

# Иллюстрированная технология печатных плат

## Изготовление односторонних печатных плат. Часть 2

Аркадий Медведев  
Сергей Арсентьев

### Введение

Во второй части цикла статей описаны стадии производства печатных плат с неметаллизированными сквозными отверстиями. Порядок их описания такой же, как в первой части: каждый новый рассматриваемый процесс следует за предыдущим; все процессы анализируются поочередно. Данная тема раскрыта на примере отдельного участка платы, содержащего печатный проводник и сквозное отверстие с монтажной контактной площадкой. В качестве примера выбрана односторонняя плата (рис. 1), так как в большинстве случаев производство двусторонних плат нецелесообразно из-за высокой стоимости процесса изготовления плат с металлизированными сквозными отверстиями.

На диаграмме (рис. 2) показана наиболее простая последовательность процесса изготовления плат с неметаллизированными сквозными отверстиями (в скобках указаны разделы текста). Настоящий метод основан на использовании органического резиста для избирательного травления, наносимого методом трафаретной печати либо фотолитографии. Перед формированием рисунка проводников выполняют сверление или выштамповку (пробивку) отверстий.

Платы с неметаллизированными сквозными отверстиями также могут быть изготовлены с помощью металлорезиста, наносимого гальваническим методом. Ознакомившись с технологией производства двусторонних плат (глава первая), понять существо данного процесса несложно. Для этого нужно

опустить описание стадий химической металлизации и гальванического меднения платы.

Обычно платы с неметаллизированными отверстиями имеют рисунок проводников с одной стороны (односторонние платы), однако иногда возникает необходимость в двусторонних платах без металлизации сквозных отверстий. Двусторонние платы сложнее в изготовлении, поскольку требуют совмещения рисунка с обеих сторон заготовки.

В процессе проектирования двусторонних плат без металлизации отверстий часто нужна установка соединений с двух сторон (рис. 3). Наиболее простой способ в таких случаях — установка в отверстия и пайка провода, соединяющего контактные площадки на разных сторонах платы (рис. 3а). При этом использовать выводы компонентов для установки соединений не рекомендуется.

Однако есть и другой подход, предусматривающий применение пистонов — полых медных заклепок, покрытых припоем или оловом. Их заклепывают до формы воронки и припаивают с обеих сторон платы (рис. 3б). Или их можно полностью заклепать и опять

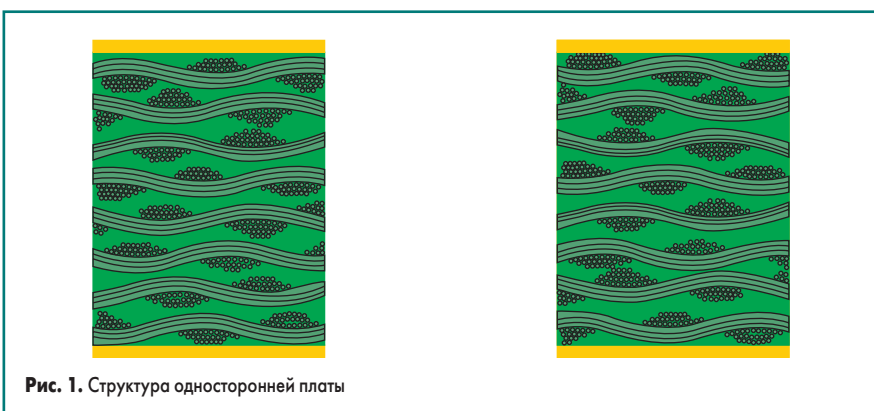
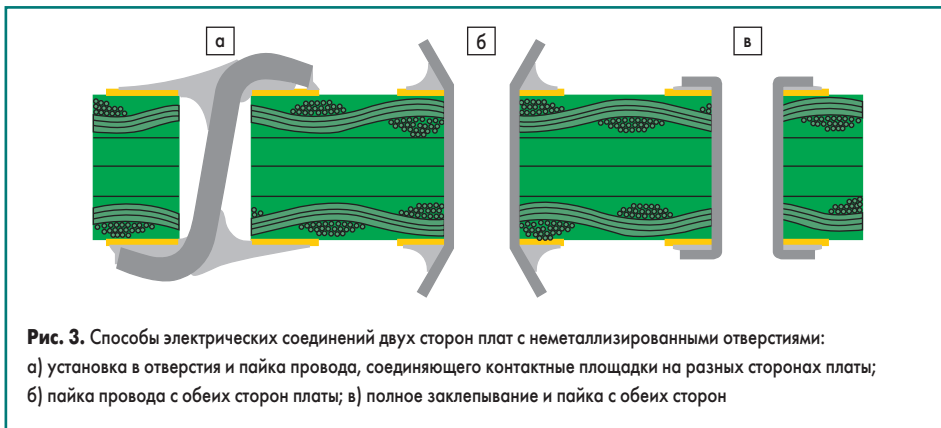


Рис. 1. Структура односторонней платы



Рис. 2. Схема процесса изготовления ПП с неметаллизированными сквозными отверстиями



**Таблица 1.** Номинальная толщина фольгированных материалов (включая медную фольгу)

мм	0,8	1,2	1,5	1,6	2	2,4	3,2
дюйм	0,031	0,047	0,059	0,062	0,079	0,093	0,125

**Таблица 2.** Толщина медной фольги

мкм	17,5	35	70	105	140
оз.	0,5	1	2	3	4

**Таблица 3.** Максимальная рабочая температура эксплуатации базовых материалов

FR-2, FR-3	105 °C
CEM-1, CEM-2, FR-4	130 °C

с обеих сторон (рис. 3в), но для этого необходимо покрытие контактных площадок припоем.

### 1. Базовые материалы

#### Характеристики и применение базовых материалов

Информация о толщине базовых материалов, медной фольги и температурных условиях приведена в таблицах 1–3.

Материал состоит из листов электротехнической бумаги, пропитанной феноальдегидной смолой (рис. 4). Несмотря на размерную нестабильность, материал обладает удовлетворительными электрическими и физическими качествами. Рассчитан он на эксплуатацию в комнатных (стабильных) условиях. FR-2 — самый дешевый материал, который обычно применяется для односторонних плат. В основном его используют при эксплуатации приборов, не требующих особой устойчивости к экстремальным внешним воздействиям по температуре, влажности и механическим воздействиям, — например, в телевизорах, калькуляторах, кухонных комбайнах, игрушках и электронных играх.

#### Гетинакс с эпоксидным связующим — FR-3

Так же как и FR-2, материал состоит из листов бумаги, но пропитанной эпоксидной смолой. Материал во многом аналогичен FR-2, однако благодаря эпоксидной пропитке обладает лучшими электрическими и физическими качествами. Предназначен для эксплуатации в комнатных условиях. Применяется в технике массового потребления — компьютерах, радио и телевизорах.

#### Гетинакс, облицованный стеклотканью, — CEM-1

Этот составной материал содержит бумажную сердцевину, покрытую стеклотканью с пропиткой из эпоксидной смолы (рис. 5). Из-за составной структуры CEM-1 представляет собой нечто среднее между базовым материалом на бумажной основе (FR-2/FR-3) и стекловолоконными материалами (FR-4). Условия его эксплуатации аналогичны FR-2/FR-3. Электрические и физические свойства близки к FR-4 (но чуть хуже). Обычно CEM-1 применяется в автомобильной про-

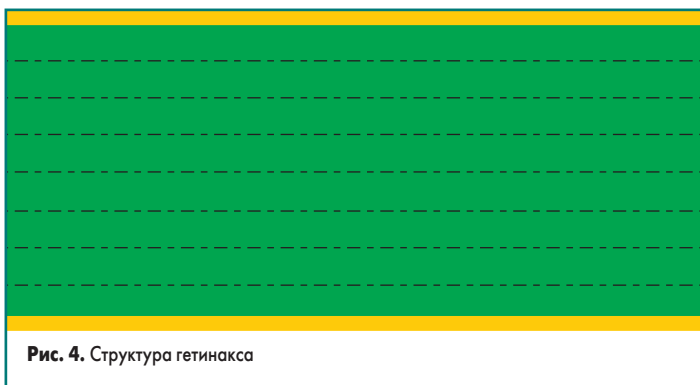
мышленности, производственной электронике, радио, телевизорах и калькуляторах.

#### Стекломат с эпоксидным связующим — CEM-3

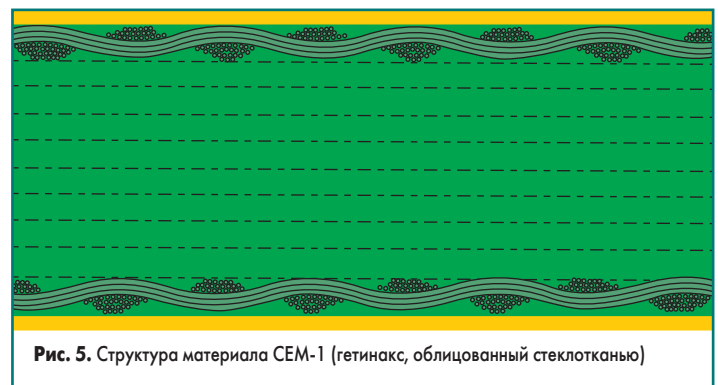
Материал CEM-3 состоит из нетканой стеклянкой сердцевины (стекломат), покрытой стеклотканью (рис. 6). В качестве пропитки наносится эпоксидная смола. Иногда в центре основания также прокладывается слой стеклоткани. По своим свойствам CEM-3 находится между FR-2/FR-3 и FR-4, но поскольку в качестве сердцевины используется стеклоткань вместо бумаги, CEM-3 ближе к FR-4. В отличие от FR-4 его легче сверлить (сверла меньше изнашиваются). Области применения CEM-3 такие же, как у материала CEM-1.

#### Стеклотекстолит с эпоксидным связующим — FR-4

Данный материал состоит из нескольких слоев стеклоткани с пропиткой из эпоксидной смолы (рис. 7). FR-4 широко распространен в произ-



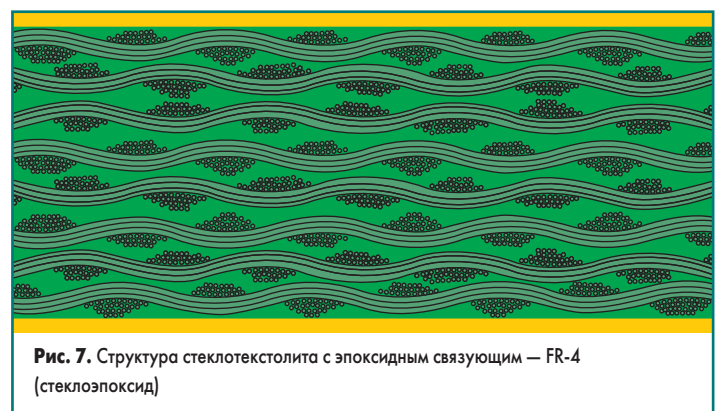
**Рис. 4.** Структура гетинакса



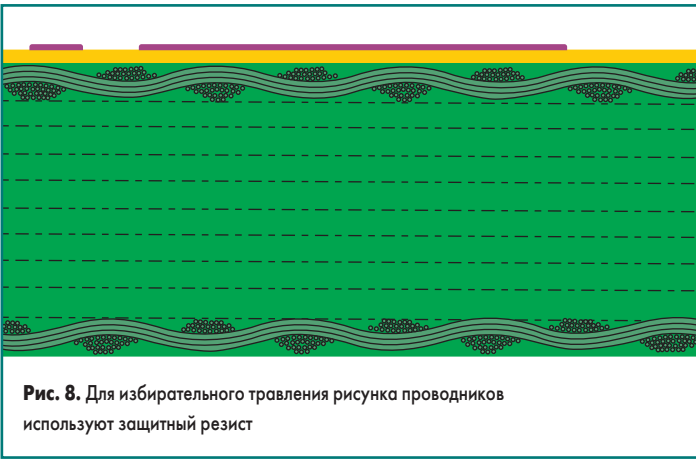
**Рис. 5.** Структура материала CEM-1 (гетинакс, облицованный стеклотканью)



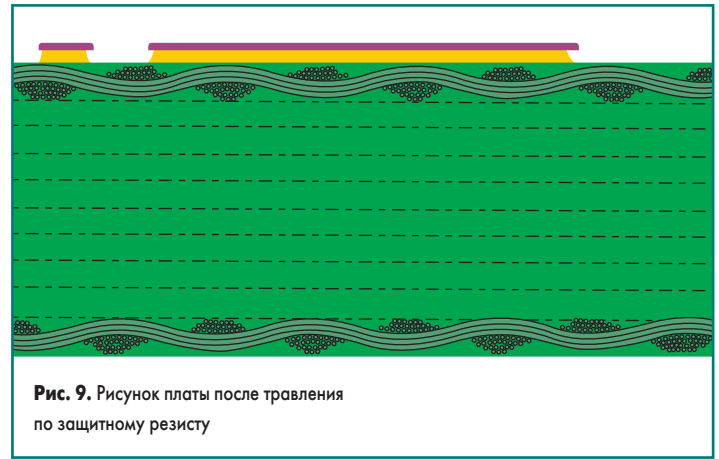
**Рис. 6.** Структура материала CEM-3 (нетканая стекловолоконная сердцевина, облицованная стеклотканью)



**Рис. 7.** Структура стеклотекстолита с эпоксидным связующим — FR-4 (стеклоэпоксид)



**Рис. 8.** Для избирательного травления рисунка проводников используют защитный резист



**Рис. 9.** Рисунок платы после травления по защитному резисту

водстве ПП как с металлизированными сквозными отверстиями, так и с неметаллизированными. Имеет хорошие электрические и физические качества, обеспечивающие возможность его использования в военном и другом профессиональном оборудовании (системы коммуникаций, компьютеры, измерительное оборудование). Поскольку материал обладает высокой твердостью, его фрезеровку обычно производят сверлением и оконтуриванием.

## 2. Формирование рисунка

### Цель

Покрытие медной поверхности платы по будущему ее рисунку (проводников и контактных площадок) защитным резистом, чтобы защитить рисунок проводников от травления. Все остальные медные участки фольги должны быть доступны для травления.

### Процесс

Защитный резист может быть нанесен на заготовку двумя способами: трафаретной печатью или в виде сухой фотопроявляемой пленки. Перед его нанесением следует провести тщательную очистку медной поверхности платы для обеспечения хорошей адгезии. Обычно очистка выполняется щетками, с последующим микротравлением. На рис. 8 показан нанесенный трафаретной печатью защитный слой кислотостойкой краски — защитный резист травления.

### Трафаретная печать

Трафаретная печать производится по гладкой поверхности фольги односторонней платы, отчего процесс значительно упрощается. Рисунок проводников на трафарете (на сите) должен быть негативным, то есть все контакты и дорожки на нем должны быть открыты, чтобы при прохождении ракеля по трафарету краска покрывала фольгу в местах будущих проводников и контактов.

### Сухой пленочный фоторезист

Нанесение СПФ, его экспонирование и обработка описаны в первой части. В отличие от резиста, по которому осуществляется металлизация, защитный резист в односторонних платах должен покрыть те области, где будет проводящий рисунок платы. Поэтому фотошаблон должен быть негативом: рису-

нок платы представлен на нем прозрачными областями. В результате при воздействии ультрафиолетовых лучей фоторезист полимеризуется и защищает проводящий рисунок от травления. Остальные области останутся непокрытыми и будут вытравлены.

### Выбор резиста травления

Выбор типов защитных резистов травления определяется следующими факторами:

- плотность рисунка;
- размер заготовки;
- количество плат.

### Плотность рисунка

Трафаретная печать целесообразна при невысокой плотности рисунка, когда ширина дорожек и пространство между ними не превышает 0,2–0,25 мм. В некоторых случаях трафаретная печать возможна при ширине дорожек и расстоянии между ними 0,1–0,15 мм, однако большинство производителей плат отказывается от этого варианта из-за нестабильной воспроизводимости рисунка (неприемлемого объема брака).

При изготовлении прецизионных плат с рисунком высокой плотности (менее 0,2 мм) обычно применяют сухой пленочный фоторезист. И хотя он более дорогой, некоторые производители постоянно используют СПФ, даже при низкой плотности рисунка плат. Очевидным преимуществом в данном случае является получение более ровных краев рисунка.

### Размер заготовки

Недостатком трафаретной печати считается потеря точности рисунка, вызванная растяжением сита трафарета в результате механического воздействия ракеля. Обычно при длине платы 250 мм погрешности в воспроизведении рисунка достигают 0,1 мм. Точность рисунка в данном случае зависит от рабочего оборудования и квалификации оператора. Для больших плат предпочтителен СПФ.

### Количество плат

Трафаретную печать лучше использовать, если количество плат превышает 25 шт. и требования к точности рисунка невысоки. Если же плат меньше, итоговая стоимость производства будет относительно велика из-за больших затрат на изготовление трафарета. В таком случае следует остановить свой выбор на СПФ.

## 3. Травление

### Цель

Удаление ненужной меди, не защищенной резистом травления, с целью проявления рисунка платы.

### Процесс

Процесс аналогичен описанному выше (рис. 9). Во избежание разрушения защитного резиста он должен быть совместим с травильным раствором. Как правило, в качестве травящего раствора применяются кислые среды и кислотостойкие защитные краски или фоторезисты. Такие резисты после использования смываются в щелочных средах.

Как уже было сказано, в процессе травления возникает подтравливание. По размеру подтравливание краев проводников соответствует толщине медной фольги (при условии, что коэффициент травления равен 1). Так, при толщине медной фольги 35 мкм общее подтравливание дорожки (сумма по двум сторонам) составит 70 мкм. Тогда при условии сохранения 75% (от номинала) ширины проводника в 300 мкм ширина проводника на фотошаблоне должна быть:

$$300 \times 0,75 + 70 = 295 \text{ мкм.}$$

Получение же прецизионных плат с шириной проводников менее 0,3 мм (или даже 0,25 мм) вызывает определенные сложности. В этом случае приходится компенсировать подтравливание проводников, проектируя рисунок платы на фотошаблоне с более широкими проводниками. Однако это затруднит нанесение рисунка, так как уменьшатся зазоры между соседними проводниками и в итоге может быть смазан защитный слой краски, нанесенный трафаретным способом.

## 4. Снятие резиста

### Цель

Удаление резиста травления с целью оголения меди дорожек и контактов.

### Процесс

Снятие защитного резиста травления, покрывающего печатные проводники, достигается способом, описанным в первой части статьи. В итоге рисунок платы представляет

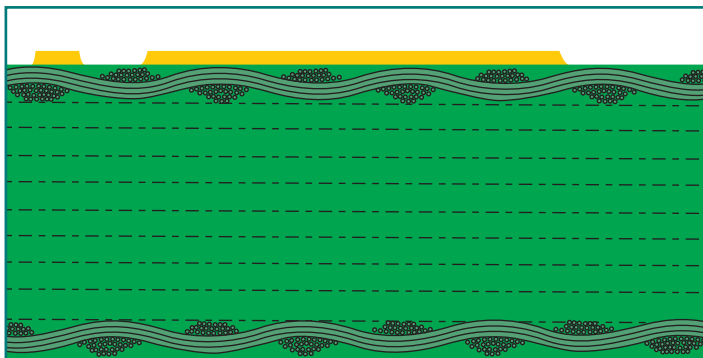


Рис. 10. Рисунок платы после снятия защитного резиста

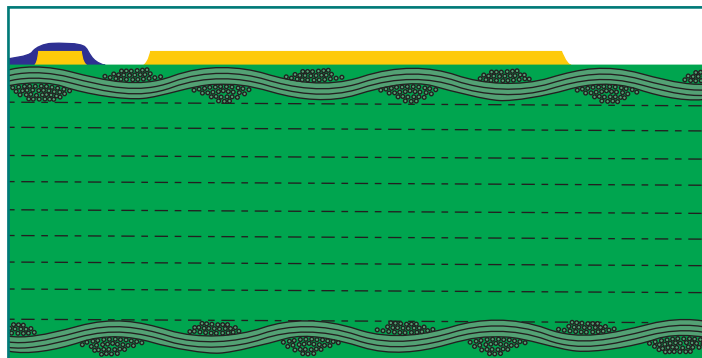


Рис. 11. Паяльная маска (голубой цвет), нанесенная на печатный проводник

собой медные дорожки и контактные площадки (рис. 10).

### 5. Паяльные маски

#### Цель нанесения

Покрытие медного рисунка платы за исключением поверхности монтажных контактных площадок (рис. 11).

#### Виды паяльных масок

В настоящее время существует два основных вида паяльных масок: наносимые трафаретной печатью и фотополимерные.

Обычно платы с неметаллизированными сквозными отверстиями имеют достаточно грубый рисунок и не требуют той точности и аккуратности, какую обеспечивает фотополимерная паяльная маска. Трафаретная печать в таком случае получается дешевле. Если же партия состоит лишь из нескольких плат или заготовок, то стоимость подготовки трафарета превысит стоимость нанесения фотополимерной паяльной маски.

### 6. Маркировка

#### Назначение

Обозначение на плате позиций электронных компонентов.

#### Процесс

Маркировка наносится, как правило, трафаретной печатью на поверхность платы

(обычно со стороны компонентов). При этом используется краска из одно- или двухкомпонентной эпоксидной смолы, которой после нанесения требуется термоотверждение.

#### Трудности трафаретной печати

Трудности, связанные с трафаретной печатью, для плат с неметаллизированными сквозными отверстиями те же, что были описаны в первой части. На односторонние платы маркировка почти всегда наносится со стороны компонентов. А поскольку эта сторона платы достаточно гладкая, достигается более высокое качество печати, чем на двусторонних платах, где маркировка может лечь на рисунок проводников.

Для того чтобы маркировка была хорошо видна и контрастировала с платой, ее основание иногда делают зеленым, тогда целесообразно, например, использовать желтую краску (рис. 12). Лучший контраст достигается с помощью черной или белой краски. Но если предстоит лужение платы, использовать белую краску не следует, так как при пайке оплавлением из-за высоких температур белая краска потемнеет до коричневой. Во избежание подобного изменения цвета нужно производить лужение до трафаретного нанесения маркировки. Однако это может быть затруднительным, поскольку паяльную маску и маркировку обычно наносят в одних и тех же областях платы. Поэтому рекомендуется использовать черную краску.

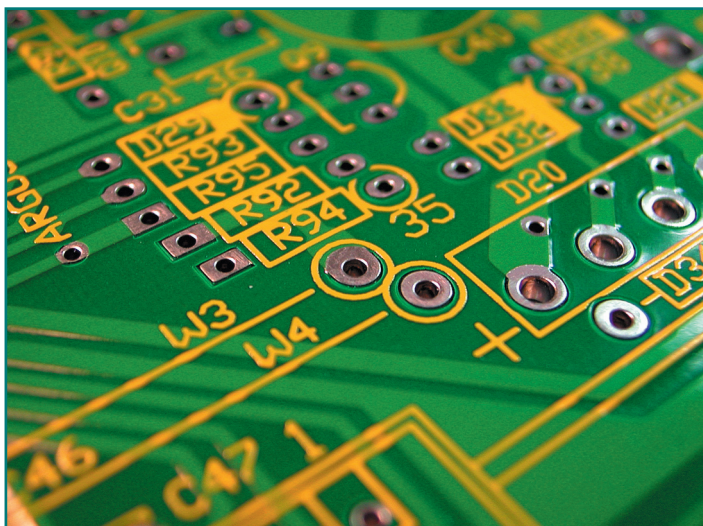


Рис. 12. Пример маркировки платы

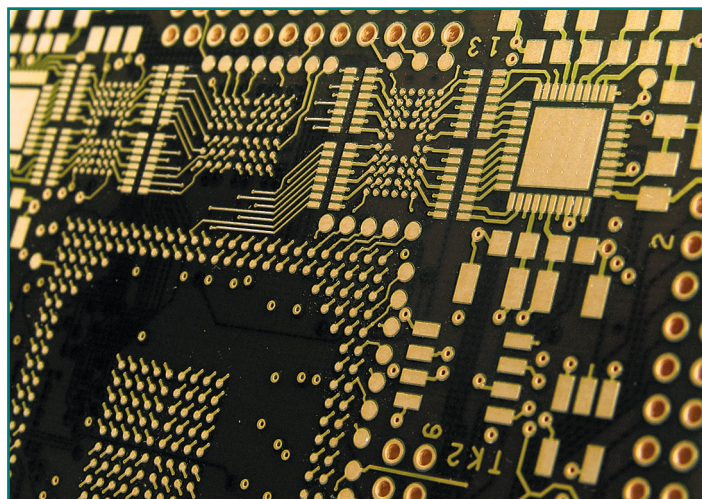


Рис. 13. Финишное покрытие — химически осажденный никель (иммерсионное золото)

### 7. Финишные покрытия

#### Назначение

Сохранение свойств паяемости платы путем нанесения специального покрытия под пайку.

#### Мотивация

Обладая хорошей паяемостью, медь в то же время подвергается быстрому окислению, в результате которого плата становится непригодной для пайки. Слой окиси можно удалить, используя при пайке высокоактивированный флюс, но это сопряжено и с увеличением времени пайки, притом что слой окиси не слишком толст. Однако флюс способен значительно снизить изоляционные свойства диэлектрического основания платы даже после тщательной ее очистки. Особенно сложно очистить поверхность платы под установленными компонентами.

При использовании более слабых видов флюса производителю плат необходимо обеспечить защиту их поверхности от воздействия окружающей среды на паяемость. Существуют следующие виды защитных покрытий:

- лужение погружением;
- химически осажденный никель — иммерсионное золото (рис. 13);
- роликотное горячее лужение;
- органическое покрытие;
- иммерсионное оловянирование.

### Проблемы

Когда следует наносить финишное покрытие: до или после сверления отверстий? В зависимости от выбора возникают следующие проблемы.

В случае сверления отверстий до нанесения финишного покрытия могут быть заполнены некоторые отверстия. В частности, при роликовом оловянировании над отверстиями в контактных площадках может образоваться тонкий слой олова-свинца, а при использовании органического покрытия его капельки иногда попадают в отверстия и блокируют их. При лужении погружением такой проблемы не возникает благодаря последующему выравниванию припоя горячим воздухом. Подобная опасность отсутствует и при иммерсионном оловянировании и нанесении никеля-золота.

При сверлении или пробивке отверстий после травления рисунка проводников могут остаться заусенцы или образоваться кольца незащищенной меди по внутренним краям отверстий, которые окисляются при хранении плат. В худшем случае окисление способно затруднить пайку, и тогда потребуются более сильный флюс.

На луженых контактных площадках плат в результате сверления отверстий может образоваться недопустимые заусенцы. Причина тому — недостаточная плоскостность поверхности припоя на контактных площадках из-за наплывов или в результате неравномерно гальванически нанесенного сплава олова-свинца. Причиной заусенцев могут стать и нарушение режимов сверления, ведь платы обычно сверлят в стопках по три-четыре штуки.

Некоторые производители печатных плат предпочитают сверлить или пробивать отверстия на последнем этапе, чтобы избежать заполнения отверстий при облуживании. Удобно на том же оборудовании произвести оконтуривание платы.

### Процессы создания финишных покрытий под пайку

**Лужение, никель-золото, иммерсионное оловянирование**  
Процесс описан в первой части.

### Роликовое оловянирование

Конструкция оборудования для роликового лужения достаточно проста. В его состав входят два ролика, нижний из которых находится в ванне с расплавленным припоём композиции 63/37 или 60/40. Плата с нанесенным на нее флюсом пропускается между двух роликов, и при этом нижний ролик наносит слой припоя на медные поверхности платы. Современное оборудование благодаря неровной поверхности нижнего ролика позволяет наносить 15–25-мкм слой припоя.

Толщина слоя припоя зависит и от самого рисунка платы. Толщина покрытия развитых поверхностей силовых цепей будет меньше, чем толщина покрытия проводников и контактных площадок. Конкретно указать значе-

ние толщины покрытия сложно, так как в зависимости от используемого оборудования его значение меняется.

### Консервирующее покрытие спирто-канифольным лаком

Защита спирто-канифольным лаком — достаточно распространенный недорогой способ предохранить медную поверхность плат от окисления. Перед нанесением лака следует полностью очистить медную поверхность от всех примесей и окислов.

Лак наносят спреем, погружением или же с помощью ролика. Некоторые производители печатных плат используют флюс на водной основе. Но такой флюс после одного-двух месяцев хранения настолько затвердевает, что становится труднорастворимым при машинной пайке. В результате пайка становится проблематичной.

### Иммерсионное оловянирование

Иммерсионное оловянирование — это химическое нанесение олова на медную поверхность. К сожалению, нанесение более 0,1 мкм олова невозможно, чего явно недостаточно для сохранения свойств паяемости платы на более-менее продолжительный срок.

Как известно, олово образует с медью интерметаллические соединения. А поскольку слой олова очень тонок, то оно по всей толщине стремительно преобразуется в интерметаллические соединения, которые, окисляясь, резко ухудшают паяемость платы за одну-две недели.

Современные технологии иммерсионного оловянирования используют специальный барьерный слой между оловом и медью, предотвращающий образование интерметаллоидов. В результате паяемость сохраняется больше года.

## 8. Сверление и пробивка отверстий

### Назначение отверстий

Монтаж в них выводов электронных компонентов.

### Сверление отверстий

Сверление отверстий выполняется на оборудовании с числовым программным управлением (ЧПУ) и координатным столом. Подобные сверлильные установки часто снабжены автоматической сменой сверл.

### Пробивка отверстий

Пробивка, или прокалывание, отверстий производится на пробивочном оборудовании, состоящем из многочисленных пуансонов и смонтированной в стол матрицы. Благодаря тому что все отверстия пробиваются за один такт, их пробивка в большом количестве обходится дешевле сверления, даже с учетом довольно высоких технологических затрат.

Для того чтобы избежать отслоения медного слоя на контактных площадках, плата должна быть обращена лицевой стороной к пуансону. При пробивке двусторонних плат резко увеличивается вероятность отслоения медных

оснований контактных площадок, поэтому производить их пробивку не следует. Такие платы нужно сверлить.

Необходимое значение давления при пробивке определяется количеством и размером отверстий, толщиной основания платы и его сопротивлением сдвигу. Часто требуется очень высокое давление.

Пробивка производится смещением (сдвигом) базового материала платы. Сила сдвига рассчитывается через сопротивление сдвигу материала и суммарную площадь пробиваемых отверстий (определяется как произведение количества отверстий и площади их внутренних стенок).

Не менее важно усилие, нужное для возврата пуансонов из отверстий после их пробивки. При этом суммарное усилие, требующееся для изъятия пуансонов из пробитых отверстий, как минимум в два раза превосходит давление пробивки.

### Пример

Плата толщиной 1,6 мм из материала FR-2 имеет 2000 отверстий диаметром 0,8 мм. Сопротивление сдвига материала 8,5 кг/мм<sup>2</sup>.

Требуемое для пробивки 2000 отверстий усилие составит:

$$2000 \times \pi \times 0,8 \times 1,6 \times 8,5 = 68\,000 \text{ кг} = 68 \text{ т.}$$

Общее усилие для возврата пуансонов из отверстий будет в два раза больше, что с учетом небольшого запаса соответствует 150 т.

### Размеры пробиваемых отверстий

Учитывая упругость базового материала плат, следует использовать пуансоны чуть большего диаметра, чем заданный диаметр отверстий. Для материала FR-2 толщиной 1,6 мм пуансоны должны быть на 0,1 мм толще номинала пробиваемых отверстий (при комнатной температуре). При конструировании таких плат надо учитывать, что минимальный диаметр отверстий не должен быть меньше половины толщины платы. Следует соблюдать расстояние между краями соседних отверстий не меньше толщины основания платы.

## 9. Фрезерование

### Цель

Отделение плат от заготовок и придание им нужной формы (рис. 14).

### Процесс

Оконтуривание плат может быть реализовано либо фрезерованием, либо нанесением засечек (более подробно в следующих главах). При большом объеме производства платы могут быть раскроены, однако из-за упругости материала их габариты получаются чуть больше требуемых, что следует учитывать при настройке оборудования.

Некоторые базовые материалы на основе бумаги легче раскраиваются, будучи предварительно нагретыми. При этом нужно учитывать коэффициент их термического расширения. К тому же базовые материалы на бу-

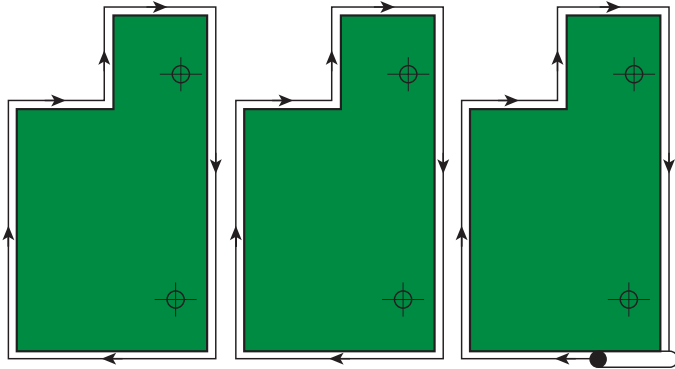


Рис. 14. Выделение рабочих плат из технологической заготовки

мажной основе не всегда имеют одинаковые коэффициенты расширения по осям X и Y.

#### Виды раскроя

Некоторые виды оборудования по оконтуриванию плат позволяют прерывать линию контура платы, чтобы сохранить ее внутри заготовки. Это делается, чтобы всю панель заготовки с раскроенными платами в ней можно было использовать для проведения сборки

и пайки отдельных плат, после чего их отделяют от панели.

#### Края раскроенных плат

Раскроенные платы обычно имеют неровные края, если их контур обрабатывали на изношенном оборудовании, когда вследствие неполноценного сдвига листа базового материала возникает разлохмаченность ее краев (рис. 15).

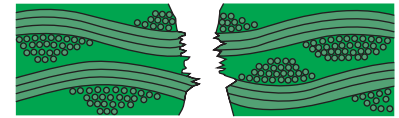


Рис. 15. Неровность краев плат за счет притупления режущих кромок

#### Величина давления

В массовом производстве вырубку плат из заготовки осуществляют вырубным штампом. Значение давления, создаваемого в этом случае, определяется длиной их контура, толщиной основания плат и его сопротивлением сдвигу. Требуемое значение рассчитывается аналогично значению давления пробивки отверстий — как произведение сопротивления сдвигу и сдвигаемой площади (длина контура, умноженная на толщину платы).

К примеру, если плата толщиной 1,6 мм из базового материала FR-2 (сопротивление сдвигу 8,5 кг/мм<sup>2</sup>) имеет формат 150×200 мм, то для раскроя платы требуется давление:

$$(150+200+150+200) \times 1,6 \times 8,5 = 9,52 \text{ кг} = 95 \text{ т.}$$