

Опыт обработки СВЧ-материалов для ПП

В статье рассказывается об опыте ЗАО «Центр перспективных технологий и аппаратуры» (ЗАО «ЦПТА») изготовления печатных плат для СВЧ-техники.

Андрей Тавризов

tavrizov@zao-cpta.ru

Сергей Постнов

postnov@zao-cpta.ru

Введение

Этим направлением организация занимается более семи лет. И если первые заказы звучали так: «... А не попробуете заматаллизировать отверстия на материалах, отличных от стеклотекстолита?», и нам приносили куски материала с экзотическим названием, то сегодня заказы на материалах как импортных производителей, таких как Rogers Corporation, Arlon Materials for Electronics, Taconic, NELTEC, так и на отечественных материалах типа ФАФ-4Д, ФЛАН, «Дифлар» воспринимаются как одни из типовых. Такому положению вещей способствуют принятые и реализуемые федеральные целевые программы:

- Космическая программа России на 2006–2015 годы, предназначенная удовлетворить растущие потребности государственных структур, регионов и населения страны в космических средствах и услугах на основе расширения и повышения эффективности использования космического пространства для решения стоящих перед Россией задач в экономической, социальной, научной, культурной и других областях деятельности, а также в интересах безопасности страны, расширения международного сотрудничества в области космической деятельности и выполнения международных обязательств Россией в этой области.
- Программа «Глобальная навигационная система», целью которой является дальнейшее развитие и эффективное использование глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС) в интересах социально-экономического развития страны и обеспечения национальной безопасности; сохранение Россией лидирующих позиций в области спутниковой навигации за счет гарантированного предоставления навигационных сигналов отечественным и зарубежным потребителям.
- Программа «Развитие телерадиовещания в Российской Федерации на 2009–2015 годы», в основе которой заложены:
 - модернизация инфраструктуры государственных сетей телерадиовещания;
 - перевод государственных сетей телерадиовещания на цифровые технологии;
 - обеспечение потребностей распределения теле-радиоканалов спутниковым ресурсом;

- обеспечение возможности повсеместного регионального цифрового вещания;
- развитие сетей радиовещания;
- развитие новых видов телевизионного вещания, включая телевидение высокой четкости, мобильное и с элементами интерактивности.

Актуальность создания электронных устройств и аппаратуры для выполнения этих федеральных программ требует выполнения большого числа научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, в том числе и по разработке и изготовлению печатных плат. Наши заказчики, среди которых ФГУП НПП «Пульсар», ФГУП ОмПО «Иртыш», ОАО «Российские космические системы» и многие другие, предъявляют повышенные требования по конструктивному исполнению печатных плат и, соответственно, по качеству изготовления.

Среди задач при изготовлении печатных плат для изделий СВЧ-техники мы выделяем:

- особенности механической обработки материалов (при сверлении отверстий и финишной обработке по контуру);
- проблемы при подготовке отверстий перед металлизацией и металлизация отверстий;
- изменения геометрических размеров изделий в ходе технологического процесса изготовления;
- применение различного вида финишных покрытий.

Опытом, приобретенным в ходе решения этих задач, мы и хотим поделиться.

Материалы

Материалы для производства СВЧ ПП можно разделить по происхождению на отечественные и импортные. К отечественным материалам относятся:

- ФАФ-4Д, ФФ-4 производства «Галоген», г. Пермь;
- ФЛАН производства СЗАО «Тирасламинат», г. Тирасполь;
- «Дифлар» производства МТУСИ, г. Москва.

По химическим свойствам все материалы следует разделить на две части (требуют различной обработки диэлектрика в процессе металлизации отверстий):

1. Не содержащие фторопласт: модифицированные эпоксиды, реактопласты, полифениленоксид, полиимид и др. Все они достаточно хорошо металлизуются, не хуже FR-4.

2. Содержащие фторопласт: ФФ-4, ФАФ-4Д, RO-3000, RT-5000, RT-6000, AR и AD1000, TLX, TLY и др.

Фторопластовая матрица этих материалов может быть армирована стеклотканью и содержать различные керамические наполнители для получения конкретных значений коэффициента диэлектрической проницаемости. Как чистый фторопласт, так и все композиты, его содержащие, металлизуются с трудом из-за уникальной химической инертности фторопласта («органическая платина») и несмачиваемости поверхности водными растворами, особенно в отверстиях малого диаметра. Для успешной металлизации требуется специальная обработка в жестких условиях — в плазме или в натрий-нафталиновом комплексе.

Кроме того, для фторопласта характерна значительная усадка (порядка 1%) в процессе обработки, особенно при травлении и высокотемпературных процессах.

При некачественной пропитке армирующей стеклоткани возникают трудности (на одной из партий AR1000 после металлизации в отверстиях наблюдалась пена высохших солей). По этой же причине при горячем лужении происходит вспучивание вокруг металлизированных отверстий в отечественном материале ФАФ-4Д.

Выбор маршрута изготовления определяет конечными требованиями заказчика. Схема выбора маршрута представлена на рис. 1.

Финишные покрытия можно разделить на две группы:

1. Электрохимические (гальванические): требуют токоподвода и поэтому наносятся до травления.
2. Химические: могут быть нанесены на разобщенные проводники, то есть после травления.

Неоплавляемые электрохимические покрытия (никель, серебро, олово, ПОС) могут вызвать проблемы из-за нависания карнизов, образующихся в результате подтравливания и коррозии меди под ними. (На посеребренной антенне для поиска *p-n*-переходов по краям проводников образовались эти самые переходы, что полностью нарушило работу устройства. После стравливания слоя серебра работоспособность была восстановлена.)

Механическая обработка

Как фторопластовые, так и все прочие СВЧ-материалы могут быть армированы стеклом и содержать керамические наполнители, в частности, окись алюминия (корунд) и двуокись титана (рутил). Особенно много керамики в материалах с высоким коэффициентом диэлектрической проницаемости типа ФЛАН-10 (16), RT-6010. Абразивные свойства этих материалов высоки, инструмент изнашивается очень быстро, требуется его частая замена.

В таблице приведены значения рекомендуемой глубины сверления для материалов семейства TMM фирмы Rogers.

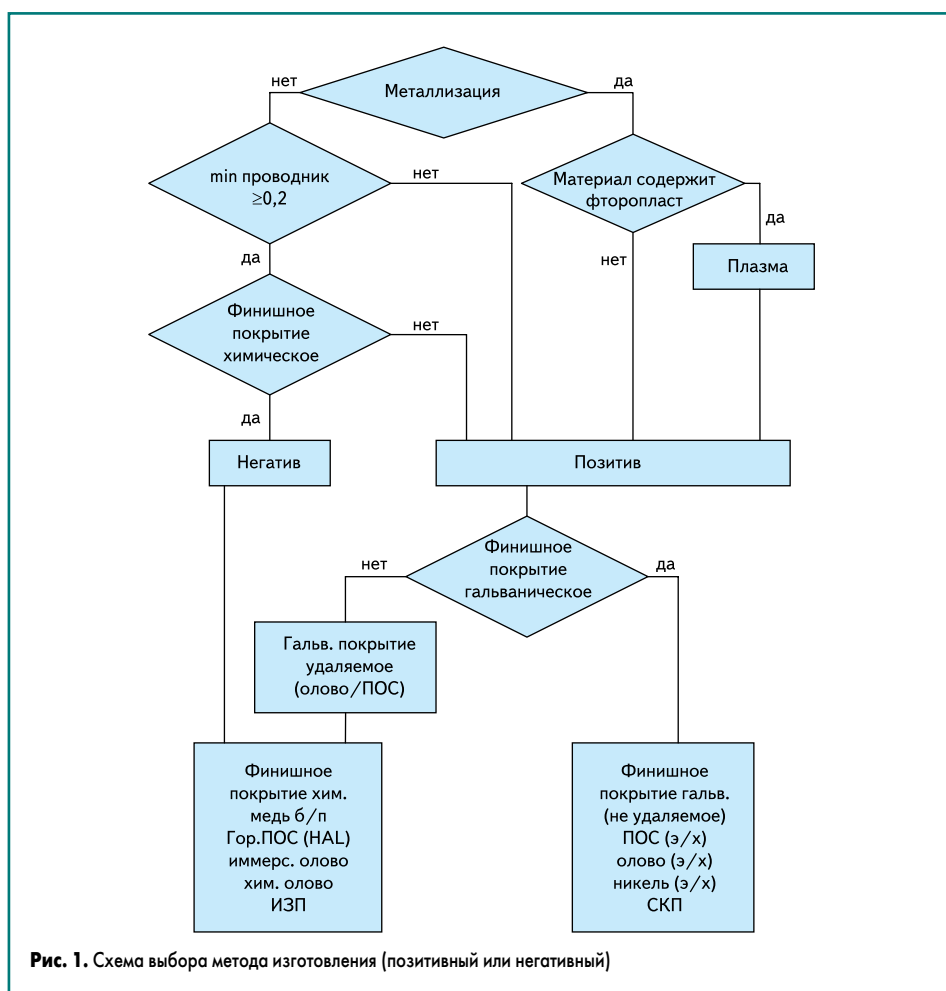


Рис. 1. Схема выбора метода изготовления (позитивный или негативный)

Таблица. Общая рекомендуемая глубина сверления (мм)

Вид ПП	TMM-3	TMM-4	TMM-6	TMM-10
Двусторонние ПП	915	965	1065	1525
Многослойные ПП	455	480	530	760

Максимальное рекомендуемое количество отверстий для ДПП толщиной 2,54 мм из материала TMM-10: 1525/2,54 = 600.

Общие правила при обработке СВЧ-материалов: новый инструмент, жесткие подкладки и накладки (тоже новые, без следов сверления), небольшая высота пакета для беспрепятственного удаления стружки, частая смена инструмента. Стоимость основного материала настолько высока, что экономить на вспомогательных бессмысленно.

Почти по всем импортным материалам в Интернете есть рекомендации по выбору инструмента и режимов обработки. Для отечественных материалов это загадка. Режимы не знают даже сами производители: «Мы не делаем ППП, мы делаем материалы». Приходится самим подбирать режимы для используемых инструментов и оборудования. Некоторые материалы слишком пластичны и дают стружку, нависающую на сверло. В этом случае может помочь прерывистое сверление для разделения стружки или многократное выполнение программы сверления с увеличением глубины по 0,3–0,5 мм.

Фрезерование. Материалы с высоким содержанием керамических наполнителей особенно большой толщины (8–10 мм) невозможно

фрезеровать так же, как FR-4. «Кукурузная» фреза быстро забивается, нагревается, начинает плавить диэлектрик и, в конце концов, ломается. Такие изделия следует вначале отсверливать по контуру, возможно, за несколько заходов, а затем срезать полученную перфорацию 2-заходной фрезой. Для облегчения фрезерования фирма Rogers рекомендует использовать подплатник с заранее отфрезерованными каналами, выходящими наружу: для подсоса воздуха снизу, надежного удаления стружки и охлаждения инструмента. Для уменьшения вспучивания материала вокруг неметаллизированных отверстий, просверливаемых в пробельных местах после травления (2-я механическая обработка), рекомендуется перекладывать заготовки плотной бумагой. Также важно соблюдать правильное направление обхода фрезы: внутренний контур по часовой стрелке, внешний — против нее. Иначе на кромках остается повышенная шероховатость или даже бахрома, которую приходится удалять вручную.

Механическая обработка щетками (механическая зачистка после сверления или перед нанесением фоторезиста) возможна только для толстых и твердых материалов. Мягкие и тонкие могут деформироваться и вытягиваться. В крайнем случае можно зачищать на подложках из стеклотекстолита (2 раза с перевертыванием), но возникает проблема сушки. Взамен механической подготовки можно применять химическую подготовку, включающую в себя щелочное обезжиривание, подтравливание и декапирование, но и тогда необходи-

ма качественная промывка и быстрая сушка. В противном случае на поверхности остаются соли меди и соли жесткости из воды, что приводит к «подпылтию» на последующей операции гальванического покрытия в результате отслоения фоторезиста в местах высыхания капель. Это особенно важно на СВЧ-схемах, где размеры проводников влияют на работоспособность изделия.

Хранить СВЧ-материалы следует в заводской упаковке отдельно от обычных фольгированных диэлектриков. Иначе на поверхности образуются забоины, риски, отпечатки пальцев, приводящие к браку. Брать заготовки следует в перчатках, обязательно двумя руками (например, ТММ10i толщиной 0,6 мм разламывается под собственным весом, если взять его за угол), переносить в подставках или на поддонах.

Металлизация

На нашем предприятии уже более 6 лет внедрен процесс прямой металлизации шведской фирмы J-Kem. Большинство материалов, не содержащих фторопласта, легко металлизуются, не хуже FR-4. Металлизация фторопласта всегда была проблемой из-за его химической инертности и несмачиваемости. Для успешной металлизации необходимо каким-то образом модифицировать поверхность фторопласта: или оторвать фтор от углерода, или активировать внешний слой. От там происходит на самом деле, мало кто себе представляет.

В первом варианте применяется раствор натрий-нафталинового комплекса в эфире. Это достаточно сложно и пожароопасно. На нашем предприятии используется установка плазменной обработки. При низком давлении в камере ВЧ разряд на электродах вызывает распад молекул разряженного газа с образованием свободных радикалов, ионов, электронов, возбужденных атомов, которые активируют поверхность загруженных заготовок. У нас применяется нагрев в среде азота и обработка в аргоне, который легко ионизируется при низком давлении. Химикам трудно понять сущность обработки в инертном газе аргоне, но тем не менее эффект налицо. Металлизация фторопласта проходит успешно, время хранения заготовок после плазмы — не более суток. Разработчики процесса прямой металлизации фирмы J-Kem утверждают, что если работать при высокой концентрации палладия в ванне активации, то можно металлизировать фторопласт и без плазмы. В целях экономии дорогостоящего концентрата мы работаем на нижнем пределе концентрации палладия, тем более что СВЧ-платы составляют небольшую часть от общей площади выпускаемых на нашем предприятии плат. Кстати, металлизация без плазмы возможна и при низких концентрациях, но требуется пропускать заготовки через линию 2–4 раза с вибрацией подвесок для заполнения отверстий растворами (с помощью резинового молотка). Классическое химическое меднение, в отличие от прямой

металлизации, происходит с выделением водорода. Мелкие отверстия могут быть заполнены газом, сплошное покрытие под вопросом.

На одной из выставок весной 2009 г. был представлен процесс атмосферной плазменной обработки. Время жизни активных частиц при атмосферном давлении мало, но и концентрация их на 6–7 порядков выше, следовательно, во столько же раз можно уменьшить время обработки. Принципиально возможно установить «плазменную завесу», состоящую из ряда форсунок, на гальванической линии, там, где подвеска опускается в первую ванну. Пока, по словам разработчика, создание завесы длиной 500–1000 мм достаточно дорого, но уже существуют установки для обработки движущейся с большой скоростью ленты шириной 100 мм.

Иногда могут возникать проблемы с металлизацией, связанные с соблюдением режима сверления или с качеством исходного материала. В частности, на одной партии материала AR1000 после металлизации наблюдались бурные потоки из отверстий, и в микроскоп на стенках отверстий были видны вспучившиеся при сушке соли. Наиболее вероятная причина — недостаточно качественная пропитка стеклоткани и, как следствие, впитывание растворов между волокнами. Средство борьбы — повторная металлизация, до тех пор, пока не исчезнут видимые потоки из отверстий. При поставке других партий материала проблема больше не возникала.

Получение рисунка

Для подготовки поверхности перед нанесением фоторезиста на предприятии ЗАО «ЦПТА» используется для толстых и твердых материалов механическая зачистка мягкими щетками, а для тонких и мягких — химическая подготовка.

В процессе работы мы столкнулись с образованием «волны» при совмещении на кнопках фотоматрицы с заготовками из материалов RT-6006 и RT-6010. Измерение межцентровых расстояний показало, что заготовки сжались в среднем на 0,2%, то есть на 0,6 мм на 300 мм длины! В результате обращения через продавцов к изготовителям этих материалов

удалось выяснить, что для фольгированных фторопластов характерна усадка после травления меди, и на сайте фирмы Rogers есть посвященная этому процессу статья (Fabrication Guidelines 4.2.2). Однако в описаниях отдельных материалов об этой важной их особенности умалчивается. Как оказалось, усадка материалов происходит на всех операциях, где есть воздействие повышенной температуры, а не только после травления.

Для ПП небольшого размера, где изменение размера не имеет существенного значения, фотоматрица для большой групповой заготовки следует выпускать непосредственно перед печатью с учетом измеренного коэффициента усадки (рис. 2), произошедшей на предшествующих операциях. Для крупных ПП с повышенными требованиями к точности линейных размеров фирма Rogers рекомендует применять двойное травление.

В случае совмещения при помощи кнопок базовые отверстия следует вскрывать предварительно, а не вдавливать кнопки через резист. Особенно это касается тонких и мягких материалов, так как отверстия легко деформируются. Лучше всего совмещать бесконтактно, например при помощи установки Exproaligner. После проявления ретушь допускается только при небольших дефектах в несущественных местах схемы.

Покрyтия

В настоящее время на предприятии ЗАО «ЦПТА» возможен выпуск СВЧ ПП со следующими финишными покрытиями:

- Олово-свинец, гальваническое покрытие неоплавленное, О-С (60).
- Горячее лужение, гор. ПОС, HAL, HASL.
- Олово, гальваническое покрытие неоплавленное, О4.
- Иммерсионное олово фирмы J-Kem, 1 мкм с органическим подслоем.
- Химическое олово.
- Никель гальванический блестящий.
- Никель гальванический матовый.
- Иммерсионное защитное покрытие, хим. H3-6.3л.0.1.
- Специальное контактное покрытие, гальваническое покрытие Cr5.
- Медь без покрытия.

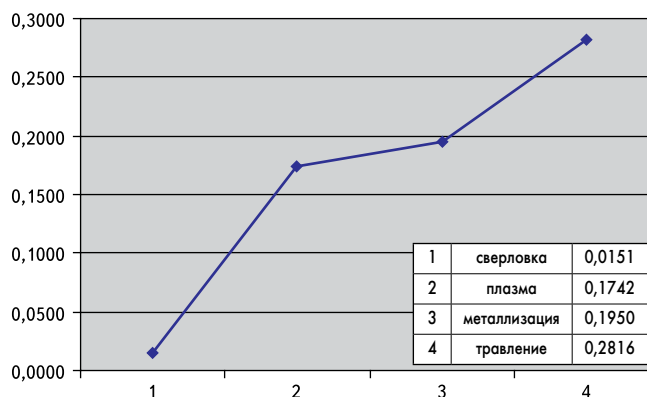


Рис. 2. Возрастание коэффициента усадки (%) в процессе изготовления ПП на материале RT6006

Все покрытия могут быть нанесены на любые материалы, но есть и исключения:

- Гор. ПОС на тонкие и мягкие материалы наносить рискованно из-за возможного механического разрушения при окунании в расплавленный припой. Обработка возможна в случае крепления заготовки в специальном приспособлении.
- Гор. ПОС на материал ФАФ-4Д с металлизацией отверстий наносить нежелательно. Из-за высокого влагопоглощения и расслоения вдоль волокон стеклоткани материал может вздуться. Без металлизации отверстий ФАФ-4Д прекрасно выдерживает горячее лужение.
- Иммерсионное покрытие ИЗП на материал ФАФ-4Д без специальной обработки нанести нельзя. Адгезионный слой применяемой в этом материале фольги не вытравливается полностью в аммиачном травильном растворе. Остатки (возможно, никель) являются активными центрами кристаллизации химического никеля, в результате покрытие разрастается по поверхности вплоть до полного замыкания соседних проводников.

Следует напомнить, что покрытия, используемые в качестве металлорезиста (никель, ПОС и олово гальваническое, СКП), после травления образуют нависающий карниз, который может отделяться и замыкать близкорасположенные проводники.

Кроме проводящих покрытий, возможно также нанесение защитной паяльной маски и маркировки. Фторопластовые материалы нельзя защищать щетками перед нанесением ЗПМ. Заполированная поверхность диэлектрика теряет адгезию. Лучше сохранить шероховатость, образованную адгезионным слоем фольги и оставшуюся после ее стравливания.

Травление

Для СВЧ ПП обычно предъявляются повышенные требования к точности воспроизведения рисунка. Если ширина проводников менее 0,2 мм, то используется позитивный метод с металлорезистом, даже если металлизация отсутствует. Это связано с тем, что для многих материалов перед нанесением фоторезиста нельзя применить зачистку щетками, а после химической подготовки адгезия резиста к медной фольге хуже и тонкие полоски фоторезиста могут отслоиться в процессе травления.

Скорость травления непостоянна, так как зависит от многих факторов: концентрации меди, температуры, pH раствора, давления на форсунках, концентрации ускоряющих добавок, расположения рисунка схемы. Даже при наличии регенератора, если его производительность меньше скорости стравливания меди, концентрация меди будет расти, и, соответственно, будет расти скорость травления. При наличии тонких проводников следует подбирать скорость конвейера на образцах с равной толщиной фольги. В любом случае подтравливание неизбежно, и для проводников до 0,2 мм желательно увеличивать их

ширину на фотошаблоне хотя бы на толщину фольги. Но нужно это согласовать предварительно с заказчиком и убедиться, что он уже не сделал этого сам.

На предприятии ЗАО «ЦПТА» используется медно-аммиачный травильный раствор на основе сульфата меди по технологии фирмы Elo-Chem. Его основное отличие от стандартного раствора в том, что он не содержит хлоридов. Коррозионная активность сульфат-ионов меньше, чем хлорид-ионов, поэтому скорость травления в нем меньше, но зато в сульфатном растворе в качестве анодов регенератора в течение длительного времени может работать хромистая сталь. В хлоридном растворе она разрушается очень быстро.

Тонкие металлические электроды позволяют сконструировать компактный биполярный электролизер. Последовательное питание электродов дает возможность использовать выпрямитель на 200 А, в несколько раз меньшего размера по сравнению с выпрямителем на 3000 А, по классической схеме с параллельным питанием графитовых электродов при равной производительности. С помощью ускоряющих добавок скорость травления может быть приближена к скорости в стандартном растворе. Корректировка раствора газообразным аммиаком избавляет от увеличения объема жидкости и образования концентрированных отходов, содержащих до 100 г/л меди. Кроме того, поддержание значения pH в узком диапазоне позволяет травить в одном растворе заготовки с различными как металлическими (олово, олово-свинец, никель, серебро), так и органическими резистами водно-щелочного проявления. Фоторезист Riston 240 выдерживает до 4 проходов через машину при травлении фольги толщиной 140 мкм.

Для всех фольгированных материалов характерна усадка после стравливания фольги, правда, в разной степени. «Чемпионом» является чистый фторопласт, отечественный ФФ-4 дает усадку более 1% (5 мм на стандартном листе 500×500 мм). Армированные тканью диэлектрики имеют меньшие значения. В упоминавшейся уже статье компании Rogers приведены значения для материалов RT-5880 (0,2–0,5%), RT-6010 (0,32–0,34%) и RT-6006 (0,9–1,1%), причем величина усадки может отличаться по основе и утку армирующей ткани.

Фрезерование готовых ПП небольшого размера (где можно пренебречь изменениями линейных размеров) следует производить по программе с учетом вновь измеренного коэффициента усадки. Нельзя просто умножить координаты программы на коэффициент. Нужно учесть, что усадка происходит не к нулевой точке программы, а к неподвижному штифту стола станка, то есть смещается и нулевая точка. Можно пойти и другим путем: изготовить подплатник и просверлить в нем с учетом коэффициента усадки 2 отверстия, которые уже есть на заготовке, допустимо использовать крепежные отверстия. Следует установить заготовку на подплатник со штифтами, имеющими диаметр, равный диаметру выбранных отверстий. Далее фрезеровать по программе с учетом коэффициента усадки.

Для крупных ПП, требующих точного воспроизведения рисунка, Rogers рекомендует процесс, названный «Двойное травление». Он включает два отдельных этапа получения рисунка и травления с промежуточной сушкой для ускорения остаточного сжатия. Эта процедура позволяет провести усадку приблизительно на 90% до окончательного травления схемы. Окончательная усадка обычно не превышает нескольких сотых процента по отношению к требуемым размерам, что достаточно мало, и поэтому ею можно пренебречь.

Промежуточная сушка заключается в прогреве при 225 °С в течение 2 часов в наполненной азотом печи. Присутствие кислорода при таких условиях вызовет окисление меди и приведет к снижению усилия отрыва фольги.

Если требуется сквозная металлизация отверстий, то они могут быть просверлены после предварительного травления по программе без учета усадки, соответствующим образом подготовлены и все поверхности заготовки металлизированы. Конечный фотошаблон совмещается по центральным линиям, образованным грубым фотошаблоном. Позитивный фотошаблон используется для получения рисунка, и ПП покрывается медью до требуемой толщины. Металлорезист осаждается на открытую медь, и затем оставшаяся медь (включая металлизацию, не покрытую металлорезистом) стравливается. Если нет металлизированных отверстий, можно сразу экспонировать через негатив и оставшуюся медь стравить. Такой двухстадийный процесс травления и сушки приведет к очень малым изменениям размеров на готовой ПП.

Более простым способом является последовательное приближение, но этот метод требует дополнительного расхода основного материала. Необходимо изготовить фотошаблон без учета усадки, провести заготовку через весь технологический процесс, дождаться завершения процесса усадки (она может продолжаться несколько суток, нагрев ускоряет процесс), измерить реальный коэффициент усадки для данной партии материала, рисунка схемы и технологии. Затем изготовить новый фотошаблон с коэффициентом, обратно пропорциональным коэффициенту усадки (больше единицы), и постараться в точности воспроизвести технологический процесс. Особенно важны режимы всех горячих операций, включая и мокрые: обезжиривание (70 °С), ИЗП (90 и 70 °С), а также плазма, промежуточные сушки в шкафах, дублирование маски, если она есть.

ЗаклЮчение

ЗАО «ЦПТА» изготавливает ПП для СВЧ-изделий как из материалов заказчика, так и из материалов собственной закупки. Накопленный опыт позволяет выполнять работы по изготовлению простых конструкций (двусторонние и односторонние печатные платы) и более сложных (многослойные печатные платы). МПП могут быть выполнены из однородных базовых диэлектриков, а также скомбинированы на основе FR-4 и специализированного материала для СВЧ.