

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Томский  
государственный университет систем управления и радиоэлектроники»  
(ТУСУР)

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой  
«Управление инновациями»

\_\_\_\_\_ А.Ф. Уваров

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

ПОСОБИЕ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ  
по дисциплине  
**«Конструирование радиоэлектронных средств»**

Составлено кафедрой «Управление инновациями»

Для студентов, обучающихся по направлению подготовки 222000.68 «Инноватика»

Магистерская программа «Управление инновациями в электронной технике»

Форма обучения – очная

**Составитель:**

Ст. преподаватель кафедры УИ

\_\_\_\_\_ Д.С. Медведев

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

Томск 2012 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Компоновка РЭС.....	4
2. Обзор программных продуктов, предназначенных для моделирования электрических принципиальных схем .....	10
3. Обзор программных продуктов, предназначенных для моделирования механических, тепловых, электромагнитных процессов, протекающих в процессе эксплуатации РЭС.....	10
4. Обзор программных продуктов, предназначенных для проектирования печатных плат .....	11
5. Изучение технологии изготовления печатных плат.....	11
6. Освоение одного из пакетов проектирования печатных плат .....	16
7. Радиационные и климатические факторы, влияющие на функционирование РЭС .....	16
8. Источники и пути проникновения влаги в РЭС .....	17
9. Логистика РЭС .....	17
10. Травление и легирование интегральных схем.....	18
ЛИТЕРАТУРА .....	22

## **Введение**

Дисциплина «Конструирование радиоэлектронных средств» дает магистрантам знания по широкому кругу вопросов, связанных с проектированием устройств: базовые принципы проектирования радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) различного назначения; способы расчета и компьютерного моделирования РЭС; внешние факторы, влияющие на работоспособность РЭА; методика и инструменты проектирования плат печатного монтажа и корпусов РЭА, методика поиска и заказа электронных компонентов, модулей, печатных плат и корпусов, основы конструирования интегральных микросхем.

**Целью** курса является формирование у магистрантов целостной картины того, как осуществляется конструирование радиоэлектронной аппаратуры, начиная с анализа технического задания и заканчивая подготовкой к производству радиоэлектронных средств.

В **задачи** курса входит изучение конструкций РЭА, способов расчета и моделирования РЭС, первичное знакомство с современными системами автоматизированного проектирования печатных плат и конструкций корпусов, основы логистики РЭС.

Настоящее пособие для самостоятельной работы предназначено для расширения знаний и закрепления навыков, полученных в ходе проведения лекционных и практических занятий.

## 1. Компоновка РЭС

Компоновка представляет собой размещение элементов РЭС в пространстве или на плоскости. Компоновка – это не абстрагированные схемные обозначения, а геометрическая модель. Компоновочный эскиз – это документ, облегчающий работу конструктора, художника, технолога. По компоновочному эскизу можно выполнить предварительный расчет теплового режима блока и затем по этим данным рассчитать надежность с учетом не только электрических коэффициентов, но и температурного режима. Одна из основных задач при разработке РЭС – правильно скомпоновать элементы схемы электрической (СхЭ) в соответствии с требованиями ТЗ. Эта компоновка определяет работу коллектива разработчиков. При этом осуществляется выбор форм, основных геометрических размеров, ориентировочное определение массы и расположения в пространстве любых элементов или изделий радиоэлектронной техники. Имея СхЭ и компоновочный эскиз узла, можно до разработки рабочих чертежей и изготовления функционального макета оценить возможный характер и величину паразитных связей, рассчитать тепловые режимы узла и т.д. Выделяют четыре типа факторов, учитываемых при компоновке:

1. Внутренние факторы, определяющие особенности компоновки собственно радио- или электронного аппарата.
2. Факторы, связанные с геометрическими размерами элементов, их формой, расположением выводов.
3. Факторы, определяющие паразитные связи между отдельными цепями и элементами.
4. Факторы, обусловленные наличием перегревов внутри изделия.

Часто на компоновку и ее критерии могут оказывать немаловажное влияние связи между оператором и объектом. Эти связи могут действовать непосредственно или косвенно. Используются следующие виды компоновочных работ:

- аналитическая компоновка;
- номографическая компоновка;
- аппликационная компоновка;
- модельная компоновка;
- графическая компоновка;
- натурная компоновка.

При аналитической компоновке оперируют численными значениями различных компоновочных характеристик: геометрическими размерами, объемом, массой. Зная соответствующие компоновочные характеристики элементов изделия и законы их суммирования, можно вычислить компоновочные характеристики изделия и его частей. Трудно в этом случае вычислить объем деталей сложной формы. Ее разбивают на ряд простых фигур, которых может быть очень много. При аналитическом определении объемов замещающих фигур стремятся ввести их количество к минимуму. Принципиально можно вычислить  $V_{уст}$  и другие параметры элементов РЭС, пользуясь выражением

$$KП = K_{\partial} \sum_{i=1}^m N_i,$$

где  $KП$  – компоновочный параметр (вес, объем, площадь);

$K_{\partial}$  – коэффициент дезинтеграции;

$m$  – количество составляющих компоновочных параметров;

$N_i$  – элементарный компоновочный параметр.

Объем:

$$V_{\Sigma} = K_v \left( \sum_{i=1}^n V_{\sigma i} + \sum_{j=1}^m V_{\alpha j} \right);$$

Масса изделия:

$$\sigma = K_{\sigma} \sum_{i=1}^n \sigma_i,$$

где  $V_{\Sigma}$  – общий установочный объем изделия;

$K_n$  – обобщенный коэффициент заполнения блока изделия элементами  $s$  и  $a$ ;

$V_{s i}$  и  $V_{a j}$  – значения установочных объемов однотипных  $V_s$  и  $V_a i$ -х элементов.

Однако непосредственное вычисление таких формул затрудняется ввиду большого объема вычислительной работы. Для определения установочной площади или объема элемент заменяют в соответствии с рисунком 1.1 эквивалентной фигурой (прямоугольником), в который может быть вписан данный элемент вместе с устройствами крепления и монтажа.

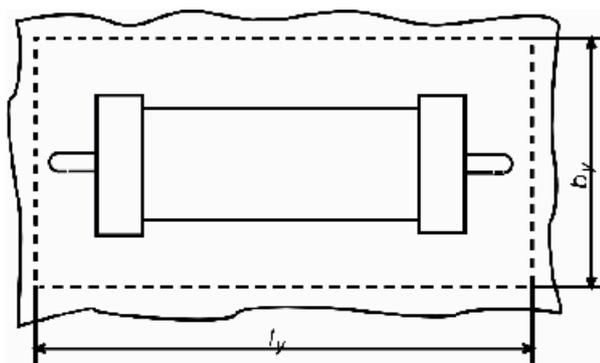


Рисунок 1.1 – Установочные размеры элемента

Минимальный установочный размер ( $l_y$ ) в миллиметрах для элемента в соответствии с рисунком 1.2 следует рассчитывать по формуле

$$l_y = L + 2l_0 + 2R + d,$$

где  $L$  – максимальная длина корпуса, мм;

$l_0$  – минимальный размер до места изгиба вывода, мм;

$R$  – радиус изгиба вывода, мм;

$d$  – номинальный диаметр вывода элемента, мм.

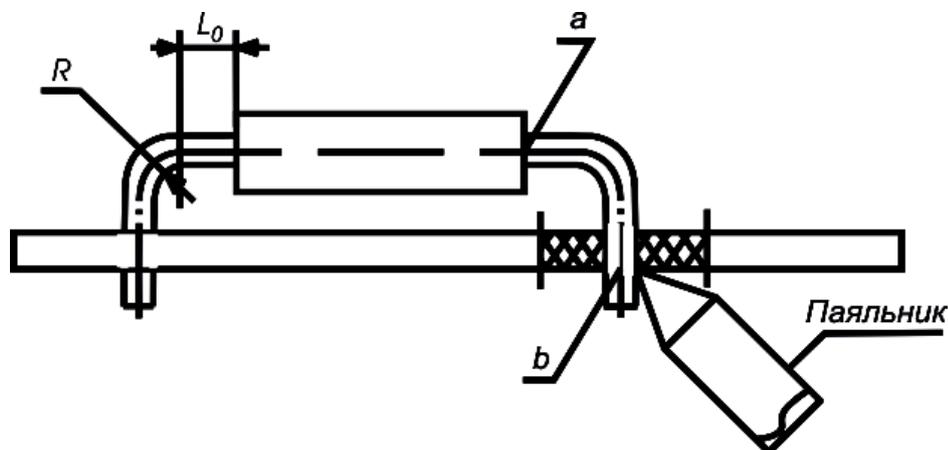


Рисунок 1.2 – Размеры при формовке выводов элемента

При формовке выводов элемента размером от корпуса элемента до места изгиба вывода  $l_0$  считают размер от корпуса элемента вдоль оси вывода до места приложения паяльника или зеркала припоя (размер, определяющий расстояние между точками  $a$  и  $b$  вдоль оси вывода, как указано на рисунке 1.2), в том числе при пайке вывода в металлизированное отверстие.

Минимальный размер от корпуса элемента до места изгиба при формовке выводов  $\lambda_0$ , мм:

- для резисторов, конденсаторов.....0,5;
- для микросхем и других элементов в корпусах типа 4 по ГОСТ 17467.....1,0;
- для полупроводниковых приборов.....2,0;
- для дросселей.....3,5.

Минимальный внутренний радиус изгиба выводов  $R$ , мм:

- для выводов диаметром или толщиной до 0,5 мм включительно.....0,5;
- для выводов диаметром или толщиной свыше 0,5 мм до 1,00 мм включительно.....1,0;
- для выводов диаметром или толщиной свыше 1,00.....1,5.

В технически обоснованных случаях допускается уменьшать внутренний радиус изгиба выводов до 0,3 мм.

Минимальный размер от корпуса элемента до места пайки – 2,5 мм.

Допускается уменьшение указанного размера при условии обеспечения теплоотвода в процессе пайки.

Предельные отклонения размеров между осями двух любых выводов элемента, устанавливаемых в монтажные отверстия, – +0,2 мм, а на контактные площадки – +0,1 мм. Остальные размеры формовки выводов элементов должны быть обеспечены инструментом. Установочные размеры для элементов, устанавливаемых в отверстия печатных плат, следует выбирать кратными шагу координатной сетки 2,5 или 1,25 мм в соответствии с ГОСТ 10317–79. Для законченных систем и аппаратов используют аналитические данные по геометрическим размерам, массе и энергопотреблению. Их сопровождают фотографиями, рисунками или габаритными чертежами. Аналитические методы компоновки включают в себя две трудоемкие операции: расчет отдельных установочных объемов  $V_{уст}$  и их суммирование. Определение веса выполняется по значению  $VS$  довольно просто. Если ограничиться определениями общего объема  $VS$ , геометрических размеров и веса, то использование номограмм упрощает вычисления. Это упрощение будет еще большим, если вместо натурального ряда численных значений оперировать нормированными значениями  $V_{уст}$ . Возможность этого определяется следующим. Рассмотрим блок в виде куба со стороной, равной единице. Его объем будет равен единице заданной размерности. Если ребро куба будет определено с погрешностью

А, малой по отношению к размеру ребра, то легко показать, что погрешность определения объема будет в три раза больше:

$$(1 + \Delta)^3 \alpha + 3\Delta$$

Отсюда видно, что при определении стороны с погрешностью в 5% можно определить объем блока с погрешностью в 15%. Точность определения стороны блока в 5% более чем достаточна не только для стадии эскизного, но и технического проектирования.

### **1.1 Аппликационная компоновка**

Аналитическая и номографическая компоновки выполняются по перечням принципиальных схем. Они не обладают наглядностью и не дают возможности получить пространственные компоновочные эскизы. Эти способы используются только при разработке аванпроекта. После оценки компоновочных характеристик с помощью аналитического расчета или номограмм переходят к использованию других методов. Рассмотрим, например, метод аппликаций. В этом случае на тонком картоне или миллиметровке вычерчивают необходимые проекции элементов. Количество проекций зависит от сложности элемента. Для малогабаритных элементов аппликации вычерчивают в увеличенном масштабе (2:1, 5:1 и более), для крупногабаритных – в уменьшенном. По возможности нужен масштаб 1:1 (наилучшее представление о компоновочных характеристиках). Затем вырезают по контуру изображения элементов, которые и будут собственно аппликациями. Если элемент имеет несколько разнохарактерных выходов или его части могут перемещаться в процессе работы, то все эти особенности необходимо учесть при вычерчивании его аппликации. На аппликациях источников питания, конденсаторов и т.д. следует указывать их полярность около соответствующих выводов. На аппликациях полупроводниковых приборов, трансформаторов, дросселей, модулей необходима цоколевка выводов. На аппликациях с перемещающимися частями пунктиром следует указать их крайние положения и траекторию движения. Такие аппликации очень наглядны, но изготовление их довольно сложно. Поэтому чаще их заменяют прямоугольниками, равными по величине установочной площади элемента в данной проекции. На них даются необходимые условные обозначения. Затем, наложив на комбинацию аппликаций пергамент или работая на столе с подсветкой, можно получить очень наглядный компоновочный эскиз. Наиболее удобен этот способ для компоновки в одной плоскости объемных элементов устройств, выполненных с использованием печатного или одноплоскостного проволочного монтажа. Удовлетворительные результаты

получаются, когда коэффициент использования объема по *V<sub>уст</sub>* не превышает 0,5...0,7 и используются детали с хорошо согласующимися формами и размерами.

### **1.2 Модельная компоновка**

При изготовлении моделей элементов формы их выбирают такими, чтобы они имели достаточно простые, но характерные обводы, на которые большое влияние оказывает материал. Клееные модели из плотной бумаги или тонкого картона могут быть только простых форм в виде цилиндров, конусов, кубов, параллелепипедов и их комбинаций. Выполняются модели из дерева, пенопласта, который хорошо обрабатывается, из пластилина, гипса. Для повышения практичности и более полного соответствия моделей отображаемым ими изделиям их целесообразно окрасить, разместить на них места крепления, дать расположения и цоколевку электрических выводов, оси симметрии и другие необходимые при компоновке сведения. Макеты шасси клеят из картона или фанеры. На них наносят координатную сетку соответствующего размера. Очень наглядны макеты шасси из стекла. Для крепления моделей на них сверлят отверстия диаметром 1 или 1,5 мм для проволочных скрепок. Кроме моделей, позволяющих получить натурное изображение компонуемого изделия, делают «условные» макеты печатных плат. С их помощью можно выполнить "прикидку" соответствующих узлов, на основе которой легко сделать необходимые чертежи.

### **1.3 Графическая компоновка**

Сущность ее – использование упрощенных способов начертания элементов. Графическая компоновка дает максимальное упрощение ручных графических работ. Это достигается упрощением начертания элементов, применением различных трафаретов, штампов, радиотехнических линеек. Повышение наглядности изображения дает использование цвета для выделения элементов различного типа.

### **1.4 Натурная компоновка**

При натурной компоновке используются различные реальные компоненты. Существует три способа выполнения натурной компоновки.

1. Собирают все элементы заданного устройства, плотно укладывают в коробку и, задаваясь коэффициентом заполнения объема, пересчитывают полученное значение в предположительно необходимое. Однако нарушение правил учета вспомогательных и монтажных объемов может привести к значительным ошибкам.

2. Элементы устройства подготавливают к монтажу, дополнительно изгибая их выводы так, чтобы элементы можно было поставить на плоскость, и раскладывают их в необходимом порядке на листе бумаги или миллиметровке. После достижения удобного расположения элементов их места отмечают простым карандашом, а места точек пайки – цветным. Наложив лист пергамина по цветным точкам, выполняют монтажный эскиз, а по контурам – компоновочные эскизы.

3. Используя элементы устройства, выполняют его работающий макет, соответствующий СХЭ. Часто в таком макете величина паразитных связей мала, а требования по электрическому монтажу не соответствуют нормам. В таких случаях после конструкторской разработки приходится дополнительно доводить разработанный образец до соответствия требованиям ТЗ.

## **2. Обзор программных продуктов, предназначенных для моделирования электрических принципиальных схем**

В ходе самостоятельной работы необходимо провести анализ существующих программных решений в области моделирования процессов, происходящих в электронных цепях постоянного и переменного тока, в том числе высокочастотного. Поскольку разработчиками подобного программного обеспечения являются зарубежные компании, следует проводить основной поиск на англоязычных ресурсах. Тем не менее, российские разработки стороной обходить не стоит.

В результате самостоятельной работы требуется составить письменный отчет, в котором будет приведена сравнительная характеристика программных продуктов. Сравнивать следует по таким критериям, как количество функций, удобство интерфейса и цена.

Ниже перечислены программные продукты, на которые стоит обратить особое внимание:

1. NI Multisim
2. OrCAD
3. Microcap
4. Proteus
5. Microwave office

## **3. Обзор программных продуктов, предназначенных для**

## **моделирования механических, тепловых, электромагнитных процессов, протекающих в процессе эксплуатации РЭС**

В ходе самостоятельной работы необходимо провести анализ существующих программных решений в области моделирования механических, тепловых, электромагнитных процессов, протекающих в электронных цепях постоянного и переменного тока, в том числе высокочастотного. В процессе эксплуатации РЭС. Поскольку разработчиками подобного программного обеспечения являются зарубежные компании, следует проводить основной поиск на англоязычных ресурсах. Тем не менее, российские разработки стороной обходить не стоит.

В результате самостоятельной работы требуется составить письменный отчет, в котором будет приведена сравнительная характеристика программных продуктов. Сравнивать следует по таким критериям, как количество функций, удобство интерфейса и цена.

### **4. Обзор программных продуктов, предназначенных для проектирования печатных плат**

В ходе самостоятельной работы необходимо провести анализ существующих проприетарных программных решений в области проектирования плат печатного монтажа. Поскольку разработчиками подобного программного обеспечения являются зарубежные компании, следует проводить основной поиск на англоязычных ресурсах. Тем не менее, российские разработки стороной обходить не стоит.

В результате самостоятельной работы требуется составить письменный отчет, в котором будет приведена сравнительная характеристика программных продуктов. Сравнивать следует по таким критериям, как количество функций, удобство интерфейса и цена.

### **5. Изучение технологии изготовления печатных плат**

#### **Плёночные технологии изготовления ПП**

Повышение требований к качеству ПП и стабильности их параметров привело к созданию ПП на керамических и полиамидных основаниях. Для изготовления таких плат применяются многочисленные методы, основанные на тонко- и толстоплёночной технологии. При использовании тонкоплёночной технологии диэлектрические и токопроводящие слои наносят с помощью одного из методов вакуумного испарения,

которые характеризуются разнообразием применяемых материалов и возможностью создания многослойных структур в одном технологическом цикле. Недостатками метода являются низкая производительность, сложность технологического оборудования, необходимость вакуума.

При использовании толсто пленочной технологии с помощью трафаретной печати создают изоляционные и проводящие слои, которые затем вжигают в основание. Так как керамика в неотожженном состоянии допускает механическую обработку для получения монтажных отверстий, то появляется возможность методом послойного наращивания формировать многослойные структуры с межслойными проводящими переходами. Метод обеспечивает высокую надежность изделий и производительность процесса без применения дорогостоящего оборудования. Однако при изготовлении многослойных проводящих структур требуются материалы со ступенчатыми температурами вжигания. Применение сырых керамических пленок позволяет параллельно изготавливать слои многослойной ПП. Собранные по базовым отверстиям пакеты заготовок спрессовываются при температуре 75-100 °С, а затем спекаются при 1500-1800 °С. Скорость повышения температуры должна быть оптимальной и не приводить к растрескиванию подложки. Существенное уменьшение линейных размеров (на 17-20 %) требует точного расчета при первоначальном нанесении рисунка на сырые листы.

Технологический процесс изготовления многослойной ПП на полиамидных пленках начинается с изготовления двухслойных ПП. С помощью двустороннего фототравления за один цикл формируются монтажные отверстия диаметром 50-70 мкм на пленке толщиной 50 мкм. При травлении образуется конусообразная форма отверстий, удобная для последующей вакуумной металлизации толщиной 1-2 мкм. После избирательного усиления металлизации слоем гальванической меди и технологическим покрытием (Sn—Ni, Sn—Bi, Sn—Pb) платы поступают на сборку. Многослойные ПП получают приклеиванием двухслойных плат через фигурные изоляционные прокладки из полиимида к жесткому основанию, на котором предварительно сформированы контактные площадки. В качестве основания используются металлические пластины с изолирующим слоем (анодированный алюминий, эмалированная сталь и др.). Электрическое соединение отдельных слоев проводится пайкой в вакууме.

### **Покрyтия и маски наружных слоёв**

Покрyтия наружных слоёв выполняются для защиты медных печатные проводников от окисления, для формирования паяльных масок, для создания износоустойчивых соединителей непосредственного контакта.

Защитное покрытие печатных проводников серебром в настоящее время не применяется. У серебра обнаружено неприятное свойство: в условиях повышенной влажности под действием электрического поля происходит рост кристаллов-дендритов по поверхности и в глубину изоляционного основания печатной платы, что приводит к уменьшению электрической прочности изоляции.

Введение в конструкцию ПП паяльной маски является необходимым условием, т.к. обычная стеклоэпоксидная основа печатных плат не обладает достаточной теплостойкостью при температурах пайки (220-240 °С), и без паяльной маски за время, необходимое для проведения пайки, может происходить поверхностная деструкция материала диэлектрика. По методу формирования рисунка паяльные маски делятся на два типа:

- ▲ Паяльные маски, рисунок которых формируется методом трафаретной печати. Как правило, это составы на эпоксидной основе, отверждаемые термически или ультрафиолетовым (УФ) излучением. При относительной дешевизне их недостатком является низкая разрешающая способность и необходимость использования сеткографического трафарета.
- ▲ Паяльные маски, рисунок которых формируется фотолитографическим методом (фоторезистивные маски). Способ позволяет формировать маски любой сложности и в последнее время получил наибольшее распространение. Для этих целей применяются сухие и жидкие фоторезистивные материалы. Размеры окон в маске на платах 3-го и более высоких классов точности должны превышать размеры контактных площадок на величину 0,05-0,1 мм.

Припой на контактные площадки наносится либо электроосаждением (с последующим оплавлением для снятия пористости осажденного металла) либо непосредственно окунанием платы, защищенной маской, в расплавленный припой. Применяются и другие варианты покрытий, обеспечивающие хорошую паяемость:

- ▲ Иммерсионная или химическая металлизация золотом, серебром, палладием. Применяется в ПП для аппаратуры ответственного назначения. Иммерсионный слой металла имеет способность самоограничения при росте и обычно очень тонкий (0,05-0,2 мкм).
- ▲ Органические покрытия, связанные с обработкой меди (составы на основе бензимидазола или имидазола).

Если на плате имеются контакты электрического соединителя непосредственного контакта, на эти контакты должно наноситься покрытие, дающее стабильное низкое

переходное сопротивление и обладающее высокой износоустойчивостью. В таких случаях применяется многослойное покрытие, в верхнем слое которого наносится золото или палладий. Толщина слоя 0,5-2 мкм. Для подслоя золота обычно используют никель, что предохраняет медь от миграции через пористый золотой слой на поверхность.

### **Механическая обработка ПП**

Механическая обработка ПП включает раскрой листового материала на полосы, получение из них заготовок, выполнение фиксирующих, технологических, переходных и монтажных отверстий, получение чистового контура ПП. Размеры заготовок определяются требованиями чертежа и наличием по всему периметру технологического поля, на котором выполняются фиксирующие отверстия для базирования деталей в процессе изготовления и тестовые элементы. При прессовании МПП на технологическом поле образуется зона некачественной пропрессовки пакета, которая удаляется при обработке контура. Ширина технологического поля не превышает 10 мм для односторонних ПП и двусторонних ПП и 20-30 мм для многослойных ПП. Малогабаритные платы размером до 100 мм размещают на групповой заготовке площадью не менее 0,05 м<sup>2</sup> с расстоянием 5-10 мм между ними.

Выбор метода получения заготовок определяется типом производства. В крупносерийном и массовом производстве раскрой листового материала осуществляют штамповкой на кривошипных или эксцентриковых прессах с одновременной пробивкой фиксирующих отверстий на технологическом поле. Для уменьшения вероятности образования трещин, сколов, расслоений и повышения точности обрабатываемый материал прижимают к плоскости матрицы фольгированной стороной. Вырубку в штампах производят как в холодном, так и в нагретом до 80-100 °С состоянии материала. Прогревают материал при получения сложного контура ПП и его толщине свыше 2 мм.

Заготовки ПП в единичном и мелкосерийном производстве получают разрезкой на одно- и многоножевых роликовых или гильотинных ножницах. Применяемые ножи должны быть установлены параллельно друг другу с минимальным зазором 0,01-0,03 мм по всей длине реза.

Фиксирующие отверстия диаметром 4-6 мм выполняют штамповкой или сверлением с высокой точностью (0,01-0,05 мм). Для сверления используют универсальные станки, в которых точность достигается применением кондукторов, или специальное полуавтоматическое оборудование, которое в одном цикле с обработкой пакета заготовок предусматривает пневматическую установку штифтов, фиксирующих пакет. Сверление ведут спиральными сверлами из быстрорежущей стали или твердых

сплавов при скорости 30-50 м/мин и подаче 0,03-0,07 мм/об. Биение сверла при обработке не должно превышать 0,03 мм. Повышение точности сверления фиксирующих отверстий достигается их развертыванием при скорости 10-30 м/мин и ручной подаче инструмента.

Аналогичными методами выполняют и технологические отверстия, которые используют для предотвращения смещения заготовок слоев многослойной ПП в процессе прессования, но к точности их обработки не предъявляются такие жесткие требования, как к точности обработки фиксирующих отверстий, по которым идет совмещение заготовок с фотошаблонами и отдельных слоев в пакете.

Монтажные и переходные отверстия получают также штамповкой и сверлением. Пробивку отверстий на универсальных или специальных штампах применяют в тех случаях, когда отверстие в дальнейшем не подвергается металлизации и его диаметр не менее 1 мм. При пробивке отверстий в односторонних фольгированных диэлектриках применяют штампы с увеличенным зазором между пуансоном и матрицей, обеспечивающим затягивание фольги в отверстие, чем достигается его частичная металлизация. Если плата имеет высокую плотность монтажа, большое количество отверстий и малый шаг координатной сетки, то применяют последовательную пробивку на нескольких штампах. Применение универсальных штампов, в которых необходимое количество отдельных пуансонов набирается в специальном трафарете, делает процесс штамповки экономичным в условиях мелкосерийного производства.

Металлизированные монтажные и переходные отверстия обрабатывают с высокой точностью на специализированных одно- и многошпиндельных сверлильных станках с ЧПУ. Эти станки имеют координатный стол с автоматической системой позиционирования, сверлильные шпиндели с бесступенчатым регулированием скорости и систему ЧПУ позиционного типа. В зависимости от размеров обрабатываемых плат и требуемой производительности станки можно оснастить различным числом шпиндельных головок. Каждый шпиндель имеет независимый привод скоростей, в связи с чем за одну установку и по одной общей программе могут обрабатываться отверстия разных диаметров.

Для обработки металлизированных отверстий используются специальные спиральные сверла из металлокерамических твердых сплавов. Их стойкость при обработке фольгированных стеклотекстолитов составляет 3000-7000 тыс. отверстий, при наличии лакового покрытия на ПП стойкость инструмента уменьшается в 2-3 раза.

Повышение температуры в зоне обработки при сверлении слоистых пластиков приводит к наволакиванию размягченной смолы на кромки контактных площадок, препятствующему последующей металлизации отверстий. Для устранения этого

недостатка предлагается ряд усовершенствований: применение охлаждающих агентов, не содержащих смазок (вода, водяной туман, очищенный сжатый воздух и т. п.); двойное сверление; наложение на поверхность платы алюминиевых листов; разработка сверл с дополнительными режущими кромками, направленными в сторону, противоположную основному, и т. п. Однако все перечисленные способы оказываются малоэффективными в условиях массового производства. Предлагаемый фирмой IBM (США) процесс лазерного фрезерования хотя и устраняет наволакивание смолы на торцы контактных площадок, но не исключает ее стеклование на поверхности стенок отверстия. Наиболее эффективным средством устранения наволакивания признана последующая гидроабразивная очистка.

Чистовой контур ПП получают штамповкой, отрезкой на гильотинных ножницах или на специальных станках с прецизионными алмазными пилами, фрезерованием. Повышение производительности фрезерных работ достигается групповой обработкой пакета ПП толщиной 10-30 мм. Для исключения повреждения их поверхностей между отдельными заготовками прокладывают картон, а пакет помещают между прокладками из листового гетинакса.

В последнее время для чистовой обработки все большее распространение получают контурно-фрезерные многошпиндельные станки с ЧПУ, которые обеспечивают хорошее качество кромок ПП и точность размеров в пределах  $\pm 0,025$  мм, позволяют обрабатывать внешние и внутренние контуры за одно крепление, характеризуются высокой производительностью (1500-2000 плат/ч) и надежностью. Они снабжены устройствами для автоматической смены фрез, защитными скафандрами для ограждения оператора от шума, пыли и стружки при обработке, бесступенчатым регулированием частоты вращения инструмента в диапазоне 15-60 тыс/мин.

## **6. Освоение одного из пакетов проектирования печатных плат**

На занятии потребуется самостоятельно выбрать свободно распространяемый программный продукт, предназначенный для разработки печатных плат и освоить его на базовом уровне. Рекомендуется использовать материалы глобальной сети Интернет, в частности, видео уроки.

Цель настоящей самостоятельной работы – усвоить разницу между проприетарными программными продуктами и свободно распространяемыми.

## **7. Радиационные и климатические факторы, влияющие на функционирование РЭС**

Условия эксплуатации электронной аппаратуры и систем характеризуются комплексом параметров, называемых внешними воздействующими факторами, которые имеют различную физико-химическую природу и изменяются в весьма широких пределах. Эти факторы принято разделять на радиационным, климатические и механические.

К радиационным факторам относят: космическую радиацию; ядерную радиацию от реакторов, атомных двигателей, радиационно-опасных ситуаций; облучение потоком гамма-фотонов, нейтронов, бета-частиц, альфа-частиц, протонов, дейтронов.

К климатическим факторам относят: изменение температуры и влажности окружающей среды; тепловой удар; изменение атмосферного давления; наличие движущихся потоков пыли и песка; присутствие активных веществ в окружающей атмосфере; наличие солнечного облучения, грибковых образований (плесень), микроорганизмов, насекомых, грызунов; взрывоопасной и легковоспламеняющейся атмосферы; дождя и брызг; присутствие в окружающей среде озона.

На занятии необходимо изучить соответствующие разделы дополнительной литературы [1, с.36-40, 41-44].

## **8. Источники и пути проникновения влаги в РЭС**

В процессе производства, хранения и эксплуатации РЭА может подвергаться дестабилизирующему воздействию внешней среды. При изучении данного раздела следует обратить внимание на способы защиты от повышенной температуры, влажности и механических воздействий и конструктивные решения, соответствующие этим способам.

При рассмотрении способов влагозащиты следует рассмотреть классификацию металлических и лакокрасочных покрытий по различным признакам, конструкции и материалы монолитных и полых оболочек.

В процессе самостоятельной работы следует изучить соответствующие разделы вспомогательной литературы [2, с. 245–250], [3, с. 191–211].

## **9. Логистика РЭС**

Задачи для самостоятельной проработки:

1. Ознакомиться с документами «Указание Министерство РФ по связи и информатизации 17-у от 24.03.03. О порядке оформления разрешений на ввоз РЭС и ВЧ устройств из-за границы»

[http://www.vch.ru/cgi-bin/guide.cgi?table\\_code=14&action=show&id=2172](http://www.vch.ru/cgi-bin/guide.cgi?table_code=14&action=show&id=2172)

2. Сделать обзор услуг, предоставляемых компаниями контрактного производства. Обратит внимание на возможность предоставления собственной базы элементов и возможность корпусирования.

## 10. Травление и легирование интегральных схем

### Травление

Травление — процесс поверхностных слоёв диоксида кремния, металлов и поликремния, на заданную глубину, со всей поверхности (общее травление) или в соответствии с рисунком, сформированным резистом (локальное травление).

По ориентации в пространстве процессы травления разделяют на:

- ▲ **изотропный** — не зависит от кристаллической структуры материала;
- ▲ **анизотропный** — зависит от кристаллической структуры материала.

При изотропном травлении вытравливание (коррозия) происходит во всех направлениях с одинаковой скоростью на немаскированных участках на поверхности, формируя, таким образом, круглую форму поперечного сечения.

При анизотропном травлении скорость травления различна в разных кристаллографических направлениях вещества. Наименьшая скорость травления в направлении где плотность атомов максимальна (111), наибольшая — в направлении где плотность атомов минимальна (100).

По применяемой среде методы травления разделяются на жидкостные и сухие. Из жидкостных методов травления в производстве ИС используется химическое травление, из сухих — плазменное травление.

**Жидкостное химическое травление** — травление с использованием растворов, содержащих травители (обычно это кислотные смеси), которые вступают в химическую реакцию с материалами, подлежащими удалению.

Химические растворы для жидкостного травления помещаются в ванны для травления с контролируемой температурой, изготовленные из полипропилена (PP), огнестойкого полипропилена (FRPP) или поливинилхлорида (PVC). Обеспечивает достаточно высокую точность по глубине (вплоть до мономолекулярного слоя), регулируемую параметрами процесса (концентрация, температура, время).

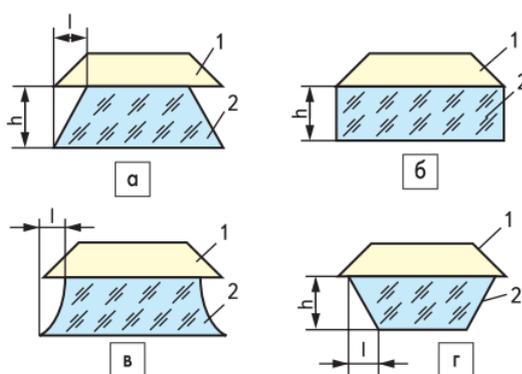
**Сухое плазменное травление** — травление с использованием низкотемпературной плазмы в среде инертных газов или в среде, содержащей активные газы

Плазма представляет собой ионизированный газ, состоящий из почти равных

количеств положительно и отрицательно заряженных частиц. В методах плазменного травления используют слабоионизированные газы, получаемые с помощью электрических разрядов при низких давлениях. Неупругие столкновения молекул газа с электронами, разогнанными электрическим полем, приводят к образованию ионов и свободных радикалов, которые могут вызвать травление за счет физических и химических взаимодействий с обрабатываемыми поверхностями. В зависимости от сочетания давления и энергии ионов плазмы характер процессов может меняться от чисто физического (ионное травление, распыление) до чисто химического (плазмохимическое травление).

**Боковое подтравливание** — подтравливание под резист через вытравленную область. Боковое подтравливание является основным проблемным местом в травлении.

С травлением в жидких травителях связано не только явление бокового подтравливания, но и разброс величины подтравливания в совокупности элементов одного слоя. При сухих методах существенно уменьшено боковое подтравливание, характерное для химического жидкостного травления, поэтому клин травления уменьшается и вертикальный профиль рельефного рисунка элементов приближается к идеальному. Кроме того, сухое травление слабо зависит от адгезии резиста к подложкам, которые после обработки не требуют операций промывки и сушки. В современном производстве



применяются сухие методы травления.

Рисунок 10.1 – Профили элементов рельефного рисунка после травления: а) жидкостного; б) ионно-химического; в, г) плазмохимического (1 — слой ФР; 2 — технологический слой)

Чем меньше проектная норма технологического процесса, тем большее влияние на качество ИС оказывают дефекты поверхности полупроводника, возникающие после травления. Уменьшить дефекты структуры ИС можно путём расплавления элементов этой структуры. Такая техника получила обозначение Self-Perfection by Liquefaction (SPEL), что можно перевести как «самосовершенствование путем сжижения». После расплавления

элементов структуры ИС появляется возможность манипулирования ими, используя для этого силы поверхностного натяжения жидкости. Метод SPEL позволяет получать практически идеальные геометрические формы – окружность, прямые линии и пр.

Главным препятствием перед внедрением подобной техники в производственный цикл изготовления интегральных микросхем являлась высокая температура плавления полупроводниковых структур, что могло привести не только к плавлению необходимого участка, но и всего кристалла. Метод SPEL предусматривает использование эксимерного лазера, при помощи которого можно нагревать небольшой участок на поверхности микросхемы, а значит, осуществлять плавление только необходимой части структуры, не затрагивая сам кристалл. Второй проблемой является поведение самого расплавленного материала, который стремится «расползтись» по поверхности и тем самым увеличить ширину компонентов, что недопустимо. Для устранения расплзания необходимо поднести к расплавленным компонентам пластину. Поднимая пластину над поверхностью кристалла можно регулировать высоту и толщину компонентов (удалось уменьшить толщину микролиний сразу в пять раз). Нет необходимости прикасаться пластиной к расплавленному материалу, достаточным условием является наличие небольшого зазора между ней и компонентами микросхемы. Это позволит избежать «загрязнения» полупроводника или металла материалом, из которого изготовлена сама пластина.

### **Легирование**

**Легирование** — процесс внедрения примесей для создания зон разного типа проводимости, донорной (для n проводимости — фосфор P, мышьяк As, сурьма Sb) или акцепторной (для p проводимости — бор B, галлий Ga, индий In, алюминий Al) примеси. Кроме этого, легирование может быть направлено на достижение иных технологических целей, например, легирование бором останавливает процесс травления основного материала.

При создании элементов структуры ИС легирование выполняют через защитную маску из двуокиси кремния.

В производстве ИС применяют два метода легирования:

- ▲ диффузия (термодиффузия);
- ▲ ионная имплантация.

**Диффузия** — процесс переноса материи или энергии из области с высокой концентрацией в область с низкой концентрацией.

Метод **термодиффузии** заключается в том, что пластина подвергается воздействию

высокой температуры в среде содержащей необходимые добавки (примеси) в парообразном состоянии.

Обычно пластины укладывают в кварцевый носитель или лодочку и помещают в диффузионную печь. Скорость диффузии различных примесей в кремний в основном зависит от температуры поэтому очень важен температурный контроль. Диапазон температур колеблется от 900 до 1300 °С в зависимости от конкретной примеси.

Нагревание кремниевой пластины при высокой температуре позволяет атомам примеси диффундировать в кристаллическую структуру. Примеси перемещаются медленнее через диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ), чем через сам кремний, позволяя тонкой окисной пленке служить в качестве маски. После накопления достаточного количества примесей пластины удаляются из печи, и диффузия завершается.

Для обеспечения максимального контроля в большинстве случаев диффузия проводится в два этапа: предварительного осаждения и загонки. Предварительное осаждение, или диффузия с постоянным источником, осуществляется в печи, где температура выбирается с целью достижения наилучшего контроля над количеством примесей. После сравнительно короткого этапа предварительного осаждения пластину физически перемещают в другую печь, обычно с более высокой температурой, и с помощью второй тепловой обработки примесь загоняется на требуемую глубину.

**Ионная имплантация** — внедрение в полупроводниковый материал ионизированных атомов, разогнанных в электрическом поле (разность потенциалов в десятки тысяч вольт) и обладающих высокой энергией.

Атомы (сканирующий пучок) бомбардируют пластину и внедряются на разную глубину в зависимости от их массы и энергии. Так же, как при обычной диффузии, окисный слой или фоторезистивная маска избирательно маскируют пластину от ионов.

Обычно после ионного легирования выполняется этап высокотемпературного отжига при температуре от 900 до 1000 °С. Это отжиг, выполняемый с помощью лазерного луча, или импульсный отжиг с источником электронного пучка. Отжиг позволяет уменьшить число дефектов регулярной кристаллической решетки на внешней поверхности легированной пластины, вызванных бомбардировкой ионами примесей.

Эта технология является намного более точной, чем диффузионный метод, и применяется для создания скрытых слоев, р- и п-карманов, доменов в кристалле, формирующих транзисторные каналы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры : Учебник для вузов / К. И. Билибин [и др.] ; под общ. ред. В. А. Шахнова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 528 с.: ил.
2. Шимкович, А. А. Проектирование несущих конструкций электронных устройств : учеб. пособие / А. А. Шимкович. – Мн. : Адукацыя і выхаванне, 2003. – 308 с.: ил., вкл.
3. Ненашев, А. П. Конструирование радиоэлектронных средств : учебник / А. П. Ненашев. – М. : Высш. шк., 1990. – 432 с.: ил.