

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Владимирский государственный университет

В.П. КРЫЛОВ

**ТЕХНОЛОГИИ И ПОДГОТОВКА
ПРОИЗВОДСТВА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ**

Учебное пособие

Владимир 2006

УДК 621.396
ББК 32.844
К85

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор кафедры
"Технология приборостроения"

Московского авиационного института

А.М. Медведев

Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой
"Радиотехника и радиосистемы"

Владимирского государственного университета

О.Р. Никитин

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Владимирского государственного университета

Крылов, В. П.

К85 Технологии и подготовка производства печатных плат :
учеб. пособие / В. П. Крылов ; Владим. гос. ун-т. — Владимир :
Изд-во Владим. гос. ун-та, 2006. — 64 с.

ISBN 5-89368-689-6 В основу учебного пособия положен одноименный раздел курсов "Технология радиоэлектронных средств" и "Технология электронно-вычислительных средств", читаемых автором для студентов Владимирского государственного университета (ВлГУ), обучающихся по направлению бакалаврской подготовки 210200 — проектирование и технология электронных средств, а также по специальностям инженерной подготовки 210201 — проектирование и технология радиоэлектронных средств и 210202 — проектирование и технология электронно-вычислительных средств.

Подготовлено для студентов высших учебных заведений и может быть использовано в системе повышения квалификации инженерно-технических работников предприятий и организаций радиоэлектронной промышленности.

Ил. 4. Библиогр.: 9 назв.

УДК 621.396

ББК 32.844

ISBN 5-89368-689-6

©Владимирский государственный
университет, 2006

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ	6
1.1. Элементы системного анализа технологических процессов изготовления печатных плат	6
1.2. Проблемы выбора базовых материалов	10
Глава 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАРШРУТЫ ОДНО- И ДВУХСТОРОННИХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ	12
2.1. Химический и другие простые способы изготовления одно- и двухсторонних печатных плат	12
2.1.1. Химический негативный (субтрактивный) метод .	12
2.1.2. Химический позитивный метод	13
2.1.3. Прочие простые способы	13
2.2. Комбинированные методы изготовления двухсторонних печатных плат с металлизацией переходных отверстий . .	14
2.2.1. Комбинированный позитивный метод	15
2.2.2. Тентинг-метод	15
2.2.3. Электрохимический (полуаддитивный) метод . . .	16
Глава 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАРШРУТЫ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ	20
3.1. Метод металлизации сквозных отверстий	21
3.1.1. Изготовление заготовок	21
3.1.2. Сборка пакета и прессование	23
3.1.3. Формирование рисунка на внешних слоях и металлизация отверстий	24
3.2. Другие методы изготовления многослойных печатных плат	25
3.2.1. Метод попарного прессования	25
3.2.2. Метод послыонного наращивания	26
3.2.3. Прочие методы	26

Глава 4. ХИМИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ	
ПРОЦЕССЫ В ТЕХНОЛОГИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ . . .	27
4.1. Травление меди: выбор травителя и утилизация отходов . . .	27
4.2. Химическая металлизация	30
4.3. Гальваническая металлизация	32
Глава 5. МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА И ПОЛУЧЕНИЕ	
ЗАЩИТНОГО РЕЛЬЕФА	36
5.1. Операции механической обработки	36
5.1.1. Получение заготовок и очистка поверхности	36
5.1.2. Пробивка, сверление и прошивка отверстий	37
5.1.3. Оформление контура: фрезерование, скрайбирование, штамповка, перфорирование	39
5.2. Формирование защитного рельефа	40
5.2.1. Сеткография: защитные краски	40
5.2.2. Фоторезисты: сухие пленочные и жидкие	41
5.2.3. Защитные паяльные маски: назначение и нанесение	42
5.2.4. Маркировка: сеткография, фотоспособ и принтеры	43
Глава 6. КОНТРОЛЬ В ТЕХНОЛОГИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ . . .	44
6.1. Разрушающие и неразрушающие методы контроля плат	44
6.2. Контроль режимов технологических операций	47
Глава 7. ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ . . .	48
7.1. Основные функции системы технологической подготовки производства печатных плат	48
7.2. Изготовление фотошаблонов: фотоплоттеры, фильм-процессоры и лазерные граверы	49
7.3. Компьютерное моделирование основных и вспомогательных технологических процессов	52
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	61
ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ	62
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	63

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемое вниманию читателя учебное пособие не претендует на детальное изложение всех вопросов, связанных с подготовкой производства и изготовлением печатных плат. Конспективное изложение материала раздела предполагает прослушивание "живых" лекций и посещение (при необходимости) консультаций с целью ознакомления с дополнительными материалами, выяснения непонятных вопросов, а также предварительной сдачи материала данного раздела преподавателю в режиме экзамена.

Студентам в процессе изучения данного раздела в рамках УИРС и написания рефератов предлагается совместная работа по систематизации большого количества постоянно обновляющейся и порой противоречивой информации о состоянии производства печатных плат в России и удовлетворении быстро меняющихся потребностей сборочных российских предприятий в печатных платах, что сегодня не одно и то же из-за того, что радиоэлектронная промышленность России стремительно интегрируется в мировое разделение труда в области разработок и производства электронных средств.

В ИНТЕРНЕТе, на серверах ВлГУ, в локальной вычислительной сети кафедры КТ РЭС, в лаборатории "Технология электронных средств" читателю доступны:

- глоссарий "Печатные платы", отечественные и зарубежные стандарты, в том числе каталог и отдельные стандарты IPC;
- образцы печатных плат и полуфабрикатов;
- виртуальная экскурсия по цеху печатных плат;
- учебные материалы информационных партнеров: статьи, сайты и книги А.М. Медведева (МАИ), Ф.П. Галецкого (ИТМ и ВТ РАН) и др.;
- видеофильм о фотоплоттере китайского производства, приобретенном ОАО "Владимирский завод "Электроприбор";
- рекламные материалы отечественных и зарубежных фирм;
- журналы "Электронные компоненты", "EDA эксперт" и др.

Глава 1.

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

1.1. Элементы системного анализа технологических процессов изготовления печатных плат

Итак, предмет нашего рассмотрения — печатные платы (*PCB* — *Printed Circuit Boards* — как их именуют в мире)[5]. По данным, опубликованным в печати¹, объем производства печатных плат в России за 2003 год вырос на одну треть. И это несмотря на микроминиатюризацию электронных средств (ЭС). Правда, нам в плане выпуска печатных плат существенно "помогают" фирмы Китая и других стран Южной Азии. Их доля на российском рынке, по различным оценкам, колеблется от 50% до 65%. Доля предприятий других стран (Европа, США, Канада) составляет до 10%. Таким образом, сегодня до 75% печатных плат в России имеют нероссийское происхождение.

В ГОСТ 23751-86², как известно, описаны пять классов точности, которых нашей промышленности ЭС пока хватает. Более того, далеко не все предприятия России могут изготавливать печатные платы самого высокого пятого класса точности, хотя в мире уже востребованы платы более высокой точности. Классы точности, как известно, отличаются минимальными размерами проводников и расстояниями между ними, а также связанными с ними другими параметрами печатной платы.

В конце прошлого века восхищение мировых производителей ЭС вызывали двухсторонние платы с проводниками и зазорами между ними величиной 150 мкм, покрытые зеленой паяльной маской и имеющие блестящие площадки после горячего лужения (оплавления припоя). Конечно, и сейчас для плат с такими характеристиками находится мас-

¹Макаров В. Обзор российского рынка печатных плат : Электронные компоненты. — 2003, № 8. — М. : ИД Электроника. — С. 13 — 26 (www.elcp.ru/index.php?state=izd&i_izd=elcomp&i_num=2003_08-18k).

²ГОСТ 23751-86. Платы печатные. Основные параметры конструкции. — М. : Издво стандартов, 1988. — 8 с.

са применений, и мы можем назвать предприятия, которые еще только стремятся освоить технологии производства таких плат. Но многие современные устройства, разработанные с применением интегральных микросхем высокой степени интеграции и компонентов субминиатюрных размеров, требуют плат с минимальной шириной проводников 100, 75, 50 мкм. На смену луженым проводникам и контактными площадкам идет химическое или гальваническое покрытие никель — золото, при нанесении которого, например, химическим путем никель осаждается на медь, а потом реакцией замещения (на молекулярном уровне) поверхностный слой никеля замещается золотом (иммерсионное золото). За рубежом с таким покрытием производятся уже все платы для поверхностного (SMD) монтажа.

Вашему вниманию предлагается следующая последовательность знакомства с технологиями изготовления печатных плат. В начале сформулируем общие проблемы и закономерности развития технологии печатных плат, затем рассмотрим основные технологические маршруты и, в заключение, остановимся на конкретных проблемах отдельных ключевых технологических операций и подготовки производства.

На первом этапе попробуем применить на практике системный подход, изучением которого мы закончили первый раздел нашего курса [3].

Технологии печатных плат развиваются по своим законам, представляя собой сложные системы, охватывающие разработку, изготовление и использование печатных плат для изготовления печатных узлов [6]. Однако, говоря о развитии технологии, не следует понимать конкретный технологический процесс на конкретном предприятии как непрерывную цепочку изменений. В такой сложной системе, как технологический процесс изготовления печатных плат всякого рода изменения надо вносить очень осторожно, постоянно помня об устойчивости производственного процесса. Вносимые изменения могут "раскачать" технологический процесс и сделать его неустойчивым, что приведет к резкому росту процента брака на отдельных операциях.

Говоря о динамике развития технологических процессов с позиций системного подхода, попытаемся разглядеть такие глубинные явления, как единство и борьба противоположностей, переход количественных изменений в качественные, отрицание отрицания.

Начнем с "борьбы" субтрактивного¹ (в России и некоторых других странах его почему-то именуют химическим методом) и аддитивного² направлений в технологии печатных плат. Главный недостаток наиболее распространенного сегодня субтрактивного направления заключается в том, что собственно цель — изготовление электромонтажа — достигается, согласитесь, обходным путем, а именно посредством стравливания ненужных участков металлического покрытия базового материала. Отсюда и проблемы экономии достаточно дорогой сегодня меди, и восстановления (регенерации) травильных растворов, и экологических проблем. "Урожайность" меди может достигать от 30 до 60 центнеров с гектара потому, что от 60% до 95% меди в зависимости от замысла конструктора подлежит стравливанию с поверхностей фольгированного диэлектрика.

Появляются серьезные проблемы с очисткой сточных вод от солей тяжелых металлов, к которым относится медь. Из-за необходимости больших вложений на поддержание очистных сооружений производство печатных плат на малых предприятиях является экономически нецелесообразным.

Чем толще фольга, тем легче изготовить фольгированный диэлектрик, тем прочнее сцепление фольги с диэлектриком, но тем ниже разрешающая способность процесса из-за явления бокового подтравы, который напрямую связан с толщиной фольги. С уменьшением толщины фольги растет разрешающая способность, но появляются проблемы с изготовлением фольгированных диэлектриков, с механической обработкой, например сверлением металлизированных отверстий.

Интересно, что патент на основной метод изготовления печатных плат, предусматривающий травление фольгированного диэлектрика, был получен американцем Ф.Т. Гармоном в 1925 году, а в 1906 году вездесущий изобретатель Т.А. Эдиссон описал в одном из своих многочисленных патентов способ изготовления проводников на изоляторе путем нанесения металлического порошка.

С точки зрения логики здравого смысла надо развивать аддитивное направление, то есть пытаться осаждать пленочные проводники только

¹От латинского *subtratio* — отнимать, вычитать.

²От латинского *additio* — прибавлять, суммировать.

туда, куда нам необходимо в соответствии с топологией печатной платы. Но не тут-то было. С большими трудностями удастся осадить медь на всю поверхность диэлектрической подложки, а способы, с помощью которых этого добиваются именно в нужных местах платы, пока, по имеющимся данным, до серийного производства не дошли.

Отличительной особенностью аддитивной технологии, если она придет в серийное производство, будет требование больших объемов производства на одном предприятии — десятки гектаров в год.

Компромисс сегодня — комбинированные технологические маршруты, в которых субтрактивное и аддитивное направления сочетаются в разном виде. Практически используемые сочетания получили названия "комбинированный позитивный метод" и "полуаддитивный", или электрохимический (по терминологии отечественных отраслевых стандартов). По терминологии известной в мире фирмы "Шеринг" соответственно SUBTRAGANT- и SEMIGANT-процессы.

Теперь о "борьбе" двухсторонних и многослойных печатных плат. В первом разделе курса мы говорили о поколениях многослойных печатных плат [3]. В переходе от двухсторонних печатных плат второго поколения к многослойным печатным платам второго поколения мы наблюдаем действие закона отрицания отрицания, но с переходом на более высокую степень технологического развития.

Можно в определенном смысле говорить и о борьбе проводного монтажа с печатным, правда, на уровне сообщений в технической прессе об успехах тканного или печатно-проводного монтажа.

Для полноты картины следует упомянуть механическое фрезерование фольги и ее обработку лазерным лучом как способы формирования рисунка. Координатные столы этих станков с ЧПУ позволяют автоматизировать процесс изготовления печатных плат, особенно для единичных (макетных) образцов (прототипов). В отличие от механического фрезерования, которое полностью удаляет фольгу на пробельных участках, испарение фольги с помощью сфокусированного лазерного луча производится не на всю толщину. Далее, с помощью так называемого дифференциального химического травления фольга удаляется с обработанных лазером участков.

1.2. Проблемы выбора базовых материалов

Выбор базовых материалов для печатных плат, то есть материалов основания, сегодня огромен. Благодаря интеграции отечественной промышленности электронных средств в мировое разделение труда все больше материалов становятся доступными нашим производителям печатных плат. Однако существует Федеральный закон № 60-ФЗ "О поставках продукции для федеральных государственных нужд", не допускающий в ряде случаев использования материалов импортного производства при наличии отечественных аналогов.

Какие технологические требования конструкторы-технологи предъявляют сегодня к базовым материалам?

Это технологичность обработки (механической, химической и т. п.), термоустойчивость, пожаробезопасность. Не менее важными являются такие параметры, как удельное объемное и поверхностное сопротивление диэлектрика, пробивное напряжение, малые диэлектрические потери, заданные значения и однородность (постоянство) диэлектрической проницаемости по площади (для СВЧ- и быстродействующих цифровых плат).

Плановое социалистическое хозяйство СССР в свое время породило монополистов. Не стало исключением и производство слоистых диэлектриков (фольгированных и нефольгированных) для печатных плат, которое было решено развернуть в Молдавии на Тираспольском комбинате "Молдавизолит" (www.izolit.narod.ru). Отсюда и первые буквы в марке — МИ вместо ГФ (гетинакс фольгированный) и СФ (стеклотекстолит фольгированный) по советским стандартам. Изменилась и привычная российскому разработчику цифровая составляющая обозначения базового материала. Российские производители слоистых диэлектриков предпринимают усилия по наращиванию производства базовых материалов, отвечающих требованиям мировых стандартов¹. Появление на российском рынке таких всемирно известных производи-

¹Лисаченко В. Фольгированные диэлектрики для отечественных производителей печатных плат : Электронные компоненты. — 2003, № 9. — М. : ИД Электроника. — С. 140,141 (www.elcp.ru/index.php?state=izd&i_izd=elcomp&i_num=2003_09&i_art=33-11k).

телей, как ISOLA (Германия), ROGERS (США) и др. делает проблему выбора поставщика базовых материалов еще более сложной.

Следует отметить своеобразный разрыв между фольгированными гетинаксами и стеклотекстолитами, который заполняется комбинированными материалами, где наружные слои, несущие медную фольгу, изготовлены из стеклотекстолита, а внутренние — из более технологичного с точки зрения механической обработки гетинакса.

Появление термостойких тефлоновых, полиимидных и лавсановых пленочных диэлектриков позволило изготавливать гибкие печатные кабели. Тонкая проводящая медная или алюминиевая фольга наносится на эту пленку с помощью распыления в вакууме, что позволяет существенно уменьшить толщину фольги. Остаются проблемы, обусловленные стойкостью большинства диэлектрических пленок к травителям, что делает обязательным механическое сверление (прошивку) переходных отверстий. Следует заметить, что эти пленки более 20 лет назад активно использовались изготовителями тонкопленочных микросборок при решении проблем многослойной металлизации.

Интересными конструктивно-технологическими решениями являются платы на алюминиевых (с изолирующим окисным слоем) и стальных подложках (с покрытием стеклоэмалью), а также платы на прозрачном диэлектрике и на диэлектрике с рельефной поверхностью. Платы на алюминиевых подложках обеспечивают эффективный отвод тепла и высокую теплостойкость, а стальные основания очень удобны в автоматизированном производстве, так как существенно упрощают конструкции схватов промышленных роботов за счет использования электромагнитов.

Очень важным базовым материалом для многослойных печатных плат является препрег (так его называют в мире), а у нас он именуется по советским стандартам стеклотканью прокладочной (СП). Более подробно о специфике технологических требований к этому материалу будет идти речь при изучении технологии многослойных печатных плат.

С позиций системного подхода необходимо отметить также, что от качества таких материалов, как фоторезисты, защитные паяльные маски, растворы для травления, химической и гальванической металлизации и т. д. существенно зависит качество печатных плат.

Глава 2.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАРШРУТЫ ОДНО- И ДВУХСТОРОННИХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

2.1. Химический и другие простые способы изготовления одно- и двухсторонних печатных плат

Простые способы, описываемые ниже, отличаются отсутствием металлизированных отверстий и подробно описаны в учебниках [1, 8, 9]. Обращаю внимание читателей также на то, что в соответствии с принятой в отечественной промышленности стандартной терминологией позитивный метод (химический или комбинированный) отличается от негативного использованием металлорезиста в качестве маски, защищающей медную фольгу от травления. Таким образом наши познания из фотографии (позитив и негатив) скорее навредят нам, чем помогут. Металлорезистом может быть серебро, а также олово и свинец в виде химически осаждаемого припоя или чистого олова.

Поэтому в негативном методе защитный рельеф (краска или фоторезист) нужен при последующем травлении меди, а в позитивном для избирательного гальванического нанесения металлорезиста на места будущих проводников. Удаление защитного рельефа в негативном способе выполняется сразу после травления медной фольги, а в позитивном — перед травлением меди после нанесения металлорезиста. Далее следует операция сверления или пробивки отверстий, которые в дальнейшем не подвергаются металлизации. После этого оформляют контур печатной платы, удаляя технологические поля. В конце технологического маршрута платы маркируют и подвергают консервации для сохранения паяемости при хранении.

2.1.1. Химический негативный (субтрактивный) метод

Отличается минимальной трудоемкостью и возможностью автоматизации всех операций. Весьма широко распространен при изготовлении дешевых односторонних печатных плат не выше 2-го класса точ-

ности. Для нанесения защитного рельефа используется сеткография (шелкография), реже офсетная печать (с клише) или фотоспособ (использование фотоэмульсии или фоторезиста).

Технологический маршрут усложняется, если мы хотим сэкономить припой и в то же время не забываем о защите медных проводников. Можно использовать либо защитные эпоксидные маски, наносимые с помощью сетчатых трафаретов, либо химическую защиту медных проводников с помощью химического пассивирования.

2.1.2. Химический позитивный метод

Его уже нельзя назвать чисто субтрактивным, поскольку в качестве маски при травлении используется металлорезист, гальванически осаждаемый на медную фольгу. Применяется достаточно редко и ограничивается обычно изготовлением микрополосковых плат для СВЧ-диапазона. В качестве металлорезиста обычно используется серебро толщиной 9 – 12 мкм, обеспечивающее хорошую проводимость на высоких частотах за счет скин-эффекта (вытеснения тока высокой частоты в приповерхностные слои проводника).

2.1.3. Прочие простые способы

Способ штамповки широко использовался для массового производства простых плат не выше 1-го класса точности. При этом способе на диэлектрическое основание, покрытое недополимеризованным клеевым слоем, накладывается медная фольга. Прижим комбинируется с вырубкой проводников. После удаления ненужной фольги следует нагрев для полимеризации клея. Утилизация отходов меди не встречает проблем.

Способ переноса принципиально позволяет утилизировать медь из травильных отходов. Он заключается в получении проводящего медного рисунка на плоском технологическом (временном) металлическом основании из коррозионно-стойкой стали, например 18ХН9Т. На это основание наносится каким-либо образом защитный рельеф, далее следует гальваническое меднение с целью создания слоя фольги тол-

щиной 30 – 50 мкм. Фольга не очень прочно держится на стальном основании, и если ее намазать клеем и прижать к диэлектрику платы, то при нагреве клей полимеризуется и фольга прочно приклеивается к плате.

Если вместо листового диэлектрика использовать пресс-форму и пресс-порошки, то проводящий рисунок может быть запрессован "заподлицо", что удобно при изготовлении переключателей, кодовых дисков и т.д.

Использование электропроводных красок и паст, хотя и позволяет наряду с проводниками изготавливать печатные резисторы и конденсаторы, широкого распространения в технологии печатных плат не получило, несмотря на многочисленные публикации о достижениях в этом направлении. В большей степени это направление оказалось востребованным в толстопленочной технологии изготовления микросборок, но уже на основе термического вжигания композиций на базе легкоплавких стекол.

2.2. Комбинированные методы изготовления двухсторонних печатных плат с металлизацией переходных отверстий

Описываемые ниже маршруты не следует считать застывшими¹. Они непрерывно развиваются. Понадобилась, например, защитная паяльная маска — появляются новые операции и новые проблемы с защитой меди. Вреден свинец — применяем чистое олово в качестве металлорезиста. Нужна высокая плоскостность поверхности (малая разновысотность контактных площадок) — необходимо отказаться от луженых контактных площадок и перейти к использованию золочения с подслоем никеля. Маркировка мест установки электронных компонентов также приводит к усложнению технологического процесса в зависимости от выбранного способа нанесения маркировки (сеткография, фотоспособ, специальный струйный принтер).

¹Трубкина В. Выбор технологических методов в производстве печатных плат : Компоненты и технологии. — 2002, № 1. — СПб. : Файнстрит. — С. 85 – 89 (www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/02_01/stat_128.htm – 20k–).

Выбор метода изготовления существенно сказывается на точности воспроизведения рисунка и стоимости печатных плат.

2.2.1. Комбинированный позитивный метод

По терминологии фирмы "Шеринг" он именуется Субтрагант. Последовательность технологических операций представлена на рис. 2.1.

Процесс усложняется, если нам нужны защитная паяльная маска, маркировка мест установки электронных компонентов. Существенные усложнения связаны с использованием фольгированных диэлектриков с тонкомерной (5 мкм) медной фольгой, защищенной алюминиевым протектором (алюминиевая фольга толщиной порядка 50 мкм).

Комбинированный позитивный метод потенциально позволяет изготавливать печатные платы до четвертого класса точности за счет меньшей толщины травления медной фольги.

2.2.2. Тентинг-метод

Представляет собой упрощение (удешевление) комбинированного позитивного метода. Последовательность технологических операций представлена на рис. 2.2.

Название процесса имеет английское происхождение¹ потому, что пленка фоторезиста надежно закрывает металлизированные отверстия от доступа травящих растворов. Необходимо заметить, что далеко не все пленочные фоторезисты способны к этому.

По терминологии советских отраслевых стандартов он достаточно близок к комбинированному негативному методу, который применялся в промышленности до появления сверлильных станков с числовым программным управлением. В то же время положительно отличается от него в сторону комбинированного позитивного метода тем, что обеспечивает надежную металлизацию отверстий.

Тентинг-метод при всех его преимуществах не может претендовать на воспроизведение рисунка выше 3-го класса по ГОСТ 23751-86, однако при этом стоимость изготовления плат по сравнению с комбини-

¹ *Tent, англ.* – палатка

рованным позитивным методом будет примерно в полтора раза меньше за счет упрощения технологического маршрута.

2.2.3. Электрохимический (полуаддитивный) метод

По терминологии фирмы "Шеринг" он именуется Семигант. Последовательность технологических операций представлена на рис. 2.3.

Прецизионные печатные платы с проводниками и зазорами около 75 мкм и менее могут быть изготовлены только полуаддитивным методом. При этом следует отметить, что полуаддитивный метод, в отличие от предыдущих, становится экономически целесообразным при относительно больших объемах выпуска печатных плат.

Развитие полуаддитивного метода идет в направлении уменьшения разницы высот контактных площадок за счет использования защитных покрытий из никеля с гальваническим или так называемым иммерсионным золотом (химическое замещение золотом приповерхностного никеля с толщиной монослоя).

Идея дифференциального травления, когда нужный результат достигается за счет разной толщины пленки меди, соединенная с лазерным скрайбированием (частичным испарением) медной фольги сфокусированным лучом ультрафиолетового лазера, позволяет обойтись без фоторезиста и фотошаблонов при срочном изготовлении прототипов печатных плат [6]. Однако для серийного производства печатных плат это пока экономически нецелесообразное решение.

Варианты полностью аддитивной технологии, описанные в литературе [5], пока не получили широкого распространения в промышленности из-за нерешенных проблем толстослойного химического меднения. Сегодня это сложный и низкопроизводительный процесс, требующий управления по большому количеству параметров. При любых сбоях управления он способен разрушаться с большими издержками для производства. Кроме того, этот процесс имеет большую длительность: для достижения приемлемой толщины осаждения меди порядка 25 мкм процесс длится часами. Надежность технологических и энергетических систем зачастую не позволяет выдерживать нужные режимы осаждения в течение этого времени.

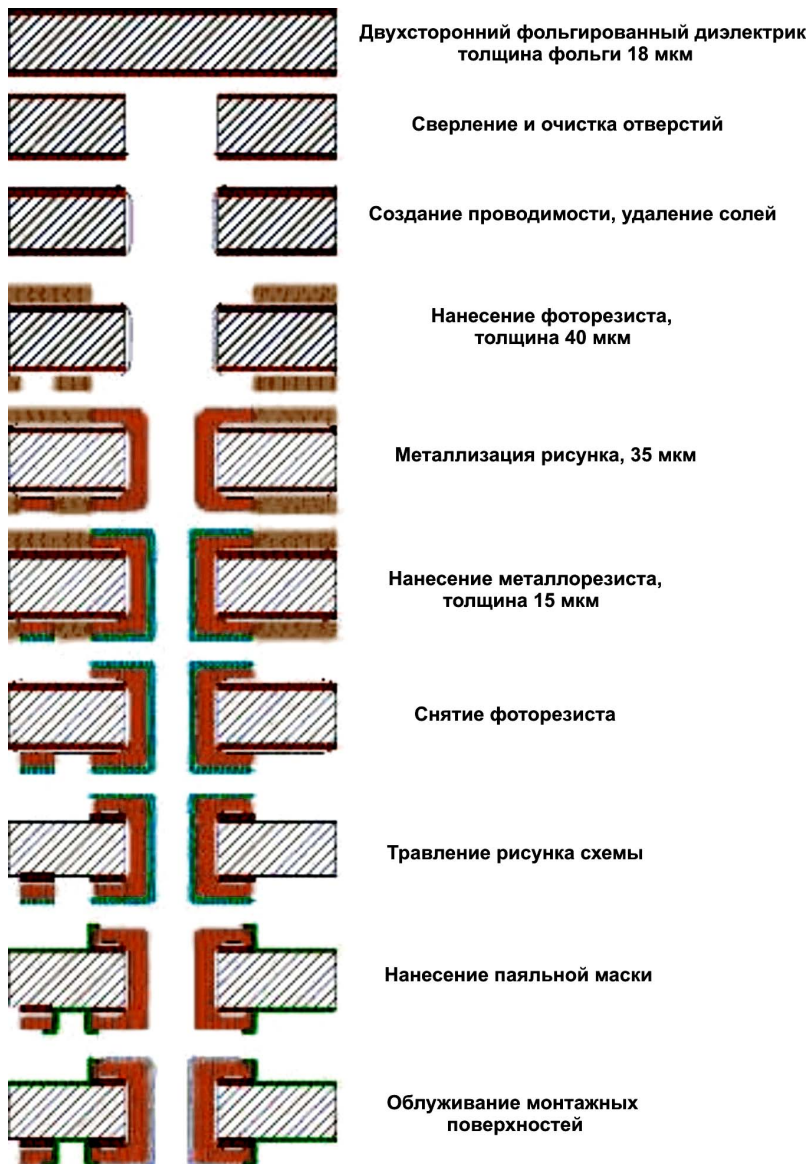


Рис. 2.1. Технологический маршрут комбинированного позитивного метода

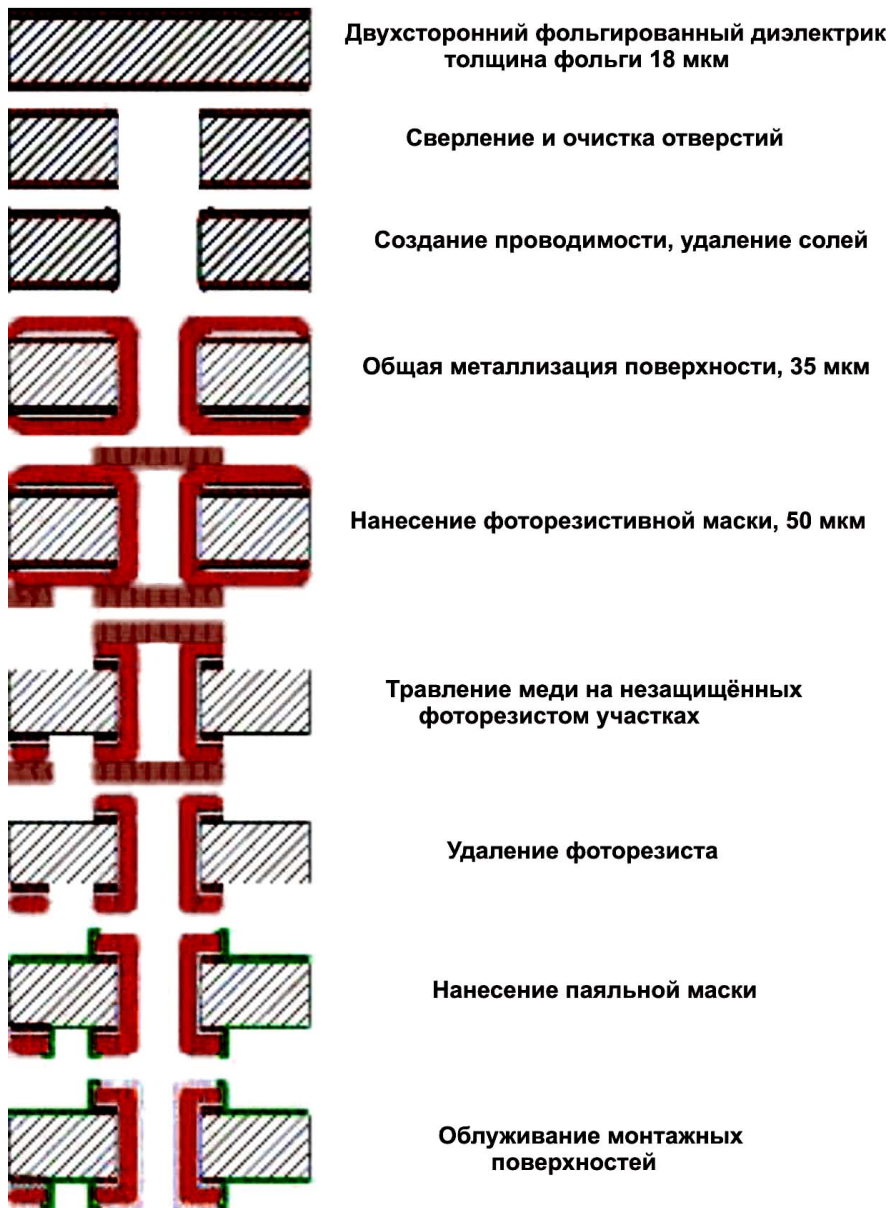


Рис. 2.2. Технологический маршрут тентинг-метода

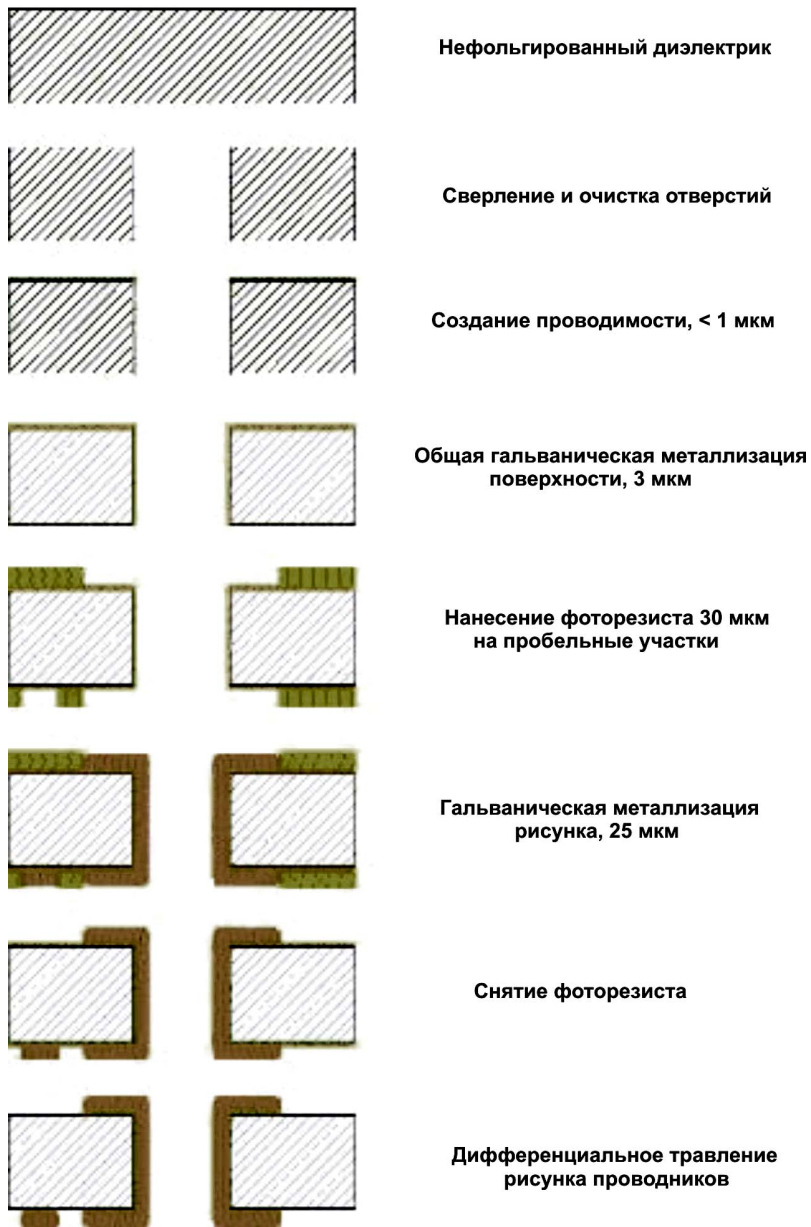


Рис. 2.3. Технологический маршрут полуаддитивного метода

Глава 3.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАРШРУТЫ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

С позиций системного подхода можно выделить два поколения многослойных печатных плат (МПП) [3]. В учебниках [1, 8, 9] весьма подробно описаны различные технологические маршруты изготовления МПП первого поколения, необходимость в которых была обусловлена низкой степенью интеграции элементной базы и сложностью электрических соединений на плате, не позволявшей обойтись двумя слоями металлизации. В процессе "естественного отбора" с течением времени свои преимущества смог показать метод металлизации сквозных отверстий, по которому изготовлялось порядка 80 % многослойных печатных плат первого поколения с количеством слоев до 30.

Многообразие технологических маршрутов изготовления МПП первого поколения вряд ли будет существенно расширено при переходе к МПП второго поколения [5]. Скорее всего, развитие технологии МПП пойдет по пути комбинирования известных технологических маршрутов, применения новых базовых материалов, прогрессивных средств технологического оснащения, отличающихся более высокой точностью и разрешающей способностью. В многослойных печатных платах второго поколения появились скрытые ("слепые") и открытые ("глухие") микропереходы (рис. 3.1), что привело к созданию конструкций печатных плат типа HDI¹.



Рис. 3.1. Типы переходных отверстий

¹ *High Density Interconnection* – высокая плотность межсоединений

Различные технологические варианты МПП имеют свои области применения. В этом можно убедиться, если сравнить их по следующим показателям [1, с. 234]:

- максимальное число слоев, надежность межслойных электрических соединений;
- плотность монтажа;
- возможность установки электронных компонентов (в том числе интегральных микросхем) со штыревыми и планарными выводами, включая компоненты, предназначенные для поверхностного монтажа;
- трудоемкость и стоимость изготовления;
- ремонтпригодность;
- контролепригодность;
- длительность технологического цикла;
- возможность механизации и автоматизации изготовления МПП и сборки ячеек ЭС.

3.1. Метод металлизации сквозных отверстий

Название методу дали межслойные электрические соединения, осуществляемые исключительно с помощью металлизированных сквозных отверстий (см. рис. 3.1). Укрупненно этот технологический маршрут можно представить в виде трех основных этапов, рассмотренных ниже.

3.1.1. Изготовление заготовок

Заготовки внутренних слоев представляют собой тонкие двухсторонние печатные платы с соответствующими рисунками проводников, а заготовки внешних (наружных) слоев являются односторонними печатными платами, рисунок проводников на которых на данном этапе не сформирован.

Для заготовок обычно используют теплостойкий фольгированный стеклотекстолит марки СТФ или травящийся марки ФТС. При увеличении числа слоев или изготовлении гибких МПП вместо стеклотекстолита применяются пленочные полиимидные или лавсановые фольгированные диэлектрики и соответствующие им препреги. Полиимид-

ные диэлектрики отличаются от прочих тем, что в них можно вытравливать отверстия.

На каждом технологическом поле отдельной (наружной или внутренней) заготовки пробивают базовые (технологические) отверстия, с помощью которых в дальнейшем обеспечивается необходимое совмещение слоев.

Количество пробиваемых отверстий устанавливается в зависимости от размеров платы и может достигать 10. Одни из этих отверстий будут работать при формировании рисунка внутренних слоев, другие — при сборке пакета, а третьи — при сверлении металлизированных сквозных и крепежных отверстий, а также при формировании рисунка наружных слоев.

Установка для совмещения и пробивки базовых (технологических) отверстий позволяет получить с точностью шага $\pm 0,05$ мм при диаметре 5 мм. Стандартный шаг перемещения координатного стола составляет 10 мм. Пробитые (а не просверленные) отверстия отличаются относительно высокой точностью диаметра и качеством краев отверстий, наиболее пригодным именно в качестве опорных (реперных) знаков, а не для металлизации, например.

Аналогичные отверстия пробивают в листах прокладочной стеклоткани (препрега) марки СП, которая представляет собой листы из крученых стеклянных нитей диаметром 0,1 — 0,25 мм, пропитанных, например, эпоксидным лаком ЭД-8-Х в недополимеризованном состоянии. Гарантийный срок хранения препрега не более полугода, в противном случае будет самопроизвольная полимеризация и способность к склеиванию пропадет. Очевидно, что степень полимеризации эпоксидной смолы будет зависеть от фактического срока хранения и в пределах указанного гарантийного срока. Это обстоятельство в дальнейшем создает серьезные проблемы при прессовании пакета.

На заготовках внутренних слоев химическим методом с использованием фоторезистивного защитного рельефа получают проводящий рисунок. После травливания меди наблюдается нежелательная деформация сжатия диэлектрика, обусловленная внутренними напряжениями, проявляющими свое действие после удаления части медной фольги. Величина этих деформаций зависит от характера проводящего

рисунка и минимальна в случае применения двухсторонних фольгированных диэлектриков.

Для обеспечения высокой прочности сцепления внутренних поверхностей заготовок необходима соответствующая обработка медных проводников и открытой поверхности диэлектрика. Она предусматривает оксидирование проводников с помощью щелочного раствора, затем обработку внутренних поверхностей заготовок в аммиачно-хлоридном травителе, либо в травителе на основе серной кислоты. В итоге необходима технологическая линия модульной конструкции специально для химической подготовки слоев перед сборкой и прессованием пакета.

3.1.2. Сборка пакета и прессование

Сборка пакета сводится к укладыванию в пресс-форму в заданной последовательности заготовок и препрегов. Фиксация и совмещение слоев осуществляются за счет базовых (технологических) отверстий и соответствующих направляющих и фиксирующих штырей пресс-формы. При этом рекомендуется следить за правильным ориентированием нитей прокладочной стеклоткани (препрега).

Для устранения влияния неровностей поверхности пресс-формы, разнотолщинности заготовок и препрегов сверху и снизу пакета укладывают листы триацетатной пленки и кабельной бумаги. Одновременно в пресс-форму можно уложить несколько пакетов, если число слоев МПП относительно невелико.

Горячее прессование осуществляется в две ступени при постоянной температуре порядка 160 – 170°С и ступенчатом наложении давления:

- 1) 0,1 – 0,5 МПа в течение 100 – 200 мин.;
- 2) 2 – 3,4 МПа в течение 50 – 70 мин.

Не могут не обратить на себя внимание большие разбросы рекомендуемых значений технологических режимов прессования. Отечественная нормативно-техническая документация рекомендует уточнять режимы (давления и времена выдержки) экспериментально для каждой партии препрегов по результатам пробного прессования. Рецепты выбора начальных режимов весьма противоречивы. Количество неудачных проб (технологического брака) зависит от опыта оператора

и от разброса свойств препрегов внутри партии и от партии к партии. Трудности можно преодолеть, располагая прибором контроля вязкости смолы в составе препрега. Это позволит объективно установить степень недополимеризации смолы, которая зависит не только от времени хранения, но и от температуры хранения.

Некоторые авторы рекомендуют измерять удельное объемное сопротивление эпоксидного лака в процессе прессования, разместив на технологическом поле платы соответствующие датчики, однако математические модели, которые позволяют скорректировать таким образом технологические режимы, в этих публикациях отсутствуют.

После охлаждения пакета в пресс-форме он извлекается для обреза облоя на роликовых или гильотинных ножницах.

3.1.3. Формирование рисунка на внешних слоях и металлизация отверстий

Металлизация сквозных отверстий и формирование рисунка наружных слоев МПП выполняются по технологии комбинированного позитивного метода, рассмотренного выше, то есть сначала сверлят сквозные отверстия, привязываясь к базовым (технологическим). Затем следуют операции химической и гальванической металлизации (меднения), формирования защитной металлорезистивной маски и травления меди.

Следует обратить внимание на особенности металлизации сквозных отверстий большой глубины. Качество металлизации (прочность сцепления и переходное электрическое сопротивление) будет зависеть от площади металлизации внутренних слоев, выходящих в металлизированное отверстие. Эту площадь можно искусственно увеличить:

- либо селективным подтравливанием диэлектрика ФТС до металлизации отверстий — наиболее часто применяемый вариант;

- либо гальваническим наращиванием вышедших на стенки отверстия внутренних проводников до металлизации отверстий, что возможно только при условии технологического (временного) электрического соединения всех проводников за счет соответствующей топологии слоев с использованием технологических полей платы, но при этом необходимость в травящемся диэлектрике отпадает.

3.2. Другие методы изготовления многослойных печатных плат

Метод металлизации сквозных отверстий [5, с. 58] обеспечивает известный компромисс в ходе удовлетворения весьма противоречивых требований, изложенных выше, при условии достаточно высокой технологической культуры производства. Запас по числу слоев здесь "покупается" за счет стоимости МПП и длительности технологического цикла ее изготовления. К недостаткам этого метода относятся слабая связь металлизации отверстий с торцами контактных площадок внутренних слоев, а также недостаточная плотность монтажа из-за большого количества сквозных металлизированных отверстий.

В зависимости от характера требований к МПП и особенностей конкретного производства могут представлять интерес альтернативные методы изготовления МПП, рассматриваемые ниже.

3.2.1. Метод попарного прессования

Сущность данного метода заключается в том, что используются две заготовки из двухстороннего фольгированного диэлектрика. На одной (внутренней) из сторон каждой заготовки негативным комбинированным методом формируется токопроводящий рисунок и металлизированные отверстия – переходы с первого слоя на второй и с третьего на четвертый. Связь проводников внутренних слоев (второго и третьего) осуществляется через внешние проводящие слои (первый и четвертый).

Рисунок МПП на наружных слоях и соединения между ними (через металлизированные отверстия) выполняются комбинированным позитивным методом. При этом металлизированные отверстия, сформированные при изготовлении заготовок заполняются эпоксидной смолой.

Метод позволяет снизить требования к точности базировки при сверлении отверстий, снизить стоимость и обеспечить доступность за счет снижения разрешающей способности и усложнения процесса конструирования таких плат. Его можно использовать при изготовлении МПП со скрытыми межслойными переходами.

3.2.2. Метод послойного наращивания

Это самый дорогостоящий и трудоемкий из описанных в литературе методов [5, с. 56], при разработке которого преследовалась цель обеспечить максимальную надежность межслойных соединений и внутренних проводников. Межслойные соединения в данном методе представляют собой столбики гальванически осажденной меди.

Используются тонкие нефольгированные диэлектрики, отверстия в которых формируют расположение столбиков межслойной металлизации. МПП, изготовленные таким методом, не содержат отверстий для штыревых выводов электрорадиоэлементов.

Для изготовления HDI-плат перспективной является комбинация методов металлизации сквозных отверстий и послойного наращивания путем напрессовывания на двухстороннюю печатную плату слоев с микропереходами.

3.2.3. Прочие методы

Метод открытых контактных площадок использует односторонний фольгированный диэлектрик. Контактные площадки внутренних слоев непосредственно видны со стороны установки электрорадиоэлементов (ЭРЭ). Межслойная связь осуществляется с помощью пайки выводов ЭРЭ или проволочных перемычек к открытым контактным площадкам. Таким образом исключаются аддитивные процессы и обеспечивается визуальный контроль всех межслойных соединений, но плотность монтажа будет невысокой.

Метод выступающих выводов получил свое название за счет использования для межслойных соединений полосок медной фольги, выступающих с каждого проводящего слоя через отверстия на наружный слой металлизации или на промежуточные слои. Для этого необходимы заготовки из нефольгированного диэлектрика и толстая (до 80 мкм) медная фольга.

Использование механических деталей — штифтов или пустотелых заклепок (пистонов) — для межслойных соединений предельно просто и весьма надежно, но разрешающая способность оставляет желать лучшего.

Глава 4.

ХИМИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ТЕХНОЛОГИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

4.1. Травление меди: выбор травителя и утилизация отходов

Под травлением понимают химическое растворение меди обычно под действием жидких травящих растворов или, реже, активированных газов (плазмохимическое травление). Перечислим требования к раствору для травления меди:

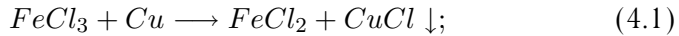
- скорость травления (измеряется в мкм/мин);
- емкость по меди, то есть предельно допустимое увеличение концентрации меди (измеряется в г/л);
- селективность травления, что имеет значение при использовании металлорезиста в позитивных методах;
- возможность регенерации травильного раствора в процессе травления;
- отсутствие взаимодействия с изолятором-основанием;
- возможность экономичной утилизации без ущерба для окружающей среды;
- минимальная анизотропия и боковой подтрав;
- удовлетворение требованиям охраны труда работающих.

Для поддержания постоянной скорости травления оно должно быть струйным: горизонтальным или вертикальным. В этом случае струи свежего (обновленного в замкнутом цикле) травителя с постоянной скоростью воздействуют на медную фольгу, обеспечивая стабильность процесса травления.

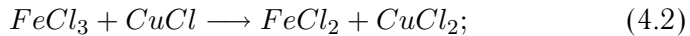
Начнем с водного раствора на основе хлорного железа $FeCl_3$ плотностью 1,3 или 400 г/л, весьма популярного среди радиолюбителей. При температуре травления около 35°C скорость травления порядка 35 мкм/мин. Это очень высокая скорость. Емкость по меди также высока: в пределах 75 – 105 г/л.

При травлении меди хлорным железом одновременно имеют место минимум три типа реакций:

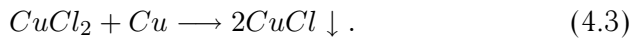
— хлорное железо реагирует с медью с образованием хлористого железа и нерастворимой хлористой меди, стремящейся выпасть в осадок:



— хлорное железо реагирует с неуспешей выпасть в осадок хлористой медью с образованием хлористого железа и хорошо растворимой хлорной меди:

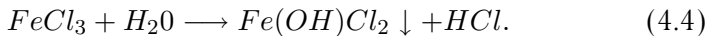


— хлорная медь, в свою очередь, вступает в реакцию с медью с образованием хлористой меди:



К сожалению, мы не можем сказать, какая из реакций и какой относительный вклад вносит в данный момент времени, то есть какова динамика процесса травления. На уровне математических моделей она технологам пока неизвестна.

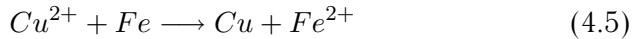
Кроме трех перечисленных в водном растворе указанных солей идут и другие реакции, например, гидролизация остатков травильного раствора, особенно при промывке печатных плат, с образованием трудно-растворимых основных солей железа, например:



Фенольные смолы, входящие в состав гетинакса, обладают свойством ионнообменных смол адсорбировать ионы трехвалентного железа из раствора. В результате поверхностное сопротивление диэлектрика падает. Кроме того, отработанный раствор очень трудно поддается регенерации и практически невозможна его автоматическая коррекция при травлении. Этот травитель нельзя использовать в позитивном методе, так как он растворяет металлорезист на основе олова-свинца. При использовании хлорного железа для травления меди со временем полы, стены и ванны покрываются ярко-рыжим налетом.

В одном из отраслевых стандартов описан следующий процесс утилизации и регенерации травильного раствора:

– в отработанный раствор засыпается обезжиренная стальная стружка при температуре 40 – 50°С. Вследствие реакции цементации



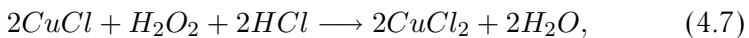
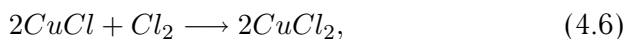
медь в виде рыхлого осадка выделяется на частицах железа;

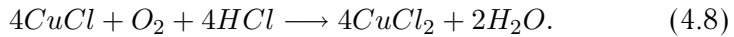
– после осаждения меди раствор сливается и передается на нейтрализацию, а порошковая медь смывается струей воды в льняной мешок, а затем обезживается и высушивается. Осадок гидроокиси железа (4.4) после нейтрализации известковым молоком должен вывозиться для захоронения в специально отведенных для этого местах, что нежелательно с точки зрения экологии.

Аналогичные проблемы возникают с травильными растворами на основе персульфата аммония $(NH_4)_2S_2O_8$ и серной кислоты H_2SO_4 с той лишь разницей, что при его при высокой скорости травления можно использовать как при позитивных, так и при негативных процессах.

Для травления можно использовать растворы на основе серной кислоты H_2SO_4 . После травления получается химически чистая соль Cu_2SO_4 , которую можно использовать для приготовления растворов химического и гальванического меднения. Это позволяет поддерживать безотходную технологию за счет параллельного протекания субтрактивных и аддитивных процессов.

Особого внимания заслуживает использование водного раствора хлорной меди в качестве самостоятельного травителя (4.3). Этот травитель значительно дешевле (примерно в 25 раз) хлорного железа при той же начальной скорости травления. Образующаяся при травлении труднорастворимая хлористая медь может быстро засорить форсунки травильной машины, однако в присутствии ионов хлора (растворы HCl , NH_4Cl , $NaCl$, KCl) образуются хорошо растворимые комплексы с ионами $CuCl^-$. В итоге возможна регенерация травильного раствора на основе хлорной меди с помощью реакций





Относительно малая емкость по меди (10 – 20 г/л) компенсируется возможностью достаточно простой регенерации (восстановления) травильного раствора. Для этого достаточно слить отработанный травильный раствор и добавить соляную кислоту до значения водородного показателя $pH = 1 - 2$. После этого добавляется перекись водорода H_2O_2 . Эти процессы можно автоматизировать, располагая датчиками, преобразующими водородный показатель pH в электрический сигнал.

Утилизация меди выполняется гальваническим путем — медь выделяется под действием электрического тока из раствора на катоде в регенераторе, образующем с травильной машиной замкнутый контур.

Дополнительным достоинством хлорной меди является селективность (избирательность) травления, что позволяет использовать его в позитивном процессе с защитной маской олово-свинец. Кроме того, травильный раствор хлорной меди хорошо отмывается с печатной платы, не оставляя следов.

4.2. Химическая металлизация

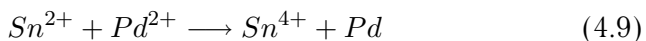
Чаще всего это химическое меднение, то есть нанесение меди на поверхность без применения электрического тока. Используется в основном для придания диэлектрической поверхности токопроводящих свойств, что необходимо для последующего нанесения металла гальваническим способом.

Рассмотрим более подробно процесс химического меднения. В качестве восстановителя меди из раствора используется дешевый и недефицитный материал — формальдегид ($HCOH$). Особенность этого окислительно-восстановительного процесса состоит в том, что он инициализируется катализатором, в качестве которого служит дорогостоящий металлический палладий (Pd). Расход палладия достигает 2 г на 100 м². В дальнейшем катализатором осаждения является осажденная медь, то есть процесс становится автокаталитическим.

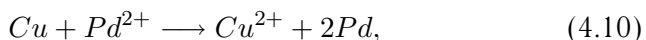
Для того чтобы медь не выпадала в виде гидроксильных осадков, в раствор добавляют комплексообразователи: калий-натрий виннокис-

лый (тарtrat калия-натрия), трилон-Б (динатриевая соль этилендиаминтетрауксусной кислоты), лимонная кислота и др.

Применение палладия в качестве катализатора позволяет осаждать медь именно на плату, а не на стенки и дно ванны. Поэтому перед осаждением меди поверхность платы подвергается активированию, в результате которого на диэлектрике платы осаждаются частицы палладия. Эту операцию можно осуществить, предварительно обработав плату в растворе хлористого олова $SnCl_2$ (сенсбилизация). Затем, промыв плату в воде, погрузить в раствор хлористого палладия $PdCl$. В ходе химической реакции



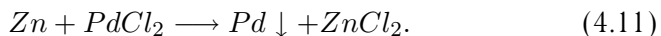
на поверхности диэлектрика платы осаждается металлический палладий. На участках платы, покрытых медной фольгой, возможна реакция



которая приводит к быстрому истощению раствора хлористого палладия. Использование для активирования более сложных вариантов растворов, где Pd присутствует в виде сложных комплексов, исключает реакцию (4.10), но при этом сенсбилизация проводится не в растворе $SnCl_2$, а в растворе NaH_2PO_2 (гипофосфита натрия).

Отметим важность тщательного проведения операции промывки после реакции (4.9). Если промывка недостаточна по времени, то слой гидроокиси олова, обволакивающий частицы палладия, не будет удален. Увеличение времени промывки сверх оптимального приводит к смыванию обоих реагирующих компонентов.

Палладий относится к драгоценным металлам, поэтому его остатки должны улавливаться для повторного использования. Рекомендуется использовать не менее двух улавливателей с непроточной водой с помощью реакции



Порошкообразный осадок палладия механически удаляется и растворяется в соляной кислоте, к которой добавлена перекись водорода.

Полученный раствор нагревается до разложения перекиси водорода и его можно использовать для корректировки ванны активирования.

Состав раствора химического меднения не ограничивается присутствием солей меди и восстановителя. Наряду с упоминавшимися выше комплексообразователями (лигандами) в состав раствора входят вещества для обеспечения заданного значения pH раствора, а также различные добавки, обеспечивающие осаждение меди в отверстиях малого диаметра, эластичность пленки осажденной меди и т.д. Чаще всего состав этих добавок представляет собой коммерческую тайну фирмы — изготовителя раствора, раскрыть которую с помощью различных видов химического и спектрального анализа невозможно. Дело в том, что определенные в ходе анализов химические элементы могут входить в состав растворов либо в виде поверхностно-активных веществ, либо коллоидных растворов и т.п.

Типовые растворы химического меднения обеспечивают относительно малую скорость осаждения — около 2,5 мкм/час. Это означает, что при выдержке 15 — 25 мин. осажденный слой меди имеет толщину менее 1 мкм. Принципиально возможное получение толстых (25 — 30 мкм) слоев меди в рамках полностью аддитивной технологии сопряжено с необходимостью непрерывного корректирования состава ванны меднения. Кроме того, необходимо каким-то образом активировать палладием поверхность диэлектрика только в тех местах, где будет осаждаться медь (проводники и межслойная металлизация).

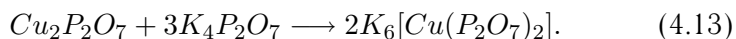
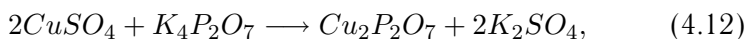
4.3. Гальваническая металлизация

Использование электрического тока существенно (более чем на порядок) увеличивает скорость осаждения металла, а оптимальный подбор плотности тока при гальваническом нанесении покрытия наряду с оптимальным составом электролита обеспечивает хорошую рассеивающую способность (например меди в металлируемых отверстиях малого диаметра) и эластичность покрытия, которая оценивается по относительному удлинению при испытаниях на разрыв. Однако следует помнить, что при этом все металлируемые токопроводящие поверхности должны быть соединены друг с другом и отрицательным полю-

сом источника постоянного тока, иначе гальванического осаждения не будет.

С помощью гальванического осаждения в технологии печатных плат осаждают не только медь, но другие покрытия, например: золото, серебро, родий, никель, олово, палладий. Назначение этих покрытий самое разное — от защитно-декоративных, с хорошей электропроводностью, стойкостью к истиранию, до технологических, обеспечивающих хорошую паяемость, защитные резистивные свойства при травлении меди в комбинированном позитивном методе. Серебро, например, обеспечивает самую высокую электропроводность при относительной дешевизне покрытия (по сравнению с золотом), но достаточно быстро корродирует, особенно в присутствии соединений серы. Поэтому используют комбинацию серебро-родий, обеспечивая высокую электропроводность и твердость покрытия, выдерживающего до миллиона переключений при высоких контактных давлениях. С целью экономии золота применяют его электрохимические сплавы с никелем и кобальтом.

Из щелочных электролитов для гальванического нанесения меди наиболее распространены пирофосфатные электролиты, которые готовят следующим образом:



Разряд меди из такого комплексного аниона обеспечивает получение мелкозернистой структуры меди, удовлетворительной толщины покрытия в отверстиях, хорошей эластичности медной пленки. Однако возможное присутствие фосфора в меди крайне нежелательно.

Из кислых электролитов применяются сульфатные ($CuSO_4$), фторборатные ($Cu(BF_4)_2$), кремнийфторидные ($CuSiF_6$) и др. Сульфатные электролиты наиболее просты в приготовлении и эксплуатации.

К выбору того или иного электролита необходимо подходить с системных позиций, учитывая тип применяемого фоторезиста, возможности корректирования электролита и утилизации отходов.

Для улучшения рассеивающей способности и эластичности меди, повышения производительности в состав электролитов вводят различные добавки. Некоторые поверхностно-активные вещества, например

столярный клей, способны регулировать относительные скорости осаждения металлов при осаждении сплавов. Звучные названия фирменных добавок "Купрацид", "Новостар", "Кубас1", "Меданит" и др. служат рекламой фирм-изготовителей, но не содержат, как правило, информации о том, как они приготовлены. Многие отечественные производители печатных плат, закупившие импортные линии химического и гальванического меднения, желая обеспечить высокое качество металлизации, используют готовые концентраты электролитов, также приобретаемые за рубежом.

При электролизе могут иметь место побочные реакции, например восстановление кислорода на катоде. Для борьбы с этим нежелательным явлением электролит продувают азотом.

Оптимальный ток в электролизной ванне устанавливают в результате экспериментального определения оптимальной плотности тока с помощью так называемой ячейки Хулла, которая представляет собой миниатюрную ванночку с электролитом. Плоский медный анод и печатная плата расположены в этой ванне не параллельно, а под углом друг к другу. Плотность тока в такой ванне максимальна при наиболее близком расстоянии между анодом и катодом и убывает по мере увеличения этого расстояния. После электролиза сравнивают нанесенную медную пленку с образцом и по цвету покрытия, который изменяется в зависимости от плотности тока и при сравнении с эталоном помогает определить оптимальную плотность для данного состава электролита. Оптимальный ток в электролитической ванне определяется как произведение плотности тока на площадь покрытия, которая, в свою очередь, зависит от топологии конкретной платы. Поэтому технолог с помощью специализированного программного продукта моделирования технологических процессов типа САМ (САМTastic, САМ350 и т.п.) при подготовке производства в процессе изготовления фотошаблонов определяет площади металлизации и указывает их на технологическом поле фотошаблона.

Нанесенные химическим или гальваническим способом покрытия осветляют травителем на основе соляной кислоты HCl , подвергают термообработке для оптимизации кристаллической структуры пленки, а покрытия на основе сплавов олово-свинец дополнительно оплавли-

ют нагретым воздухом (так называемый HAL-процесс) или с помощью инфракрасного нагрева. Это покрытие наилучшим образом сочетается с применением оловянно-свинцовых припоев при пайке печатных плат, однако в свете так называемых европейских директив RoHS, введенных с 1 июля 2006 г. и предусматривающих изъятие свинца из технологии электронных средств, этому покрытию необходимо срочно искать замену.

Длительное время химическое и гальваническое осаждение чистого олова считалось нетехнологичным из-за склонности олова к иглообразованию и плохого оплавления. Требования указанных директив заставили активизировать поиски технологичных вариантов осаждения чистого олова, которое, в отличие от сплава олово-свинец, легче удалять травлением с поверхности меди при использовании олова в качестве защитного резиста в комбинированном позитивном процессе с защитной паяльной маской.

В заключении описания химических процессов в технологии печатных плат необходимо отметить [6], что во всех известных зарубежных справочниках и на INTERNET-сайтах вы не найдете практически ничего о составах технологических растворов для проведения описанных выше операций. Рынок предлагает зашифрованные продукты типа "ABC". И весь мир, особо не задумываясь, пользуется этими продуктами, выбирая лишь фирму-поставщика. С одной стороны, это удобно в производстве. Технологи приходится лишь строго соблюдать фирменный регламент "ABC", а вся ответственность за результат ложится на фирму — поставщика концентратов. Однако пытливые отечественные технологи, не привыкшие работать "втемную", не хотят чувствовать себя "пешками" в технологических процессах, тем более что спрос за качество ложится именно на них. Согласитесь, обидно за державу, если компонентом "С" импортного концентрата "ABC" является дистиллированная вода. На государственном уровне это означает необходимость проведения работ по импортозамещению. Огромный и недостаточно востребованный сегодня государством потенциал отечественной химической науки вполне способен создать и поставить на поток производство высококачественных специальных химических реактивов.

Глава 5.

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА И ПОЛУЧЕНИЕ ЗАЩИТНОГО РЕЛЬЕФА

5.1. Операции механической обработки

5.1.1. Получение заготовок и очистка поверхности

Заготовка может быть индивидуальной или групповой, рассчитанной на одновременную обработку нескольких плат, включая сборку ячеек ЭС на групповой заготовке с последующим ее разделением. Размер групповой заготовки ограничивают размеры поля сверлильного станка, ламинатора, установки экспонирования, ванн химической и электрохимической обработки, причем не только сверху, но и снизу. Например, транспортер струйной травильной машины не позволяет перемещать платы малых размеров.

Листы фольгированного диэлектрика в состоянии поставки имеют достаточно большие размеры (не менее 1 x 2 м). Для получения заготовок эти листы режут на полосы, а полосы на отдельные заготовки. Технологические поля заготовок одно- и двухсторонних печатных плат, как правило, не более 10 мм, а МПП до 30 мм. На технологических полях кроме базовых и технологических отверстий размещают вспомогательные знаки совмещения (реперы), контрольные элементы для проверки качества адгезии фольги к диэлектрику, сопротивления изоляции, толщины меди в металлируемых отверстиях и т.п.

В крупносерийном производстве для вырубki заготовок используют штампы и кривошипные механические прессы, в мелкосерийном предпочитают использовать роликовые или гильотинные ножницы. В условиях единичного и опытного производства используют станки собственного производства с абразивными или алмазными кругами.

Заготовки из тонких листов диэлектрика (до 0,25 мм) рекомендуются термостабилизировать (три цикла нагрева и охлаждения) для завершения полимеризации смолы, сочетая эту процедуру с механической рихтовкой продвижением между вращающимися стальными вальками с регулируемым зазором.

Для очистки поверхности фольги применяют эластичные и жесткие шлифовальные круги, металлические и неметаллические вращающиеся щетки, пемзу, гидроабразивную обработку. Как правило, механическая очистка сочетается с химической, включая, например, обработку 50 % раствором соляной кислоты с последующей промывкой.

5.1.2. Пробивка, сверление и прошивка отверстий

Базовые и технологические отверстия до появления многошпиндельных станков с ЧПУ повышенной точности формировали с помощью пробивки. Оборудование для пробивки базовых отверстий обеспечивает точность межцентровых расстояний не хуже $\pm 0,05$ мм на длине до 180 мм и $\pm 0,1$ мм на длине до 360 мм при высоком качестве краев отверстий.

Появление упомянутых станков изменило ситуацию, и теперь все отверстия (базовые, крепежные и металлируемые) могут быть просверлены на одном станке за один установ заготовки платы.

Так, например, сверлильный станок ALPHA Z фирмы "Диджител системз" при скорости передвижения стола свыше 10 м/мин обеспечивает точность установки не хуже $\pm 0,005$ мм.

Полезной будет рекомендация располагать базовые (технологические) отверстия асимметрично. В этом случае не получится зеркального расположения платы относительно оборудования. Не стоит также забывать, что сверлить надо материал со стеклянными нитями (стеклотекстолит). Это предъявляет повышенные требования к материалам сверл. Как правило, это сверла из сплавов типа ВК-8 или ВК6М, представляющие собой смесь карбидов вольфрама и кобальта.

Скорость вращения шпинделя при сверлении базовых (технологических) отверстий не должна быть очень высокой — вполне достаточно 1000–2000 об./мин. Для обеспечения точности диаметра отверстия после сверления желательна дополнительная обработка твердосплавной разверткой.

Иные требования предъявляются к металлируемым отверстиям. От качества его исполнения во многом зависит качество металлизации и точность совмещения проводящих рисунков слоев. При этом долж-

на быть обеспечена такая микрошероховатость поверхности, которая создаст оптимальные условия для адсорбирования каталитических частиц палладия и, соответственно, качественное последующее меднение.

С точки зрения производительности труда желательно иметь максимальную скорость вращения шпинделя со сверлом. Для упоминавшегося выше станка ALPHA Z эта скорость может достигать фантастической величины — 900000 об./мин. Для сравнения отметим, что максимальная скорость вращения четырехшпиндельных станков АРБМ разработки и производства владимирской фирмы "Вектор" и двухшпиндельных ВП-910М производства ФГУП ВПО "Точмаш" составляет всего 70000 об./мин.

С точки зрения качества стенок металлируемых отверстий важно оптимальное сочетание скорости вращения шпинделя и скорости подачи. При больших оборотах шпинделя и малых скоростях подачи происходит заполировка (засаливание) стенок отверстия, нагрев и размягчение смолы вплоть до расплавления. В этом случае смола травящегося диэлектрика делается устойчивой к действию травителя (H_2SO_4), что недопустимо. При больших скоростях подачи происходит чрезмерное разрыхление стеклянных нитей, что также нежелательно. Скорость подачи для ALPHA Z может достигать 762 см/мин., а скорость возврата — 1143 см/мин. Если учесть, что величина подачи чуть больше толщины пакета плат в пределах 17 мм, то производительность труда ограничивается уже необходимостью автоматической сменой сверл после определенного количества отверстий (1000 — 3000 отверстий в зависимости от материала сверла). Обязательными элементами такого сверлильного станка являются массивное (до 2 тонн) гранитное основание, центробежные быстрозаменяемые патроны, устройство автоматической замены инструмента, вакуумное устройство для удаления стружки.

Для лазерной прошивки отверстий необходимо варьировать мощность лазера так, чтобы испарение медной фольги производилось при плотности энергии 4 Дж/см², а диэлектрической подложки — 0,1 Дж/см² [6, с. 77]. Эти режимы пока трудно совместить, используя один лазер. Поэтому используют два разнородных лазера, совмещенных в одной головке: CO_2 -лазер для обработки диэлектрика и "зеле-

ный" эксимерный лазер для испарения меди. Лучи обоих лазеров сводят в одну точку так, что они попеременно обрабатывают отверстие. Эти лазерные системы¹ позволяют прошить сотни отверстий в секунду диаметром от 50 до 200 мкм. Плотность размещения таких отверстий в HDI-платах может достигать 10000 отв./дм².

Максимальная точность и управляемость процессом лазерной прошивки достигается при воздействии на материал серии импульсов лазерного излучения с относительно небольшой энергией (обычно 0,1...0,3 Дж) и малой длительностью (0,1 мс и менее).

5.1.3. Оформление контура: фрезерование, скрайбирование, штамповка, перфорирование

В мировом производстве плат уже уходят в Лету времена, когда производитель объявлял своим потребителям, что "с фрезеровкой плата будет дороже". Сегодня в большинстве случаев фрезеровка — это нормальный метод оформления контура платы, который подразумевается по умолчанию.

Другие варианты в основном являются решениями для крупносерийного производства: скрайбирование с двухсторонней V-образной надрезкой и штамповка. Скрайбирование все больше привлекает внимание отечественных серийных и массовых производителей. Компактное расположение плат небольшого размера на больших групповых заготовках позволяет существенно уменьшить себестоимость сборки за счет так называемого "группового монтажа". Однако следует помнить, что ручное выламывание смонтированных плат после скрайбирования — это грубое нарушение технологии. Для окончательного разделения плат требуется специальное оборудование для "дорезки".

Для предприятий, не имеющих оборудования для скрайбирования и дорезки, рекомендуется перфорирование, при котором контур плат на групповой заготовке отфрезерован примерно на 90%, но плата остается висеть на небольших перфорированных перемычках. При таком исполнении групповой заготовки допускается вручную выламывать отдельные платы после монтажа.

¹Подробности на сайте www.lpkf.ru

5.2. Формирование защитного рельефа

Назначение защитного рельефа может быть самым разнообразным. В негативных процессах он защищает от стравливания проводники печатной платы. В позитивных процессах предотвращает осаждение металлорезистивных покрытий на пробельные участки, с которых впоследствии будет удалена медь. Применение защитного рельефа в качестве паяльной маски существенно повышает качество монтажа. Маркировка обозначений мест установки электрорадиоэлементов является одним из способов использования защитного рельефа.

5.2.1. Сеткография: защитные краски

Наряду с термином сеткография для обозначения этой технологии формирования защитного рельефа используется также термин "шелкография", пришедший в производство печатных плат из типографий. Другой типографский процесс — офсетная печать — вполне пригоден для нанесения защитного рельефа, однако широкого распространения в технологии печатных плат не получил.

Защитные краски, которые служат для формирования защитного рельефа, должны быть либо кислотостойкими, либо щелочестойкими в зависимости от особенностей технологических операций травления или гальванического осаждения. Сеткография предъявляет дополнительные требования к стабильности реологических свойств красок, в частности, к вязкости.

Материалом для сетчатого трафарета служит шелковая, полиамидная (капроновая), полиэфирная или стальная сетка. Шаг сетки порядка 50 — 180 линий/см. Размер частиц красящего пигмента должен быть в 2—3 раза меньше окна ячеек. Сетка должна быть хорошо натянута и обезжирена. Окна для нанесения краски на плату формируются с помощью, например фоторезиста, который в соответствии с фотошаблоном после экспонирования, проявления и термозадубливания либо полностью открывает ячейки, либо закрывает их. Стойкость такого трафарета до 4000 циклов нанесения защитного красящего рельефа с помощью специального инструмента — резинового ракеля.

5.2.2. Фоторезисты: сухие пленочные и жидкие

Фотоспособ по сравнению с сеткографией существенно повышает точность формирования токопроводящего рисунка. Фоторезисты отличаются от фотоэмульсий своим назначением. Если основным назначением фотоэмульсии является передача градаций оптической плотности, то назначение фоторезиста состоит в том, чтобы создавать прочный защитный рельеф, толщина которого зависит от его назначения (позитивный или негативный методы) и требуемой разрешающей способности.

Фотоэмульсии, на которых в прошлом веке длительное время работали наши изготовители печатных плат, отличаются относительно большим размером зерна, что обуславливает их высокую светочувствительность и способность, в зависимости от освещенности, создавать защитную пленку разной толщины, формируя эти самые градации оптической плотности. Это востребовано в фотографии, но не нужно в технологии печатных плат. В отличие от фотоэмульсий фоторезисты имеют эквивалентный размер зерна на уровне молекул, из которых они состоят. В итоге разрешающая способность современных фоторезистов достигает 50000 лин./дюйм.

Экспонирование позитивных фоторезистов ведет к разрушению межмолекулярных связей, а негативных, наоборот, к "сшиванию" молекул по типу вулканизации резины. Позитивные фоторезисты проявляют в слабых щелочных растворах, которые вымывают засвеченные участки, а удаляют в сильных щелочных растворах. Это означает, что позитивные фоторезисты в большинстве своем не годятся для работы в щелочных средах в качестве защитного рельефа. Негативные фоторезисты в этом отношении более универсальны, но их обработка (проявление и удаление) связана с использованием токсичных легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, что не всегда приемлемо.

Жидкие фоторезисты, пришедшие в технологию печатных плат из микроэлектроники, менее технологичны по сравнению с сухими пленочными фоторезистами (СПФ), получившими наибольшее распространение в технологии печатных плат. Эти фоторезисты наносят на заготовку печатной платы с помощью установки двухстороннего ламинирования (ламинатора).

5.2.3. Защитные паяльные маски: назначение и нанесение

Паяльная маска — это тот элемент технологии печатных плат, который кроме своих основных функций (защита проводников и диэлектрика платы, экономия припоя, повышение разрешающей способности монтажа) несет еще и дополнительную — определяет внешний вид платы.

Серьезные заказчики крайне щепетильно относятся к внешнему виду платы и маски. Что касается цвета маски, то наряду с успокаивающим и традиционным зеленым к стандартным цветам уже можно отнести красный, синий, черный. В последние годы потребителя интересует не только цвет маски, но и тип поверхности (матовая, стандартная, блестящая).

Для современного производства печатных плат характерно применение фоточувствительных защитных паяльных масок. Они, как и фоторезисты, могут быть жидкими и сухими пленочными. Жидкие маски водно-щелочного проявления представляют собой термоотверждаемые двухкомпонентные системы, состоящие из фоторезиста и отвердителя. Эти два компонента смешивают непосредственно перед нанесением маски, так как время жизни в смешанном состоянии не более 72 часов. В отдельных случаях к маске добавляют немного (до 3% разбавителя).

Как при использовании любой защитной маски для получения хорошего сцепления, а также для исключения электрокоррозии требуется чистая сухая обезжиренная медная поверхность (на проводниках и полигонах). Полигоны лучше проектировать сетчатыми, а не залитыми. Сетчатые полигоны создают более благоприятные условия для хорошей адгезии маски. Кроме того, сетчатые полигоны уменьшают вероятность коробления плат при термообработке.

На всю поверхность платы маску наносят с помощью сеткографии (сетки и ракеля). При использовании сетки из полиэфирных нитей можно получить толщину слоя маски примерно 15 — 25 мкм. Перед экспонированием маску сушат при температуре 75 — 85°C. Делать это можно в обычном сушильном шкафу, если он гарантирует постоянство температуры при достаточном отводе растворителя. Однако лучше ис-

пользовать циркуляционную печь с подачей свежего воздуха, разумеется, без нарушения постоянства температуры. Перед экспонированием плата охлаждается до температуры окружающей среды.

Экспонирование осуществляется через фотошаблон с помощью ламп ультрафиолетового излучения мощностью 5 – 7 кВт, при этом максимальная температура в зоне экспонирования не превышает 30 – 35°C. В качестве проявителя служит однопроцентный раствор карбоната натрия или калия при температуре 30 – 40°C и времени проявления 45 – 60 с. После проявления рекомендуется промывка в теплой воде. Не позднее чем через 4 часа после проявления маску необходимо подвергнуть отверждению (термозадубливанию) в течение примерно 60 мин. при температуре около 150°C. При использовании контактных площадок, покрытых золотом с подслоем никеля, толщина маски должна быть тоньше (до 10 мкм). Это достигается соответствующим выбором толщины нитей сетчатого трафарета.

По аналогии с сухими пленочными фоторезистами на рынке материалов появились и сухие пленочные защитные паяльные маски. Для их нанесения на плату нужны ламинаторы — вакуумные или валиковые. Обработка таких масок аналогична операциям с сухими пленочными фоторезистами.

5.2.4. Маркировка: сеткография, фотоспособ и принтеры

Маркировка плат и мест установки электрорадиоэлементов на плате с помощью вытравливания медной фольги не может удовлетворить современное производство печатных плат. Поэтому практически обязательной операцией технологического процесса изготовления печатных плат является маркировка поверх защитной паяльной маски. Сеткография и фотоспособ добавляют еще пару фотошаблонов в состав средств технологического оснащения. Относительно недавно в научно-технической литературе появились сообщения о создании специальных струйных принтеров для маркировки печатных плат¹.

¹Одноворцев М. Нанесение маркировки прямым струйно-капельным методом : сборник "Технологии в производстве электроники". — 2005, часть 1. — М. : ООО "МэйкАП-принт". — С. 259 – 265.

Глава 6.

КОНТРОЛЬ В ТЕХНОЛОГИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

6.1. Разрушающие и неразрушающие методы контроля плат

Согласно требованиям системы менеджмента качества ISO 9001-2000, ГОСТ 23752–79¹, производство печатных плат, как и всякий другой производственный процесс, требует наличия обратной связи для его мониторинга и измерения [2, 4]. Инструментом, позволяющим оценить параметры техпроцесса, является контрольно-измерительное (тестовое) оборудование.

Контроль может быть следующих видов:

- работоспособности;
- диагностический;
- прогностический.

Контроль может быть разрушающим и неразрушающим (критерии деления приводятся в технических условиях), сплошным и выборочным. Необходимо определиться с тем, что контролировать в цеху, а что в центральной заводской лаборатории (ЦЗЛ). Важно определиться также с объемом входного контроля поставщиков основных и вспомогательных материалов.

Методы неразрушающего контроля:

- оптические;
- электрические;
- прочие (рентгеновские, тепловизионные, радиационные).

Оборудование для оптического (визуального) контроля (контроля внешнего вида) можно разделить на три группы:

- линзы с подсветкой — используются, как правило, для определения целостности дорожек на небольших предприятиях при контроле несложных плат;

¹ГОСТ 23752–79. Платы печатные. Общие технические условия. — М. : Изд-во стандартов, 1991. — 31 с.

— оптические стереосистемы и микроскопы — это более сложная группа оборудования, с помощью которого можно определять не только целостность дорожек, но и качество металлизации переходных отверстий;

— автоматизированные оптические системы (АОИ — Automatic Optical Inspection) представляют собой программно-аппаратные комплексы, имеющие подвижную оптическую систему и модуль обработки видеоизображения. Эти системы позволяют сравнивать полученное изображение с эталонным. Основным недостаток этих систем состоит в том, что они проверяют правильность взаимного расположения проводников только в одном слое, без учета переходных отверстий. Наибольшее распространение метод АОИ получил для тестирования внутренних слоев многослойных печатных плат (без глухих и скрытых отверстий) до их склеивания. Применение телевизионных камер, способных преобразовать рентгеновское и инфракрасное излучение в оптический диапазон, расширяет возможности данного вида контроля.

Электрический контроль параметров печатной платы предусматривает:

— контроль отсутствия обрывов и коротких замыканий;

— измерение сопротивления проводников. Проблемы возникают в связи с влиянием переходного контактного сопротивления и решаются переходом к четырехзондовому контролю;

— измерение сопротивления изоляции, которое складывается из поверхностного и объемного сопротивлений. Для измерений необходим тераомметр. Измерение проводится с помощью двух стандартных параллельных полосок металлизации, размещенных на технологическом поле платы. Поверхностное сопротивление сильно зависит от влажности, поэтому перед его измерением плату необходимо просушить. Время (обычно не менее часа) и температура сушки оговариваются в технических условиях;

— контроль электрической прочности изоляции. Он может быть разрушающим (измерение напряжения пробоя) и неразрушающим (подача предельно допустимого рабочего напряжения);

— измерение тангенса угла диэлектрических потерь и относительной диэлектрической проницаемости;

— измерение толщины и качества фольги в металлизированных отверстиях с помощью метода вихревых токов;

— измерение времени нарастания потенциала (CRT) — метод, запатентованный фирмой Luther and Maelzer, позволяет измерять электрическую емкость дорожек платы. Слишком малые CRT-значения означают обрыв дорожки, слишком высокие — короткое замыкание. Возможны и более сложные ситуации — двойные и тройные дефекты. Чтобы они не мешали, надо сначала проверить на обрывы и короткие замыкания другими способами;

— рефлектометрический метод — контроль волновых сопротивлений и локализация неоднородностей волнового сопротивления по результатам измерения временных характеристик отраженного импульса.

Оборудование для электрического контроля делится на две большие группы, отличающихся методом доступа к тестируемой печатной плате: системы типа "поле контактов" ("ложе из гвоздей") и системы с подвижными пробниками (Flying Prober — "летающие пробники").

Прочие неразрушающие виды контроля используют рентгеновское и другие виды ионизирующих излучений, а также тепловизионные (активные и пассивные) методы.

Среди разрушающих методов следует отметить весьма информативный металлографический анализ [6, с. 266 — 270]. В производстве обычно используют микрошлифы металлизированных отверстий, расположенных на технологическом поле печатной платы (так называемые "свидетели" или тест-элементы). Этот вид контроля рекомендуется в качестве обязательного при отработке технологического процесса, впоследствии он становится выборочным.

К разрушающим видам контроля относятся оценка прочности на отрыв проводников и металлизации в отверстиях, жесткости платы, стойкости к ударам и вибрациям и т. п.

ГОСТ 23752–79 предусматривает проведение приемо-сдаточных и периодических испытаний на влагуостойчивость, тепло- и холодустойчивость, устойчивость к пониженному давлению, циклическое воздействие температуры, паяемость, устойчивость к перепайкам, устойчивость металлизированных отверстий к токовой нагрузке и т. п.

6.2. Контроль режимов технологических операций

Центр тяжести работ по контролю технологических процессов на производствах, претендующих на звание высокотехнологичных, по законам высоких технологий постепенно смещается от контроля параметров полуфабрикатов и готовых изделий к контролю режимов технологических операций [3, с. 23]. Это становится возможным при наличии датчиков соответствующих физико-химических процессов.

Например, весьма капризный технологический процесс прессования многослойных печатных плат становится более управляемым при наличии контроля вязкости препрегов с использованием дисков сдвига, контроле объемного электрического сопротивления эпоксидного компаунда в процессе прессования многослойных печатных плат.

Читателям рекомендуется заглянуть в предыдущие главы (например в главу 4), чтобы получить представление о проблемах контроля режимов технологических операций. Столь необходимую информацию о ходе химических и электрохимических реакций можно в ряде случаев получить достаточно оперативно. Уже давно в химии растворов применяются такие приборы как pH -метры, способные выдать электрический (аналоговый или цифровой) сигнал, несущий информацию о pH раствора. По аналогии с pH могут быть измерены pCu , pNa , pAg , pNH и т. д. Это принципиально позволяет осуществлять, например оперативный контроль концентрации меди с выдачей пороговых сигналов при достижении определенных концентраций.

Известны также способы контроля плотности растворов и концентрации за счет контроля прозрачности с помощью фотоэлектрокалориметра и другие методы и средства оперативного контроля.

К сожалению, приходится констатировать, что наши знания о влиянии технологических режимов на качество печатных плат пока далеки от идеалов — адекватных математических моделей взаимосвязи режимов технологических операций и параметров качества готовых печатных плат. Вполне возможно, что на отдельных предприятиях в России и за рубежом эти математические модели получены, но разработчики и владельцы этой интеллектуальной собственности, как правило, не торопятся делиться этой информацией по вполне понятным причинам.

Глава 7.

ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

7.1. Основные функции системы технологической подготовки производства печатных плат

Понятие "технологическая подготовка производства" охватывает комплекс мероприятий по обеспечению технологической готовности производства. Системой государственных стандартов ЕСТПП (ГОСТ14.) эти мероприятия объединены в четыре направления, которые именуются основными функциями системы технологической подготовки производства:

- обеспечение технологичности конструкций изделий;
- выбор и разработка технологических процессов;
- выбор и разработка средств технологического оснащения;
- управление процессом технологической подготовки.

Под обеспечением технологичности понимается прежде всего согласование топологии платы с возможностями оборудования для ее изготовления. Переход на так называемые групповые заготовки существенно повышает технологичность изготовления печатных плат и, в ряде случаев, сборки печатных узлов в условиях серийного производства при достаточно больших размерах партий.

В современном автоматизированном производстве разработка технологической документации как таковая отсутствует и заменяется разработкой управляющих программ для технологического оборудования. Автоматизируется также материальное и трудовое нормирование технологии.

Основным видом средств технологического оснащения являются фотшаблоны, количество которых для двухсторонних печатных плат может достигать шести (формирование проводников и переходных отверстий, защитной паяльной маски, маркировки).

Эффективное управление процессом технологической подготовки производства печатных плат предполагает интеграцию процессов проектирования, подготовки производства, изготовления, контроля и

сборки печатных узлов в рамках так называемых CALS-технологий, предусматривающих компьютерную информационную поддержку изделия на всех этапах его жизненного цикла [3].

7.2. Изготовление фотошаблонов: фотоплоттеры, фильмпроцессоры и лазерные граверы

Фотошаблоном называется стеклянная пластина или лист пленки со светочувствительным слоем, на которую в процессе изготовления был нанесен рисунок, повторяющий расположение графических примитивов¹ на соответствующем слое печатной платы.

Безвозвратно ушла в прошлое схема изготовления фотошаблонов: фотооригинал — эталонный фотошаблон — рабочий фотошаблон с различными методами изготовления фотооригиналов: вычерчивание с заливкой смесью тушь+гуашь, наклеивание липкой ленты на прозрачное пленочное основание с нанесенной на него координатной сеткой, прорезание с помощью ручного или автоматизированного координатографа пленки или краски, нанесенной на стекло или специальную безусадочную прозрачную пленку-основание с последующим удалением ненужных участков.

Как правило, современные фотошаблоны изготавливаются на фотоплоттерах с разрешением от 2000 до 16000 точек на дюйм, реже на типографских фотонаборных устройствах, получающих входные данные в формате *Postscript*. Это оборудование способно производить пленочные позитивы с разрешением 2540 точек на дюйм и может в ряде случаев стать достаточно дешевой альтернативой фотоплоттеру.

Фотоплоттеры делятся на два вида — векторные и растровые. По виду основания, на котором закрепляется фотопленка, различают фотоплоттеры с барабанным и плоским держателями. Перспективы последних связывают с возможностью прямого экспонирования фоторезиста без использования фотошаблона. Первые проще в реализации и наиболее распространены, однако точность выполнения фотошаблона здесь зависит от разброса толщины фотопленки.

¹Размеры и формы проводников и контактных площадок.

Векторные плоттеры строят изображение из комбинации "мазков" и "точек", формируемых световым пятном. Изображение в этом случае похоже на то, что прорисовывается перьевыми плоттерами, которые выбирают инструмент нужной толщины и описывают в пространстве чертежа некоторый вектор, после чего на нем образуется линия, ширина которой определяется диаметром апертуры. Набор апертур¹ позволяет плоттеру прорисовывать проводники различной ширины, контактные площадки различной формы и многое другое. Некоторые плоттеры используют для линий и точек разные апертуры, другие управляют интенсивностью света, в этом случае любая из апертур может быть использована как для линий (в режиме включения источника света, движения по вектору и выключения источника света), так и для точек (элементов изображения, формируемых вспышкой источника света).

Растровые плоттеры не используют систему фиксированных апертур. Они читают *Gerber*-файл, хранящий изображение всего чертежа, формируют его растровое изображение и выводят на пленку построочно с помощью матрицы миниатюрных лазерных светодиодов, почти аналогично тому, как формируется изображение на экране телевизора. Растровые фотоплоттеры могут синтезировать практически неограниченное число различных апертур, являются более гибким инструментом и предоставляют разработчикам дополнительные возможности. Некоторые растровые фотоплоттеры используют формат *Postscript*, созданный в свое время для типографий. Это означает, что для большей эффективности проектирования печатной платы рекомендуется учитывать тип фотоплоттера, на котором будет изготавливаться фотошаблон для изготовления этой платы.

Почти все из существующих типов фотоплоттеров управляются посредством специального языка описания векторов. Обычно это *Gerber*, который был разработан компанией Gerber Scientific Company и со временем стал промышленным стандартом *RS-274*. Несмотря на то что этот язык эволюционирует вслед за развитием печатающего оборудования и технологий проектирования, разработчику фотошаблонов в процессе планирования работы по генерации файлов в формате

¹"Инструмент рисования" фотошаблона.

Gerber необходимо учитывать связанные с этим потенциальные трудности и ограничения. В частности, при использовании векторного плоттера следует применять примитивы, для которых существуют подходящие апертуры. Эти апертуры соответствуют различным размерам и формам отверстий в так называемом апертурном барабане, сквозь которые свет проецируется на светочувствительный слой пленки.

Как правило, в комплекте с фотоплоттером работает фильмпроцессор — проявочная машина. По вполне понятным причинам его характеристики, прежде всего максимальный размер пленки, должны быть согласованы с характеристиками фотоплоттера.

Фотоплоттеры в начале использовали для изготовления так называемых эталонных фотошаблонов, с которых с помощью контактной фотопечати делают рабочие фотошаблоны. Сегодня необходимость переkontakта определяется типом пленки и размером партии плат. Например, известная фирма AGFA сообщила о разработке пленки *Mastertool* с защитным покрытием, которая выдерживает до 3000 контактов с платой. В среднем применяемые сегодня пленки выдерживают не более 100 — 200 контактов. Много, конечно, зависит от аккуратности оператора. Из-за случайных царапин фотошаблон может прийти в негодность и раньше, хотя в отдельных случаях его можно отретушировать. Можно констатировать, что в целом ряде случаев дешевле отказаться от контактной печати рабочих фотошаблонов с эталонных, тем более что переcontact неизбежно связан с уменьшением разрешающей способности и другими проблемами.

В мире существует около десятка крупных фирм — разработчиков и изготовителей фотоплоттеров: Lavenir (Pulsar 8000), Mivatec, Emma, Glaser, EIE, Orbotech и др. Одним из первых фотоплоттеров китайского происхождения, поставленных в Россию, стал фотоплоттер, приобретенный ОАО "Владимирский завод "Электроприбор".

Особняком в парке оборудования для изготовления фотошаблонов расположились лазерные гравировальные машины LaserGraver, разработанные в России фирмой "АЛЬФА". Они с виду похожи на фотоплоттеры с держателями пленки барабанного типа, но фильмпроцессоры им не нужны. Изготовление фотошаблона осуществляется в них за счет испарения мощным сфокусированным лучом лазера специальной

краски, нанесенной на прозрачную термостойкую пленку. Все бы хорошо, но лампы накачки лазера хватает ненадолго, да и пленку для этих установок делает одна единственная фирма России. Пока эти установки не могут конкурировать с фотоплоттерами, использующими "мокрую" технологию изготовления фотошаблонов. По сведениям менеджера фирмы "АЛЬФА" на конец 2004 года их установки в количестве свыше 120 штук были приобретены ведущими мировыми производителями печатных плат.

Проверить качество изготовленного фотошаблона можно с помощью измерительного инструментального микроскопа (точность размеров) и денситометра — прибора для измерения оптической плотности изображения на светлых и темных участках фотошаблона. Заключительной операцией изготовления фотошаблона является пробивка базовых отверстий для совмещения фотошаблона с печатной платой.

Одно из российских предприятий в г. Екатеринбурге предложило контролировать качество фотошаблонов с помощью фотосканера и специально разработанного программного продукта **Aplite Inspection**, который можно обнаружить в каталоге и на сайте фирмы "Электрейд-М" (www.eltm.ru).

7.3. Компьютерное моделирование основных и вспомогательных технологических процессов

Выполняется с целью обеспечения технологичности печатных плат, материального нормирования и создания управляющих программ для оборудования по изготовлению фотошаблонов и сверлильно-фрезерных станков с числовым программным управлением. К услугам конструкторов и технологов разработан набор специализированных программных инструментов (*PcbCAM*-систем)¹ Эти инструменты облегчают согласование противоречивых интересов: конструктор обычно стремится к максимальной плотности монтажа, технолог же вынужден

¹Локшин К. Обзор программных средств подготовки печатных плат к производству : Компоненты и технологии. — 2003, № 1. — СПб. : Файнстрит. — С. 146 — 150 (http://www.compitech.ru/html.cgi/archiv/03_01/stat_158.htm).

учитывать возможности реального производства и проводить технологическую правку исходной топологии.

Существенное повышение производительности труда технолога обеспечивают макросы, написание которых, однако, возможно не во всех *PcbCAM*-системах. Распространенные в России программные *PcbCAM*-системы можно условно разделить на три группы (уровня) аналогично легким, средним и тяжелым *PcbCAD*-системам.

В первую группу (базовый уровень, низшая ценовая категория) входит программа **CAMtastic** фирмы Altium, которая бесплатно поставляется в комплекте с *CAD*-системами среднего уровня **P-CAD** и **Protel (Altium Designer)** той же фирмы. К достоинствам этой программы относятся относительно простой и удобный интерфейс, к недостаткам — отсутствие возможности автоматизации (создания макросов).

К *PcbCAM*-системам среднего уровня относятся **CAM-350** фирмы Downstream Technologies, **CAMMaster** фирмы Lavenir, которая разработала этот программный продукт для своей линейки фотоплоттеров, и **GerbTool** производства фирмы WISE Software Solutions, входящий в комплект **OrCAD**. По функциональным возможностям перечисленные в этом классе программные продукты практически совпадают, однако наибольшее распространение по ряду причин в России получил программный продукт **CAM 350**, предусматривающий создание макросов на основе собственного бейсикоподобного языка.

Среди *PcbCAM*-систем высокого уровня следует упомянуть **Genesis 2000** и **U-CAM**. В отличие от программ среднего уровня эти программные продукты не только находят "узкие места", но и автоматически исправляют их. Следует заметить, что такое "проявление инициативы" программных продуктов не всегда приветствуется конструкторами печатных плат специального назначения. Некоторые специалисты считают, что соотношение "цена — экономия" за счет уменьшения брака у систем высокого уровня существенно хуже, чем у систем среднего уровня, особенно если потратить время и относительно небольшие деньги на написание макросов, например для **CAM-350**.

PcbCAM-системы позволяют:

— импортировать данные, полученные в *CAD*-системах автомати-

зированной проектирования (*P-CAD, Protel, OrCAD, Mentor Graphic* и др.). Работа *CAD*-систем обычно заканчивается генерацией *Gerber*- и *drl*-файлов. Наиболее распространенными в России форматами в сфере подготовки печатных плат являются *Gerber RS-274* и *Exellon*. *Gerber*-формат применяется для описания рисунка слоев печатной платы в векторном виде с помощью апертур. *Exellon*-формат применяется для описания координат отверстий и формы фрезерных пазов для сверлильно-фрезерных станков. Следует отметить, что указанные файлы, как правило, не могут быть использованы при работе с фото-плоттером и сверлильно-фрезерным станком непосредственно, а только после обработки с помощью *CAM*-системы;

- обеспечение технологичности, что включает так называемую *DRC*-проверку (поиск узких мест с точки зрения технолога), коррекцию на подтрав размеров проводников и контактных площадок, капле-видное сглаживание стыков проводников с контактными площадками, вычисление суммарной площади металлизации, панелизации (размещению нескольких плат на групповой заготовке), оконтуривание всех элементов в случае производства "сухим методом";

- генерация выходных файлов для фотоплоттеров и сверлильно-фрезерных станков с ЧПУ, включая возможность удаления, копирования, вставки, зеркального отображения, масштабирования и изменения апертуры выделенных объектов. Для создания контуров фрезерования в ***CAMTastic*** например, можно выбрать до десяти различных стратегий. В специальной таблице инструментов могут быть описаны до 99 различных инструментов, при этом будут учитываться поля компенсации, диаметра инструмента, врезная подача, скорость вращения шпинделя, глубина реза.

Как правило, в *CAM*-системе имеется возможность размещения на технологических полях заготовки печатной платы сведения о шифре изделия, знаки совмещения (реперы), тест-элементы для проверки качества приклеивания фольги к диэлектрику, сопротивления изоляции, толщины и прочности металлизации в отверстиях.

Выход на фотоплоттер не всегда удается выполнить с непосредственным использованием *CAM*-системы, так как некоторые растровые фотоплоттеры не могут работать с векторными файлами или, на-

оборот, САМ-система не выводит растровые файлы. Иногда приобретение фотоплоттера "привязывает" его владельца к конкретному программному продукту *PcbCAM*.

Ниже приведены практические рекомендации по компьютерному моделированию основных и вспомогательных технологических процессов изготовления печатных плат.

Получение GERBER- и DRL-файлов с помощью P-CAD 2002

1. Открыть *pcb*-файл в **P-CAD 2002**.

2. Начать диалог File Gerber Out генерации *Gerber*-файлов, выполнив File - Export - Gerber....

3. Вызвать диалог установки *Gerber*-файлов кнопкой Setup Output Files.

4. Задать расширение *Gerber*-файла в графе File Extension, например: ТРМ — для слоя верхней паяльной маски, ТОР — для слоя верхнего проводящего рисунка, ВОТ — для слоя нижнего проводящего рисунка, ВТМ — для слоя нижней паяльной маски, BRD или В — для контура платы.

В графах XOffset и YOffset задать нулевое смещение. Для слоев проводящего рисунка включить добавление в *Gerber*-файл информации о контактных площадках и переходных отверстиях (Pads, Vias), для слоев паяльной маски только информацию о контактных площадках (Pads). Выбрать слой из списка Layers, *Gerber*-файл которого необходимо, задать директорию, в которую будет экспортирован *Gerber*-файл, и добавить сформированное задание, нажав кнопку диалога Add. Параметры заданий можно корректировать. После изменения параметров для того чтобы они вступили в силу, нужно указать в списке Output File, для какого *Gerber*-файла были сделаны изменения, и нажать кнопку диалога Modify. Так же можно удалять задания из списка, для чего нужно выделить *Gerber*-файл и нажать кнопку диалога Delete. После того как будут заданы все необходимые *Gerber*-файлы, выйти из диалога Setup Output Files, нажав кнопку Close.

5. Вызвать диалог определения апертур кнопкой Apertures. В графе Draw Apertures Size установить значение 0,25 мм и включить добавление информации обо всех параметрах, кроме параметров отверстий,

контактных площадок и переходных отверстий *Pad/Via holes*. Выполнить автоматическое определение апертур, нажав кнопку диалога **Auto**, и выйти из диалога (кнопка **Close**).

6. Вызвать диалог установки параметров формата вывода *Gerber*-файлов **Gerber Format...**. Задать миллиметровый формат вывода в разделе **Output Units**, формат числа 4:4 в разделе **Numeric Format** (4 целых значащих цифры, 4 десятичных). Включить формат вывода **RS-274X** и выйти из диалога.

7. Выбрать в списке **Output Files** необходимые *Gerber*-файлы (если все, то можно воспользоваться кнопкой **Set All**) и нажать кнопку диалога **Generate Output Files**, после чего будут сформированы *Gerber*-файлы в указанную директорию. Выйти из диалога **File Gerber Out**.

8. Начать диалог **File N/C Drill** генерации *DRL*-файлов, выполнив **File - Export - N/C Drill**.

9. Вызвать диалог установки *DRL*-файлов кнопкой **Setup Output Files**.

10. Задать расширение файла в графе **File Extension**, рекомендуемое расширение ***.drl**. В графах **XOffset** и **YOffset** задать нулевое смещение. Выбрать слои проводящего рисунка **Top** и **Bottom**. Включить наличие информации в *DRL*-файле обо всех отверстиях, параметр **All Holes**. Добавить задание в список и выйти из диалога.

11. Перейти в диалог определения диаметров сверл **Tools...** При включенном параметре **Clear current tools** выполнить автоматическое определение диаметров сверл, нажав кнопку диалога **Auto**, и выйти из диалога.

12. Вызвать диалог установки параметров формата вывода *DRL*-файлов кнопкой **N/C Drill Format**. Задать миллиметровый формат вывода в разделе **Output Units**, тип кода — в разделе **Output Code Type**: **ASCII None**, добавление нулей — в разделе **Zero Suppression**: **None**. Выйти из диалога.

13. Выбрать *DRL*-файл в списке **Output Files** и нажать кнопку диалога **Generate Output Files**, после чего будет сформирован *DRL*-файл в формате *Exellon*. Выйти из диалога **File N/C Drill**.

14. Выйти из **P-CAD 2002**.

Получение GERBER- и DRL-файлов с помощью PROTEL DXP

1. Открыть *pcb*-файл в **Protel DXP**.

2. Начать диалог Gerber Setup генерации Gerber-файлов, выполнив File - Fabrication Outputs - Gerber Files.

3. На вкладке **General** в разделе **Units** установить единицы измерения миллиметры (**Millimeters**), в разделе **Format** установить формат вывода **4:2** (4 целых, 2 десятичных значения).

4. На вкладке **Layers** выбрать слои, Gerber-файлы которых необходимо получить. Следует помнить, что в **Protel DXP** нельзя создать Gerber-файл контура печатной платы.

5. На вкладке **Apertures** проверить наличие галочки, она должна быть напротив параметра **Embedded apertures (RS274X)**.

6. На вкладке **Advanced** в разделе **Leading/Trailing Zeroes** установить параметр **Keep leading and trailing zeroes**, в разделе **Position on film** установить параметр **Reference to absolute origin**, остальные параметры на этой вкладке не изменять.

После того как все описанные ранее операции настройки выполнены, надо нажать кнопку **Ok** диалога, что приведет к генерации Gerber-файлов выбранных слоев. Имя Gerber-файла такое же, как у исходного *pcb*-файла. Причем расширения Gerber-файлов имеют следующую 3-х знаковую структуру:

1-й знак: **g** означает, что файл Gerber-формата;

2-й знак: указывает на назначение слоя и, как правило, это первая буква в названии слоя (**t** - top, **b** -bottom и т.п.);

3-й знак: как правило, **l**, что означает **layer** (слой).

Генерация происходит в папку, где находится исходный *pcb*-файл, или в отдельно создаваемую папку, если *pcb*-файл входит в проект, причем эта папка находится в папке проекта.

7. Начать диалог **NC Drill Setup**, выполнив File - Fabrication Outputs - NC Drill Files.

8. В разделе **Units** установить единицы измерения (**Millimeters**), в разделе **Format** — формат вывода **4:2** (4 целых, 2 десятичных значения), в разделе **Leading/Trailing Zeroes** — **Keep leading and trailing zeroes**, в разделе **Coordinate Position** — **Reference to absolute origin**.

При нажатии на кнопку диалога **Ok** будет сгенерирован *DRL*-файл в формате *Excellon*, имя файла такое же, как у исходного *pcb*-файла, а расширение **.txt*, которое лучше заменить на **.drl*.

9. Выйти из **Protel DXP**.

Подготовка фотошаблонов с помощью CAM350

1. Импорт *Gerber*-файлов слоев ПП в **CAM350**.

Меню: **File - Import - Gerber Data...**

В открывшемся диалоге в полях **Filename** нажатием на кнопку номера слоя указывается путь к *Gerber*-файлу. Нажав кнопку **Data Format**, установить формат **Gerber RS-274X**, формат числа 4:2 без добавления нулей, метрические единицы измерения.

В открывшемся диалоге в полях **Filename** нажатием на кнопку номера слоя указать путь к *Gerber*-файлу, в поле **Layer Type** выбрать параметр **Graphic**. Нажав кнопку **Data Format**, установить формат **Gerber RS-274X**, формат числа 4:2 без добавления нулей, метрические единицы измерения.

2. Импорт *DRL*-файлов слоев ПП в **CAM350**.

Меню: **File - Import - Drill Data.**

В открывшемся диалоге в полях **Filename**, нажав на кнопку номера слоя, указать путь к *DRL*-файлу. Установить в поле **Format: Excellon**, формат числа 4:2 без добавления нулей, метрические единицы измерения.

После импорта всех необходимых слоев и сверловки, если есть смещения слоев, то их необходимо выровнять с помощью команды меню **Edit - Move**. Кнопка клавиатуры **W** включает групповое выделение объектов.

3. Создание реперных знаков и технологических полей на слоях металлизации.

а) Реперные знаки, обозначающие углы платы (на всех слоях) имеют вид прямого угла с длиной стороны 5 мм и толщиной линии 1мм. Этот реперный знак создается с помощью команды меню **Add - Line**, круглой апертурой диаметром 1 мм. Внутренний край реперного знака должен проходить по краю платы. Для создания апертуры необходимо

вызвать таблицу апертур (клавиша клавиатуры **A** при неактивных командах, иначе будет выделение всего), выбрать необходимую апертуру и подтвердить нажатием кнопки диалога **Ok**. Если необходимой апертуры нет в таблице, то ее нужно создать. Для этого в списке апертур выбрать неопределенную **None** апертуру и в графе **Shape** (форма) выбрать ее тип, а в графе **Diameter** — ее размер.

б) Реперы совмещения (на всех слоях) — точки, необходимые для совмещения фотошаблона с просверленной платой. В этих точках пробивают отверстия и вставляют специальные кнопки, посредством которых шаблон совмещается с отверстиями на плате. Такие реперы располагаются по углам платы с верхней и нижней стороны на расстоянии 10 мм (от края платы до центра репера) минимум по 2 точки (расстояние между центрами реперов 15 мм) на угол и минимум на 2 угла (диагонально). Эти точки отмечаются объектами типа **Flash** (меню **Add - Flash**), апертура **Target**, размер 5 мм.

в) Контакт-поле (в слоях металлизации) — поле, которое обеспечивает протекание тока по поверхности платы при гальваническом осаждении металлорезиста. Оно располагается с одной стороны платы, желательно с наименьшей. Для его создания используется команда создания растровых полигонов (меню **Add - Polygon...**). В появившемся диалоге выбираем режим рисования границ (**Draw Border**), режим растровой заливки (**Raster Fill**) и величину отступа от других объектов. Поле имеет ширину 15 мм и длину на 6 — 8 мм больше длины стороны платы, вдоль которой нарисовано поле.

4. Подсчет площади металлизации.

Для подсчета площади металлизации слои металлизации должны быть видимыми. Используется команда меню **Analysis - Copper Area...**

В графе **Resolution** задается разрешение сканирования, в графе **Scan Box Size** — размер единицы сканируемой площади. Параметр **Compute With Drill Information** включает подсчет площади с учетом металлизированных отверстий, в графе **Board Thickness** задается толщина платы. По окончании подсчета выводится отчет, в котором приводятся площади для каждого слоя, площади в отверстиях и суммарная площадь.

5. Добавление технологических надписей.

Надписи создаются с помощью команды меню **Add - Text**. В надпи-

сях можно использовать только символы английской раскладки клавиатуры. Для настройки параметров надписей используют команду меню **Settings - Text...** Высота знаков (**Total Height**) 3 мм, для надписей на нижних слоях надо включить параметр **Mirror**. Надписи наносятся в активный слой. Надписи рекомендуется наносить круглой (**Round**) апертурой размером 0,35 — 0,4 мм.

а) Площадь металлизации располагается в слое верхней металлизации между платой и контакт-полем. Надпись имеет вид: " $S = 14163 \text{ мм}^2$ ".

б) Обозначение платы и слоя обычно содержит десятичный номер платы или название файла и идентификатор слоя. Для слоя верхней металлизации в качестве идентификатора используется латинская **C** (от названия слоя *comp* — сторона установки компонентов на односторонней плате), а для слоя нижней металлизации **S** (от названия слоя *solder* — сторона пайки компонентов на односторонней плате), для массочных слоев перед **C** или **S** добавляется **M** (от *solder mask* — паяльная маска). Надпись имеет вид: "7.104.995 C" или "plata0 S".

6. Расстановка технологических отверстий.

Для редактирования сверловки переходят в редактор **NC Editor** (меню **Tools - NC Editor**). Для определения инструмента переходят в таблицу сверловки (**Tables - "название"**). В пустом поле **Tool Num** вводится номер инструмента (и нажимается **Enter** на клавиатуре), в поле **Size** аналогично вводится диаметр сверла.

Для простановки отверстий используют команду меню **Add - Drill Hit**. Выбрав нужный инструмент из списка и сделав слой сверловки активным, приступают к простановке отверстий. Технологические отверстия ставятся там же, где реперы совмещения.

В заключение перечислим наиболее полезные "горячие" клавиши:

[A] — таблица апертур, выделить все;

[W] — выделение рамкой;

[+] — увеличить изображение;

[-] — уменьшить изображение;

[Home] — показать все;

[Правая кнопка мыши] — как обычно в программах;

[Левая кнопка мыши] — отменить.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предпринята попытка относительно краткого и в то же время системного изложения особенностей технологий и подготовки производства печатных плат с учетом реалий современности: интеграции российской электроники в мировое разделение труда, микроминиатюризации электронных средств, автоматизации производства, смены элементной базы, компьютеризации инженерной деятельности. Согласитесь, столь противоречивые требования к содержанию учебного пособия создают предпосылки определенного субъективизма в отборе и изложении материала, поэтому автор с благодарностью воспримет критические замечания в свой адрес. Их можно направлять в издательство Владимирского государственного университета (см. с. 64) и лично автору по электронной почте *krylov_vp@mail.ru*.

Из-за малого объема издания в нем практически не затронуты технологические особенности оперативного изготовления так называемых прототипов печатных плат. В этом плане, по мнению автора, представляет интерес системное согласование постоянно расширяющихся возможностей программных средств посттопологического моделирования электрических принципиальных схем печатных узлов на фоне новых подходов к прототипированию печатных плат, прежде всего HDI-типа.

Автор считает своим долгом выразить признательность информационным партнерам — фирмам "Электрейд-М", "Электрон-Сервис-Технология", ООО "Марафон", "ОСТЕК", Издательскому Дому (ИД) "Электроника", ИД "Файнстрит" за предоставленную информацию о последних достижениях в области производства печатных плат. Положительное влияние на качество работы оказало многолетнее сотрудничество с технологическим отделом и цехом печатных плат ОАО "Владимирский завод "Электроприбор", а также с другими предприятиями.

Автор благодарен за поддержку, предоставленные материалы и критические замечания А.М. Медведеву, Ю.В. Потапову, С.А. Савенко и А.М. Зайцеву.

Приведенные ниже вопросы и задания нацелены на формирование инновационного подхода к изучению технологических проблем современного производства печатных плат.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Как проявляют себя законы диалектики в процессе развития технологий печатных плат?
2. По каким признакам можно различать поколения печатных плат?
3. Сформулируйте требования к базовым материалам для изготовления печатных плат.
4. Чем обусловлено многообразие технологических маршрутов изготовления печатных плат: односторонних, двухсторонних, многослойных?
5. Сравните комбинированные методы изготовления двухсторонних печатных плат.
6. Чем обусловлены проблемы прессования пакета заготовок в производстве многослойных печатных плат?
7. Из каких соображений выбирается травитель меди и способ травления?
8. В чем заключаются основные проблемы химического меднения?
9. Как оптимизировать процесс гальванического меднения?
10. Почему для оформления контура печатной платы применяются несколько методов?
11. В чем состоят особенности формирования металлизировемых отверстий?
12. Каково назначение защитного рельефа в производстве печатных плат?
13. Что дает применение защитных паяльных масок в технологии печатных плат и поверхностного монтажа компонентов?
14. Сформулируйте предложения по формированию набора разрушающих и неразрушающих методов контроля печатных плат.
15. Что дает контроль режимов технологических операций по сравнению с контролем готовых изделий в производстве печатных плат?
16. В чем заключается подготовка производства печатных плат?
17. Как обеспечить технологичность печатных плат?
18. Каковы задачи компьютерного моделирования основных и вспомогательных технологических процессов изготовления печатных плат?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Бушминский, И.П.* Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры : учеб. для вузов / И. П. Бушминский [и др.] ; под ред. А. П. Достанко, Ш. М. Чабдарова. — М. : Радио и связь, 1989. — 624 с. — ISBN 5-256-00292-9.
2. *Глудкин, О.П.* Управление качеством электронных средств: учеб. для вузов / О. П. Глудкин [и др.] ; под ред. О. П. Глудкина. — М. : Высш. шк., 1994. — 414 с. — ISBN 5-06-003277-9.
3. *Крылов, В. П.* Введение в технологии производства электронных средств : учеб. пособие / В. П. Крылов ; Владим. гос. ун-т. — Владимир, 2006. — 32 с. — ISBN 5-89368-681-0.
4. *Медведев, А. М.* Надежность и контроль качества печатного монтажа / А. М. Медведев. — М. : Радио и связь, 1986. — 286 с.
5. *Медведев, А. М.* Печатные платы: конструкции и материалы / А. М. Медведев. — М. : Техносфера, 2004. — 302 с. (Мир электроники). — ISBN 5-94836-026-1.
6. *Медведев, А. М.* Технология производства печатных плат / А. М. Медведев. — М. : Техносфера, 2004. — 358 с. (Мир электроники). — ISBN 5-94836-052-0.
7. *Мэнгин, Ч.-Г.* Технология поверхностного монтажа. Будущее технологии сборки в электронике / Ч.-Г. Мэнгин, С. Макклелланд ; пер. с англ. ; под ред. Л. А. Коледова. — М. : Мир, 1990. — 276 с. — ISBN 5-03-001485-3.
8. *Ушаков, Н. Н.* Технология производства ЭВМ / Н. Н. Ушаков. — М. : Высш. шк., 1991. — 416 с. — ISBN 5-06-000711-1.
9. *Ханке, Х.-И.* Технология производства радиоэлектронной аппаратуры / Х.-И. Ханке, Х. Фабиан ; пер. с нем. ; под ред. В. Н. Черняева. — М. : Энергия, 1980. — 464 с.

Учебное издание

КРЫЛОВ Владимир Павлович

ТЕХНОЛОГИИ И ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА
ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Учебное пособие

Редактор Л.В. Пукова

Технический редактор Н.В. Тупицына

Компьютерная верстка В.П. Крылова

Подписано в печать 07.09.06.

Формат 60x84/16. Бумага для множит. техники. Гарнитура Литературная.

Печать на ризографе. Усл. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 3,60. Тираж 50 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета.

600000, Владимир, ул. Горького, 87.