

Министерство науки и высшего образования Российской
Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»
Кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры

Н.В. Ципина

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РАЗРАБОТКИ
МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ: ПРАКТИКУМ

Утверждено Редакционно-издательским советом
университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2022

УДК 621.3

Н.В. Ципина. Современные методы разработки многослойных печатных плат: практикум: учеб. пособие [Электронный ресурс] – Электрон. текстовые, граф. данные (5,6 Мб) / Н.В. Ципина – Воронеж : ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2022.

Учебное пособие предназначено для проведения практических занятий. Рассматриваются системы автоматизированных проектирований многослойных ПП, тенденции и перспективы развития САПР.

Издание соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению 11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств» магистерские программы «Автоматизированное проектирование и технология радиоэлектронных средств специального назначения»), «Силовая электроника» дисциплине «Современные методы разработки многослойных печатных плат».

Учебное пособие подготовлено в электронном виде в текстовом редакторе MS Word и содержится в файле «Практикум Современные методы разработки многослойных печатных плат.doc».

Ил. 116. Библиогр.: 6 назв.

Рецензенты: кафедра инфокоммуникационных систем и технологий Воронежского института МВД России;

д-р техн. наук, проф. В.М. Питолин

© Ципина Н.В., 2022

© Оформление. ФГБОУ ВО

“Воронежский государственный технический университет”, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ И ТЕХНОЛОГИЙ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ	8
1.1. Основные определения	8
1.2. Характеристика современных технологий изготовления печатных плат.	15
1.2.1. Субтрактивный метод	15
1.2.2. Аддитивная технология формирования слоев методом «ПАФОС».	21
1.2.3. Аддитивный метод фотоформирования (метод «Фотоформ»)	25
1.2.4. Комбинированный позитивный метод (полуаддитивный метод).	26
1.2.5. Метод попарного прессования печатных плат	29
1.2.6. Метод послойного наращивания	32
1.2.7. Метод металлизации сквозных отверстий	36
Контрольные вопросы	43
Глава 2. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ.	44
2.1. Базовые и расходные материалы для изготовления ПП	44
2.2. Материалы для изготовления ОПП, ДПП и МПП.	48
2.3. Проводниковые материалы для изготовления ГПП, ГПК и ГЖП	61
2.4. Защитные покрытия ГПП, ГПК и ГЖП	62
2.5. Адгезивы ГПП, ГПК и ГЖП.	63
Контрольные вопросы	64
Библиографические ссылки.....	66

ВВЕДЕНИЕ

Уровень развития современных радиоэлектронных средств (РЭС) предъявляет повышенные требования к различным параметрам входящих в их состав печатных плат. Это, в свою очередь, приводит к необходимости постоянно улучшать параметры печатных плат и совершенствовать процесс их производства.

Одним из основных показателей печатных плат (ПП) являются параметры их печатного монтажа [1, 2, 4, 5, 17, 31], качество которых во многом определяет помехозащищенность, удельные показатели, технологичность, а также частотные характеристики и надежность узлов и устройств, реализованных на основе ПП. Современная технология проектирования ПП основывается на сквозных автоматизированных алгоритмах, позволяющих реализовывать маршруты проектирования ПП начиная от моделирования электрических характеристик [24, 35] до выпуска конструкторской и технологической документации [25]. При этом современные САПР ПП (например, Pspace, Micro Sim, Design Lab [23, 24, 27], OrCAD 9.x, Protel 99SE [<http://www.rodnik.ru>], Micro Cap [35], P-CAD [22, 23], Accel EDA [28], P-CAD 2000, Microware Office [<http://www.rodnik.ru>], «АСОНИКА-Т» [15,16], beta soft, Polaris [24], Omega plus и т.п.), применяемые в рамках таких маршрутов, позволяют осуществлять комплексные исследования на ранних этапах разработки, например моделировать в едином технологическом цикле проектирования влияние температурных воздействий на электрические характеристики, влияние печатного монтажа на качество распространения сигналов и т. п. Таким образом, современная технология проектирования ПП, а также требования, предъявляемые к современным ПП,

позволяют выделить в отдельное направление процесс разработки и создания ПП, который характеризуется основными параметрами.

В рамках учебного проектирования, в настоящее время, наблюдается также активное внедрение современных технологий проектирования ПП.

Однако при этом сказывается отсутствие литературы, позволяющей одновременно раскрыть предметную область данного направления с наиболее важных сторон, таких как основные положения конструкторско-технологических аспектов разработки ПП, основы математического обеспечения автоматизированного топологического проектирования ПП, применение вопросов

системного подхода в процессе проектирования ПП средствами САПР и т. п. Наличие такой литературы позволит значительно повысить эффективность применения современных САПР ПП [24, 28] в учебном проектировании.

Печатные платы применяются практически во всех отраслях народного хозяйства, и потребность в них постоянно возрастает. Опережающие темпы развития микроэлектроники требуют непрерывного повышения их технического уровня, который определяется ростом плотности монтажа электрорадиоизделий, повышения требований к надежности, увеличением частоты следования импульсов. Обеспечение этих требований зависит от достижений

в области конструирования и развития технологии производства печатных плат.

Печатные платы широко применяются в бытовой технике, аппаратуре средств связи, вычислительной технике, в системах автоматизации. Они также используются в контрольно-измерительной аппаратуре, в медицинском приборостроении, в авто-мобильной промышленности, в других областях промышленной электроники, в авиационной, космической промышленности. Известно применение печатных плат в спецтехнике, в городском коммунальном хозяйстве (для средств контроля расхода воды, газа, электричества, топлива и пр., экологического контроля воды, воздуха, земли по радиационным, физическим, механическим и химическим параметрам).

Технологический процесс изготовления печатных плат является сложным и многооперационным (порядка 50 операций) с использованием большого количества оборудования (до 40–50 единиц), производственных площадей. Он требует не только узких специалистов в области химии, физики, схемотехники, программирования, организации производства, но и специалистов широкого профиля, представляющих все проблемы и пути комплексного решения вопросов, стоящих в настоящее время в производстве печатных плат.

Следует отметить, что имеются многочисленные отечественные и зарубежные патенты, статьи, сообщения по рассматриваемому вопросу. Имеются подробные обзоры материалов по этой теме [1–5]. Специалист, работающий в области производства печатных плат, всегда может обратиться к этим изданиям для решения возникающих у него проблем.

Одной из целей данного пособия является составление краткого обзора литературы по вопросу производства печатных плат. Авторы считают, что для освоения студентами учебного курса «Технология изготовления печатных плат» это будет удобно: вся информация, помещенная в многочисленных и не всегда доступных трудах, собрана воедино. Однако главная цель данного учебного пособия состоит в том, чтобы помочь студенту, который *впервые* встречается с таким сложным материалом, познакомиться с особенностями технологии производства печатных плат, понять, что происходит на различных этапах процесса производства печатных плат и какие физико-химические закономерности управляют этим производством. Для этого довольно подробно рассмотрены научные основы производства, а в конце каждой главы приведены контрольные вопросы, обдумывание ответов на которые поможет лучшему восприятию материала.

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ И ТЕХНОЛОГИЙ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

1.1. Основные определения

Печатная плата (ПП) — изделие, состоящее из плоского изоляционного основания с отверстиями, пазами, вырезами системой токопроводящих полосок металла (проводников), которое используют для установки и коммутации электрорадиоизделия (ЭРИ) и функциональных узлов в соответствии с электрической принципиальной схемой (рис. 1.1).

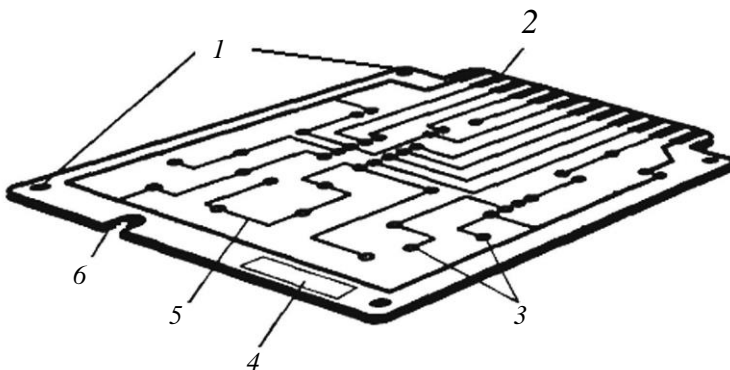


Рис. 1.1. Печатная плата [3, с. 21]:

1 — крепежные отверстия; 2 — концевые печатные контакты; 3 — монтажное отверстие; 4 — место маркировки; 5 — печатный проводник; 6 — ориентирующий паз

Рисунок печатной платы — конфигурация проводникового и (или) диэлектрического материала на печатной плате.

Пр о в о д я щ и й р и с у н о к — конфигурация проводящего материала. Проводящий рисунок ПП должен быть четким, с ровными краями, без вздутий, подтравливания, разрывов, отслоений, следов инструмента и остатков технологических материалов. Для улучшения паяемости и повышения коррозионной стойкости на поверхность проводящего рисунка наносят электролитическое, химическое или органическое покрытие, которое должно быть сплошным, без разрывов и отслоений.

Н е п р о в о д я щ и й р и с у н о к — конфигурация диэлектрического материала (пробельные места ПП).

П е ч а т н ы й п р о в о д н и к (дорожка) — одна проводящая полоска в проводящем рисунке.

К р е п е ж н ы е о т в е р с т и я — отверстия для крепления ПП в модулях более высокого конструктивного уровня (панелях, блоках).

М о н т а ж н ы е о т в е р с т и я — отверстия для установки и пайки ЭРИ. На внутреннюю поверхность металлизированных монтажных отверстий наносят медное покрытие толщиной не менее 25 мкм и покрытие для обеспечения паяемости, которые должны быть сплошными, без пор и включений, пластичными, с мелкокристаллической структурой, быть прочно сцепленными с диэлектриком, иметь определенное сопротивление, выдерживать токовую нагрузку 250 А/мм² в течение 3 с при нагрузке на контакты 1–1,5 Н и четыре (для многослойных ПП — три) перепайки выводов ЭРИ без изменения внешнего вида и отслоений.

К о н ц е в ы е п е ч а т н ы е к о н т а к т ы — ряд печатных контактов, расположенных на краю ПП и предназначенных для сопряжения с соединителем прямого сочленения.

О р и е н т и р у ю щ и й п а з — паз на краю ПП, который используют для ее правильной установки и ориентации в электронной аппаратуре (ЭА).

М а р к и р о в к а ПП — совокупность знаков и символов на ПП, необходимая для ее идентификации и контроля.

О с н о в а н и е ПП — элемент конструкции ПП, на поверхности или в объеме которого выполняется проводящий рисунок.

Диэлектрическое основание должно быть однородным по цвету, монолитным по структуре, не иметь посторонних включений, вну-тренних пузырей, раковин, сколов, расслоений и трещин.

М а т е р и а л о с н о в а н и я ПП — материал (диэлектрик), на котором выполняют рисунок ПП.

П е ч а т н ы й м о н т а ж — способ монтажа, при котором электрическое соединение ЭРИ, экранов, функциональных узлов между собой выполнено с помощью элементов печатного рисунка: проводников, контактных площадок.

По ГОСТ 23751–86 предусмотрены следующие типы печатных плат (рис. 1.2).

О д н о с т о р о н н я я п е ч а т н а я п л а т а (ОПП) — это плата, на одной стороне которой выполнены элементы проводящего рисунка (см. рис. 1.2). Такие ПП просты по конструкции и экономичны в изготовлении. Их применяют для монтажа бытовой радиоаппаратуры, блоков питания и устройств техники связи.

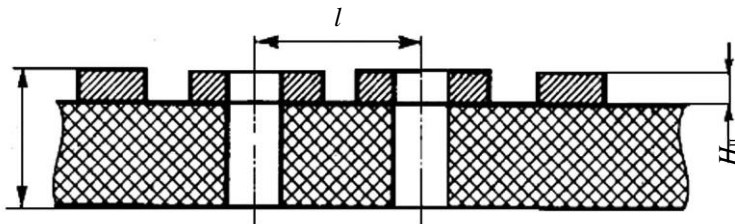


Рис. 1.2. Односторонняя печатная плата [3, с. 22]:

H_p — толщина ПП; h_f — толщина фольги; l — расстояние между центрами (осями) элементов конструкции ПП

Д в у х с т о р о н н я я п е ч а т н а я п л а т а (ДПП) — это плата, на обеих сторонах которой выполнены элементы проводящего рисунка и все требуемые соединения в соответствии с электрической принципиальной схемой платы (рис. 1.3).

Электрическая связь между сторонами осуществляется с помощью металлизированных отверстий. Размещать ЭРИ можно как на одной, так и на двух сторонах ПП. Двухсторонние ПП

используются в измерительной технике, системах управления, автоматического регулирования и др.

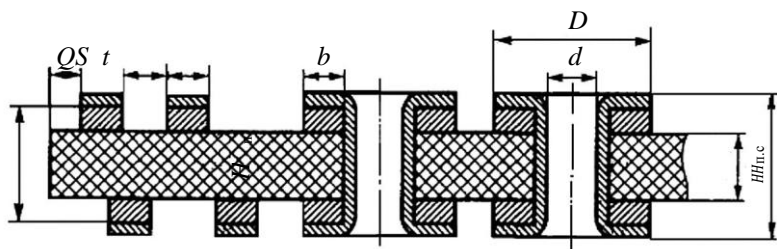


Рис. 1.3. Двухсторонняя печатная плата [3, с. 22]:

Q — расстояние от края печатной платы, выреза, паза до элементов проводящего рисунка; S — расстояние между проводниками; t — ширина проводника; b — расстояние от края просверленного отверстия до края контактной площадки (поясок); D — диаметр контактной площадки; d — диаметр отверстия; $H_{\text{п}}$ — толщина ПП; $H_{\text{м}}$ — толщина материала основания ПП; $H_{\text{п.с}}$ — суммарная толщина ПП с химическим и гальваническим покрытием

Многослойная печатная плата (МПП) — это плата, состоящая из чередующихся слоев изоляционного материала с проводящими рисунками на двух или более слоях, между которыми выполнены требуемые соединения (рис. 1.4).

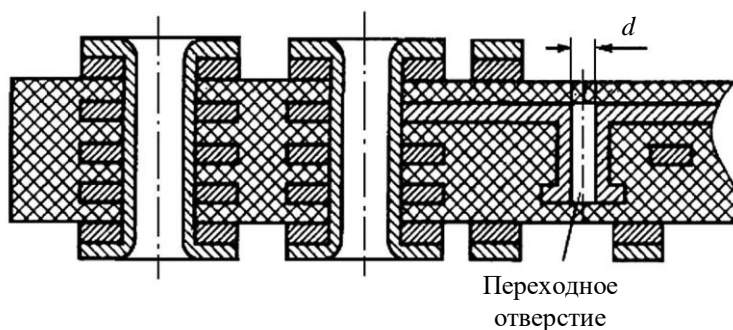


Рис. 1.4. Многослойная печатная плата [3, с. 22]

Электрическая связь между проводящими слоями может быть выполнена специальными объемными деталями, печатными элементами или химико-гальванической металлизацией отверстий. Многослойные ПП характеризуются повышенной надежностью и плотностью монтажа, устойчивостью к климатическим и механическим воздействиям, уменьшенными размерами и меньшим числом контактов. Вследствие большой трудоемкости их изготовления, сложности получения высокой точности рисунка и совмещения слоев, высокой стоимости и сложности технологического оборудования, контроля на всех операциях технологического процесса (ТП), низкой ремонтпригодности МПП применяют для уже отработанных конструкций электронно-вычислительной, авиационной и космической аппаратуры.

Гибкая печатная плата, гибкий печатный кабель, гибко-жесткие платы — качественно новые несущие конструкции и системы межсоединений, которые применяются взамен «громоздких» и «тяжелых» жестких ПП, плоских ленточных проводов, жгутов и объемных проводников.

Г и б к а я п е ч а т н а я п л а т а (ГПП) — ПП, имеющая гибкое основание или ПП, использующая гибкий базовый материал. Гибкая ПП является аналогом жесткой ПП по расположению печатных проводников, контактных площадок и других элементов печатного монтажа, по размещению ЭРИ (преимущественно бескорпусных и поверхностно-монтируемых компонентов — ПМК), при этом она имеет гибкое основание толщиной 0,1–0,5 мм, может изгибаться, работать на перегибы и принимать разную форму. Гибкие ПП применяются в случаях, когда плата в процессе эксплуатации подвергается многократным изгибам, вибрациям или когда ей необходимо придать для работы изогнутую компактную форму (поместить в небольшой объем). При помощи ГПП можно соединять различные элементы ЭА, используя ответвления от общего основания ГПП. Основным отличием ГПП от жесткой ПП является возможность монтажа в трехмерном пространстве и огибания углов других блоков. Гибкие ПП могут изготавливаться в комбинации с жесткими ПП.

Многослойные ГПП не являются аналогом жестких МПП, так как каждый из слоев может быть продолжен в любую сторону и использоваться как ГПК для соединения с другими модулями ЭА.

Гибкий печатный кабель (ГПК) (рис. 1.5) имеет тонкое изоляционное основание длиной до нескольких метров с расположенными параллельно друг другу печатными проводниками, ширина и шаг которых соответствует стандартным соединителям. Толщина ГПК составляет 0,06–0,3 мм.



Рис. 1.5. Гибкий печатный кабель [3, с. 24]

Гибко-жесткие платы (ГЖП) (рис. 1.6) являются самыми сложными соединительными структурами в ЭА. Простая ГЖП имеет один жесткий и один гибкий слой.

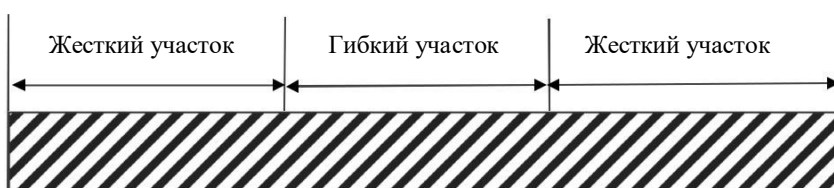


Рис. 1.6. Схема гибко-жесткой печатной платы [3, с. 22]

Сложные ГЖП могут иметь 20 и более соединительных наборов из односторонних и двухсторонних ГПП между жесткими внешними ПП.

Создание ГПП и ГЖП обусловлено: необходимостью миниатюризации ЭА; диспропорцией между объемом и массой ЭРИ (бескорпусных и поверхностно-монтируемых компонентов), размещаемых на жестких ПП, и объемом и массой жестких ПП;

необходимостью высокой надежности при реализации уникальных и сложных технических решений, например, в бортовой ЭА, радарных системах, в имплантируемых стимуляторах работы

сердца-, слуховых аппаратах, видеокамерах, фотоаппаратах, т. е. где требуется плотная компоновка в трех плоскостях и безотказная работа в жестких условиях окружающей среды.

Проводная печатная плата (ППП) — это плата, на диэлектрическом основании которой размещены отдельные элементы печатного рисунка (контактные площадки, шины земли и питания и др.), а электрические соединения вместо печатных проводников выполнены изолированными проводами диаметром 0,1–0,2 мм. Контактные соединения на ППП могут быть получены пайкой, сваркой или химико-гальванической металлизацией. Проводные ППП применяют при макетировании, разработке опытных образцов и в мелкосерийном производстве вместо трудоемких в изготовлении МПП, так как эквивалентны по трассировочной способности 5-, 8- и 11-слойным МПП.

Ширина печатного проводника — поперечный размер печатного проводника в любой его точке, видимый в плане (рис. 1.3 и 1.7).

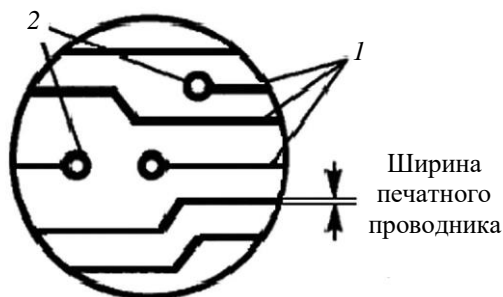


Рис. 1.7. Печатные проводники и контактные площадки [3, с. 24]:

1 — печатные проводники; 2 — контактные площадки

Контактная площадка — часть проводящего рисунка, используемая для соединения токопроводящего рисунка схемы

(печатных проводников с металлизацией монтажных отверстий) и для установки и пайки (сварки) ЭРИ (см. рис. 1.7). Контактные площадки монтажных отверстий должны равномерно смачиваться припоем в течение 3–5 с и выдерживать не менее трех (для МПП — двух) перепаек без расслоения диэлектрика, отслаивания и вздутий. Не допускаются разрывы контактных площадок, так как при этом уменьшаются токонесущая способность проводников и адгезия к диэлектрику.

К л а с т е р — группа контактных площадок для установки и пайки (сварки), например, микросхем.

1.2. Характеристика современных технологий изготовления печатных плат

Наиболее общими показателями уровня печатных плат являются ширина проводников и диаметр межслойных переходов. Тенденция развития печатных плат характеризуется уменьшением ширины проводников и увеличением количества межслойных переходов за счет уменьшения их размеров и использования поверхностных контактных площадок для присоединения выводов компонентов. Используют два вида технологий получения проводящего рисунка слоев печатных плат: на основе субтрактивных методов; на основе аддитивного формирования.

1.2.1. Субтрактивный метод

По субтрактивной технологии рисунок проводников получается травлением медной фольги по защитному изображению в фоторезисте или металлорезисте. Применяются три разновидности субтрактивной технологии.

Первый вариант (рис. 1.8) — негативный процесс с использованием сухого пленочного фоторезиста (СПФ). Процесс достаточно простой, применяется при изготовлении односторонних и двухсторонних ПП. Металлизация внутренних стенок отверстий не выполняется. Заготовка — фольгированный диэлектрик.

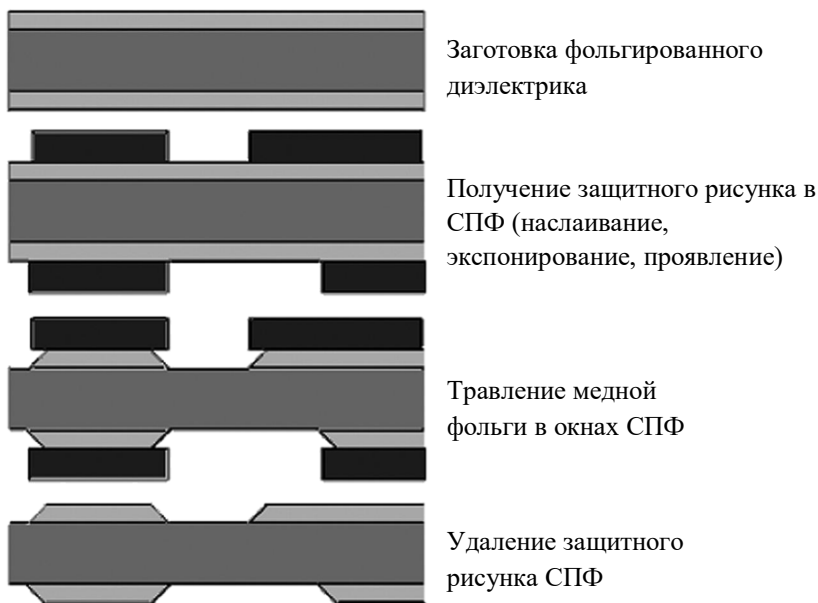


Рис. 1.8. Негативный процесс с использованием сухого пленочного фоторезиста (СПФ) [32]

Методами фотолитографии с помощью сухого пленочного фоторезиста на поверхности фольги формируется защитная маска, представляющая собой изображение (рисунок) проводников. Затем открытые участки медной фольги подвергаются травлению, после чего фоторезист удаляется.

Второй вариант (рис. 1.9) — позитивный процесс. Создается проводящий рисунок двухсторонних слоев с межслойными металлизированными переходами (отверстиями).

Сухой пленочный фоторезист наслаивается на заготовки фольгированного диэлектрика, прошедшие операции сверления отверстий и предварительной (5–7 мкм) металлизации медью стенок отверстий и всей поверхности фольги. В процессе фотолитографии СПФ защитный рельеф получают на местах поверхности металлизированной фольги, подлежащей последующему

удалению травлением. На участки, не защищенные СПФ, последовательно осаждаются медь и металлорезист (сплав олово–свинец),

в том числе и на поверхность стенок отверстий. После удаления маски СПФ незащищенные (более тонкие) слои меди вытравливаются. Процесс более сложный, однако с его помощью удается получить металлизированные стенки отверстий.

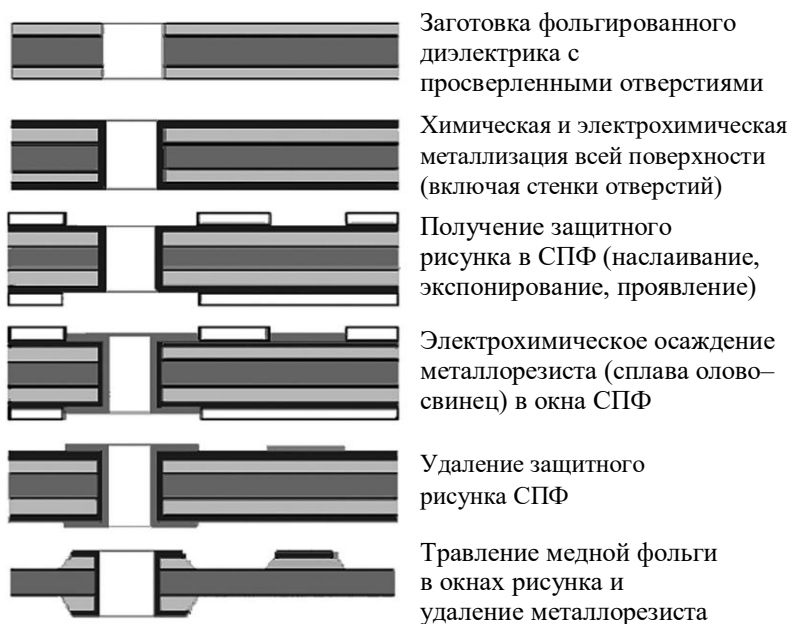


Рис. 1.9. Позитивный процесс с использованием сухого пленочного фоторезиста (СПФ) [32]

Третий вариант (рис. 1.10) — так называемый тентинг-процесс. Как и в позитивном процессе, берется заготовка в виде фольгированного диэлектрика, формируются отверстия, проводится предварительная металлизация всей платы, включая внутренние стенки отверстий. Затем наносится СПФ, который формирует маску во время фотолитографии в виде рисунка печатных проводников и образует завески — тенты над металлизированными

отверстиями, защищая их во время последующей операции травления свободных участков медной фольги.

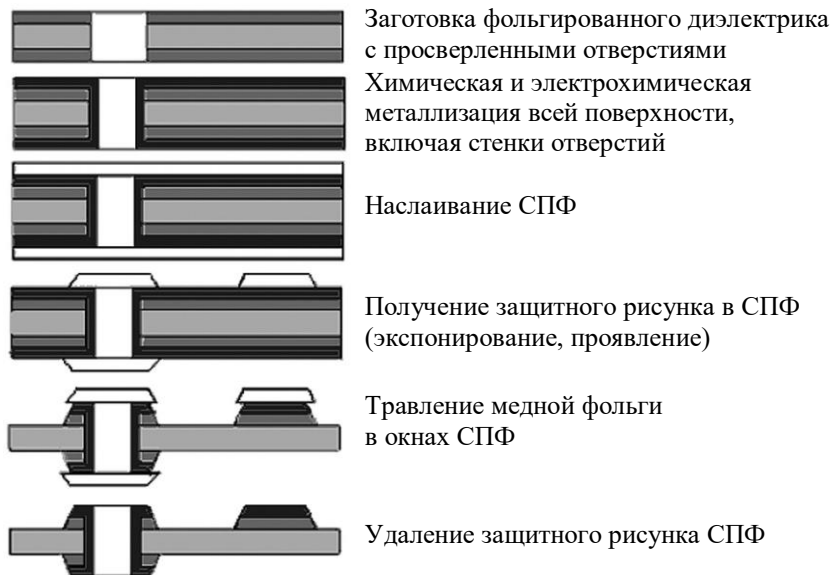


Рис. 1.10. Тентинг-метод с использованием сухого пленочного фоторезиста (СПФ) [31]

В этом процессе используются свойства пленочного фоторезиста наслаиваться на сверленные подложки без попадания в отверстия и образовывать защитные слои над металлизированными отверстиями. Применение тентинг-метода упрощает технологический процесс изготовления двухсторонних ПП с металлизированными отверстиями. Однако необходимо обеспечить гарантированное запечатывание отверстий фоторезистом. Кроме того, качество поверхности металла вокруг отверстий должно быть очень хорошим, без заусениц.

Для получения изображений используется пленочный фоторезист толщиной 15–50 мкм. Толщина фоторезиста в случае метода «тентинг» диктуется требованиями целостности защитных завесок над отверстиями на операциях проявления и травления,

проводимых разбрызгиванием проявляющих и травящих растворов под давлением 1,6–2 атм и более. Фоторезисты толщиной менее 45–50 мкм на этих операциях над отверстиями разрушаются.

Подготовка поверхностей заготовок под наслаивание пленочного фоторезиста с целью удаления заусенцев сверленных отверстий и наростов гальванической меди производится механической зачисткой абразивными кругами с последующей химической обработкой в растворе персульфата аммония или механической зачисткой водной пемзой суспензией. Такие варианты подготовки обеспечивают необходимую адгезию пленочного фоторезиста

к медной поверхности подложки и химическую стойкость защитных изображений на операциях проявления и травления. Кроме того, механическая зачистка пемзой дает матовую однородную поверхность с низким отражением света, обеспечивающую более однородное экспонирование фоторезиста.

Фоторезист наслаивается по специально подобранному режиму: при низкой скорости наслаивания 0,5 м/мин, при температуре нагрева валков 115 °С (± 5 °С), на подогретые до температуры 60–80 °С заготовки. При экспонировании изображения используются установки с точечным источником света, обеспечивающим высококоллимированный интенсивный световой поток на рабочую поверхность с автоматическим дозированием и контролем световой энергии.

Субтрактивный метод получения рисунка проводников ПП основан на травлении медной фольги по защитной маске. Из-за процессов бокового подтравливания меди под краями маски поперечное сечение проводников имеет форму трапеции, расположенной большим основанием на поверхности диэлектрика. Величина бокового подтравливания и, соответственно, разброс ширины создаваемых проводящих дорожек зависит от толщины слоя металла: при травлении фольги толщиной 5 мкм интервал разброса ширины проводников порядка 7 мкм, при травлении фольги толщиной 20 мкм разброс составляет 30 мкм, а при травлении фольги толщиной 35 мкм — около 50 мкм. Искажения ширины медных проводников по отношению к размерам ширины их изображений

в фоторезисте и на фотошаблоне смещаются в сторону заужения. Следовательно, при субтрактивной технологии размеры проводников на фотошаблоне необходимо увеличивать на величину заужения. Из этого следует, что субтрактивная технология имеет ограничения по разрешению, которые определяются толщиной фольги и процессами травления. Минимально воспроизводимая ширина проводников и зазоров составляет порядка:

- 50 мкм при толщине фольги 5–9 мкм;
- 100–125 мкм при толщине проводников 20–35 мкм;
- 150–200 мкм при толщине проводников 50 мкм.

Для получения логических слоев с металлизированными переходами с более плотным печатным рисунком, с шириной проводников 125 мкм и менее, например, 100 мкм, при их толщине 50 мкм, используется технологический процесс по субтрактивной технологии травлением по металлорезисту (3-й вариант субтрактивной технологии) с использованием диэлектрика с тонкомерной фольгой, толщиной 5–9 мкм. В этом случае предварительная металлизация стенок отверстий и поверхности фольги заготовок диэлектрика производится на минимально возможную толщину 8–10 мкм. Условия получения изображения в пленочном фоторезисте отличны от условий процесса «тентинга». А именно, для получения изображений используются тонкие пленочные фоторезисты с более высоким разрешением и гальваностойкостью. Подготовка поверхности подложки под наслаивание пленочного фоторезиста из-за небольшой толщины фольги и металлизированного слоя и во избежание их повреждения проводится химическим способом.

Фотошаблоны-позитивы должны иметь резкость края изображения 3–4 мкм вместо 7–8 мкм у фотошаблонов, применяемых при получении изображений с разрешением 200–250 мкм. Проявление изображений проводится в установках проявления — процессорах в стабилизированном трихлорэтане.

Для удаления следов органики с медной поверхности подложки в каналах освобождений в рельефе пленочного фоторезиста проводится обработка в окислителе — в 20 % ном растворе серной кислоты в течение 2 мин с последующей промывкой в воде

и калориферной сушкой в конвейерной струйной установке, после чего для повышения гальваностойкости защитного изображения проводится световое дублирование в светокопировальных рамах по режимам экспонирования. Проводящий рисунок формируется в рельефе пленочного фоторезиста последовательным гальваническим осаждением меди на толщину 20–40 мкм и олова–свинца (ПОС-61) на толщину 9–12 мкм или никеля на толщину 3–5 мкм. После удаления фоторезиста производится травление медной фольги с металлизированным слоем суммарной толщиной 10–15 мкм с пробельных мест схемы. Для этого применяется травильная установка с медно-аммиачным травильным раствором. В варианте использования металлорезиста ПОС-61 последний удаляется в травильном растворе в струйной конвейерной установке. При применении в качестве металлорезиста никеля сложность процесса в том, что слой никеля остается на поверхности проводника и несколько шире его медной части. Поэтому применение металлорезиста сплава олово–свинец с последующим его удалением является более технологичным процессом.

Из изложенного выше можно сделать вывод: изготовление слоев по субтрактивной технологии с применением диэлектриков с тонкой медной фольгой толщиной 5–9 мкм обеспечивает получение проводящего рисунка с минимальной шириной проводников и зазоров между ними порядка 50 мкм при толщине проводников 5–9 мкм и 100–125 мкм при толщине проводников 40–50 мкм.

1.2.2. Аддитивная технология формирования слоев методом «ПАФОС»

Для изготовления печатных плат с шириной проводников и зазоров 50–100 мкм с толщиной проводников 30–50 мкм рекомендуется использовать аддитивный метод формирования рисунка (метод «ПАФОС»). Это полностью аддитивный электрохимический метод, по которому проводники и изоляция между ними (диэлектрик-) формируются селективным гальваническим осаждением проводников и прессованием изоляции только в необходимых

местах. Метод «ПАФОС», как аддитивный метод, принципиально отличается от субтрактивного тем, что металл проводников наносится, а не вытравливается.

По способу создания токопроводящего покрытия аддитивные методы разделяются на химические и химико-гальванические. При химическом процессе на каталитически активных участках поверхности происходит химическое восстановление ионов металла. В разработанных растворах скорость осаждения меди составляет 2–4 мкм/ч, и для получения необходимой толщины процесс продолжается длительное время.

Проводящий рисунок формируется (рис. 1.11) последовательным наращиванием слоев: 1 — получение на временных «носителях» — листах из нержавеющей стали — медной шины толщиной 2–20 мкм; 2, 3 — формирование рисунка в СПФ; 4 — гальваническое осаждение тонкого слоя никеля (2–3 мкм) и меди (30–50 мкм) по рисунку освобождений в рельефе пленочного фоторезиста.

В защитном рельефе пленочного фоторезиста на верхнюю поверхность сформированных проводников производится также нанесение адгезионных слоев (5). После этого пленочный фоторезист удаляется (6). При изготовлении ДПП подготовленные пластины разделяются пластиной препрега или другого диэлектрика (7) и спрессовываются (8), после чего механически удаляются носители (9). Если не нужны межслойные переходы, то медные шины стравливается, и плата готова (10).

Лучшее качество подготовки поверхности медной шины на «носителях» обеспечивается зачисткой водной суспензией пемзы. Однако механическая зачистка не всегда применима, так как иногда вызывает разрушение медной шины, особенно на «носителях» больших размеров. Поэтому лучше применять химическую подготовку обработкой в растворе персульфата аммония на струйных конвейерных установках. Эта подготовка обеспечивает адгезию и химическую стойкость защитных изображений на операциях гальванического формирования проводящего рисунка и щелочного оксидирования.

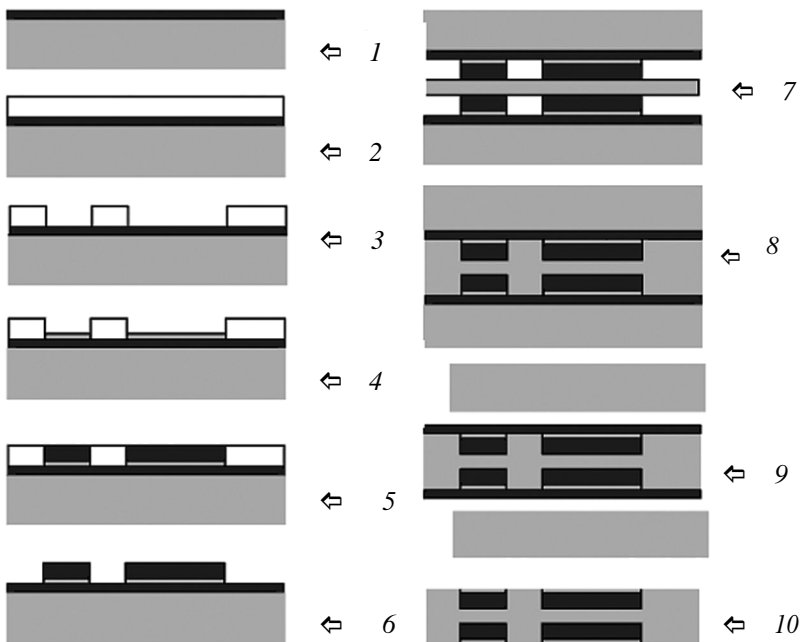


Рис. 1.11. Технологическая схема изготовления слоев методом «ПАФОС» [31]

Условия проведения операции экспонирования для получения изображений в пленочном фоторезисте с разрешением 50–100 мкм:

Фотошаблоны должны иметь высокие оптические характеристики — оптическая плотность прозрачных полей менее 0,1 ед. оптической плотности, непрозрачных полей более 3,5 ед. оптической плотности, резкость края изображения не хуже 2–3 мкм.

Экспонирование изображений должно проводиться на установках с точечным источником света с высококоллимированным интенсивным световым потоком, с автоматическим дозированием и контролем световой энергии. Температура нагрева копировальной поверхности в

процессе экспонирования не должна превышать температуру помещения более чем на 3–5 °С (температура помещения 21(± 1) °С).

Проявление изображений должно проводиться в струйных установках с форсунками среднего и высокого давления. После проявления изображений с целью удаления следов органики с поверхности медной шины в узких каналах рисунка освобождений в рельефе пленочного фоторезиста следует проводить обработку в 20 % ном растворе серной кислоты в течение 2–3 мин.

Последовательность проведения операций обработки в окислителе та же, как в случае получения изображений высокоплотных схем по субтрактивной технологии с применением диэлектрика с тонкомерной фольгой. При обеспечении правильных условий проведения процессов получения изображений в пленочных фоторезистах достигается следующее:

- 1) ширина гальванически сформированных проводников в фоторельефе пленочных фоторезистов на высоте между уровнями от 0,2 до 0,7 толщины фоторезиста равна ширине изображения проводника на фотошаблоне, интервал разброса замеров не превышает 5–10 мкм;
- 2) искажения ширины проводников на поверхности подложки относительно размеров на фотошаблоне в среднем составляют от 10 до 20 мкм;
- 3) суммарный интервал разброса ширины проводников по всей высоте фоторельефа не превышает 15–20 мкм.

Профиль фоторельефа пленочного фоторезиста зависит от применяемой модели светокопировальной установки. При экспонировании на установках с совершенной экспонирующей системой, обеспечивающей высокую коллимацию высокоинтенсивных световых лучей и отсутствие нагрева рабочей копировальной поверхности, например, на моделях НМW-201 и ОРТИ-ВЕАМ 7100, фоторельеф имеет ровные боковые стенки с малым наклоном к поверхности подложки.

1.2.3. Аддитивный метод фотоформирования (метод «Фотоформ»)

Аддитивным методом изготавливают прецизионные ДПП на нефольгированном диэлектрике. В отличие от субтрактивных методов в аддитивном методе используется нефольгированный диэлектрик, на который селективно осаждается химическая медь. Толщина химически осажденной меди на диэлектрик составляет 25–35 мкм. Удельное электрическое сопротивление $2,8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м (выше, чем у гальванической — $1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом·м); относительное удлинение 4–6 %; прочность сцепления с диэлектриком не менее 0,4 Н/3 мм.

Метод фотоформирования является одним из вариантов аддитивного метода. Он применяется для изготовления ДПП и слоев МПП на нефольгированном основании 5-го класса точности. В качестве материала основания используют слоистые диэлектрики.

Для получения рисунка методом фотоселективной активации применяют фотоактиваторы (фотопроторы) — светочувствительные растворы солей меди и серебра на основе органических кислот (уксусной, винной, глутаминовой и др.). Фотоактиваторы наносят на подложку, затем проводят экспонирование; под действием УФ-излучения ионы меди восстанавливаются, формируя отчетливое изображение рисунка схемы. Проявление рисунка осуществляется в ванне химического меднения, в которой в результате автокаталитического процесса происходит восстановление меди.

Одним из вариантов фотоформирования является вычерчивание световым лучом рисунка схемы по нанесенному на нефольгированный диэлектрик фотоактиватору, после чего на восстановленный металл осаждают химическую медь. При аддитивном методе изготовления в качестве материала основания ДПП применяют нефольгированный стеклотекстолит: с клеевыми пленками (адгезионными) типа СТЭФ; с введенным в объем диэлектрика катализатором, который способствует осаждению меди на диэлектрик — типа СТАМ; с эмалью.

Технологический процесс изготовления зависит от применяемого материала.

Преимущества аддитивного метода:

высокий класс точности — 5-й; равномерность меди на поверхности и в отверстиях при отношении толщины ДПП к диаметру отверстия 10 : 1; короткий технологический процесс;

сокращение количества оборудования по сравнению с субтрактивными методами;

снижение расхода, так как ее осаждают селективно в соответствии с рисунком схемы ДПП;

возможность использования для химического меднения солей меди после регенерации травильных отходов.

К недостаткам аддитивного метода относятся: высокое удельное электрическое сопротивление химической меди; наличие адгезионного слоя на поверхности, подверженного старению; тенденция химической меди к растрескиванию под действием термических ударов и др.

1.2.4. Комбинированный позитивный метод (полуаддитивный метод)

Данный метод применяется при производстве ДПП, а также при изготовлении внутренних слоев МПП, выполненных методом попарного прессования. По своей сути комбинированные способы изготовления плат относятся к полуаддитивным. Как и при субтрактивном методе, для изготовления плат по полуаддитивной технологии используются фольгированные диэлектрики. Однако есть существенная разница: при производстве полуаддитивным методом толщина применяемой фольги значительно меньше. В современных технологических процессах изготовления МПП с применением полуаддитивных методов используется фольга толщиной 18, 12, 9 и 5 мкм. Дальнейшее формирование рисунка проводников происходит, как и при аддитивных методах, путем гальванического осаждения меди с применением фотошаблонов.

Этапы комбинированного позитивного метода:

- нарезка технологических заготовок;
- очистка поверхности фольги (дезоксидация);
- сверление отверстий (подлежащих металлизации) на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) (эта технологическая операция применяется только при изготовлении ДПП и заготовок внутренних слоев МПП, выполненных по методу попарного прессования со скрытыми переходными отверстиями);
- активация поверхности под химическую металлизацию;
- тонкая химическая металлизация (до 1 мкм) или палладирование при использовании технологического процесса прямой металлизации отверстий (только для ДПП и заготовок внутренних слоев МПП со скрытыми переходными отверстиями);
- предварительная тонкая гальваническая металлизация (до 6 мкм) — «гальваническая затяжка»;
- нанесение и экспонирование фоторезиста через фотошаблон-позитив;
- основная гальваническая металлизация (до 25 мкм толщины меди внутри отверстий);
- нанесение металлорезиста;
- удаление экспонированного фоторезиста;
- травление обнаженных участков тонкой фольги между элементами печатного рисунка;
- удаление металлорезиста;
- нанесение контактных покрытий на концевые печатные ламели (только при изготовлении ДПП);
- отмывка платы (заготовки МПП), сушка;
- нанесение паяльной маски (только для ДПП);
- нанесение финишного покрытия на контактные площадки (только для ДПП).

Преимущества комбинированного позитивного метода: возможность создания элементов печатного рисунка с высокой точностью. При использовании фольги толщиной 9 мкм достижимая степень разрешения проводников и зазоров между ними — 75 мкм; практически на всех этапах техпроцесса фольга защищает диэлектрическое основание от воздействия технологических растворов. Этим достигается высокое качество поверхности диэлектрика и, как следствие, высокая надежность изоляции; хорошая адгезия (прочность сцепления) элементов печатного рисунка и диэлектрического основания платы.

Недостатки комбинированного позитивного метода: наличие операций травления приводит к возникновению бокового подтравивания проводников. Это ограничивает разрешающую способность процесса. При использовании фольг толщиной 18 мкм и более обеспечение зазоров и ширин проводников на уровне 100 мкм уже может быть проблематичным, так как затрудняет изготовление ультра-сложных плат (платы HDI — сверхвысокой плотности размещения элементов печатного рисунка); травление рисунка по металлорезисту ограничивает свободу выбора травящих растворов, что влечет за собой рост стоимости изготовления по сравнению с применением типовых субтрактивных методов; после завершения травления заготовок МПП необходимо удалять металлорезист, что ведет к увеличению расходов на изготовление.

Для МПП в основном используются методы металлизации сквозных отверстий. Метод попарного прессования уступил в свое время первенство виду более низкой гибкости и невозможности использования при создании плат с очень высоким классом точности. Часто метод попарного прессования применяется для изготовления внутренних слоев сложных МПП со скрытыми переходными отверстиями, расположенными внутри структуры плат. Метод послойного наращивания часто применяется в комбинации с методом металлизации сквозных отверстий (для создания сложных МПП со слепыми переходными отверстиями (платы HDI) [6, 7].

1.2.5. Метод попарного прессования печатных плат

Метод основан на выполнении межслойных соединений посредством металлизации отверстий, как и для обычных двухслойных плат. Для этого применяется полуаддитивный метод изготовления заготовок (или, как чаще называют, — ядер), из которых в дальнейшем и собирается пакет многослойки. Простейшая структура МПП, реализованная таким методом, показана на рис. 1.12.



Рис. 1.12. Простейший вариант структуры МПП попарного прессования [33]:

1 — переходное металлизированное отверстие между наружным и внутренним слоем; 2 — сквозное металлизированное отверстие; 3 — проводник наружного слоя; 4 — проводник внутреннего слоя

Этапы метода попарного прессования:

- с помощью комбинированного позитивного способа формируются будущие ядра МПП. Методика изготовления описана выше. Отличие состоит лишь в том, что для будущих наружных слоев рисунок топологии не изготавливается — фольга остается целой. Эти слои будут изготовлены на завершающих стадиях, после этапа прессования заготовки платы;
- заготовки (ядра) с готовыми внутренними слоями спрессовываются. При прессовании между ядрами размещаются слои прокладочной стеклоткани, пропитанной эпоксидной смолой (такая ткань называется препрегом). Выдавленная при прессовании смола заполняет переходные отверстия, защищая их медное гальванопокрытие от химического воздействия при последующих технологических операциях;

- сверление сквозных отверстий (подлежащих металлизации) на станках с ЧПУ;
- активация, тонкая химическая металлизация и гальваническая затяжка — как и для ДПП при комбинированном позитивном способе, но уже применительно для заготовки МПП;
- нанесение и экспонирование фоторезиста через фотошаблон для изготовления внешних слоев;
- основная гальваническая металлизация;
- нанесение металлорезиста;
- удаление экспонированного фоторезиста;
- травление обнаженных участков тонкой фольги между элементами печатного рисунка внешних слоев;
- удаление металлорезиста;
- отмывка платы, сушка;
- нанесение паяльной маски;
- нанесение финишного покрытия на контактные площадки;
- нанесение маркировки;
- электрическое тестирование, контроль всей платы.

Преимущества метода попарного прессования:

- относительная простота реализации, поскольку он основан на обычной технологии металлизации отверстий двухсторонних плат, хорошо освоенной в промышленности;
- высокая скорость изготовления плат, поскольку все заготовки (ядра) могут изготавливаться одновременно в одном технологическом цикле;
- низкая чувствительность к браку и огрехам изготовления отдельных ядер. Это значительно увеличивает выход годной продукции и, как следствие, удешевляет стоимость МПП.

Недостатки метода попарного прессования:

- одним из главных недостатков такого метода является необходимость дважды осаждать на внешних слоях МПП гальваническую медь: сначала при металлизации переходных отверстий ядер, затем при металлизации сквозных металлизированных отверстий. Поэтому толщина

меди наружных слоев может достигать в отдельных случаях значений 130–160 мкм (типовое значение — 70–100 мкм). Это резко снижает разрешающую способность рисунка на внешних слоях МПП (вследствие значительных боковых подтравов проводников). Кроме того, неравномерность толщины гальванической меди по плоскости платы не обеспечивает достаточного качества и плотности печатного рисунка;

- при нанесении паяльной маски и защитных лаковых покрытий создаются затруднения в обеспечении качества такого покрытия — лаки стекают с высоких проводников, обнажая их острые кромки. Это приводит к необходимости использования (в качестве паяльных масок) специальных материалов, которые не дают высокой точности при формировании рисунка маски;
- для получения качественной металлизации межслойных переходов и их высокой надежности необходимо обеспечить достаточную жесткость заготовок (ядер). Это обстоятельство не позволяет использовать (при таком методе изготовления МПП) тонкие ядра, что влечет резкое увеличение толщины МПП при большом количестве слоев либо ограничивает количество слоев до 4–6 при необходимости обеспечения толщины платы 1,5–2,0 мм. Такое количество слоев не всегда позволяет получить необходимую плотность топологии;
- для заполнения пробельных мест в рельефе печатного рисунка (между соседними слоями МПП) при высокой толщине меди проводников потребуется значительное количество смолы. Это обстоятельство приводит к необходимости использования нескольких достаточно толстых слоев прокладочной стеклоткани (препрегов), что также приведет к увеличению суммарной толщины МПП;
- при комбинировании используется два различных технологических метода: гальваническое осаждение меди и травление остатков медной фольги между проводниками. При этом увеличивается стоимость

техпроцесса, а также появляются дополнительные расходы на поддержание растворов, принимающих участие в техпроцессах;

- для наращивания гальванической меди требуется несколько часов. Это удлинит весь техпроцесс в целом и плохо стыкуется со временем, необходимым на травление меди (несколько минут при использовании вертикального оборудования со струйным травлением).

Метод попарного прессования широко распространен на предприятиях, специализирующихся на двухслойных и несложных многослойных платах. Именно этот метод применяется на подавляющем большинстве отечественных предприятий [8].

1.2.6. Метод послойного наращивания

Метод заключается в последовательном чередовании слоев изоляционного материала (препрега) и проводникового слоя. Соединение между проводящими элементами соседних печатных слоев производится гальваническим наращиванием меди в отверстиях изоляционного слоя. Пример структуры МПП, реализованной этим методом, показан на рис. 1.13.

Этапы метода послойного наращивания:

- с помощью субтрактивного метода формируется будущее ядро — основа МПП (формируются слои двух первых внутренних слоев МПП с рисунком печатных проводников и площадок);
- поверх ядра с обеих сторон наносится необходимое количество слоев препрега;
- поверх препрега наносится фольга;
- заготовка подвергается технологической операции прессования;
- с помощью механического сверления (с контролем глубины сверловки), лазерного или плазменного прожига формируются отверстия — основа микропереходов между внешними и ближайшими внутренними слоями заготовки;

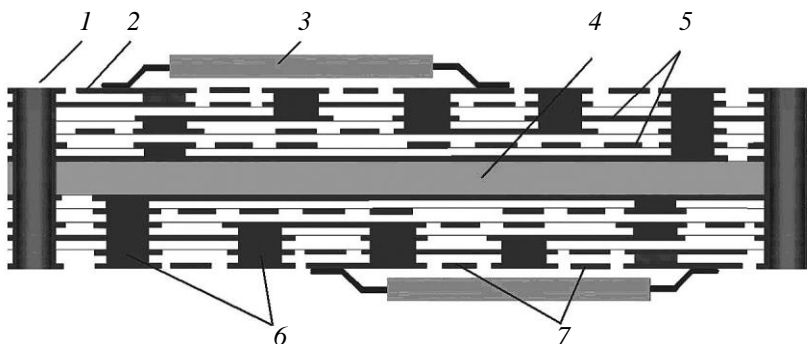


Рис. 1.13. Вариант структуры МПП послойного наращивания [33]:

1 — сквозное переходное металлизированное отверстие между наружными слоями; 2 — монтажная контактная площадка; 3 — компонент с планарными выводами; 4 — основа (ядро МПП); 5 — проводники внутренних слоев; 6 — межслойные переходы (металлизированные столбики); 7 — проводники внешних слоев

- активация, тонкая химическая металлизация и гальваническая затяжка, как и для ДПП при комбинированном позитивном способе;
- нанесение и экспонирование фоторезиста через фотошаблон для изготовления внешних слоев;
- основная гальваническая металлизация (отличие от классического полуаддитивного метода — большая толщина меди для полного заполнения полостей отверстий микропереходов);
- нанесение металлорезиста;
- удаление экспонированного фоторезиста;
- травление обнаженных участков тонкой фольги между элементами печатного рисунка внешних слоев;
- удаление металлорезиста;
- механическая и химическая очистка, выравнивание и планаризация поверхности осажденной меди (особенное внимание уделяется областям межслойных переходов — в этих местах не должно быть наплывов меди);

- отмывка заготовки, сушка;
- электрическое тестирование, контроль полученной заготовки;
- далее снова наносится необходимое количество слоев препрега, медной фольги и все технологические операции повторяются;
- при формировании внешних слоев МПП после прессования заготовки производится сверление сквозных отверстий (подлежащих металлизации) на станках с ЧПУ;
- далее повторяется ряд технологических операций по гальванической металлизации и травлению остатков меди между элементами рисунка;
- нанесение паяльной маски;
- нанесение финишного покрытия на контактные площадки;
- нанесение маркировки;
- обрезка платы по контуру;
- электрическое тестирование, контроль всей платы.

Основным преимуществом данного метода изготовления МПП является исключительно высокая плотность размещения проводников во всех слоях печатной платы и очень высокая плотность монтажа. Это достигается вследствие возможности выполнения межслойных переходов в любой точке платы, независимо от трассировки и расположения межслойных соединений любых смежных слоев.

Недостатки метода послойного наращивания:

- ограниченное количество слоев МПП. Как правило, нельзя производить операцию прессования более пяти раз, поэтому количество слоев такой МПП будет не более двенадцати. Это связано с тем обстоятельством, что при каждом следующем прессовании нового слоя диэлектрик внутренних слоев (с уже сформированной структурой) подвергается тепловому стрессу и большим механическим нагрузкам.
- С каждым новым прессованием происходит нарушение уже сформированной структуры полимеризованной ранее смолы внутренних слоев. Таким образом, при наращивании новых слоев происходит старение и деградация внутренних слоев,

что ограничивает слоистость платы и уменьшает ее надежность в целом;

- при комбинированных методах, используемых для изготовления слоев при послойном наращивании МПП, используется два различных технологических метода: гальваническое осаждение меди и травление остатков меди между проводниками. Следует обратить внимание, что толщина осаждаемой меди достаточно значительна (не менее 35 мкм) для обеспечения заполнения отверстий межслойных переходов;
- для наращивания гальванической меди требуется большое время — несколько часов, что делает техпроцесс изготовления каждой новой пары слоев достаточно продолжительным. Так как наращивание новых слоев происходит последовательно (только после полного завершения техпроцесса изготовления предыдущей пары слоев), то полный цикл изготовления МПП по этому методу занимает очень большое время;
- при возникновении дефектов изготовления последующих слоев вся полученная заготовка уходит в брак. Это значительно снижает выход годной продукции и, как следствие, приводит к удорожанию годных плат;
- особенности гальванического осаждения меди в толстых слоях приводят к необходимости тщательной очистки технологических растворов и электролитов на протяжении всего техпроцесса изготовления. Для обеспечения постоянных условий такой металлизации необходимо более часто производить химический анализ, корректировку и очистку рабочих растворов.
- Сложность послойного наращивания (в сочетании с высокой реализуемой плотностью топологии печатного рисунка и монтажа) стала причиной применения этого метода в основном для изготовления ультрасложных МПП в опытном производстве с высокой технологической культурой. Внедрение его в серийное производство встречает множество трудностей, из-за чего возможно выполнить только опытные образцы и очень малые серии плат. По этим

причинам применение метода послойного наращивания оправдано только для изготовления уникальной аппаратуры с высокой надежностью.

1.2.7. Метод металлизации сквозных отверстий

В общих чертах мало отличается от метода попарного прессования, но имеет ряд существенных отличий в деталях. Так же, как и при методе попарного прессования, изготавливаются ядра, на которых выполнен проводящий рисунок будущих внутренних слоев МПП. Однако способ изготовления ядер чисто субтрактивный, межслойные микропереходы между слоями (принадлежащими одному ядру) не изготавливаются. После прессования заготовки МПП из ядер выполняется: сверловка сквозных отверстий, гальваническое осаждение меди и изготовление топологии внешних слоев МПП с применением комбинированного позитивного метода. Типичная структура МПП, изготовленная методом металлизации сквозных отверстий, показана на рис. 1.14.

Этапы изготовления МПП методом металлизации сквозных отверстий:

- вырубка заготовок ядер МПП из фольгированного диэлектрика;
- подготовка поверхности фольги (дезоксидация);
- нанесение и проявление фоторезиста, закрывающего участки фольги, не подлежащих вытравливанию;
- травление заготовок;
- отмывка и сушка заготовок;
- электрическое тестирование, контроль полученных заготовок;
- подготовка поверхности фольги (активация) для обеспечения лучшего сцепления фольги с препрегами при прессовании;
- прессование заготовок в единый пакет;

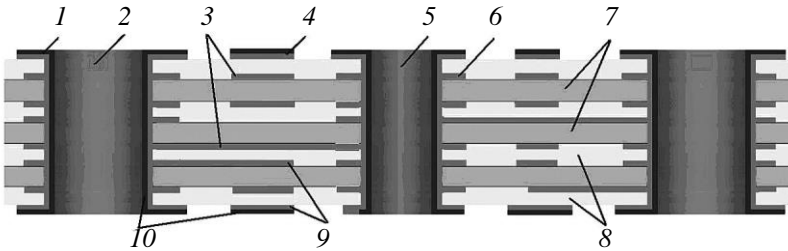


Рис. 1.14. Структура МПП, изготовленная классическим методом металлизации сквозных отверстий [33]:

1 — контактная площадка внешнего слоя; 2 — сквозное монтажное металлизированное отверстие; 3 — проводник внутреннего слоя; 4 — проводник внешнего слоя; 5 — сквозное переходное металлизированное отверстие; 6 — контактная площадка внутреннего слоя; 7 — основа (ядро МПП); 8 — слой прокладочной стеклоткани (препрег); 9 — медная фольга; 10 — гальваническая медь

- сверление сквозных отверстий (подлежащих металлизации) на станках с ЧПУ;
- очистка отверстий от наносов смолы (desmaer-процесс);
- активация меди, тонкая химическая металлизация и гальваническая затяжка (как и для ДПП при комбинированном позитивном способе);
- нанесение и экспонирование фоторезиста через фотошаблон для изготовления внешних слоев;
- основная гальваническая металлизация, нанесение металлорезиста и удаление экспонированного фоторезиста;
- травление обнаженных участков фольги между элементами печатного рисунка внешних слоев;
- удаление металлорезиста;
- отмывка платы, сушка;
- нанесение паяльной маски;
- нанесение финишного покрытия на контактные площадки;
- нанесение маркировки;
- обрезка платы по контуру;
- электрическое тестирование, контроль.

Преимущества метода металлизации сквозных отверстий:

- возможность высокой автоматизации процесса изготовления МПП и полной автоматизации при изготовлении ядер, поскольку этот процесс основан на обычной субтрактивной технологии, хорошо освоенной в промышленности;
- простота реализации МПП, так как все процессы однотипны и просты, не требуют сложной оснастки;
- высокая скорость изготовления плат, поскольку все заготовки (ядра) могут изготавливаться одновременно в одном технологическом цикле;
- низкая чувствительность к браку и огрехам изготовления отдельных ядер. Это значительно увеличивает выход годной продукции и, как следствие, удешевляет стоимость МПП;
- высокая повторяемость и скорость изготовления рисунка топологии (особенно при использовании струйного травления) позволяет широко использовать этот метод в крупносерийном производстве;
- использование фольгированных диэлектриков с малой толщиной фольги позволяет уменьшить боковой подтрав и изготавливать проводники малой ширины с высокой точностью. Применение струйного травления и широкий выбор травящих растворов позволяют изготавливать проводники с высоким качеством и стабильностью параметров шириной до 75 мкм, при таком же значении зазоров на фольге толщиной 18 мкм. Это позволяет изготавливать печатные платы высокой сложности с большой плотностью топологии, недостижимой при использовании других методов изготовления МПП;
- отсутствие межслойных переходов позволяет применять очень тонкие диэлектрические основания для изготовления ядер МПП, а малая толщина фольги позволяет использовать тонкие препреги. Применение же тонких диэлектриков приводит к возможности изготовления МПП небольшой толщины с большим количеством слоев;

- этот метод позволяет изготавливать печатные платы с практически не ограниченным количеством слоев, тем самым компенсирует более низкую плотность размещения топологии и монтажа. По сравнению с другими методами изготовления он значительно упрощает топологию, поскольку позволяет предоставить конструктору большую вариантность в размещении трасс, использовать более короткие линии связи;
- возможность введения дополнительных слоев без существенного увеличения стоимости плат позволяет выполнять в структуре МПП экранирующие слои, отводить под питание отдельные слои. Это приводит к улучшению характеристик быстродействующих сигналов, повышению качества питания компонентов, высокой степени защиты сигналов от внешних и внутренних электромагнитных помех и снижению излучения элементами топологии, что существенно при проектировании сложных быстродействующих устройств.

Недостатки метода металлизации сквозных отверстий:

- главный недостаток — относительно механически слабая связь металлизации отверстий с торцами контактных площадок внутренних слоев. Это приводит к осложнению изготовления МПП по высоким классам надежности, необходимости применения специальных методов очистки и подготовки поверхности отверстий перед металлизацией;
- для обеспечения качественной металлизации отверстий необходимо соблюдать отношение минимального диаметра отверстия к толщине платы как 1 : 8, не более (увеличение соотношения до 1 : 10 и более приводит, как правило, к снижению качества металлизации и снижению надежности платы). Это ограничивает либо минимальный диаметр переходных отверстий МПП (изготовленных по этому методу), либо толщину платы;
- из-за отсутствия межслойных переходов этот метод имеет несколько более низкую плотность размещения топологии и монтажа. Так как переходные отверстия сквозные, то при изготовлении перехода с одного из сигнальных слоев на другой отверстия и контактные площадки к ним будут присутствовать на всех остальных слоях. Это ограничивает

эффективную площадь трассировки на всех слоях и вводит ограничения на размещение компонентов и расположение переходных отверстий;

- необходимо точно совмещать печатные слои при изготовлении ядер, а также ядра при прессовании. Малейшие неточности совмещения в процессе прессования, деформации базовых материалов, а также погрешности фотошаблонов неточности при сверлении отверстий приводят к нарушению подключений фольги (во внутренних слоях) к гальванической меди, осажденной в полости отверстий;
- особой тщательности требует подбор режимов прессования и качество технологической оснастки прессов (для обеспечения прочной адгезии пакета слоев). Не менее важна равномерная полимеризация смолы во всей структуре МПП, чтобы обеспечить дальнейшую устойчивость МПП к температурным воздействиям в процессе группового монтажа.

К тому же существуют, по крайней мере, две причины, которые делают невозможным эффективное использование метода металлизации сквозных отверстий для изготовления ультрасложных МПП. Первая причина — использование микросхем в корпусах BGA с малым шагом выводов. Вторая причина — использование сверхбольших микросхем (СБИС) в корпусах BGA, LGA и им подобных с очень большим количеством выводов. Рассмотрим эти случаи более детально.

При использовании микросхем в BGA-корпусах с шагом выводов 0,60 мм и меньше возникает необходимость применения переходных отверстий с очень малым диаметром. Например, для микросхем с шагом расположения шариков 0,50 мм необходимо использовать переходные отверстия диаметром 0,10 мм. Качественную металлизацию таких микроотверстий можно обеспечить только при относительно небольшой толщине платы — 0,50–0,80 мм, не более. Такое ограничение по толщине платы может не позволить изготовить МПП с необходимым количеством слоев. Кроме того, сам технологический процесс осаждения меди в каналах сквозных отверстий столь малого диаметра вызывает зачастую непреодолимые технологические

трудности, причиной которых становятся капиллярные эффекты внутри таких микроотверстий.

При применении в конструкции устройства СБИС в BGA корпусах с количеством шариков от 800 и более, для корректной разводки, возникает необходимость в использовании большого количества слоев (16 и более). Ситуация усугубляется в случае большого потребления тока в цепях питания СБИС и большой рассеиваемой мощности, а тем более при необходимости построения согласованных линий передач. В этом случае возникает необходимость применения дополнительных слоев питания, теплоотводящих слоев, экранирующих слоев, расположенных между каждой парой сигнальных слоев. Для строгого соблюдения согласования импедансов линий передач сигнала регламентируются расстояния между сигнальными и опорными слоями. Все это приводит к необходимости применения очень большого числа слоев в МПП, увеличению ее толщины и повышению требований к точности изготовления элементов печатного рисунка, а также точности совмещения слоев и точности сверловки. Вследствие сказанного выше стоимость изготовления печатной платы существенно возрастает.

При значительном увеличении толщины МПП для обеспечения качественной металлизации возникает необходимость использования переходных отверстий большего диаметра, что не всегда возможно конструктивно, так как пространство для расположения переходных отверстий (возле выводов BGA-корпуса) строго регламентировано.

Именно эти причины привели к отказу использования (в чистом виде) метода металлизации сквозных отверстий для изготовления ультрасложных МПП (платы HDI — сверхвысокой плотности размещения элементов печатного рисунка). Для таких плат характерной чертой стало объединение нескольких методов изготовления [8]. Чаще всего при изготовлении HDI-структур используют комбинацию методов металлизации сквозных отверстий и послойного наращивания. Совместное применение этих методов дает наилучшие результаты для изготовления проводников малой ширины и с малыми зазорами между элементами печатного рисунка. При такой комбинации методов,

как правило, внутреннее субъядро HDI-структуры изготавливается методом металлизации сквозных отверстий. Затем методом послойного наращивания выполняются слои, имеющие микропереходные отверстия между смежными слоями. Простейший пример такой структуры показан на рис. 1.15.

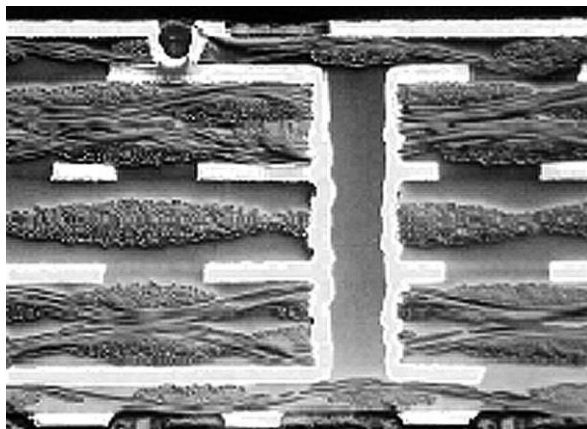


Рис. 1.15. HDI-структура МПП с глухими и скрытыми отверстиями [33]

Таким же способом можно изготавливать и HDI-структуры с большим количеством различных типов микропереходов на более глубокие слои. Это позволяет значительно снизить количество слоев платы, что благотворно сказывается на надежности и стоимости изготовления. Структуры именно такого типа применяются при изготовлении сложных МПП для мобильных устройств.

Контрольные вопросы

1. Какие методы изготовления ОПП и ДПП вы знаете?
2. Какова последовательность формирования проводников на ОПП при изготовлении субтрактивным негативным методом с использованием пленочного фоторезиста?
3. Какова последовательность формирования проводников на ДПП при изготовлении субтрактивным негативным методом с использованием пленочного фоторезиста?
4. Какова последовательность формирования проводников на ДПП при изготовлении субтрактивным позитивным методом?
5. Какова последовательность формирования проводников на ДПП при изготовлении полуаддитивным методом с использованием пленочного фоторезиста?
6. Какова последовательность формирования проводников на ДПП при изготовлении аддитивным методом с использованием пленочного фоторезиста?
7. В чем суть аддитивного метода «Фотоформ» ?
8. Какова последовательность формирования проводников на ДПП при изготовлении субтрактивным методом «тентинг»?
9. Какова последовательность изготовления МПП методом «ПАФОС»?
10. Какова последовательность изготовления МПП методом попарного прессования?
11. В чем суть метода послойного наращивания при изготовлении МПП?
12. Назовите преимущества и недостатки метода металлизации сквозных отверстий при изготовлении МПП.

Глава 2

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Создание современной электронной аппаратуры неразрывно связано с разработкой и освоением новых материалов. От свойств используемых материалов зависят как перспективность и конкурентоспособность ЭА в целом, так и конкретные характеристики ПП. В этой главе рассмотрены отечественные и импортные материалы, применяемые для изготовления всех типов ПП: ОПП, ДПП, МПП, ГПП, ГЖП и ГПК; приведены их основные сравнительные характеристики; параметры, по которым проводят входной -контроль материалов; сформулированы требования, предъявляемые при выборе марки материала, в зависимости от условий эксплуатации, электрических, конструкторских и других характеристик ПП, обозначены области применения различных материалов [9, 10] . Приведены новые негорючие материалы ПП с уникальными характеристиками, полностью соответствующие требованиям зарубежных стандартов, что делает их конкурентоспособными на мировом рынке. Акцентируется внимание на необходимости обеспечения экологической чистоты и безопасности материалов ПП для человека и окружающей среды.

2.1. Базовые и расходные материалы для изготовления ПП

К базовым материалам ПП относятся: фольгированные или нефольгированные диэлектрики, керамические и металлические (с поверхностным диэлектрическим слоем) материалы, из которых изготавливают основание ПП; изоляционный прокладочный материал (склеивающие прокладки — препреги), используемый для склеивания слоев МПП. Склеивающие прокладки изготавливают из стеклоткани, пропитанной недополимеризованной термореактивной эпоксидной или

другими смолами; из полиимидида с нанесенным с двух сторон адгезионным покрытием и др.

Для защиты поверхности ПП, МПП, ГПП, ГПК и ГЖП от внешних воздействий применяют полимерные защитные лаки и покрывные защитные пленки. Требования к базовым материалам для изготовления ПП определяются: условиями эксплуатации; электрическими, механическими, экономическими и другими требованиями к ПП; типом ПП; конструкцией ПП; методом изготовления ПП; условиями сборки и монтажа ячеек и др. Основными требованиями к базовым материалам для изготовления ПП являются: хорошие электроизоляционные свойства; высокая механическая прочность; высокая термостойкость; устойчивость к агрессивным технологическим средам; хорошая обрабатываемость; стабильность электрических и механических параметров ПП при климатических воздействиях; низкая стоимость и др.

Фольгированные и нефольгированные диэлектрики состоят из наполнителя и связующего (фенольной, эпоксифенольной, эпоксидной и другой смолы). В качестве наполнителя используют бумагу, стеклоткань, стекловолокно и пр.

Фольгированные диэлектрики на основе стеклоткани состоят: из стеклоткани, изготовленной из нитей, например, алюмоборосиликатного стекла; из смолы, используемой для пропитывания стеклоткани (определяет характеристики материала), модификацией которой получают необходимые механические и электрические характеристики фольгированных диэлектриков; из фольги, используемой в качестве металлического покрытия фольгированных материалов (медной, алюминиевой, резистивной, в частности, никромовой и др.).

Медную фольгу изготавливают одним из двух способов: электролитическим осаждением и прокаткой. Медную электролитическую фольгу, оксидированную с одной стороны в щелочных или хромовых растворах для лучшего сцепления фольги с диэлектриком- (толщиной 5, 9, 12, 18, 35, 50, 70, 105 мкм), получают, например, гальванопластическим методом и приклеивают к диэлектрику клеем БФ-4 и БФР-4, в состав которого добавлен пылевидный кварц для повышения

теплостойкости клеевого состава и улучшения адгезии к медной фольге и диэлектрику.

Нефольгированные диэлектрики выпускают двух типов:

- 1) с адгезионным (клеевым) слоем, например, эпоксикаучуковой композицией толщиной 50–100 мкм на поверхности диэлектрика, который наносят для повышения прочности сцепления осаждаемой в процессе изготовления ПП меди химическим способом;
- 2) с введенным в объем диэлектрика катализатором, способствующим осаждению химической меди.

Керамические материалы характеризуются: стабильностью электрических и геометрических параметров; стабильной высокой механической прочностью в широком диапазоне температур; высокой теплопроводностью; низким влагопоглощением и пр. Недостатками керамических материалов являются длительный цикл изготовления, большая усадка материала, хрупкость, высокая стоимость и пр.

Металлическое основание изготавливают из алюминия, титана, стали или меди. Их применяют в теплонагруженных ПП для улучшения отвода теплоты от ЭРИ и ПМК, в ЭА

с большой токовой нагрузкой, работающей при высоких температурах, а также для повышения жесткости ПП, выполненных на тонком основании.

Характеристиками прокладочных склеивающих материалов (толщиной 0,025; 0,06 и 0,1 мм) для склеивания слоев МПП в монолит являются:

- марка стеклоткани и смолы;
- общее содержание смолы, которое определяет прочность склеивания, способность заполнять пространство между печатными проводниками в слое МПП, толщину изоляционного слоя между слоями МПП. Рассчитывается как отношение массы смолы к массе прокладочного материала, в %. Содержание смолы в прокладках должно быть в пределах 42–52 %;
- к содержанию летучих веществ в смоле, которые приводят образованию пустот, уменьшению прочности

склеивания, степени полимеризации смолы из-за присутствия растворителя, ухудшению механических и изоляционных характеристик. Содержание летучих веществ в смоле должно быть не более 0,75 %. Определяется как процентное отношение массы летучего растворителя к массе пропитанной стеклоткани;

- текучесть смолы, которая определяет режим прессования слоев (температуру и давление) и пригодность прокладочного материала для склеивания слоев МПП;
- содержание растворимой смолы, от которой зависит степень полимеризации смолы. Содержание смолы для прокладочных материалов марки СП в состоянии поставки составляет порядка 80–100 %.

К технологическим (расходным) материалам для изготовления ПП относятся фоторезисты, специальные трафаретные краски, защитные маски, электролиты меднения, травления и пр. Требования к ним определяются конструкцией ПП и технологическим процессом (ТП) изготовления. Фоторезисты должны обеспечивать необходимую разрешающую способность при получении рисунка схемы и соответствующую химическую стойкость. Травильные растворы должны быть совместимы с применяемым при травлении резистом, быть нейтральными к изоляционным материалам, иметь высокую скорость травления и пр. Все материалы должны быть экономичны и безопасны для окружающей среды.

2.2. Материалы для изготовления ОПП, ДПП и МПП

В качестве материала основания ПП применяются слоистые диэлектрики, с одной или двух сторон фольгированные медной фольгой, или нефольгированные диэлектрики.

К фольгированным и нефольгированным диэлектрикам предъявляются следующие требования:

- высокие поверхностное, Ом, и удельное объемное сопротивление, Ом·м, характеризующие величину тока утечки;
- высокая электрическая прочность изоляции, определяемая напряжением постоянного тока, при котором происходит пробой;
- низкие значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь — для передачи высокочастотных сигналов и снижения тепловыделения, обусловленного диэлектрическими потерями;
- стабильность электрических характеристик при повышенной влажности и температуре;
- высокая механическая прочность: предел прочности при растяжении, при изгибе, которые зависят от типа используемой смолы и снижаются при повышении температуры;
- стабильность линейных размеров по осям X , Y и Z при повышенной температуре, зависящая от температуры стеклования T_c , теплоустойчивости и теплопроводности базового материала. Требование высокой температуры стеклования T_c (до 290 °С в перспективе, рассчитанная на рабочую температуру до 280 °С) связано с тем, что при нагреве-, например, при пайке, происходит значительное расширение стеклопластиков, эпоксидной смолы и других полимеров по оси Z , интенсивность которого особенно возрастает при превышении температуры стеклования данного материала, что может привести к расслаиванию диэлектрика и разрыву металлизации в отверстиях ПП, так как металл имеет малое расширение по оси Z . Поэтому при высокой температуре стеклования T_c процесс расширения материала ПП

сдвигается в область более высоких температур, желательно превышающих температуру пайки;

- высокая теплоустойчивость, которая зависит от типа наполнителя и состава смолы.

Данное требование связано с тем, что 1) необходима повышенная устойчивость к воздействию теплового удара, например, при пайке ЭРИ и ПМК к ПП, при котором температура пайки достигает значений деструкции диэлектрика и может происходить выход газов, порообразование, коробление и пр.; 2) в результате воздействия высоких температур в процессе сверления отверстий возможен разогрев диэлектрика, вытекание и наволакивание смолы на стенки отверстий, препятствующее металлизации отверстий в дальнейшем; 3) высокая рабочая температура может привести к расслоению стеклоткани и смолы, отслаиванию фольги, образованию пузырей под фольгой и к тому, что характеристики материала не будут удовлетворять требованиям эксплуатации ЭА;

- хорошая механическая обрабатываемость при резке, фрезеровании, зачистке, сверлении и других операциях без образования сколов, трещин и расслоения диэлектрика;
 - устойчивость к агрессивным средам (кислотам, щелочам, растворителям и пр.) в ТП изготовления ПП;
 - хорошая прочность сцепления (адгезия) фольги с диэлектриком, которая зависит от материала фольги, способа ее получения (прокатка или электролитическое осаждение), состояния поверхности, температуры и времени выдержки при повышенной температуре и пр.;
 - негорючесть — требование международных стандартов применения в ЭА только самозатухающих фольгированных диэлектриков;
 - низкое водопоглощение для исключения расслоения диэлектрика, особенно при нагреве;
 - низкое значение температуры коэффициента линейного расширения (ТКЛР), совместимое с ТКЛР выводов и корпусов ЭРИ; в случае, если ТКЛР диэлектрика значительно больше ТКЛР выводов и корпусов ЭРИ или ПМК, возникают значительные напряжения в местах пайки

вследствие большого расширения диэлектрика основания ПП по осям X , Y и малого расширения по тем же осям подложки ЭРИ;

- плоскостность (особенно необходимая для установки ПМК);
- низкая стоимость и др.

Фольгированные диэлектрики применяют в субтрактивных методах изготовления ПП, нефольгированные — в аддитивном и полуаддитивном.

Фольгированные диэлектрики, применяемые в качестве основания ПП в субтрактивных методах, являются композиционными материалами и состоят из армирующего наполнителя, синтетического связующего вещества и медной, алюминиевой или резистивной фольги. Наиболее широко в настоящее время применяются гетинакс, стеклотекстолит, полиимид и др.

Гетинакс фольгированный состоит из спрессованных слоев электроизоляционной бумаги (армирующего наполнителя), пропитанных фенольной или эпоксифенольной смолой в качестве связующего вещества, облицованных с одной или двух сторон медной фольгой (например, запись ГФ-1 или ГФ-2 обозначает гетинакс фольгированный односторонний или двухсторонний).

Стеклотекстолит фольгированный представляет собой спрессованные слои стеклоткани, пропитанные эпоксифенольной или эпоксидной смолой (например, запись СФ-1 или СФ-2 обозначает стеклотекстолит фольгированный односторонний или двухсторонний, соответственно).

Большое значение при изготовлении ПП имеет процентное соотношение между стекловолокном и смолой в диэлектрике, так как оно влияет на качество выполнения целого ряда операций, например, таких как:

- сверление монтажных и переходных отверстий — чем больше стекловолокна (абразива), тем быстрее изнашивается сверло;
- подтравливание диэлектрика в отверстиях МПП — чем больше смолы, тем легче подтравливать;

- прессование МПП, так как выбор режимов прессования (давление и время его приложения) зависят от времени желатинизации смолы (определяется экспериментально для каждой партии материала);
- металлизация монтажных или переходных отверстий — чем больше стекловолокна, тем больше торцов стекловолокна выходит в отверстия ПП, поверхность которых достаточно сложно подготовить химическим способом перед химическим осаждением меди в отверстия, и в результате могут появиться не покрытые медью участки, что приводит к разрыву металлизации и электрических цепей.

По сравнению с гетинаксами стеклотекстолиты имеют лучшие механические и электрические характеристики, более высокую нагревостойкость, меньшее влагопоглощение. Однако им присущ целый ряд недостатков: невысокая нагревостойкость по сравнению с полиимидами, что способствует загрязнению смолой торцов контактных площадок (КП) внутренних слоев при сверлении отверстий; худшая механическая обрабатываемость; более высокая стоимость; существенное различие (примерно в 10 раз) ТКЛР меди и стеклотекстолита в направлении толщины материала, что может привести к разрыву металлизации в отверстиях при пайке или в процессе эксплуатации; различие в ТКЛР эпоксидной смолы и стекла примерно в 20 раз, что может привести к значительным внутренним напряжениям, к короблению ПП и усадке в зоне сверления отверстий. Для изготовления ПП, способных обеспечить надежную передачу наносекундных импульсов, необходимо применять материалы с улучшенными диэлектрическими свойствами (уменьшенным значением диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь), что непосредственно связано с увеличением быстродействия, поскольку скорость распространения сигналов в проводниках обратно пропорциональна диэлектрической проницаемости материалов, из которых изготовлены основания ПП.

При выборе материала основания ПП необходимо обратить внимание на предполагаемые механические воздействия (вибрации, удары, линейное ускорение и т. п.); класс точности ПП (ширину проводников, расстояние между ними); реализуемые электрические функции и требования к электрическим параметрам; объект, на который устанавливается ЭА и условия эксплуатации; быстродействие; стоимость и пр.

В наименовании марки материала буквы означают: С — стеклотекстолит; Т — теплостойкий; Н — негорючий или нормированной горючести; Ф — фольгированный; 1–2 — облицованный фольгой с одной или двух сторон; цифры 5, 9, 12, 18, 35, 50, 70, 100, 105 — толщину фольги, в мкм.

В табл. 2.1 и 2.2 представлены марки материалов основания ПП, наиболее широко применяемые в настоящее время для изготовления ОПП, ДПП, МПП.

Для изготовления ПП, эксплуатируемых в условиях повышенной опасности возгорания, применяют огнестойкие гетинаксы и стеклотекстолиты марок ГОВ, ГОФВ, СОНФ, СГНФ. Фольгированные стеклотекстолиты марок СТФ, СТФТ, СТАП и СТПА-5 обладают повышенной теплостойкостью, а СТАП и СТПА-5 применяют для изготовления ПП с повышенной плотностью печатного монтажа по полуаддитивной технологии. В комплекте с материалами СТФ и СТАП применяют прокладочные стеклоткани (препреги) марок СТП-4 и СТП-СТАП.

Толщина медной фольги материалов СОНФ, СОНФ-у, СЭТ и СЭТ-Н может быть 5, 18, 35, 50, 70 и 100 мкм.

Фольгированный стеклотекстолит СФВН обладает очень высокой теплостойкостью (рабочая температура 280 °С, температура стеклования 300 °С), стабильностью линейных размеров, высокими поверхностным и удельным объемным сопротивлениями и применяется для ПП с повышенной плотностью печатного монтажа и МПП с числом слоев до 25.

Таблица 2.1

Материалы для изготовления ОПШ и ДПП

Материал	Марка	Толщина, мм	Материал	Марка	Толщина, мм
Гетинакс фольгированный	ГФ-1-35	1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0	Диэлектрик фольгированный общего назначения с гальваностойкой фольгой	ДФО-1 ДФО-2 (фольга 35 мкм)	0,06; 0,08; 0,1; 0,13; 0,15; 0,20;
Гетинакс фольгированный с гальваностойкой фольгой	ГФ-1-35Г ГФ-2-35Г ГФ-1-50Г ГФ-2-50Г		Диэлектрик фольгированный самозатухающий с гальваностойкой фольгой	ДФС-1 ДФС-2 (фольга 20 мкм)	0,25; 0,3; 0,4; 0,5; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0
Стеклотекстолит фольгированный	СФ-1-35 СФ-2-35 СФ-1-50 СФ-2-50 СФ-1-(2)-35Г СФ-1-(2)-50Г	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0	Стеклотекстолит фольгированный с повышенной нагрывостойкостью	СФПН-1-50 СФПН-2-50	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0
То же с гальваностойкой фольгой			Стеклотекстолит фольгированный общего назначения	СОНФ-1	0,13; 0,15; 0,2; 0,6; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0
				СОНФ-2	0,35; 0,5; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0
				СОНФ-у	

Продолжение табл. 2.1

Материал	Марка	Толщина, мм	Материал	Марка	Толщина, мм
Стеклотекстолит тепло-стойкий фольгированный с гальваностойкой фольгой	СТФ-1-35 СТФ-2-35 СТФ-1-18 СТФ-2-18	0,08; 0,1;	Гетинакс фольгированный общего назначения	ГОФ-1-35Г ГОФ-2-35Г	—
			Стеклотекстолит с двух-сторонним адгезионным слоем	СТЭК	1,0; 1,5; 2,0
Стеклотекстолит тепло-стойкий фольгированный с гальваностойкой фольгой	СТФ-1-35 СТФ-2-35 СТФ-1-18 СТФ-2-18	0,13; 0,2; 0,15; 0,3; 0,25; 0,5; 0,35; 0,8; 1,5; 2,5;	Гетинакс фольгированный общего назначения	ГОФ-1-35Г ГОФ-2-35Г	—
			Стеклотекстолит тепло-стойкий, армированный алюминиевым протектором	СТПА-5-1 СТПА-5-2 (фольга 5 мкм)	0,1; 0,12; 0,13; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0
Стеклотекстолит тепло-стойкий негорючий фольгированный с гальваностойкой фольгой	СТНФ-1-35 СТНФ-2-35 СТНФ-1-18 СТНФ-2-18	1; 2; 3	Стеклотекстолит с катализатором	СТАМ	0,7... 2,0
Стеклотекстолит листовой	СТЭФ-1-2ЛК	1; 2	Фольгированный армированный фторопласт	ФАФ-4Д (фольга 35 мкм)	—
Стеклотекстолит электротехнический	СТЭФ-ВК-1-1,5		Стеклотекстолит фольгированный-общего назначения с гальваностойкой фольгой	ФС	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0
То же	СТЭФ-1	0,3 ... 1,5			

Окончание табл. 2.1

Материал	Марка	Толщина, мм	Материал	Марка	Толщина, мм
Стеклотекстолит фольгированный общего назначения нормированной горючести модифицированный	СОНФМ-1-35	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0	Стеклотекстолит фольгированный теплостойкий нормированной горючести	СТФТС-1-35	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0
	СОНФМ-2-35 СОНФМ-1-50 СОНФМ-2-50			СТФТС-2-35 СТФТС-1-50 СТФТС-2-50	
Стеклотекстолит фольгированный теплостойкий	СТФТ-105	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0	Стеклотекстолит теплостойкий фольгированный	СТАП-1-35	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0
	СТФТ-2-35 СТФТ-1-50 СТФТ-2-50			СТАП-2-35 СТАП-1-50 СТАП-2-50	
Гетинакс фольгированный общего назначения влагостойкий	ГОФВМ-1	1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0	Стеклотекстолит, фольгированный алюминием	СФА-2-35	—
	ГОФВМ-2				
Стеклотекстолит фольгированный с высокой теплостойкостью	СФВН	—	Стеклотекстолит фольгированный	СЭТ СЭТ-Н	—

Таблица 2.2

Материалы для изготовления МПП

Материал	Марка	Толщина, мм
Фольгированный травящийся стеклотекстолит (гальваностойкая фольга)	ФТС-1-18А ФТС-2-18А ФТС-1-35А ФТС-2-35А ФТС-2-35Б	0,1; 0,12; 0,14; 0,15; 0,18; 0,19; 0,23; 0,27; 0,5
Фольгированный диэлектрик для микроэлектронной аппаратуры	ФДМЭ-1А ФДМЭ-2А ФДМЭ-2Б	0,1; 0,13; 0,16; 0,20
Диэлектрик фольгированный тонкий	ФДМ-1А ФДМ-2А ФДМ-2Б	0,15; 0,20; 0,23; 0,25; 0,30; 0,35
Стеклотекстолит теплостойкий фольгированный	СТФ-1-35 СТФ-2-35 СТФ-1-18	0,08; 0,1; 0,13; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,5; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0
Диэлектрик фольгированный общего назначения	ДФО-1 ДФО-2 (фольга 35 мкм)	0,06; 0,08; 0,1; 0,13; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,4; 0,5; 0,8; 1,5; 2,0
Диэлектрик фольгированный самозатухающий	ДФС-1 ДФС-2 (фольга 20 мкм)	—

Окончание табл. 2.2

Материал	Марка	Толщина, мм
Стеклотекстолит теплостойкий негорючий фольгированный	СТНФ-1-35 СТНФ-2-35 СТНФ-1-18	0,08; 0,1; 0,13; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,5; 0,8; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0
Стеклотекстолит фольгированный	СФВН	0,1 ... 2,0
Стеклотекстолит фольгированный	СТАП	0,08 ... 3,0
Стеклотекстолит теплостойкий, армированный алюминиевым протектором	СТПА-5-1 СТПА-5-2 (фольга 5 мкм)	0,1; 0,12; 0,13; 0,15; 0,2; 0,25
Полиимид фольгированный	ПФ-1 ПФ-2 (фольга 35 мкм)	0,05; 0,1
Полиимид фольгированный	Элифом-ПФ-1 Элифом-ПФ-2	—
Стеклоткань прокладочная	СП-4-0,025 СП-4-0,06 СП-4-0,1	—
Стеклоткань прокладочная травящаяся	СПТ-3-0,025 СПТ-3-0,06 СПТ-3-0,1	—
Стеклоткань прокладочная	САФ (толщина 0,025 ... 0,062 мкм)	—

Для печатных плат с металлизированными отверстиями применяют материалы с гальваностойкой фольгой.

В табл. 2.3 приведены некоторые характеристики фольгированных диэлектриков, применяемых при изготовлении ПП [6, 7]. Для изготовления ПП 1-й и 2-й группы жесткости целесообразно применять материал на основе бумаги, для 3-й и 4-й — на основе стеклоткани, полиимида и лавсана. Материалы, имеющие фольгу толщиной 5 мкм, позволяют изготовить ПП 4-го и 5-го классов точности и выше. Склеивающий материал марки САФ представляет собой стеклоткань, пропитанную модифицированным эпоксидным связующим с текучестью менее 5 %, которую применяют для склеивания разнородных материалов, полупакетов МПП с числом слоев до 24, ГЖП.

По сравнению с гетинаксами стеклотекстолиты имеют лучшие механические- и электрические характеристики, более высокую нагревостойкость, меньшее влагопоглощение. Однако у них есть ряд недостатков: худшая механическая- обрабатываемость; более высокая стоимость; существенное различие- (примерно в 10 раз) коэффициента теплового расширения меди и стеклотекстолита- в направлении толщины материала, что может привести к разрыву металлизации в отверстиях при пайке или в процессе эксплуатации.

Для изготовления ПП, обеспечивающих надежную передачу наносекундных импульсов, необходимо применять материалы с улучшенными диэлектрическими свойствами. Поэтому к перспективным относится применение оснований ПП из органических материалов с относительной диэлектрической проницаемостью ниже 3,5.

Нефольгированные диэлектрики применяют при полуаддитивном и аддитивном методах производства ПП. Для улучшения прочности сцепления металлического покрытия с основанием на его поверхность наносят тонкий (50–100 мкм) полутвержденный клеевой слой (например, эпоксидкаучуковую композицию).

Введение в лак, пропитывающий стеклоткань, 0,1–0,2 мас. % палладия, смеси палладия с оловом или закиси меди незначительно снижает сопротивление изоляции, но повышает качество металлизации.

Таблица 2.3

Основные характеристики материала основания ПП

Критерии оценки	ГФ-1 ГФ-2	СФ-1 СФ-2	СТНФ-1, 2 СТФ-1, 2	ФДМ-1,2	ФАФ-4Д	СТПА-5 СТАП	Полиимид
Поверхностное сопротивление, Ом	10 ^{8*}	5 · 10 ^{10*} 2 · 10 ^{12**}	1 · 10 ^{12**}	10 ¹⁴	—	5 · 10 ^{11**}	10 ¹⁴
Удельное объемное сопротивление, Ом · м	5 · 10 ⁷	1,4 · 10 ¹³	2 · 10 ^{12**}	9 · 10 ¹¹	10 · 10 ¹⁶	1 · 10 ¹¹	10 ¹⁴
Диэлектрическая постоянная при 1 МГц (Ег)	7,0	5,5 * 4,3	5,4 ** 4,6	4,7	2,2	5,4 * 4,6	3,5
Сопротивление изоляции, МОм	10 ³	10 ⁴	10 ⁶	10 ⁴	—	—	—
Водопоглощение, % мг, менее	2,9 60	0,3 6,4	0,20–0,25 15	1,5	—	15	2,9
Предел рабочих температур, °С	–60...+85	–60...+85	–60...+105	–60...+100	+113	—	–196...+400
Прочность сцепления фольги с диэлектриком на полоске 3 мм, Н	2,7	3,0	4,5	3 ... 3,6	—	3,6****	2,6 ... 3,9

* После кондиционирования в условиях 96 ч/40 °С/93 % (96 ч; при температуре 40 °С; относительной влажности 93 %).

** После кондиционирования в условиях 96 ч/40 °С/93 % + 1 ч/23 °С/75 %.

*** Верхние пределы указаны для тонких пленок.

**** После гальванической металлизации.

Соединение отдельных слоев МПП осуществляют специальными склеивающими прокладками, которые изготавливают из стеклоткани, пропитанной недополимеризованной эпоксидной смолой. Содержание смолы в прокладках должно быть в пределах 42–52 %, а летучих веществ не более 0,75 %. Длительное сохранение клеящих свойств межслойных прокладок достигается их консервацией в герметически упакованных полиэтиленовых мешках при пониженной (+10 °С) температуре.

Для производства печатных кабелей применяют армированные фольгированные пленки из фторопласта-4 и полиэфирные пленки. Прямое прессование медной фольги с термопластичным основанием позволяет добиться геометрической стабильности материала при кратковременном изменении температуры до 180–200 °С. Более высокой термостабильностью (до 250 °С), прочностью на растяжение, несгораемостью, радиационной стойкостью, а также способностью к равномерному травлению

в щелочных растворах обладают полиимидные пленки, но высокая стоимость и водопоглощение ограничивают их широкое применение коммутационными ДПП и МПП в микроэлектронной аппаратуре. Термопластичные материалы, обладающие повышенной текучестью, используются при изготовлении рельефных ПП. К ним относятся сложные композиции, основу которых составляют полиэфирсульфоны и полиэфиримиды. Введение в пластмассы стеклянного наполнителя увеличивает их рабочую температуру до 260 °С, что позволяет проводить пайку монтируемых элементов расплавлением дозированного припоя в паровой фазе.

В качестве основы для ПП СВЧ-диапазона используют неполярные полимеры (фторопласт, полиэтилен, полипропилен), полярные (полистирол, полифениленоксид) и их сополимеры. Направленное изменение свойств термопластичных материалов достигается наполнением (алунд, двуокись титана), армированием (стеклоткань) и плакированием (медная фольга).

Керамические материалы характеризуются высокой механической прочностью, которая незначительно изменяется в диапазоне температур 20–700 °С, стабильностью электрических характеристик и геометрических параметров, низким (0–0,2 %) водопоглощением и газовыделением при нагреве в вакууме,

хрупкостью и высокой стоимостью. Промышленность выпускает их в виде пластинок размером от 20×16 до 60×48 мм с высотой микронеровностей $0,02-0,1$ мкм и разнотолщиной $\pm 0,01-0,05$ мм. Они предназначены для изготовления одно- и многослойных коммутационных плат микросборок для СВЧ-диапазона. Металлические платы применяются в изделиях с большой токовой нагрузкой, работающих при повышенных температурах. В качестве основы используется алюминий или сплавы железа с никелем. Изолирующий слой на поверхности алюминия получают анодным оксидированием. Варьируя состав электролита и режим электролиза, можно формировать оксидные пленки толщиной от нескольких десятков до сотен микрон с сопротивлением изоляции 10^9-10^{10} Ом. На стальных основаниях изолирование токопроводящих участков осуществляют с помощью специальных эмалей, изготавливаемых в виде тонких пленок. В состав эмалей входят оксиды магния, кальция, кремния, бора, бериллия, алюминия или их смеси, связка (поливинилхлорид, поливинилацетат или метилметакрилат) и пластификатор. Пленка соединяется с основанием путем прокатки между вальцами с последующим вжиганием. Таким образом, можно создавать многослойные структуры с различными механическими и электрическими характеристиками.

Для изготовления ГПК, выдерживающих многократные (до 150) изгибы на 90° с радиусом 3 мм, применяют фольгированный лавсан и фторопласт. Материалы с толщиной фольги 5 мкм позволяют изготовить ПП 4-го и 5-го классов точности.

2.3. Проводниковые материалы для изготовления ГПП, ГПК и ГЖП

Проводниковый материал должен обладать: малым удельным электрическим сопротивлением; значительным относительным удлинением ($\delta \geq 6$ %); большим пределом прочности при растяжении и разрыве ($\sigma \geq 20$ кг/мм²); устойчивостью к перегибам;

качественной поверхностью без раковин и включений и др. Важную роль в механической прочности и гибкости ГПП, ГПК и ГЖП имеет сорт меди. Наиболее широко применяется медная (катаная и электролитическая) фольга. Самую высокую износостойкость и формообразующую способность имеет катаная и отожженная медная фольга (дорогостоящая), которую применяют в условиях работы при постоянном изгибе (динамический режим). Катаная медная фольга обладает большей гибкостью, способностью к перегибам, так как ее относительное удлинение в 5–6 раз больше, чем у электролитической фольги. Преимуществом катаной медной фольги является также способность к механической обработке без расслоения, а к недостаткам следует отнести наличие раковин, что исключает ее применение без дополнительных гальванических покрытий при изготовлении проводников шириной порядка 0,1 мм. Если гибкость необходима только при сборке ЭА, то используют тянутую при высокой температуре или электролитическую недорогую медную фольгу. Электролитическая медная фольга применяется при изготовлении ГПК с высокой плотностью рисунка проводников. Она обладает более высокой разрешающей способностью при травлении меди с пробельных мест по сравнению с катаной. Кроме медной фольги в спецаппаратуре используют никелевую, алюминиевую, нихромную, железоникелевую и другую фольгу, покрытую электрохимически осажденным оловосвинцом, золотом, никелем и другими металлами, которые обладают высокой прочностью, устойчивостью к перегибам, сравнимой с катаной медной фольгой, но имеют более высокое удельное сопротивление.

2.4. Защитные покрытия ГПП, ГПК и ГЖП

Защитные покрытия — диэлектрические покрытия, которые применяют для защиты от внешних воздействий и обеспечения электрической изоляции печатных проводников на ГПК и гибких участках ГЖП. Защитные покрытия ГПК необходимы: для защиты от коррозии; для исключения коротких замыканий; для предупреждения непреднамеренного контакта проводников ГПК с металлическими деталями ЭА; для

повышения прочности ГПК; для повышения устойчивости к перегибам.

Для защиты от внешних воздействий ГПП, ГПК и ГЖП применяют полиимидные пленки с односторонним или двухсторонним адгезионным покрытием и защитной пленкой. Эти материалы марок ПА, АПТ и ПАМ обладают хорошей адгезией, теплостойкостью, электроизоляционными свойствами, эластичностью, возможностью использовать при травлении адгезива щелочные травители, используемые при травлении полиимида [9]. Для защиты ГПК от внешних воздействий применяется пленка с адгезионным слоем марки ПЭТ-А (наносится валковым ламинированием или прессованием), а также покрывная полиимидная пленка ППП. Желательно, чтобы покрывная пленка ГПК была выполнена из того же материала, что и ГПК. Покрывная пленка наносится при температуре 471 К и давлении $7 \cdot 10^5$ Па. Возможно нанесение на ГПК вместо покрывной пленки нескольких слоев лака или эмали (жидкие полиуретаны, акрилаты, акрил-эпоксиды).

Для обеспечения механической защиты и электрической изоляции печатных проводников на гибких участках ГЖП применяют полиимидную пленку или жидкий маскирующий слой, который наносится трафаретной печатью или поливом.

2.5. Адгезивы ГПП, ГПК и ГЖП

Адгезив — клеящая композиция, необходимая для сцепления поверхностей разнородных материалов.

Адгезивы применяют в многослойных ГПП, ГПК для соединения металлической фольги с диэлектрической пленкой. При этом увеличиваются механическая прочность и эластичность многослойных структур, выравниваются напряжения среза на поверхностях раздела фаз, возникающие в результате различия ТКЛР металла и диэлектрика. Применяют адгезивы на основе термически устойчивых полимеров, таких как сложный полиэфир, полиимид, специально отвержденные эпоксидные смолы и др. При использовании полиимида в качестве базового материала

роль адгезива является определяющей и ограничивающей в термических свойствах ГПП и ГЖП.

Основными направлениями разработки новых гибких диэлектриков являются:

- создание негорючих диэлектриков в соответствии с международными стандартами;
- повышение рабочей температуры до 300 °С; применение алюминиевой фольги;
- применение фольги на основе резистивных сплавов — нихромовой и др.;
- разработка гибких фольгированных диэлектриков, стойких радиации, путем замены медной фольги на алюминиевую, так как поглощение медными проводниками сверхжесткого рентгеновского излучения может привести к их нагреву и даже испарению;
- разработка полиимида, фольгированного алюминием;
- разработка клеев для соединения металлов, слоев стекло-текстолита и пленок для создания многослойных конструкционных материалов для космической ЭА, состоящих из нескольких слоев, склеенных между собой в различных комбинациях: пленка — алюминиевая фольга — пленка — медная фольга.

Контрольные вопросы

1. Какие материалы относятся к базовым и расходным матери-алам для изготовления ПП?
2. Что собой представляют фольгированные и нефольгирован-ные диэлектрики?
3. Назовите характеристики прокладочных склеивающих материалов.

4. Какие требования предъявляются к фольгированным и нефольгированным диэлектрикам?
5. Какие марки материалов основания ПП наиболее широко применяются в настоящее время для изготовления ОПП, ДПП, МПП?
6. Какими свойствами обладают керамические материалы и полиимидные пленки для изготовления ОПП, ДПП, МПП?
7. Назовите основные характеристики материала основания ПП.
8. Какие адгезивы применяют в многослойных ГПП, ГПК?
9. Назовите основные направления разработки новых гибких диэлектриков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Медведев А. М.* Технологии производства печатных плат. М. : Техносфера, 2005.
2. *Медведев А.* Печатные платы. Конструкции и материалы. М. : Техносфера, 2005.
3. *Пирогова Е. В.* Проектирование и технология печатных плат : учебник. М. : ФОРУМ, 2005.
4. *Галецкий Ф. П.* Особенности производства печатных плат в России // Электронные компоненты. 2001. № 5. С. 18–26.
5. *Галецкий Ф. П.* Характеристики современных технологий печатных плат // Технологическое оборудование и материалы. 2000. № 12. С. 16–20.
6. *Барановский И.* Современный дизайн и технологии печатных плат: вопрос-ответ. Финишные покрытия плат. Особенности применения // CHIP NEWS, Украина. 2009. № 4 (84), май.
7. *Федулова А. А., Котов Е. П., Явич Э. Р.* Химические процессы в технологии изготовления плат. М. : Радио и связь, 1981.
8. *Happy Holden.* The HDI Handbook. First Edition, 2009.
9. *Борисова Л. Н., Шестаков А. К., Тарасов А. И.* Фольгированные материалы для изготовления печатных плат // Электронные компоненты. 2001. № 5. С. 51–54.
10. *Воробьев З. Н., Ушанова Л. Л., Вишнякова Е. П. и др.* Материалы для производства печатных плат // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 1993. № 2. С. 47–50.
11. *Шалкаускас М., Ваишялис А.* Химическая металлизация пластмасс. Л. : Химия, 1985.
12. *Фантгоф Ж.* Химико-гальванические процессы в производстве печатных плат // «РОСКОН-2001» : тез. докл. на 4-й Рос. конф. по печатным платам. СПб., 2001.
13. *Каница М.* Подготовка поверхности в производстве печатных плат // Технологии электронной промышленности. 2005. № 4. С. 18–21.
14. *Ильичева Т. Л., Брусницына Л. А., Степановских Е. И. и др.* Механизм набухания эпоксикаучукового слоя в органических растворителях // Химия и химическая технология : науч. труды. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2006. С. 132–134.
15. *Фролов Ю. Г.* Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. М. : Химия, 2004.
16. *Браун М., Долимер Д., Галвей А.* Реакции твердого тела. М. : Мир, 1983.

17. Дятленко В. А., Киричек В. А. Материалы для изготовления печатных плат // Обмен науч.-техн. опытом в радиопромышленности. 1985. № 10. С. 37–40.
18. Трубочев С. Г., Васильев А. В., Зайцев В. И. и др. Перспективные материалы для изготовления печатных плат // Электротехника. 1985. № 12. С. 38–42.
19. Свиридов В. В., Воробьева Т. Н., Гаевская Т. В. Химическое осаждение металлов из водных растворов. Минск : Университетское, 1987.
20. Брусницына Л. А., Грекова Н. А., Крупина Т. Л. и др. Технологический процесс беспалладиевой активации диэлектрических материалов // Обмен науч.-техн. опытом в радиопромышленности. 1988. № 7. С. 44–45.
21. Сосницкий В. Н., Брусницына Л. А., Китаев Г. А. и др. Раствор восстановления каталитической активности поверхности рисунка печатной схемы // ЖПХ. 1989. № 6. С. 1380–1382.
22. Ильичева Т. Л., Брусницына Л. А., Макурин Ю. Н. и др. Беспалладиевая активация диэлектрических материалов перед химической металлизацией // Химия и химическая технология : науч. труды. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2006. С. 111–113.
23. Брусницына Л. А., Макурин Ю. Н. Изучение процесса активации поверхности диэлектрических материалов растворами меди (I) // ЖПХ. 1999. Т. 72, вып. 2. С. 228–231.
24. Брусницына Л. А., Степановских Е. И., Алексеева Т. А. Комплексообразование меди (I) в растворах для активации диэлектрических печатных плат // Бутлеровские сообщения. 2012. Т. 29, № 1. С. 68–74.
25. Брусницына Л. А., Китаев Г. А. Влияние поверхностно-активных веществ на процесс фотоактивации диэлектрических материалов // ЖПХ. 1999. Т. 72, вып. 8. С. 1272–1275.
26. Ильичева Т. Л., Брусницына Л. А., Степановских Е. И. и др. Влияние времени нанесения и состава фотоактиватора на содержание меди (II) в адгезивном слое органических стеклопластиков // Химия и химическая технология : науч. труды. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2006. С. 130–131.
27. Калверт Дж., Питтс Дж. Фотохимия. М. : Мир, 1968.
28. Батеха А. Г., Беккер Г. О. Фотохимические процессы в слоях. Л. : Химия, 1978.
29. Крюков А. И., Шерстюк В. П., Дилунг И. И. Фотоперенос электрона и его прикладные аспекты. Киев : Наукова думка, 1982.

30. *Брусницына Л. А., Степановских Е. И., Алексеева Т. А.* Моделирование процесса фотовосстановления меди (II) в твердой фазе//Бутлеровские сообщения. 2012. Т. 29, № 1. С. 75–79.
31. *Капица М.* Активация поверхности диэлектрика // Технологии электронной промышленности. 2005. № 5. С. 22–25.
32. *Галецкий Ф., Лейтес И., Петров Л.* Разработка технологий изготовления высокоплотных печатных плат [Электронный ресурс] // РТС Инжиниринг : сайт. URL: www.rts-engineering.ru/Plat/plArticle11.html/ (дата обращения: 19.09.2014).
33. URL: <http://ictech.com.ua/publication/technical.../107-formirovaniesteka-mpp-part> (дата обращения: 19.09.2014).

Учебное издание

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РАЗРАБОТКИ
МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ:
ПРАКТИКУМ

Составитель:
Ципина Наталья Викторовна

В авторской редакции

Подписано к изданию . .2022.
Уч.-изд. л. 1,9

ФГБОУ ВО "Воронежский государственный
технический университет"