плат и элементной базы. Некоторые элементы электрических схем (индуктивности, емкости, сопротвления) создаются методами печати непосредственно в процессе изготовления печатных плат. В частных случаях (для получения на внутренних слоях многослойных печатных плат резисторов) используют специальную двухслойную фольгу, состоящую из меди и резистивного материала. Идеальность этого решения заключается в том, что планарные радиоэлементы получаются сами собой, одновременно с формированием рисунка схемы, не требуя дополнительных материальных и трудовых затрат. Выполнение многослойных межсоединений в многослойных структурах современных печатных плат (сквозных, слепых, глухих) позволяет увеличить коэффициент использования площади внутренних слоев многослойных печатных плат и разместить эти элементы внутри печатной платы.

Дальнейшее развитие данного процесса — в печатные платы встраиваются кристаллы микросхем с обеспечением нужных межсоединений, сенсорных датчиков, микродатчиков магнитного потока [19–21]. Еще более эффективным и, главное, гораздо более завершающим процессом является встраивание элементной базы в самый современный вариант печатной платы — в «умную ткань». В данном случае удалось от фрагментарного введения в печатную плату отдельных радиоэлементов перейти к функционально законченному изделию.

Планарные технологии, похоже, еще не исчерпали своих возможностей. Объемная печать, возможно, станет реальностью ближайшего будущего. Специалистами университета Беркли (США, Калифорния) также разрабатывается технология, позволяющая создавать функционально законченные изделия (печатные узлы). А изготавливаться они будут на обыкновенном принтере [22]. Название такой технологии — «флексоника». Принтеры, способные производить многослойную печать специальными полимерами, уже существуют и используются для производства прототипов новых устройств. Как только удастся разработать специализированный картридж для принтера, с помощью которого можно наносить все необходимые типы покрытий (диэлектрики,

полупроводники и проводники и т. д.), задача будет решена. Появится возможность распечатать на принтере мобильный телефон, радиоприемник и т. д. Такие изделия будут содержать электронные компоненты на основе полимеров. Правда, характеристики полимерных электронных компонентов пока значительно уступают обычным. Например, полимерные транзисторы работают примерно в 100 раз медленнее кремниевых. Но цена таких устройств может оказаться настолько низкой, что они станут одноразовыми.

### Дробление — объединение

Микроминиатюризация и интеграция (дробление и объединение) — два противоположных процесса, которые, как это ни странно, осуществляются в радиоэлектронике в единых временных рамках. В первую очередь такое странное сочетание характерно для изделий микроэлектроники, тех изделий, носителями которых являются печатные платы. На первый взгляд, одно исключает другое. На второй — одно дополняет другое. Уровень разрешения изделий микроэлектроники измеряется уже нанометрами. Как следствие, в небольшом объеме удается разместить все больше и больше функционально законченных электрических схем.

Сборка электрических схем из отдельных радиоэлементов, похоже, уже канула в Лету. Передатчики, приемники, усилители и другие крупные блоки электронных схем могут быть реализованы в пределах одной микросхемы. Индивидуальные радиоэлементы используются преимущественно для согласования их характеристик. Сегодня возможной становится реализация в пределах одной микросхемы функционально законченных устройств — устройств, характеризующихся комплексом потребительских свойств (компьютеров, сотовых телефонов и т. д.).

### Согласование — рассогласование

Остановимся подробнее на первой части этого закона. В печатных платах она наиболее актуальна. Печатная плата — совокупность множества материалов, обладающих различными физическими свойствами, согласовать которые необходимо. Фольгированный стеклотекстолит (исходный материал для получения большинства печатных плат) состоит как минимум из трех материалов с диаметрально противоположными свойствами: медь (металл), эпоксидная смола (полимер), стекло (смесь неорганических соединений).

Для того чтобы печатная плата была способна удовлетворять множеству требований, эти материалы и/или свойства этих материалов следует согласовать. А это непростая задача, поскольку требования зачастую противоречат друг другу. Более того, улучшение какой-то одной характеристики, как правило, ведет к ухудшению другой характеристики диэлектрика.

Использование наполнителей позволило значительно улучшить физико-механические свойства подложки. Применение в качестве

наполнителя слоев стеклоткани, а не просто стекловолокна, привело к существенному уменьшению коэффициента термического расширения (КТР) стеклотекстолита в плоскости листа. Поэтому разрывы проводников печатных плат, лежащих «в плоскости», — большая редкость. В направлении, перпендикулярном плоскости листа, остаются прослойки из эпоксидной смолы, не связанные стеклотканью. Вот почему КТР стеклотекстолита в этом направлении значительно больше. Кроме того, данный коэффициент заметно увеличивается при температуре, превышающей температуру стеклования эпоксидной смолы. Как следствие, при термических ударах очень сильно расширяющийся стеклотекстолит разрывает значительно менее склонный к расширению металлизированный столбик, связывающий проводники на двух сторонах печатной платы, а в многослойных печатных платах еще и внутренние слои. Есть традиционное решение этой задачи — как можно выше поднять температуру стеклования полимерной матрицы (эпоксидной смолы). Однако желаемого уровня согласования в этом направлении пока не получено.

Принципиально новый подход — использование полимера в качестве наполнителя полимерной матрицы подложки. Полимерный наполнитель (волокна ароматического полиамида — кевлара) в продольном направлении имеет даже отрицательный по отношению к полимерной матрице подложки КТР [23]. Применение таких базовых материалов позволяет получить высокую стабильность линейных размеров слоев, из которых изготавливаются многослойные печатные платы. А это весьма важно для очень сложных и насыщенных печатных плат. Таким способом удается снять элементы рассогласования отдельных слоев многослойных печатных плат, вносимые неизбежными колебаниями температуры окружающей среды. К сожалению, в другом направлении (перпендикулярно плоскости листа) использование в качестве наполнителя кевлара проблемы несогласованности КТР не снимает.

Не снимает оно и другой проблемы — общей для всех композиционных материалов: наличие границы раздела фаз, а следовательно, и наличие макро- и микродефектов на этой границе. Соответственно, для таких материалов характерны пористость, повышенное водопоглощение и значительное снижение диэлектрических характеристик на финише, особенно при повышенной влажности окружающей среды. Согласование (связывание) полимерной матрицы и наполнителя обычно осуществляется с помощью веществ-посредников (аппретов) [24]. В общем случае это химические соединения, содержащие как минимум две функциональные группы, одна из которых способна взаимодействовать с наполнителем, а другая — с полимерной матрицей. В лучшем варианте природа этого взаимодействия — химическая связь. И вновь несколько слов о полимеризационном наполнении. Его использование позволяет повысить эффективность взаимодействия не на химическом, а на топологическом уровне. В основе

такого взаимодействия лежит образование взаимопроникающих полимерных сеток полимера наполнителя и полимерной матрицы диэлектрической подложки печатной платы [25]. Химических связей нет, а чтобы разъединить обе полимерные сетки, химические связи все-таки нужно порвать!

До сих пор мы говорили о внутренних проблемах печатных плат. Не меньше, а даже больше проблем у печатных плат возникает в связи с необходимостью согласования с надсистемой, и в первую очередь с элементной базой. Согласование КТР радиоэлементов (особенно элементов для поверхностного монтажа) и КТР подложки печатной платы не менее сложная задача, чем внутренние согласования в самой печатной плате.

Надсистема диктует свои условия печатным платам. Микроминиатюризация элементной базы привела к тому, что печатные платы изменились не только внешне, но и внутренне. О внешних изменениях мы уже говорили. Производители печатных плат и зазоры между ними приходится рассматривать уже под микроскопом. Но этого оказалось явно недостаточно. Произошли и серьезные внутренние изменения [26]. Появление элементной базы в микроразмерах с малым шагом выводов потребовало создания высокоплотных многослойных печатных плат (high density printed circuit). В конструкциях печатных плат появились глухие микропереходы (blind microvia), внутренние или скрытые микропереходы (buried microvia), скрытые сквозные металлизированные отверстия. Глухие микропереходы выполняются между наружным и ближайшими внутренними (перераспределительными) слоями, а скрытые микропереходы и скрытые сквозные отверстия — между внутренними слоями многослойных печатных плат.

Изменения в конструкциях потребовали изменений в технологиях их изготовления. Для производства высокоинтегрированных многослойных печатных плат применяется технология наращивания (built-up technology), которая представляет собой комбинацию методов металлизации сквозных отверстий и послойного наращивания. Основа этой технологии — изготовление многослойной печатной платы и наращивание на нее последовательности слоев с микропереходами. Так, структура «2 + 4 + 2» означает, что на основу (4-слойную печатную плату) с обеих сторон наращено по два слоя с микропереходами.

Технология наращивания обеспечила большую экономию площади для трассировки благодаря:

- малой ширине проводников внутренних слоев;
- малым диаметрам микроотверстий;
- разнообразию вариантов размещения глухих и скрытых отверстий;
- размещению глухих отверстий в контактных площадках, на которые монтируются элементы;
- использованию для коммутации элементной базы в микроразмерах (BGA, CSP, COB) не только наружных, но и ближайших внутренних слоев.

Проявление закона согласования—рассогласования можно рассмотреть и на ином уровне. Применение элементов поверхностного монтажа (SMD-компонентов) позволило уменьшить толщину печатных узлов и, следовательно, габариты изделий электронной техники. На этом фоне в прямом и переносном смысле выделялись трансформаторы и дроссели. В соответствии с тем же законом изобретатели «постучали по приподнятым шляпкам этих гвоздей». В результате появились планарные трансформаторы, в которых многослойные печатные платы заменили проволочные обмотки [27].

### Где-то далеко

К чему же может привести раздельное и/или совместное действие законов развития технических систем? С отдельными законами разобраться проще. А что получится в результате наложения тенденций, соответствующих разным законам развития, число которых на данный момент уже приближается к двадцати [28], — задача со многими неизвестными. Развитие событий по каждой отдельной линии может происходить с разной скоростью. Не исключены и резкие отклонения (повороты) в том или ином направлении, связанные с будущими изобретениями и открытиями. А развитие таких направлений, как, например, нанотехнология, делает вполне реальными любые самые фантастические на данный момент явления и эффекты. К сожалению, в технике на развитие событий оказывает существенное влияние еще и человеческий (субъективный) фактор. Но несмотря на это, попробуем все-таки спрогнозировать основные тенденции развития печатных плат.

Рассмотрев последовательность «точка — линия — плоскость — объем», можно сделать вывод, что большая часть объектов нашего исследования находится на финишной стадии (объем). Что же делать дальше? Пожалуй, самое время перейти от пространственно упорядоченной (плоскостной) компоновки ее основных элементов (проводников) к хаотичному расположению. Другой (или параллельный?) вариант развития событий — придание динамичности внутреннему объему печатных плат.

А еще лучше — придать динамичность и поверхности, ограничивающей объем печатных плат. К максимально подвижным (жидким печатным платам) подводит нас логика развития событий в области повышения динамичности печатных плат. Это отдаленная перспектива. Чуть более приближена к настоящему дню комбинация из предельно гибких тканых печатных плат и жидкого наполнителя. Кстати, похожий вариант уже был опробован автором в обычных (твердых) печатных платах [29]. Свободный внутренний объем (пористость) печатных плат заполнялась жидким диэлектриком. Тем самым уменьшалось водопоглощение и улучшались диэлектрические характеристики подложки печатной платы. Гибкими такие печатные платы не становились, а вот их влагостойкость, так необхо-

димая при эксплуатации в жестких условиях, существенно повышалась.

На данном этапе развития объектов исследования уже реально происходит размывание границы между двумя понятиями — «печатная плата» и «печатный узел». Радиоэлементы стремятся внутрь печатной платы, а печатная плата, приспособившись (согласуясь) к этому устремлению, поглощает их. Данное направление развития соответствует закону повышения идеальности технических систем. Отдаленная перспектива очевидна — слияние печатных плат и изделий микроэлектроники в единое целое.

Сочетание двух противоположных процессов — микроминиатюризация и интеграция (дробление и объединение) — приводит к тому, что все более сложные законченные функциональные устройства могут быть реализованы в пределах изделий микроэлектроники. В данном варианте развития событий печатная плата в какой-то степени даже исчезает. Отпадает необходимость в одной из основных ее функций — осуществлении электрических соединений между радиоэлементами. Носителем функционально законченной микросборки в принципе может быть любой конструктивный элемент.

К такому же выводу можно прийти, основываясь в своих рассуждениях на действии закона повышения идеальности технических систем. Формулировка идеального конечного результата (ИКР) будет такова: печатной платы нет, а ее функция выполняется...

Микроминиатюризация, а в последнее время даже наноминиатюризация, стали достоянием современной электроники. Процесс микроминиатюризации печатных плат, видимо, не имеет предела. На данный момент отдельные элементы печатных плат измеряются уже микронами — то есть находятся на подступах к нанометрам. Впереди — область, занятая ныне микроэлектроникой. Не пройдет и десятка лет, как продукты микроэлектроники освободят эту нишу для своих носителей. А для освоения этой ниши, очевидно, придется использовать материалы, конструкции и технологии, заимствованные из производства микросхем.

Что же дальше? Да, как ни печально, но в отдаленной перспективе термин «печатная плата» в современном понимании исчезнет. В перспективе виден гибрид, облик которого гораздо ближе к изделию микроэлектроники, чем к печатной плате в сегодняшнем виде.

А если смотреть дальше, то и изделия современной твердотельной микроэлектроники ждут нелегкие времена. Закон Мура, согласно которому плотность упаковки элементов микроэлектроники должна удваиваться каждые 1,5–2 года, уже не выполняется. 65-нанометровые технологии стали реальностью сегодняшней микроэлектроники [30]. Но разработчики уже давно мысленно находятся в других «мирах». Взоры направлены на химические, биологические и иные устройства, реализуемые на уровне атомов и молекул.

Поэтому если смотреть еще дальше, то можно прийти и к той самой точке, которую мы пропустили выше, рассматривая историю про-

странственного развития печатных плат сразу с линии. Потомки печатных плат в своем эволюционированном виде могут превратиться в точку, завершив тем самым эволюционную петлю своего развития.

### Профессия технолог: быть или не быть?

Суждено ли превратиться в точку или же даже в отрицательную величину созидателью этой сложнейшей техники — человеку? Вытеснение человека из технических систем (в данном случае из технической системы производства печатных плат) происходит повсеместно. Автоматизация технологических процессов — веление времени. И никого этим не удивить. Гораздо интереснее иной аспект проблемы.

Дело в том, что большая часть технологий изготовления печатных плат включает так называемые «мокрых» процессов (нанесение гальванических покрытий, нанесение химических покрытий, травление и др.). Как правило, это очень сложные нестационарные химические процессы. Технологические параметры (в первую очередь концентрации полезных и вредных составляющих растворов) изменяются во времени и очень быстро. Особенно это характерно для процессов химической металлизации, основа которых — окислительно-восстановительные реакции. Следовательно, необходим постоянный контроль технологических растворов по множеству параметров и постоянная их корректировка. «Умная» автоматика не всегда способна справиться с такой задачей. Тогда к ней на помощь приходит человек — технолог. Его главная задача — обеспечить на выходе гарантированно высокое качество продукции (в данном случае печатных плат). Для этого ему приходится использовать свой интеллект.

В последние годы за рубежом прослеживается тенденция перехода на так называемые «концентраты». Поставляются концентраты с кодовыми названиями А, В и т. д. Что представляют собой эти А и В по химическому и компонентному составу — обычно не указывается. Дается инструкция, как ими пользоваться. Гарантируется, что при правильном применении технологический процесс может осуществляться долго, устойчиво и практически без вмешательства человека. Смешать в нужном соотношении А и В и загрузить в автоматическую линию способен кто угодно. Как следствие, надобность в интеллекте исчезает. Аналогичные тенденции появляются и в России. Зарубежные технологии, как сорока на хвосте, приносят их к нам. Поэтому делается вывод, что необходимость в такой профессии, как технолог, за рубежом уже отпала, а в ближайшем будущем «рудиментарный отросток», видимо, отпадет и у нас [31]. Так ли это?

Действительно, вытеснение человека из технологического процесса (как он будет называться, если технологов не будет?) соответствует объективным законам развития техники. А вот исчезнут ли они вообще, как класс, — вопрос спорный.

Ведь интеллектуальный вклад в технологию в данном случае «делается заранее» — на стадии разработки технологии (в другой надсистеме). А закон вытеснения человека из технических систем в целом все равно соблюдается. Правда, не в идеальном варианте, а на уровне «шаг назад от ИКР». Технологи остаются в надсистеме — на уровне разработки технологий. Но это очень высококвалифицированные технологи. Соответственно, численность этой «популяции» становится значительно меньше, а качество выше.

Мой прогноз: профессии технолог — быть!

### Литература

12. Ватанабе Риочи. Замечательная идея от фирмы Samsung // Технологии в электронной промышленности. 2005. № 5.
13. Химическая энциклопедия: в 5 т.: т. 4. М.: Большая Российская энцикл. 1995.
14. [www.urazaev.narod.ru](http://www.urazaev.narod.ru)
15. Уразаев В. Г. Влагозащита печатных узлов. М.: Техносфера. 2006.
16. Цветков Ю. Микротехнология — универсальная основа производства современной электроники // Технологии в электронной промышленности. 2005. № 4.
17. Галецкий Ф. П. Способ изготовления многослойных печатных плат. А.с. СССР № 970737, 1982.
18. Медведев А. М. Оборудование для производства печатных плат. По стендам «Экспо-Электроника 2002» // Электронные компоненты. 2002. № 4.
19. Медведев А. М. Летняя конференция — 2005 Европейского института печатных схем // Технологии в электронной промышленности. 2005. № 4.
20. [www.lmis2.epfl.ch/articles/pdt/16.pdf](http://www.lmis2.epfl.ch/articles/pdt/16.pdf)
21. Ляйзинг Г., Штар Й. Тенденции развития печатных плат // Технологии в электронной промышленности. 2005. № 5.
22. [www.ci.ru/inform03\\_03/p14nt.htm](http://www.ci.ru/inform03_03/p14nt.htm)
23. [www.fashionlook.ru/glossary/index.phtml?fmt=show&id=108](http://www.fashionlook.ru/glossary/index.phtml?fmt=show&id=108)
24. Справочник по композиционным материалам. М.: Машиностроение. 1988.
25. Уразаев В. Г. Все взаимопроникает, все... // Технологии в электронной промышленности. 2005. № 1.
26. Пирогова Е. В. Проектирование и технология печатных плат. М.: Форум. 2004.
27. Макаров В., Рушихин А. Применение планарных трансформаторов и плат на алюминиевой подложке в современных импульсных источниках электропитания // Силовая электроника. 2004. № 1.
28. Петров В. Серия статей «Законы развития систем». [www.trizland.ru/trizba.php?id=108](http://www.trizland.ru/trizba.php?id=108)
29. Уразаев В. Г. Влагозащита печатного монтажа. Обзор методов. [www.ELECTRONICS.ru/244.html](http://www.ELECTRONICS.ru/244.html)
30. Алферов Ж. И. Полупроводниковая электроника в России. Состояние и перспективы развития // Электроника: НТБ. 2003. № 4.
31. Медведев А. М. Технология производства печатных плат. М.: Техносфера. 2006.