

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.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ И
ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ**

по дисциплине

«Конструирование радиоэлектронных средств»

Составлены 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
Лабораторная работа №1. Изучение и анализ конструкции персонального компьютера	4
Лабораторная работа №2. Контрольное задание	9
Лабораторная работа №3. Пример расчета схемы электрической принципиальной усилителя нижних частот	9
Лабораторная работа №4. Пример построения и анализа модели усилителя нижних частот в программе Multisim	12
Лабораторная работа №5. Контрольное задание	14
Лабораторная работа №6. Тепловые режимы работы РЭС	15
Лабораторная работа №7. Расчет параметров печатных проводников	19
Практическое занятие №1. Конструкторско-технологический расчет печатных плат (ПП)	26
Практическое занятие №2. Работа в системе автоматизированного проектирования (САПР)	28
Практическое занятие №3. Организационно-экономические аспекты производства ПП	29
Практическое занятие №4. Создание конструкторско-технологической документации	35
Практическое занятие №5. Защита РЭС от механических воздействий	39
Практическое занятие №6. Экранирование РЭС	44
Практическое занятие №7. Логистика РЭС	46
Практическое занятие №8. Рассмотрение способов наращивания слоев интегральной микросхемы	54
ЛИТЕРАТУРА	64

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 предназначено для закрепления знаний, полученных на лекционных занятиях, а также для развития навыков расчета электронных схем, параметров печатных проводников, расчета тепловых режимов и многое другое.

Лабораторная работа №1. Изучение и анализ конструкции персонального компьютера

Несмотря на то, что сегодня персональный компьютер (ПК) в привычном понимании (системный блок, монитор, клавиатура, мышь и прочая периферия) постепенно замещается такими альтернативными платформами, как ноутбук, нетбук или планшетный компьютер, знание физической архитектуры ПК, умение ее укомплектовать (выбрать), разобрать и собрать все еще актуально.

Настоящее практическое занятие призвано ознакомить студентов с архитектурой ПК, делая акцент на конструкторских деталях: типоразмеры корпусов системных блоков, параллельные и последовательные физические интерфейсы, коммуникационные и силовые разъемы и т.д.

Повторимся, что физически персональный компьютер состоит из следующих частей:

- системный блок;
- устройства ввода/вывода: клавиатура, мышь, микрофон, монитор, наушники/колонки;
- периферийные устройства: принтер, копир, сканер, многофункциональное устройство (МФУ), внешние накопители и т.п.

Системный блок

Системный блок включает основные вычислительные мощности персонального компьютера. Современные системные блоки внешне представляют собой вертикально ориентированные стальные блоки с фронтальной панелью, выполненной из пластмассы (рис.1.1).



Рисунок 1.1 – Типовой корпус системного блока

В плане конструкции корпус обладает двумя характеристиками: форм-фактор и типоразмер. Форм-фактор корпуса определяет его совместимость с материнской платой. Наиболее распространенными форм-факторами являются:

1. AT
2. ATX¹
3. microATX

Самым массовым на сегодняшний день является форм-фактор ATX. Подавляющее большинство материнских плат совместимы именно с ним.

Иногда в офисах можно встретить системный блок очень малого размера (рис.1.2). Их называют «тонкими клиентами» и для них разработана своя спецификация материнской платы – mini-ITX. Особенностью данного форм-фактора является небольшой размер (170x170 мм).

¹ ATX – Advanced Technology eXtended.



Рисунок 1.2 – Тонкий клиент

Второй параметр корпуса системного блока – типоразмер – также представлен в нескольких модификациях:

- MiniTower;
- MidiTower;
- BigTower;
- SuperFullTower.

Наиболее распространенный на сегодня типоразмер – MidiTower.

Устройства ввода/вывода

Для вывода визуальной информации в персональном компьютере используется монитор. Системный блок с монитором связан посредством проводного интерфейса. Не секрет, что абсолютное большинство современных мониторов выполнены по жидкокристаллической технологии, то есть в качестве матрицы используется дисплей из жидкого кристалла (ЖК). Как правило, такие мониторы являются широкоформатными, то есть горизонтальный размер больше вертикального (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Внешний вид современного монитора

Остановимся на интерфейсах, которые используются для подключения монитора к системному блоку. В таблице 1.1 представлены наиболее распространенные из них:

Таблица 1.1 – Типы интерфейсных кабелей для подключения монитора к системному блоку

Наименование	Краткая характеристика	Внешний вид
VGA	Используется разъемы типа D-sub. Они содержат 3 параллельных ряда контактов или гнезд, обычно окружённых металлическим экраном в форме латинской D. На рисунке изображен штырьковый разъем, монтируемый на кабель. На материнской плате расположена ответная часть. Поскольку интерфейс является аналоговым, в настоящее время он постепенно вытесняется такими цифровыми интерфейсами, как DVI, HDMI, DisplayPort.	
DVI	Предназначен для передачи видеоизображения на цифровые устройства отображения, такие как жидкокристаллические мониторы и проекторы.	
HDMI	Разъём HDMI обеспечивает цифровое DVI-соединение нескольких устройств с помощью соответствующих кабелей. Основное различие между HDMI и DVI состоит в том, что разъём HDMI меньше по размеру, а также поддерживает передачу многоканальных цифровых аудиосигналов.	
DisplayPort	DisplayPort предполагается к использованию в качестве наиболее современного интерфейса соединения аудио и видеоаппаратуры, в первую очередь для соединения компьютера с дисплеем, или компьютера и систем домашнего кинотеатра.	

Для ввода информации в компьютер используются клавиатура и мышь. Отметим только, что они могут соединяться с системным блоком через проводные интерфейсы (PS/2 или USB) и беспроводные (Bluetooth). В первом случае передача информации и питания осуществляется по одному и тому же кабелю. Во втором случае информация передается по радиоканалу, а питания обеспечивается аккумуляторными батареями. На рис.1.4 приведен пример внешнего вида беспроводных клавиатуры и мыши.



Рисунок 1.4 – Беспроводные клавиатура и мышь

Питание персонального компьютера

Как и любому электронному устройству, ПК для работы требуется электрическая энергия. Ее обеспечивает блок питания, расположенный внутри системного блока (рис.1.5).



Рисунок 1.5 – Красным выделен блок питания.

На вход блока питания подается напряжение из бытовой электросети 220 В, 50 Гц посредством силового кабеля (рис.1.6).








Рисунок 1.6 – Внешний вид силового кабеля

Следует отметить, точно такой же кабель используется для питания мониторов и некоторых периферийных устройств, например, многофункциональных устройств МФУ.

Память персонального компьютера

В персональном компьютере физическая память представлена несколькими типами: оперативная память, постоянная память на магнитном носителе, постоянная память на полупроводниках (жесткие диски), память на оптических накопителях (DVD, Blue-ray Disk), внешние накопители, которые также могут быть твердотельными или магнитными. Кроме вышеперечисленных, существует так называемая кэш-память, которая является частью процессора. Ее мы рассматривать не будем. В таблице 1.2 представлено краткое описание различных видов накопителей.

Тип памяти	Название накопителя	Внешний вид накопителя
Оперативная память		
Постоянная память на магнитном носителе	Жесткий диск (HDD)	
Постоянная память на полупроводниках	Твердотельный накопитель (SSD)	
Внешняя память	USB-накопитель (флэш-память)	
Внешняя память	Внешний магнитный USB-накопитель	

Задание на практику:

1. Разбиться на подгруппы по 3-4 человека.
2. Занять рабочее место с персональным компьютером.
3. Проверить, что ПК и монитор отключены от сети.
4. Отсоединить от системного блока все силовые и коммуникационные кабели.
5. Снять левую боковую крышку (если смотреть на лицевую панель) системного блока, открутив крепежные винты.
6. Отсоединить от материнской платы все накопители (жесткие диски, модули оперативной памяти, оптические накопители).
7. Произвести все действия в обратном порядке в присутствии преподавателя с подробными комментариями.
8. Подключить к сети ПК и монитор и нажать кнопку включения. Удостовериться, что операционная система запущена, и в ней отражены все накопители.

Лабораторная работа №2. Контрольное задание.

Используя корпоративную информацию компании «Элекард Девайсез», составить аналитический отчет о функциональных особенностях и конструктивных элементах (корпус, крепеж, внешние разъемы, элементы памяти и питания) цифровой телевизионной приставки iTelec STB 830. В отчете должно содержаться общее описание продукта, спецификация корпуса, печатной платы и разъемов.



Рисунок 2.1 – Внешний вид цифровой телевизионной приставки iTelec STB 830

Лабораторная работа №3. Пример расчета схемы электрической принципиальной усилителя нижних частот

Задача любого усилителя – увеличить амплитуду электрических колебаний, присутствующих на его входе, до заданной величины, за счет энергии источника питания. Отношение амплитуд выходного и входного напряжений называется коэффициентом усиления. Усилители применяются в звуковой технике для усиления сигналов, несущую звуковую информацию, радиотехнике, измерительной технике, автоматике и т.д.

На практическом занятии **требуется** по заданной принципиальной схеме на рис. 3.1 для транзистора **BF720** (аналог отечественного транзистора **КТ315Б**) и параметрам из таблицы 3.1 рассчитать номиналы и выбрать все электронные компоненты. Вариант выбирается в соответствии с порядковым номером в журнале посещаемости.

Таблица 3.1 – Варианты заданий на практическое занятие

Параметры\Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Напряжение питания, В	20	24	20	24	20	24	20	24	20	24
Амплитуда напряжения на выходе, В	3,5	4	4,5	5	3,5	4	4,5	5	4	4,5
Сопrotивление нагрузки, кОм	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1
Внутреннее сопротивление источника сигнала, кОм	0,5	1	1,5	0,5	1	1,5	0,5	1	1,5	0,5
Нижняя рабочая частота при допустимом коэффициенте	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28

частотных искажений $M_n = 3$ дБ										
Минимальная температура окружающей среды	-15	-13	-11	-9	-7	-5	-3	-1	1	3
Максимальная температура окружающей среды	25	27	29	31	33	35	37	39	41	43

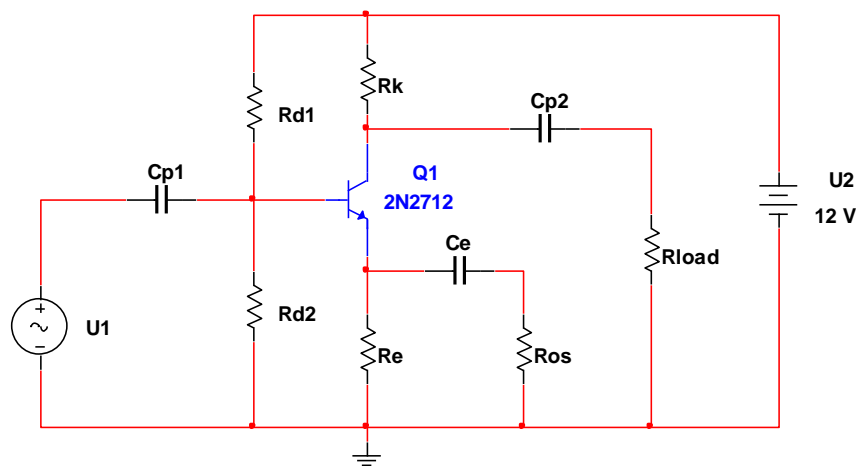


Рисунок 3.1. Схема усилителя нижних частот

Пример расчета усилителя нижних частот

Примечание: приводятся только расчеты параметров рабочей точки и элементов, а также амплитуда входного сигнала. Формулы для промежуточных расчетов можно найти в справочной литературе [2].

Напряжение в рабочей точке:

$$U_0 := U_{\min} + U_{\text{out}} + \Delta U_{\text{ke}} = 7 \text{ В}$$

Сопротивление коллекторного резистора:

$$R_k := \frac{E - U_e - U_0 - U_{\text{out}}}{I_{\min} + \frac{U_{\text{out}}}{R_H}} = 1.167 \times 10^3 \quad \underline{R_k} := 1200 \text{ Ом}$$

Ток в рабочей точке:

$$\underline{I_0} := I_{\min} + \frac{U_{\text{out}}}{R_k} + \frac{U_{\text{out}}}{R_H} = 0.01 \text{ А}$$

Сопротивление резистора в цепи эмиттера:

$$\underline{R_e} := \frac{U_e}{I_0} = 491.803 \quad \underline{R_e} := 470 \text{ Ом}$$

Сопротивление верхнего резистора делителя:

$$R_1 := \frac{E \cdot R_b}{U_e + U_{\text{be0}} + R_b \cdot I_b} = 4.269 \times 10^3 \quad \underline{R_1} := 4300 \text{ Ом}$$

Сопротивление нижнего резистора делителя:

$$R_2 := \frac{R_1 \cdot R_b}{R_1 - R_b} = 1.359 \times 10^3 \text{ Ом} \quad \underline{R_2} := 1300 \text{ Ом}$$

Напряжение источника сигнала:

$$E_c := \frac{U_{\text{out}}}{K_e} = 0.128 \text{ В}$$

Емкость входного разделительного конденсатора:

$$C_1 := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_H \cdot (R_{\text{in}} + R_c) \cdot \varphi_1} = 3.569 \times 10^{-5} \quad \underline{C_1} := 36 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

Емкость выходного разделительного конденсатора:

$$C_2 := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_H \cdot (R_H + R_k) \cdot \varphi_2} = 2.062 \times 10^{-5} \quad \underline{C_2} := 20 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

Емкость блокировочного конденсатора в цепи эмиттера:

$$C_3 := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_H \cdot \left(\frac{R_c \cdot R_b}{R_c + R_b} + h_{113} \right) \cdot \varphi_1} = 5.183 \times 10^{-5} \quad \underline{C_3} := 56 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

Лабораторная работа №4. Пример построения и анализа модели усилителя нижних частот в программе Multisim

На практическом занятии требуется с помощью системы моделирования Multisim проверить работоспособность рассчитанной на предыдущем занятии схемы. Для этого потребуется:

1. Запустить программу Multisim.
2. Ввести принципиальную схему.
3. Задать рассчитанные номиналы электронных компонентов.
4. Задать параметры источника сигнала.
5. Подсоединить к соответствующим точкам схемы измерительные приборы.
6. Запустить моделирование.
7. Проверить соответствие рассчитанных параметров и параметров, полученных с помощью моделирования.

Ниже на рис.4.1 и 4.2 приводятся примеры построения и анализа модели схемы, рассчитанной ранее.

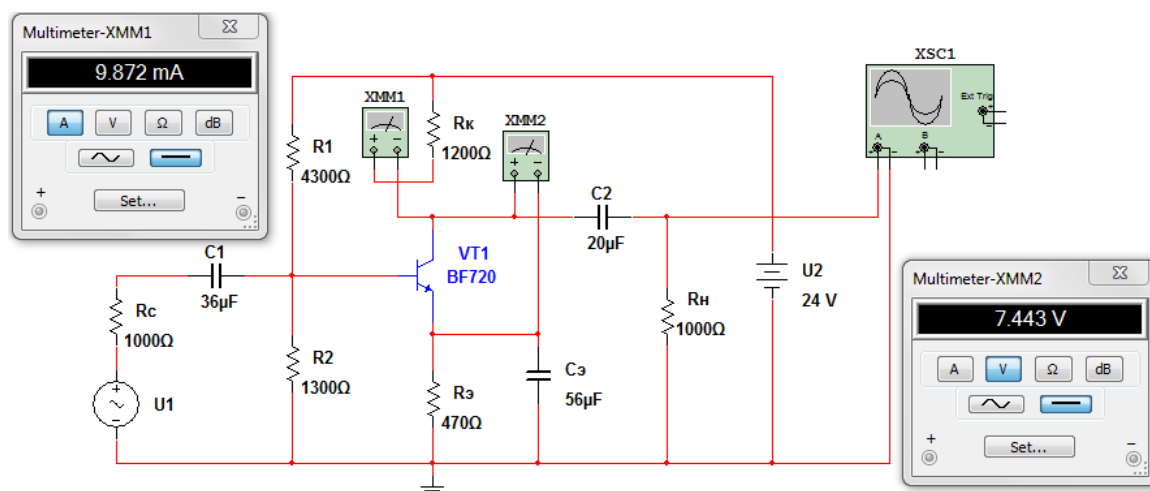


Рисунок 4.1 – Демонстрация рассчитанных номиналов элементов и параметров рабочей точки

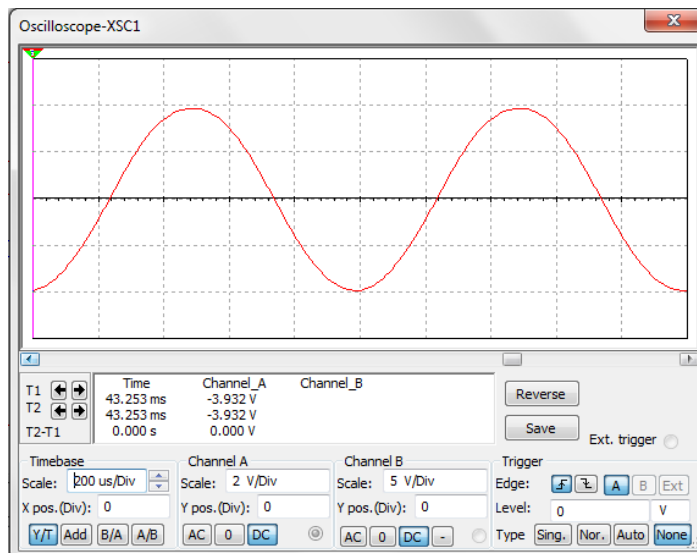


Рисунок 4.2 – Показания осциллографа

Следует заметить, что рассчитанные и полученные в модели Multisim параметры различаются. Напряжение покоя в модели больше на 0,4 В, ток покоя меньше на 0.2 мА, амплитуда выходного напряжения равна 4 В хотя по заданию требовалось 5 В. Это связано с тем, что параметры модели транзистора BF720 могут отличаться от параметров отечественного аналога КТ315Б.

Лабораторная работа №5. Контрольное задание.

Используя рассмотренную ранее схему усилителя нижних частот (рис.5.1) и уже полученную модель в программе Multisim, но с другими входными и выходными параметрами, рассчитать схему, выбрать элементы, построить модель в Multisim и убедиться в правильности расчетов.

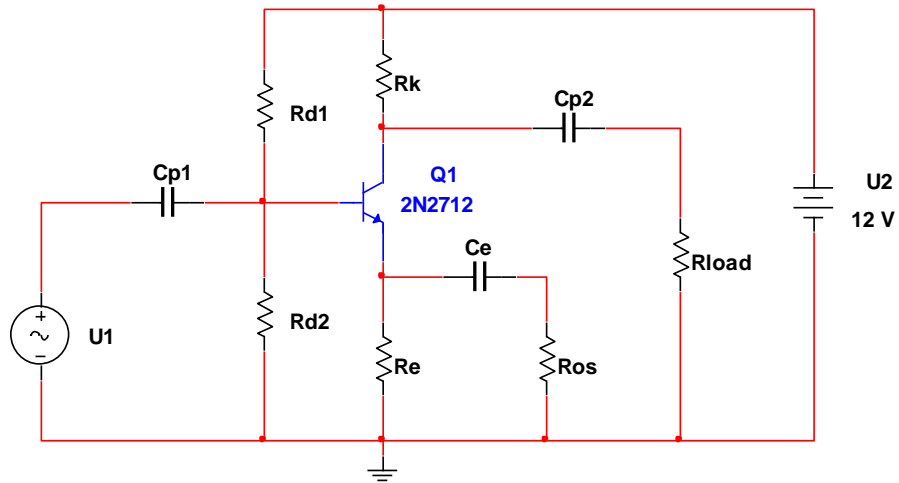


Рисунок 5.1 – Схема электрическая принципиальная усилителя нижних частот

Результатом выполнения задания должен стать письменный отчет и файл модели.

Лабораторная работа №6. Тепловые режимы работы РЭС.

На занятии рассматриваются инженерные методики расчета теплового режима РЭС в герметичном, перфорированном корпусе и с принудительной вентиляцией.

Тепловой режим РЭС в герметичном корпусе рассчитывается в следующем порядке:

1. площадь поверхности корпуса блока:

$$S_x = 2[L_1 L_2 + (L_1 + L_2)L_3];$$

2. площадь условной поверхности нагретой зоны:

$$S_3 = 2[L_1 L_2 + (L_1 + L_2)K_{з.дт} L_3];$$

3. удельная мощность корпуса блока (где P – мощность, рассеиваемая в блоке):

$$q_k = \frac{P}{S_k};$$

4. удельная мощность нагретой зоны блока:

$$q_{зона} = \frac{P}{S_3};$$

5. коэффициент θ_1 в зависимости от удельной мощности корпуса:

$$\theta_1 = 0,1472 q_k - 0,29692 \cdot 10^{-3} q_k^2 + 0,13127 \cdot 10^{-6} q_k^3;$$

6. коэффициент θ_2 в зависимости от удельной мощности зоны:

$$\theta_2 = 0,1390 q_3 - 0,1223 \cdot 10^{-3} q_3^2 + 0,0698 \cdot 10^{-6} q_3^3;$$

7. коэффициент k_{H1} в зависимости от добавления вне корпуса (H1, Па):

$$k_{H1} = \frac{1}{0,92 + 0,46 \cdot 10^{-5} \cdot H_1} + 0,8;$$

8. коэффициент k_{H2} в зависимости от давления в корпусе (H2, Па):

$$k_{H2} = \frac{1}{1,25 + 3,8 \cdot 10^{-5} \cdot H_2} + 0,8;$$

9. перегрев корпуса блока:

$$\theta_K = \theta_{k_{H1}}$$

10. перегрев нагретой зоны:

$$\theta_3 = \theta_K + (\theta_2 - \theta_1)k_{H2};$$

11. средний перегрев воздуха в блоке:

$$\theta_B = 0,5(\theta_K - \theta_3);$$

12. удельная мощность элемента:

$$q_{эл} = \frac{P_{эл}}{S_{эл}};$$

13. перегрев поверхности элемента:

$$\theta_{эл} = \theta_3 \left(0,75 + 0,25 \frac{q_{эл}}{q_3} \right);$$

14. перегрев среды около элементы:

$$\theta_{эс} = \theta_B \left(0,75 + 0,25 \frac{q_{эл}}{q_3} \right);$$

15. температура корпуса:

$$T_K = \theta_B + T_C;$$

16. температура нагретой зоны:

$$T_3 = \theta_3 + T_C;$$

17. температура воздуха в корпусе:

$$T_B = \theta_B + T_C;$$

18. температура поверхности элемента

$$T_{эл} = \theta_{эл} + T_C;$$

19. температура среды, окружающей элемент:

$$T_{эс} = \theta_{эс} + T_C.$$

Методика теплового режима блоков РЭС в перфорированном корпусе

Рассчитываются:

1. площадь поверхности корпуса блока, площадь условной поверхности нагретой зоны, удельная мощность нагретой зоны, коэффициенты $\theta_1, \theta_2, k_{Н1}, k_{Н2}$ определяются по пп. 1-8 предыдущей методики:

2. суммарная площадь перфорированных отверстий:

$$S_n = \sum_{i=1}^n S_i;$$

3. коэффициент перфорации:

$$\Pi = \frac{S_{\Pi}}{2 \cdot L_1 L_2};$$

4. функция коэффициент перфорации:

$$K_{\Pi} = 0,29 + \frac{1}{1,41 + 4,95\Pi};$$

5. перегрев корпуса:

$$\theta_K = 0,93\theta_1 K_{H1} K_{\Pi};$$

6. перегрев нагретой зоны:

$$\theta_3 = 0,93K_{\Pi} \left[\theta_1 K_{H1} + K_{H2} \left(\frac{\theta_2}{0,93} - \theta_1 \right) \right];$$

7. средний перегрев воздуха в корпусе:

$$\theta_B = 0,6\theta_3;$$

8. удельная мощность элемента:

$$q_{эл} = \frac{P_{эл}}{S_{эл}};$$

9. перегрев поверхности элемента:

$$q_{эл} = \frac{P_{эл}}{S_{эл}};$$

10. перегрев среды, окружающей элемента:

$$\theta_{эл} = \theta_B \left(0,75 + 0,25 \frac{q_{эл}}{q_3} \right)$$

11. температура корпуса:

$$T_K = \theta_B + T_C;$$

12. температура нагретой зоны:

$$T_3 = \theta_3 + T_C;$$

13. температура воздуха в блоке:

$$T_B = \theta_B + T_C;$$

14. температура поверхности элемента:

$$T_{3л} = \theta_{3л} + T_c;$$

15. температура среды, окружающей элемент:

$$T_{эс} = \theta_{эс} + T_c.$$

Методика расчета теплового режима блока с принудительной вентиляцией

Исходные данные: мощность, рассеиваемая в блоке (P), габаритные размеры корпуса L_1, L_2, L_3 , мощность нагруженных теплоэлементов (P_i), площади поверхностей (S_i), $K_{зап}$, массовый расход G_m , расстояние в направлении движения воздуха от входного сечения l , $T_в$ – температура воздуха на входе.

Порядок расчета:

1. средний перегрев воздуха в блоке:

$$\theta_B = 5 \cdot 10^{-4} \frac{P}{G_m};$$

2. площадь поперечного сечения корпуса:

$$S = L_1 L_2;$$

3. коэффициент в зависимости от массового расхода среды:

$$m_1 = 0,001 \cdot \sigma^{-0,5};$$

4. $m_2 = (L_1 L_2)^{-0,406}$ – от поперечного сечения к направлению продувания;

5. $m_3 = (L_3)^{-1,059}$ – от высоты блока в направлении продува;

6. $m_4 = K_{зап}^{-0,42} \left(1 - K_{зап}^{\frac{2}{3}} \right)^{0,5}$ – от коэффициента заполнения;

7. перегрев нагретой зоны с принудительным охлаждением:

$$\theta_3 = \theta_B + P m_1 m_2 m_3 m_4;$$

8. условная поверхность нагретой зоны:

$$S_3 = 2 \left[L_1 L_2 + K_{зап} L_3 (L_1 + L_2) \right];$$

9. удельная мощность нагретой зоны:

$$q_3 = \frac{P}{S_3};$$

10. удельная мощность элемента:

$$q_{\text{эп}i} = \frac{P_{\text{эп}i}}{S_{\text{эп}i}}.$$

11. перегрев поверхности i -го элемента:

$$\theta_{\text{эп}i} = \theta_3 \left(0,75 + 0,25 \frac{q_{\text{эп}i}}{q_3} \right) \left(\frac{L_i}{L_3} + 0,5 \right),$$

12. перегрев среды, окружающей l -й элемент:

$$\theta_{\text{эс}l} = \theta_3 \left(0,75 + 0,25 \frac{q_{\text{эп}l}}{q_3} \right) \left(\frac{L_l}{L_3} + 0,5 \right);$$

13. перегрев корпуса:

$$\theta_K = 0,93 \theta_1 K_{H1} K_{\Pi};$$

14. перегрев нагретой зоны:

$$\theta_3 = 0,93 K_{\Pi} \left[\theta_1 K_{H1} + K_{H2} \left(\frac{\theta_2}{0,93} - \theta_1 \right) \right];$$

15. средний перегрев воздуха в корпусе:

$$\theta_B = 0,6 \theta_3;$$

16. температура корпуса:

$$T_K = \theta_K + T_c.$$

Лабораторная работа №7. Расчет параметров печатных проводников.

В радиоэлектронных изделиях печатные проводники, электрически соединяющие элементы схемы, проходят на близком расстоянии друг от друга и имеют относительно малые размеры сечения. При большом времени переключения и малых тактовых частотах параметры проводников не оказывают существенного значения на быстродействие схемы и помехоустойчивость элементов. С увеличением быстродействия схем, что особенно актуально для современной РЭА в связи с широким использованием интегральных схем, все большее значение приобретают вопросы высокочастотных связей между элементами. В этом случае становится обязательным определение той или иной линии связи (сопротивления, емкости, индуктивности), а также степени влияния друг на друга.

Электрические параметры элементов печатной схемы зависят от разных факторов: режима работы схемы, применяемых материалов, технологии изготовления и т.д. Комплексный учет всех этих факторов сложен, поэтому расчет параметров платы носит ориентировочный характер и может быть разной степени сложности.

Постоянный ток в печатных проводниках

Постоянный ток в печатном проводнике распределяется равномерно по его сечению при условии, что материал проводника однороден и не имеет локальных посторонних

включений иных веществ. Сопротивление проводника шириной b (мм) и толщиной tn (мкм):

$$R = \frac{\rho \cdot l_n}{b \cdot t_n},$$

где ρ – удельное объемное сопротивление проводника, мкОм/м;

l_n – длина проводника, мкОм/м.

Величина ρ для проводников, изготовленных различными методами, неодинакова. Так, для медных проводников, полученных электрохимическим методом, $\rho = 0,02...0,03$ мкОм/м, а для медных проводников, полученных методом химического травления, $\rho = 0,075$ мкОм/м. Исходя из требований допустимого перегрева печатных проводников (80 °С), экспериментально для них установлена плотность тока – *удоп*. Она составляет 20 А/мм² – для проводников, полученных электрохимическим методом, и около 30 А/мм² – для проводников, полученных методом химического травления. Исходя из этого допустимый ток в печатных проводниках:

$$I_{\max} = 10^{-3} \gamma_{\text{доп}} b t_n.$$

Для стабильной работы печатных проводников необходимо, чтобы

$$b \geq \frac{10^{-3} I}{\gamma_{\text{доп}} \cdot t_n}.$$

где I – ток, протекающий в проводнике.

Расчет на допустимую плотность тока следует проводить для узких проводников ($b < 1$ мм), в которых ток превышает 2 А. Для цепей, в которых токи не превышают 2 А, расчет на допустимую плотность тока при ширине проводников $b > 1$ мм и толщине $tn > 50$ мкм можно не проводить. Падение напряжения на печатных проводниках

$$\Delta U = \rho \left[\frac{l_n}{b \cdot t_n} \right] = 10^{-3} \rho \cdot v \cdot l_n.$$

Для приближенных расчетов можно принять, что на каждом сантиметре длины медных проводников, полученных электрохимическим методом, при их ширине 1 мм и толщине 50 мкм теряется до 6 мВ, для тех же проводников, полученных методом химического травления, это значение доходит до 4 мВ (при условии, что $v = 20$ А/мм²).

Переменный ток в печатных проводниках

В противоположность постоянному току распределение переменного тока в печатных проводниках происходит неравномерно. Это обусловлено наличием поверхностного эффекта, возникающего при протекании по проводнику высокочастотного переменного тока. При этом внутри проводника образуется магнитное поле, приводящее к возникновению индукционного тока, взаимодействующего с основным. Вследствие этого происходит перераспределение тока по сечению проводника, и в результате его пайность в периферийных областях сечения проводника растет, ближе к центру уменьшается. На очень больших частотах ток во внутренних слоях проводника практически равен нулю в соответствии с рисунком 7.1.

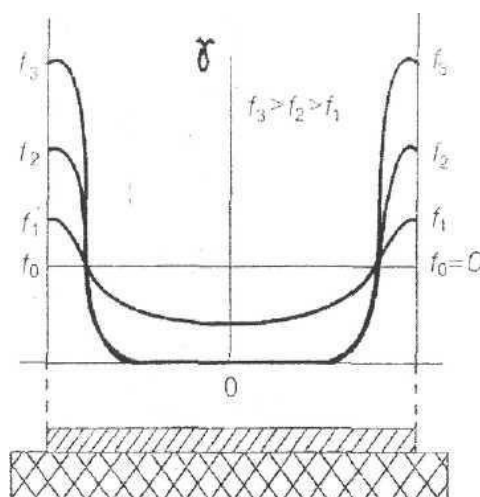


Рисунок 7.1 – Графика распределения высокочастотного тока по сечению печатного проводника

Явление поверхностного эффекта может быть количественно охарактеризовано эффективной глубиной проникновения тока, которая для немагнитных проводников определяется по формуле

$$d_{\text{эфф}} = 0,5 \sqrt{\frac{\rho}{f}} = \frac{\psi}{\sqrt{f}},$$

где f – частота, МГц;

$\psi = 0,5 r$ – коэффициент, зависящий от свойств токопроводящего материала и покрытия (значения коэффициента ψ для различных материалов приведены в таблице 7.1).

Таблица 7.1 – Значения коэффициента ψ для различных материалов

Материал	ψ	$\Theta \cdot 10^{-3}$
Серебро	0,064	2,54
Медь	0,066	2,65
Золото	0,077	3,08
Алюминий	0,084	3,34

При определении сопротивления печатного проводника переменному току часто пользуются понятием удельного поверхностного сопротивления (сопротивление квадратной площадки проводника со стороной 1 см). Удельное поверхностное сопротивление:

$$\rho_s = \Theta \sqrt{f},$$

На основании вышеизложенного сопротивление печатного проводника на высоких частотах

$$R_f = \frac{10^3 \rho_{Sn}^l}{b \cdot t_n}.$$

Сопротивление наиболее распространенных в печатных платах плоских медных проводников на высоких частотах:

$$R_{f\zeta} = \frac{0,013\xi\sqrt{f}\cdot l_n}{b\cdot t_n},$$

где ξ – коэффициент концентрации тока на углах сечения проводника (зависимость ξ от отношения ширины плоского проводника к толщине $\frac{b}{t_n}$ показана на рисунке 7.2).

Если медный проводник покрыт слоем какого-либо другого металла, то в числитель предыдущей формулы следует ввести поправочный коэффициент

$$\beta = \sqrt{\frac{\rho}{\rho_M}},$$

где ρ – удельное (объемное) сопротивление материала покрытия; ρ_M – удельное сопротивление меди.

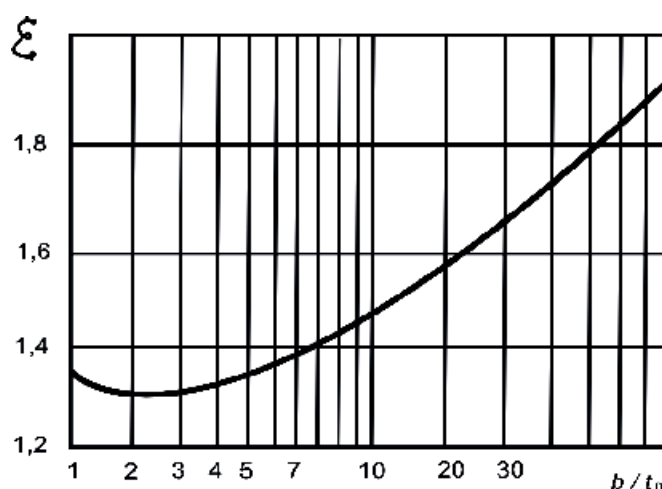


Рисунок 7.2 – Графическая зависимость коэффициента концентрации тока ξ на углах сечения проводника от отношения его ширины b к толщине t_n

Емкость и индуктивность между печатными проводниками

Емкость между печатными проводниками служит источником помех, оказывающих существенное влияние на работу аппаратуры. В данной методике указаны формулы для расчета собственной емкости и индуктивности между двумя близко расположенными печатными проводниками. На рисунке 9.3 представлены некоторые часто встречающиеся конфигурации печатных проводников, связи и различные варианты их взаимного расположения.

Емкость (пФ) между двумя параллельными печатными проводниками одинаковой ширины b (мм), расположенными на одной стороне платы:

$$C = \frac{0,12\epsilon_r l_n}{\lg [2a/(b+t_n)]},$$

где l_n – длина участка, на котором проводники параллельны друг другу, мм;

ϵ_r – диэлектрическая проницаемость среды.

Емкость (пФ) между двумя параллельными проводниками шириной b (мм), расположенными по обе стороны печатной платы с толщиной диэлектрика a (мм):

$$C = 0,008842 \varepsilon_r l_n \frac{b}{a} \left[1 + \frac{a}{\pi b} \left(1 + \lg \frac{2\pi b}{a} \right) \right]$$

Емкость (пФ) проводника печатной платы, у которой на обратной стороне имеется заземленная пластина:

$$C = 0,008842 \varepsilon_r l_n \frac{b}{a} \left[1 + \frac{2a}{\pi b} \left(1 + \lg \frac{\pi b}{a} \right) \right]$$

Три последних выражения позволяют произвести оценку емкости (пФ) печатных проводников с точностью $\pm (20 \dots 30) \%$. Для более точных расчетов следует пользоваться общей формулой:

$$C = \varepsilon l_n k,$$

где ε – действующая диэлектрическая проницаемость,

k – поправочный коэффициент, значение которого определяется по графикам, изображенным на рисунке 7.3:

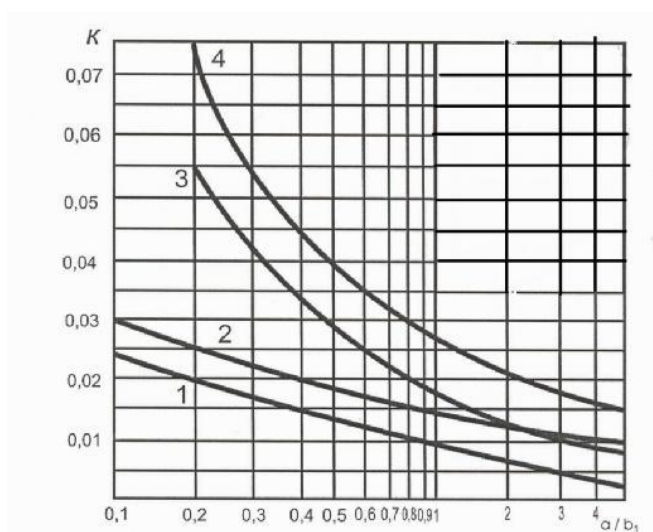


Рисунок 7.3 – Графическая зависимость поправочного коэффициента k от отношений расстояния между проводниками a к их ширине bl

Емкость (пФ) печатного конденсатора, электроды которого расположены по обе стороны печатной платы, при условии, что толщина платы много меньше линейных размеров обкладок конденсатора:

$$C = \frac{8,5 \cdot 10^{-3} b c \varepsilon_r}{a}$$

С учетом клеевого слоя:

$$C = \frac{8,5 \cdot 10^{-3} b c \epsilon_r}{a / \epsilon_r + a_k / \epsilon_k},$$

где aK и ϵK – соответственно толщина и диэлектрическая проницаемость клеевого слоя.

Иногда по заданной емкости, толщине и диэлектрической проницаемости печатной платы требуется определить площадь обкладок конденсатора. Собственная индуктивность (мкГн) печатного проводника шириной b (мм), толщиной tn (мм) и длиной ln (мм)

$$L = 0,0002 l_n \left(\lg \frac{2l_n}{t_n + b} + 0,2235 \frac{t_n + b}{l_n} + 0,5 \right).$$

Индуктивность двух параллельных печатных проводников шириной b (мм), расположенных с одной стороны печатной платы с зазором a (мм), с противоположным направлением тока в них

$$L = 0,004 l_n \left(\ln \frac{a+b}{t_n + b} - \frac{a-b}{l_n} + 0,2235 \frac{t_n + b}{l_n} + 1,5 \right).$$

Если размеры сечений проводников различны, то индуктивность такой пары

$$L = L_1 + L_2 - 2M,$$

где L_1, L_2 – собственная индуктивность (мкГн) соответственно первого и второго печатных проводников шириной b_1 и b_2 ;

M – взаимная индуктивность (мкГн) проводников, определяемая при условии $ln \gg 10(b_1 + b_2 + b_3)$:

$$M = 0,002 l_n \left(\ln \frac{2l_n}{a + \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2}} + \frac{a + \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2}}{l_n} \right).$$

Взаимная индуктивность двух печатных проводников, расположенных по прямой на одной стороне печатной платы с малым зазором между их совпадающими концами:

$$M = 0,023 \left(l_{m1} \lg \frac{l_n + l_{n2}}{l_{m1}} + \frac{l_{m1} + l_{n2}}{l_{n2}} \right) \cdot 10^{-3}.$$

Если же концы проводников разнесены на значительное расстояние, то взаимная индуктивность (мкГн):

$$M = 0,023 [(l_{m1} + l_{n2} + a) \lg(l_{m1} + l_{n2} + a) + a \lg a - (l_{m1} + a) \lg(l_{m1} + a) - (l_{n2} + a) \lg(l_{n2} + a)] \cdot 10^{-3}.$$

Проводники различной длины, расположенные параллельно по одну сторону печатной платы (см. рисунок 9.3, ж), обладают взаимной индуктивностью, определяемой формулой

$$M = 0,002 \left[4,6 l_{m1} \lg \left(\frac{l_{m1} + l_{n2} + \sqrt{(l_{m1} + l_{n2})^2 + a^2}}{a} \right) + \right. \\ \left. + 2,3 (l_{m1} + l_{n2}) \lg \left(\frac{l_{m1} + l_{n2} + \sqrt{(l_{m1} + l_{n2})^2 + a^2}}{l_{n2} + l_{m1} + \sqrt{(l_{n2} + l_{m1})^2 + a^2}} \right) + \right. \\ \left. + \sqrt{(l_{m1} - l_{n2})^2 + a^2} - \sqrt{(l_{m1} + l_{n2})^2 + a^2} \right].$$

Печатные проводники характеризуются волновым сопротивлением. Короткие связи (до 80 мм) выполняются чаще всего в виде одиночных печатных проводников, более длинные связи – в виде несимметричных и симметричных полосковых линий. Расчет волновых сопротивлений (Ом) печатных линий для симметричной и несимметричной полосковых линий можно производить соответственно по следующим приближенным формулам:

$$z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln \frac{2,55a}{l},$$

$$z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln \frac{1,75a}{b}.$$

Эти выражения с достаточной степенью точности позволяют определять значение волнового сопротивления при $tn \ll b$, $tn \ll a$, $b > a$. Во всех других случаях для определения волновых сопротивлений печатных проводников связи следует пользоваться номограммами и графиками, приведенными в справочной литературе по волновой технике. Часто при конструировании печатной платы необходимо решить обратную задачу: по заданному волновому сопротивлению печатной линии связи требуется найти ее геометрию. Для симметричной полосковой линии это задача может быть решена с помощью графика, приведенного на рисунке 7.4.

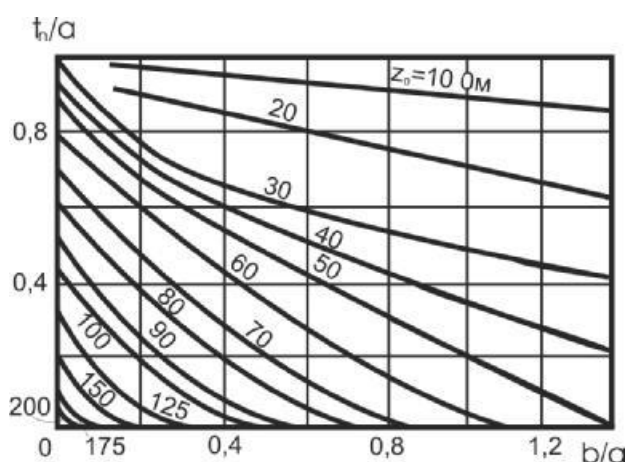


Рисунок 7.4 – Графические зависимости волнового сопротивления симметричной полосковой линии от соотношения геометрических размеров печатных проводников

Практическое занятие №1. Конструкторско-технологический расчет печатных плат (ПП).

При расчете элементов печатного монтажа следует учитывать технологические особенности производства, допуски на всевозможные отклонения значений параметров элементов печатного монтажа, установочные характеристики корпусов элементов и ИС, требования по организации связей, вытекающих из схемы функционального узла, а также перспективности выбранной технологической базы. Исходные данные для расчета элементов печатных плат следующие:

- шаг основной координатной сетки, устанавливаемый ГОСТ 10317–79, равный 2,5 мм;
- допуски отклонения размеров и координат элементов печатной платы от номинальных значений, зависящие от уровня технологии, материалов и оборудования;
- установочные характеристики навесных ЭРЭ.

Буквенные обозначения размеров конструкции платы даны на рисунке 8.1.

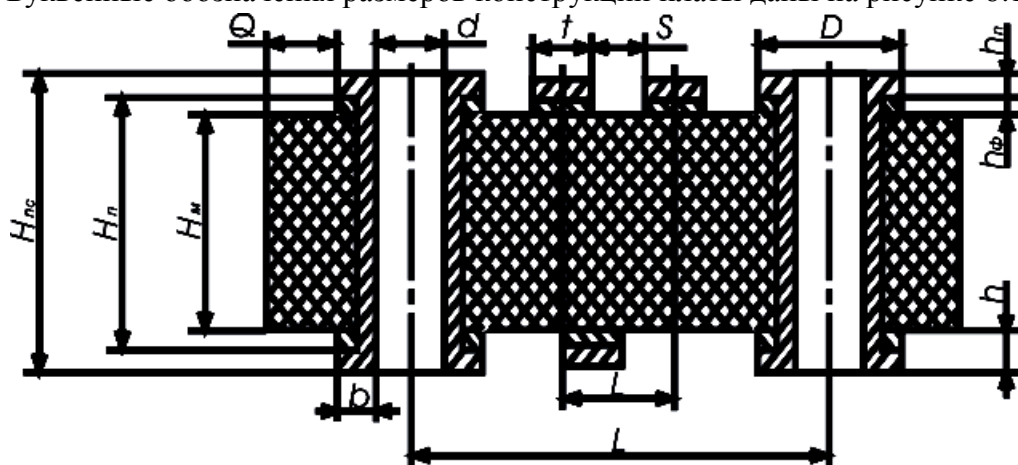


Рисунок 8.1 – Обозначения размеров конструкции платы:

- H_m – толщина материала основания печатной платы;
- hf – толщина фольги; hn – толщина химико-гальванического покрытия;
- H_n – толщина печатной платы; H_{nc} – суммарная толщина печатной платы;
- b – гарантийный поясик; D – диаметр контактной площадки;
- d – диаметр отверстия; t – ширина печатного проводника;
- Q – расстояние от края печатной платы до элемента рисунка;
- l – расстояние между центрами (осями) элементов конструкции платы;
- S – расстояние между соседними элементами рисунка

Расчет элементов печатной платы проводится в следующей последовательности:

- 1) определяется номинальное значение диаметров монтажных отверстий d :

$$d = d_{\text{н.о.}} + (0,1 \dots 0,4) \text{ мм}$$

и приводится к предпочтительному ряду: 0,7; 1,1; 1,3; 1,5 мм;

- 2) наименьший номинальный диаметр контактной площадки рассчитывается по формуле

$$D = (d + \Delta d_{\text{н.о.}} + 2b + \Delta t_{\text{н.о.}} + 2\Delta d_{\text{мп}} + (T_d^2 + T_D^2 + \Delta t_{\text{н.о.}}^2)^{\frac{1}{2}}),$$

где $\Delta d_{\text{н.о.}}$ – верхнее предельное отклонение диаметра отверстия – 0,05 мм;

$\Delta t_{в.о}$ – верхнее предельное отклонение диаметра контактной площадки – 0,15 мм;

Δd_{mp} – значение подтравливания диэлектрика в отверстии равно 0,03 мм для МПП, для ОПП, ДПП и ГПК – нулю;

T_d – значение позиционного допуска расположения центра отверстия относительно узла координатной сетки – 0,15 мм;

T_D – значение позиционного допуска расположения контактной площадки относительно номинального положения – 0,25 мм;

$\Delta t_{н.о}$ – нижнее предельное отклонение диаметра контактной площадки – 0,1 мм;

3) наименьшее номинальное расстояние l для прокладки n -го количества проводников рассчитывается по формуле

$$l = \frac{D_1 + D_2}{2} + t + S(n+1) + T_1,$$

где D_1, D_2 – диаметры контактных площадок;

n – количество проводников (рисунок 8.2);

T_1 – значение допуска печатного проводника (таблица 8.1).

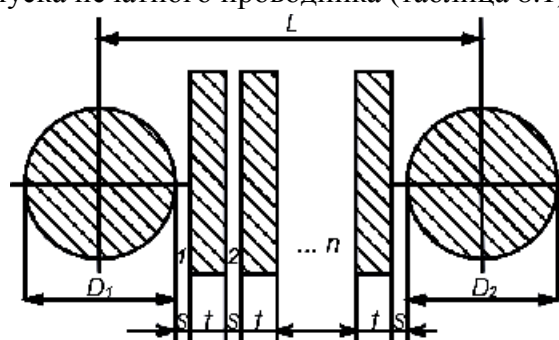


Рисунок 8.2 – Трассировка печатных проводников в узком месте

Таблица 8.1 – Допуски расположения печатных проводников

Вид изделия	Значения допуска расположения печатного проводника для класса точности T1, мм				
	1	2	3	4	5
ОП, ДПП, МПП	0,20	0,10	0,005	0,03	0,02

4) толщина МПП рассчитывается по формуле

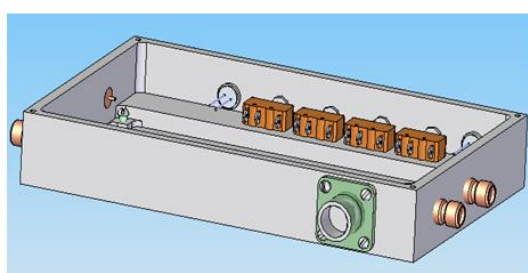
$$H_n = \Sigma H_c + (0,6 \dots 0,9) \Sigma H_{np},$$

где H_c – толщина слоя МПП;

H_{np} – толщина прокладки (по стеклоткани).

Практическое занятие №2. Работа в системе автоматизированного проектирования (САПР).

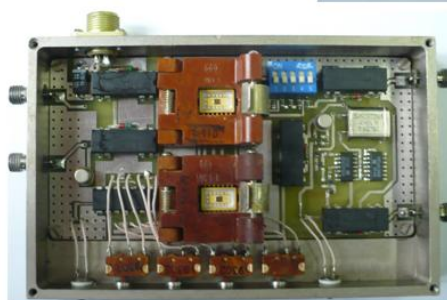
На практическом занятии преподаватель демонстрирует пример использования двух систем автоматизированной проектирования для разработки печатных плат и проектирования корпуса модуля коммутации измерителя спектральной плотности мощности фазового шума, приведенного на рис. 9.1 Упомянутый измеритель разрабатывался автором курса в рамках выполнения опытно-конструкторской работы по созданию отечественной микросхемы – пятиразрядного программируемого делителя частоты в соответствии с государственным оборонным заказом на 2007 год (постановление правительства РФ № 812-37 от 28.12.2006 г.) и государственным контрактом №6163 от 11.05.2007 г.



а)



б)



в)

Рисунок 9.1 – Модуль коммутации измерителя спектральной плотности мощности фазового шума

а) трехмерная модель модуля

б) и в) фотографии смонтированного модуля

Практическое занятие №3. Организационно-экономические аспекты производства ПП

Определение программы запуска печатных плат

При наличии брака на операциях технологического процесса (ТП) программ запуска заготовок печатных плат в производство должна быть больше программы выпуска на завершающей стадии ТП. При наличии технологических потерь на операциях программа запуска изделий на конкретной операции может отличаться от программы выпуска.

Программу запуска устанавливают с учетом процента выхода годных плат на каждой операции ТП, причем расчет проводят в обратной последовательности, начиная с последней операции ТП, считая что на ней должен быть 100 %-ый выход годных печатных плат. Программа запуска на любой операции является одновременно программой выпуска на предыдущей.

На каждой операции программу запуска определяют по формуле

$$N_{\text{зап.о}} = \frac{N_{\text{в.п.о}}}{K_{\text{в.г}}} \cdot 100, \quad (10.1)$$

Где $N_{\text{в.п.о}}$ – программа выпуска плат на предыдущей операции, шт.;

$K_{\text{в.г}}$ – процент выхода годных плат на данной операции, %.

Пример. В таблице 10.1 приведен пример расчета программы запуска заготовок печатных плат в производство для выпуска 100 000 шт. годных плат. Расчет начинают с последней операции «консервация ПП», после выполнения которой получают 100 000 шт. годных плат. Последовательно, переходя с последней операции на предпоследнюю (контроль ПП) и далее до первой (фотохимической), рассчитывая на каждой операции программу запуска по формуле 10.1, получают необходимую программу запуска в производство, равную 144 000 шт. с учетом брака на каждой операции.

Таблица 10.1 – Пример расчета программы запуска для получения 100 000 шт. ПП

№ операции	Операция	Заданный выход годных ПП, $K_{\text{в.г}}$, %	Программа запуска ПП, $N_{\text{зап.о}} \cdot 10^3$ шт.
1	Фотохимическая	94	$135 \cdot 100 / 94 = 144$
2	Травление	95	$128 \cdot 100 / 95 = 135$
3	Прессование	97	$124 \cdot 100 / 97 = 128$
4	Сверление	94	$117 \cdot 100 / 94 = 124$
5	Химико-гальваническая	88	$103 \cdot 100 / 88 = 117$
6	Механическая обработка	98	$103 \cdot 100 / 98 = 103$
7	Оплавление	99	$100 \cdot 100 / 99 = 101$
8	Контроль	100	100
9	Консервация	100	100

Определение процента выхода годных печатных плат

Процент выхода годных плат – процентное отношение количества ПП, признанных годными, т.е. удовлетворяющих всем требованиям ТУ, к количеству ПП, запущенных на операцию (отношение количества ПП на выходе данной операции к количеству ПП на входе). Процент выход годных плат в конце технологического процесса определяют по формуле

$$B_r = \frac{B_1 B_2 B_3 \dots B_n}{100^{n-1}},$$

где $B_1, B_2, B_3, \dots, B_n$ – процент выхода годных плат на каждой операции;
 n – количество операций ТП.

Из предыдущего пример следует, что

$$B_r = 94 \cdot 95 \cdot 97 \cdot 94 \cdot 88 \cdot 98 \cdot 99 \cdot 100 \cdot 100 / 100^{9-1} = 69,5 \%$$

Таким образом, процент выхода годных плат в результате девяти операций составил 69,5 %.

Определение количества оборудования, оснащения и рабочих мест

Номенклатура оборудования определяется технологическим процессом изготовления ПП.

Исходными данными для определения количества оборудования являются:

- Годовая программа выпуска;
- Производительность единицы оборудования;
- Трудоемкость изготовления одной печатной платы;
- Годовой фонд работы единицы оборудования.

Расчетное количество оборудования на каждой операции определяют по

$$K_{\text{рас.об}} = \frac{N_{\text{зап.о}}}{\text{ПФ}},$$

где $N_{\text{зап.о}}$ – годовая программа запуска на данной операции, шт.;

П – производительность единицы оборудования, шт./ч;

Ф – годовой фонд работы единицы оборудования, ч

или по формуле

$$K_{\text{рас.об}} = \frac{N_{\text{зап.о}} t}{\Phi K_0},$$

где t – трудоемкость по видам работ, мин;

K_0 – коэффициент, определяющий норму обслуживания оборудования производственными рабочими (варьируется от 0,4 до 0,6).

В таблице 10.2 приведен годовой фон времени работы различных видов оборудования при работе в одну, две и три смены.

Таблица 10.2 – Годовой фонд рабочего времени работы различных видов оборудования

Оборудование	Годовой фонд времени работы оборудования и рабочих мест, соответствующий работе Φ , ч		
	односменной	двухсменной	трехсменной
Металлорежущее	2080	4015	5960
Автоматизированные линии для изготовления ПП		3810	5590
Оборудование для изготовления ПП, агрегаты, установки	2030	4015	5960
Рабочее место	2070	4140	6210

Расчетное количество рабочих мест

$$K_{\text{рас.р.м}} = \frac{\sum_{i=1}^n N_{\text{зап.оп}} t_i}{\Phi},$$

где $\sum N_{\text{зап.оп}}$ – программа запуска ПП на данной операции, шт.;

t_i – трудоемкость операции, ч.

Коэффициент загрузки оборудования

$$\eta = K_{\text{рас.об}} / K_{\text{пр}}.$$

Здесь $K_{\text{пр}}$ – принятое количество оборудования с учетом возможного его увеличения $\eta \leq 1$.

Число производственных рабочих

$$K_{\text{раб}} = \frac{\sum_{i=1}^n N_{\text{зап.оп}} t_i}{\Phi_{\text{раб}}},$$

где $N_{\text{зап.оп}}$ – годовая программа запуска, шт.;

t_i – трудоемкость изготовления изделий, мин;

$\Phi_{\text{раб}}$ – годовой фонд времени работы одного рабочего, ч.

Номинальный годовой фонд времени работы одного рабочего в одну смену составляет 2070 ч.

Действительный годовой фонд времени зависит от продолжительности отпуска и потерь номинального фонда и составляет:

- при 15-дневном отпуске и потерями – 1860 ч;
- при 18-дневном отпуске и потерями – 1840;
- при 24-дневном отпуске и потерями – 1800 ч.
-

Расчет технологической себестоимости печатных плат

Совокупность производственных затрат на изготовление ПП составляет производственную (технологическую) себестоимость, расчет которой необходим:

- для определения цены ПП;
- для планирования, прогнозирования и управления производством;
- для определения степени влияния отдельных статей затрат на себестоимость ПП;
- для правильного определения финансовых результатов работы и налогообложения прибыли;

- для маркетинговых исследований и принятия на их основе решений о начале производства нового изделия с наименьшими затратами;
- для разработки бизнес-плана любого инновационного проекта при составлении производственного плана, в котором отражаются условия материально-технического обеспечения производства, описываются технологические процессы, выполняются расчеты себестоимости производства и реализации ПП.

Технологическую себестоимость, руб., годовой программы выпуска печатных плат определяют по формуле:

$$C_{\tau} = N_{\text{зап}} / V_{\tau} (M + L) + A + H,$$

где $N_{\text{зап}}$ – программа запуска заготовок в производство, шт.;

V_{τ} – выход готовых ПП, %;

M – затраты на материал с учетом транспортных расходов, руб.;

L – основная и дополнительная зарплата производственных рабочих, руб. (необходимо учесть отчисления в социальные фонды, которые составляют в настоящее время 38,5 % от суммы основной и дополнительной заработной платы);

A – амортизационные отчисления при действительной загрузке оборудования, руб.;

H – накладные расходы, которые складываются из цеховых, общезаводских и внепроизводственных затрат, руб.

Программу запуска заготовок ПП в производство и на каждой операции определяют по формуле 10.1; процент выхода годных ПП V_{τ} – по формуле 10.2.

Затраты на базовые материалы M определяют путем расчета массы материала, необходимого для изготовления заготовки, и стоимости 1 кг массы этого материала, на расходные с учетом норм расхода химикатов на единицу площади, умноженной на стоимость единицы массы этого материала.

Определение затрат на базовые материалы выполняют по следующей формуле:

$$M = C_m g_m + C_o g_o,$$

где C_m – стоимость единицы базового материала;

C_o – стоимость единицы отходов базового материала;

g_o – утилизированные отходы материала на одну заготовку;

g_m – норма расхода материала на одну заготовку ПП,

$g_m = \rho V$.

Здесь ρ – плотность материала, кг/м³; V – объем заготовки, м³.

При расчете стоимости материалов учитывают транспортные расходы, которые составляют 15 % от стоимости материалов. В реальном производстве учитывают также затраты на расходные материалы: химикаты, фоторезисты, абразивные материалы и др.

Зарплату L производственных рабочих рассчитывают по трудоемкости выполнения каждой технологической операции на конкретном оборудовании и стоимости выполнения операции с учетом разряда рабочего и тарифных коэффициентов.

Основная зарплата производственных рабочих определяется по формуле

$$L = \left(\sum_{i=1}^m q_i \right) K_i,$$

где K_i – коэффициент, учитывающий премии, доплату за отпуск, многостаночность. Для расчетов примем $K_i=2$. Обычно дополнительная зарплата составляет 15 % от основной

(рассчитанной по тарифным коэффициентам); q_i – сдельная расценка по каждой операции, руб./ч

$$q_i = \frac{l_i t_{шт.ки}}{60}.$$

Здесь l_i – часовая тарифная ставка рабочего принятого разряда на i -ой операции; $t_{шт.ки}$ – штучно-калькуляционное время на i -й операции, мин, $t_{шт.ки} = t_{шт.i} + t_{п.з.i}$, где $t_{п.з.i}$ – подготовительно-заключительное время (при расчетах примем равным нулю); n – число операций ТП.

Расчет штучного времени на операцию выполняют по производительности оборудования; с учетом габаритов заготовки, диаметров монтажных, базовых, переходных отверстий, скорости перемещения заготовки во время выполнения операции и т.п. Причем время, затраченное на выполнение операции при одновременной обработке n -го числа заготовок для получения $t_{шт}$, необходимо разделить на n .

Накладные расходы складывают из цеховых, общезаводских и внепроизводственных затрат. Цеховые расходы составляют 120 % от основной зарплаты, общезаводские – 75 %, а внепроизводственные – 5 % от основной зарплаты.

Амортизационные отчисления на одно изделие на каждой операции в год, руб./ч, рассчитывают по следующей формуле:

$$A_o = \frac{KH_a}{100N_{год}} \eta,$$

Где K – цена (стоимость) оборудования, руб.;

H_a – общая годовая норма амортизации, %;

$N_{год}$ – годовая программа выпуска изделий, шт.;

η – коэффициент загрузки данного типа оборудования по времени изготавливаемыми изделиями в долях единицы.

Амортизационные отчисления при действительной загрузке оборудования на всех операциях технологического процесса для программы запуска заготовок ПП в производство вычисляют по формуле

$$A = \frac{\sum_{i=1}^m K_i H_{ai} \eta_i N_{зап.i}}{100}.$$

Загрузку оборудования в год на каждой операции X_1 , %, с учетом $t_{шт.i}$ ТП определяют по формуле

$$X_1 = \frac{\sum_{i=1}^{N_{шт}} t_{шт.i}}{F_{год}} \cdot 100,$$

где $F_{год}$ – годовой календарный фонд работы оборудования.

Амортизационные отчисления при 100%-ой загрузке оборудования в год на каждой операции

$$X_2 = \frac{KH_a}{100}.$$

Амортизационные отчисления в год при действительной загрузке оборудования на каждой операции, ру.

$$X_3 = \frac{X_1 X_2}{100}.$$

Выход годных печатных плат устанавливают на каждой операции.

Практическое занятие №4. Создание конструкторско-технологической документации

Построение, изложение и оформление технического задания на изделие

Основным исходным документом для проектирования является техническое задание, которое разрабатывают на основе:

- Требований заказчика;
- Результатов НИР;
- Маркетинга;
- Анализа литературных и патентных исследований и др.

Техническое задание состоит из введения и следующих разделов:

- Основание для разработки;
- Источник разработки;
- Технические требования;
- Экономические показатели;
- Порядок испытаний.

Введение должно быть изложено в следующей редакции: «Настоящее ТЗ распространяется на разработку и испытание (наименование и шифр разрабатываемого изделия), предназначенного для (назначение разрабатываемого изделия) и использования (наименование изделия, в составе которого может быть использовано разрабатываемое изделие и (или) краткая характеристика области его применения)».

Раздел «Основание для разработки» должен быть изложен в следующей редакции:

- (наименование и шифр разрабатываемого изделия) разрабатывают (полное наименование документов, на основании которых разрабатывают изделие), утвержденного (наименование организации, утвердившей документ и дата утверждения);
- Тема (наименование и (или) условное обозначение темы разработки).

В разделе «Источники разработки» указывают:

- Перечень научно-исследовательских работ (НИР);
- Наименование изделия-аналога;

Раздел «Технические требования» состоит из следующих подразделов:

- Состав изделия;
- Технические параметры;
- Требования к надежности;
- Принцип работы;
- Программное обеспечение;
- Конструктивные требования;
- Условия эксплуатации;
- Требования безопасности;
- Требования к упаковке, маркировке, транспортировке и хранению;
- Требования к патентной чистоте.

Требования в каждом подразделе располагают в ранжированном порядке с указанием технических показателей с предельными отклонениями.

В подразделе «Состав изделия» указывают:

- Наименование и назначение составных частей основного исполнения изделия;
- Требования к стандартным, унифицированным и заимствованным составным частям (включая покупные);
- Требования к сырью и материалам и пр.

В подразделе «Технические параметры» приводят основные технические показатели изделия, определяющие его целевое назначение, например:

- Точность;
- Электрическая прочность;
- Сопротивление изоляции;
- Потребляемая мощность;
- Чувствительность;
- Производительность;
- Требования к электропитанию;
- Частота и другие необходимые требования.

В подразделе «Требования к надежности» указывают значения показателей надежности: безотказности, долговечности и сохраняемости; требования к конструкции с позиции надежности.

Надежность изделия характеризуется следующими показателями:

- 1) вероятность безотказной работы в течение определенного периода;
- 2) наработка на отказ;
- 3) интенсивность отказов и др.

Показатели долговечности:

- 1) процентный ресурс;
- 2) процентный срок службы;
- 3) средний ресурс;
- 4) средний срок службы.

В подразделе «Программное обеспечение» (ПО) указывают состав и общие требования к ПО, включая тестовые и диагностические программы. Техническое задание на ПО является самостоятельным документом, оформленным по ГОСТ 19201-78.

В подразделе «Конструктивные требования» приводят конструктивные требования к изделию в целом и его составным частям, например:

- Базовые конструкции;
- Габаритные, установочные и присоединительные размеры;
- Способы крепления в модулях более высокого конструктивного уровня;
- Масса и др.

В подразделе «Условия эксплуатации» указывают:

- Допустимое воздействие климатических факторов (температуры, влажности, атмосферного давления, солнечной радиации, пыли и др.);
- Допустимое воздействие агрессивных сред;
- Допустимое воздействие радиоактивных излучений;
- Допустимое воздействие механических нагрузок (вибрационных, ударных, скручивающих и др.);

- Допустимое воздействие внешних полей и допустимые поля, создаваемые самим работающим изделием;
- Допустимый уровень шума, воздействующего на изделие и создаваемого самим изделием.

В подразделе «Требования безопасности» излагают требования безопасности:

- При монтаже;
- При эксплуатации;
- При обслуживании;
- При ремонте.

от воздействия электрического тока, тепловых и ВЧ-полей, с указанием допустимых значений этих полей и санитарно-гигиеническим нормам; а также устанавливаются требования к допустимой массе изделия и требования для защиты кожного покрова рук и других частей тела.

В подразделе «Требования к упаковке, маркировке, транспортированию и хранению» указывают:

- Требования к маркировке, наносимой на изделие и тару, в которую должно быть упаковано изделие (место и способ нанесения, содержание маркировки, требования к качеству ее исполнения);
- Возможные варианты консервации и упаковки изделия в зависимости от условий транспортирования и хранения;
- Требования к консервации и упаковке изделия, в том числе требования к таре, материалам, применяемым при упаковке, а также способу и условиям упаковки;
- Условия транспортирования и виды транспортных средств (авиасредства, крытые, открытые вагоны, платформы, трюмы или палубы судов, закрытые отапливаемые автомашины и др.), необходимость и способы крепления при транспортировании, расстояние транспортирования, скорости передвижения;
- Требования к необходимой защите от ударов при погрузке и выгрузке и т.п.;
- Места хранения (открытая площадка, под навесом, закрытый неотапливаемый склад, отапливаемое помещение и др.);
- Условиям хранения (факторы окружающей среды, условия складирования и т.п.);
- Возможность и сроки обслуживания изделия во время хранения (переконсервация, переосвидетельствование, в том числе периодичность и длительность нахождения изделия в рабочем состоянии, периодичность замены и т.п.);
- Сроки хранения в различных условиях.

В подразделе «Требования к патентной чистоте» приводят перечень стран, в отношении которых должна быть обеспечена патентная чистота изделия.

В подразделе «Экономические показатели» перечислены экономические преимущества разрабатываемого изделия по сравнению с изделием-аналогом.

В подразделе «Порядок испытаний» указывают срок и общие требования к проведению испытаний.

Каждое требование ТЗ должно быть изложено кратко, ясно и исключать различные толкования. Оно должно излагаться словами, лишенными эмоциональной, оценочной окраски, чтобы исключить навязывание разработчику оценочных суждений, например, недопустимы словосочетания: «большая серийность», «малая масса», «хорошая чувствительность».

Нельзя одновременно задать показатели воздействий внешней среды и соответствующие им требования к внешним (входным и выходным) показателям назначения изделия.

Желательно, чтобы в каждом пункте ТЗ излагалось только одно требование, определяемое только одним количественным или качественным показателем. Качественные показатели нужно по возможности заменять количественными.

Количественные требования должны иметь наивысший уровень измерения с обязательным указанием предельных отклонений. Границы интервалов изменения номиналов и экстремальные значения должны устанавливаться только одним значением и также с указанием предельных отклонений.

Требования, установленные в стандартах, распространяющихся на конкретное изделие, в ТЗ не указывают, а дают ссылку на эти стандарты. Техническое задание оформляют в соответствии с общими требованиями к текстовым документам по ГОСТ 2.106–96 на листах формата А4.

номенклатура конструкторских документов и правила выполнения чертежей ПП, правила выполнения сборочного чертежа ячейки (на самостоятельное изучение дать ссылку на книгу Пироговой).

Практическое занятие №5. Защита РЭС от механических воздействий.

К основным динамическим характеристикам аппаратуры и ее элементов относят значения собственных (резонансных) частот, собственные формы колебаний, значения коэффициентов динамичности и коэффициентов демпфирования.

Значения собственных частот конструктивных элементов аппаратуры (элементов рамных конструкций, пластин и т.д.) определяются по формулам, известным из курса классической механики.

Значения частот собственных колебаний электрорадиоэлементов (ЭРЭ), приводимых к балочным моделям, можно определить аналитически или по номограммам. Вид одной из таких номограмм представлен на рисунке 12.1. Зная тип резистора и длину его выводов, определяют значение собственной частоты. Значение первой собственной частоты печатной платы, закрепленной по углам в четырех точках, можно определить, воспользовавшись выражением

$$f_0 = \frac{\pi}{2} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{m''}},$$

где $D = \frac{Eh^3}{12(1-\gamma^2)}$ – цилиндрическая жесткость платы;

$m'' = \frac{m}{a \cdot b}$ – распределенная по площади масса платы и элементов, размещенных на плате;

E – модуль упругости материала платы;

H – толщина платы;

m – масса платы с элементами (МС, ЭРЭ и т.д.);

a – длина платы;

b – ширина платы;

γ – коэффициент Пуассона для материала платы.

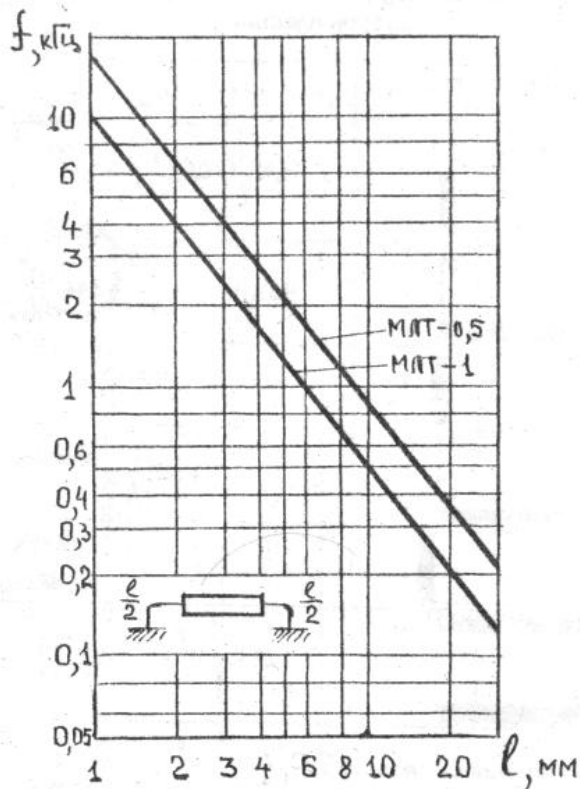


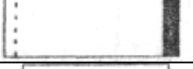
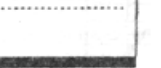
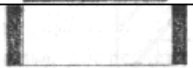
Рисунок 12.1 – Номограмма для определения значения f_0 резисторов типа МЛТ в зависимости от суммарной длины выводов l

Более общее выражение для расчета значения собственных частот пластин имеет вид




$$f_0 = \frac{K_a}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{D}{m^n}},$$

где K_a – коэффициент, зависящий от способа закрепления пластины (таблица 12.1).

Таблица 12.1 – Значения коэффициента **Ka** для различных способов закрепления сторон пластин

Вариант закрепления сторон пластины	Ka
	$15,42 \sqrt{1 + 0,95 \left(\frac{a}{b}\right)^2 + 0,41 \left(\frac{a}{b}\right)^4}$
	$9,87 \sqrt{1 + 2,33 \left(\frac{a}{b}\right)^2 + 2,44 \left(\frac{a}{b}\right)^4}$
	15,42
	$15,42 \left(\frac{a}{b}\right)^2$
	22,37
	$22,37 \sqrt{0,1 \left(\frac{a}{b}\right)^2 + 0,41 \left(\frac{a}{b}\right)^4}$

Примечание. Обозначения штриховок:

-  – жесткое закрепление стороны пластины;
-  – сторона лежит на опоре;
-  – сторона пластины свободна.

В практике проектирования печатных плат РЭС иногда пользуются формулой несколько иного вида:

$$f_0 = k_m k_b B h \frac{10^4}{a^2},$$

где k_m – коэффициент, зависящий от материала платы (для гетинакса – 0,5, для стеклотекстолита – 0,52);

$$k_b = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{m_n}{m_n}}} - \text{коэффициент, массы элементов } m_n, \text{ размещенных на поверхности}$$

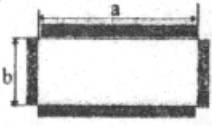

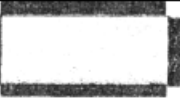
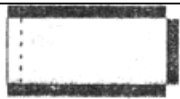
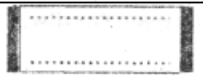
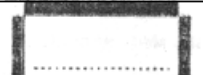
платы, масса которой m_n .

B – коэффициент, зависящий от соотношения длины сторон и способа закрепления платы, таблица 12.2;

h – толщина платы, см;

a – длина платы, см.

Таблица 12.2 – Значения коэффициента B

Варианты закрепления сторон платы	a/b							
	0,25	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0
	-	-	86	145	234	352	497	868
	40	41	56	84	124	176	240	864
	10	19	58	124	217	336	479	855
	33	44	76	139	230	349	494	866
	54	56	69	93	131	181	244	406
	54	58	76	115	175	254	353	607

Для блока, установленного на виброизоляторах, значение f_0 определяется из выражения

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\Sigma}}{m}},$$

где K_{Σ} – суммарная жесткость используемых виброизоляторов; m – масса блока.

Важной динамической характеристикой плат и других конструктивных элементов аппаратуры является коэффициент динамичности, который представляет собой отношение амплитуды колебаний блока или центра печатной платы к амплитуде колебаний основания или точек закрепления платы:

$$\mu = \frac{A}{A_0}.$$

Вид зависимости значения μ конструктивного элемента от частоты воздействующей вибрации f представлен на рисунке 12.3.

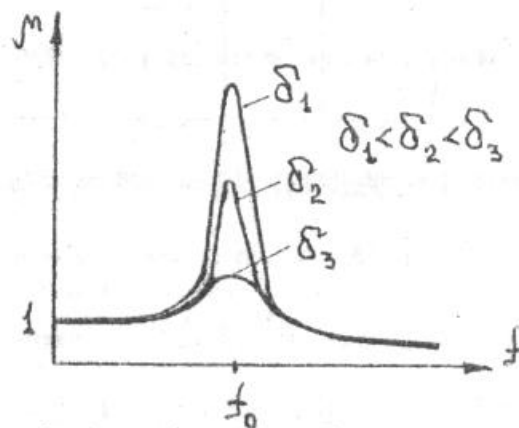


Рисунок 12.3 – Зависимость значения μ от частоты вибрации

Из приведенных кривых видно, что μ может принимать значение как больше, так и меньше единицы, т.е. конструктивный элемент или блок аппаратуры в зависимости от частоты возмущающей силы может как усиливать, так и ослаблять вибрацию.

График изменения μ в зависимости от частоты называют амплитудно-частотной характеристикой конструктивного элемента. Эта кривая в дальнейшем будет использована для обоснования и оценки эффективности различных способов виброзащиты. Коэффициент динамичности для любого значения текущей частоты f может быть определен по формуле

$$\mu = \frac{A}{A_0} = \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{\delta}{\pi}\right)^2 \alpha^2}{(1 - \alpha^2)^2 + \left(\frac{\delta}{\pi}\right)^2 \alpha^2}},$$

где d - логарифмический декремент затухания колебаний;

$\alpha = \frac{f}{f_0}$ - коэффициент расстройки по частоте.

Здесь f_0 - значение собственной частоты.

Практическое занятие №6. Экранирование РЭС.

Эффективность экрана S , оцениваемая в децибелах как относительное ослабление поля действием экрана может быть рассчитана по формуле

$$S = S_0 + S_{\Pi},$$

где S_0 – потери на отражение, дБ;

S_{Π} – потери на поглощение, дБ.

Величиной вторичного отражения поля от внутренней границы «экран – среда за экраном» пренебрегают вследствие ее малости. В зависимости от того, что действует на экран: электрическое поле (E), магнитное (H) или плоская волна (P), различают три вида потерь на отражение: $S_{0Э}$, $S_{0М}$, $S_{0П}$.

Отражение от экрана обусловлено различием тепловых сопротивлений среды, где распространяется поле, и экрана, подобно тому, как это происходит в линии, нагрузка которой не равна ее волновому сопротивлению. Когда это различие велико, потери на отражение значительны.

На низких частотах возможно хорошее экранирование электрического поля благодаря большим потерям на отражение $S_{0Э}$, тогда как потери на поглощение пренебрежительно малы. На высоких частотах для электрического поля характерна обратная картина: малые потери на отражение, но большие потери на поглощение. В экране недопустимы щели и отверстия, иначе проникающая внутрь энергия вызовет возбуждение токов утечки на внутренней стороне экрана.

При одинаковой толщине магнитные материалы (сталь и др.) на низкой частоте имеют потери на поглощение большие, чем магнитные (медь). Для этого случая экран должен быть изготовлен из относительно толстого материала с высокой магнитной проницаемостью.

С повышением частоты эффективность экранирования от внешнего источника возрастает.

Для электромагнитного экранирования используются тонколистовые и фольгированные материалы (таблица 13.1).

При оценке экранирования функциональных узлов в проектируемом устройстве выделяются узлы, наиболее ответственные с точки зрения электромагнитной совместимости, и определяется подавление помех, при котором будет обеспечено функционирование устройства. Выделяются также основные источники помех.

Таблица 13.1 – Параметры радиоматериалов

Материал	Удельная проводимость σ , См/м 10^{-7}	Относительная магнитная проницаемость μ_r
Алюминий	3,54	1
Латунь	1,25	1
Медь	5,8	1
Серебро	6,2	1
Железо	1,0	1 100...22 000
Никель	1,38	12...80
Сталь	0,66	150
Пермаллой	0,42	80...8 000

Для нормальной работы генератора РЧ подавление помехи должно составлять не менее 100 дБ. Эффективность экрана можно представить суммой двух слагаемых:

$$S_{\Sigma} = S_0 + S_n,$$

где S_0 – потери электромагнитной волны на отражение, дБ;

S_n – потери электромагнитной волны на поглощение, дБ.

Величиной вторичного отражения поля от внутренней границы «экран–среда за экраном» пренебрегают вследствие ее малости. Выбор материала и толщины экрана производится по известной величине необходимого ослабления электромагнитного поля при заданной его частоте. Как известно, для эффективности экранирования электромагнитных полей в области низких частот применяют магнитные материалы с высокой магнитной проницаемостью: железо, пермаллой. Однако ввиду того, что удельный вес этих материалов достаточно большой по сравнению с такими металлами, как алюминий, медь, латунь, применение их в малогабаритной переносимой РЭА нежелательно. Учитывая сказанное, в данной конструкции в качестве экранирующих материалов применен алюминий, что благоприятно сказалось на массогабаритной характеристике изделия. Проведем расчет эффективности экранов для указанных выше частот.

Ослабление $S_{0\Sigma}$ электрического поля отражением определяется из уравнения

$$S_{0\Sigma} = 350 + 10 \lg \frac{640 G_{\Sigma}}{f_n^3 \cdot \mu \cdot r^2} \text{ дБ},$$

где G_{Σ} – относительная электропроводимость материала экрана;

f_n – частота поля помехи, Гц;

r – расстояние между источником наводки и экраном, мм.

Определим эффективность ослабления магнитного поля:

$$S_{0M} = 201 \lg \left[\frac{12}{r} \left(\frac{\mu}{f_n G_{\Sigma}} \right)^{0,5} + 0,5 \cdot 10^{-2} r \left(\frac{\mu}{f_n G_{\Sigma}} \right)^{-0,5} + 0,35 \right].$$

Потери на поглощение энергии поля помехи в материале экрана определяются по формуле

$$S_n = 0,13 d \sqrt{\mu \cdot f_n \cdot G_{\Sigma}} \cdot \text{дБ}.$$

где d – толщина материала, равная 1 мм.

Практическое занятие №7. Логистика РЭС.

Как было отмечено на лекции, логистика РЭС это достаточно трудоемкий и ответственный процесс. В задачи логиста входит помощь инженеру-разработчику в подборе аналогов труднодоступных компонентов. Иногда логист сам принимает решение о замене компонента на полный аналог, без согласования с разработчиком. В любом случае, компетенция комплектовщика должна охватывать основные принципы электроники и построения принципиальных схем.

NB! При больших объемах заказа ошибка логиста может стоить очень дорого!

Хороший случай – когда в организации имеется отдельный логист, не являющийся разработчиком. Это позволяет разработчикам сконцентрироваться на задачах проектирования, не отвлекаясь на анализ доступности компонента и аналога. Эту, отнимающую много времени задачу, возьмет на себя комплектовщик. Желательно, чтобы работа разработчика и логиста над проектом была совместно-параллельной, что в дальнейшем сэкономит много времени, которое потребуется для того, чтобы вспомнить, почему был выбран именно этот компонент, найти еще раз документацию на компонент, и, по сути, второй раз проанализировать свое решение. Кроме этого, ответы на запросы поставщикам не всегда могут быть получены оперативно, что может значительно увеличить время от старта проекта до передачи его на производственную линию.

Здесь стоит особо отметить, что поставщик – это звено в цепи от производителя компонента до его конечного потребителя. И таких звеньев может быть большое количество. Рекомендуется выбирать крупного поставщика, поскольку он наверняка имеет большой логистический штат сотрудников и пользуется прямыми поставками из мест производства компонентов (вероятнее всего из Азии, где в настоящее время сосредоточено практически все микрoeлектронное производство). Такой подход позволяет экономить денежные средства, однако, часто приходится самостоятельно организовывать доставку компонентов.

При достаточно больших партиях производимой продукции имеет смысл использовать таможенного брокера с целью закупки компонентов напрямую из Азии и самостоятельного прохождения таможенной процедуры.

Очевидно, что на этапе макетирования проекта резонно пользоваться локальными поставщиками. Кроме этого многие крупные фирмы, например Texas Instruments, Maxim и др. предоставляют бесплатные образцы определенной части своей продукции. Данную информацию можно найти на сайте производителя.

Типовой порядок работы логиста включает следующие пункты:

1. Найти элемент по его описанию.
2. Выбрать поставщика компонентов.
3. Составить макет письма поставщику.

1. Для примера возьмем первый запрос из приложения А. Известно, что крупным производителем интерфейсов физического уровня является компания Maxim. Обратимся к их сайту <http://www.maxim-ic.com/>. На главной странице сайта в колонке Products выбираем Interface, после чего вы увидите Product Line Tree. Это дерево отображает все многообразие производимых данной компанией продуктов. Нас интересует вкладка RS-232 Line Driver/Receivers, при нажатии на которую вы попадаете на страницу

<http://para.maxim-ic.com/en/search.mvp?fam=rs232&tree=master>. Эта страница – удобный инструмент для поиска компонента по заданным параметрам. Следует отметить, что большинство крупных производителей имеет подобный инструмент на своих WEB-сайтах. Обратимся к таблице, вы видите, что здесь приведено более 150 аналогов, и если изучать каждый из них, мы потратим слишком много времени. Поэтому удобно пользоваться параметрическим поиском. В шапке таблицы приведены параметры и некоторые управляющие элементы для сортировки. Применим наши условия поиска: 2/2 приемник/передатчик, питание 5В и скорость выше 115 kbps. Количество записей в таблице сократится до 41-го. Укажем максимальный диапазон температур в параметрах - количество результатов сокращается до 9-ти. Теперь необходимо полученные результаты отсортировать по цене и выбрать чип с самой низкой стоимостью, которым является «MAX232 5V, Multi-Channel RS-232 Driver/Receiver». Нажав на его название, вы попадаете на страницу технического описания, где можно получить много полезных сведений об элементе: <http://www.maxim-ic.com/datasheet/index.mvp/id/1798>. На данном этапе логист должен обсудить с разработчиком пригодность данного чипа, тип корпуса и прочие детали. Обладая полной информацией можно выяснить из технической документации полный шифр микросхемы. Детальное изучение технической документации – залог безошибочной работы. Итогом нашего выбора стала микросхема MAX232MJE. Желательно найти еще пару аналогов у других производителей, чтобы можно было сравнить компонент по стоимости и доступности. Изучив сайт Texas Instruments, находим страницу с интерфейсами <http://www.ti.com/lscds/ti/analog/interface.page>, где в свою очередь находим гиперссылку RS-232. Далее попадаем на параметрический поиск, где аналогичными методами находим единственный результат MAX3223-EP. Страница продукта: <http://www.ti.com/product/max3232-ep>. Из документации выбираем полный шифр: MAX3232MDB.

2. Теперь необходимо выбрать поставщика компонентов, для этого воспользуемся сервисом <http://www.efind.ru>, подобных сервисов существует несколько, они упомянуты в лекции. В строку поиска вводим название нашего компонента и получаем результаты по поставщикам. В результатах поиска отображаются поставщики, у которых заявлена продажа данных компонентов. Стоимости, отраженные в таблице, не стоит воспринимать как истинные данные. Они пригодны для анализа примерной стоимости элемента. Условимся, что нам нужны чипы для макетирования, поэтому будем выбирать локального поставщика, чтобы не было необходимости организовывать доставку своими силами. Например, наш регион – Новосибирская область. Выберем поставщика RAINBOW TECHNOLOGIES – филиал в Новосибирске, их официальный сайт: <http://www.rtcs.ru/> а адрес электронной почты: nsk@rtcs.ru. Сайт Efind может и не дает точной информации, однако, здесь имеется возможность оперативно найти ближайшего поставщика и данные для связи. Аналогичным образом находим поставщика для MAX3232MDB: ЮЕ-Интернейшнл – филиал в Новосибирске. Официальный сайт: <http://www.yeint.ru/> и почта yesupport@yeint.ru. К слову, на сайте указаны контактные телефоны, по которым можно оперативно выяснить наличие компонента у поставщика, однако, если подразумевается, что это будет «под заказ» или безналичный расчет, то лучшим вариант – отправить письмо-запрос. Еще несколько слов о выборе поставщика: у опытного логиста всегда имеется определенный набор привычных ему поставщиков, проверенных временем, с которыми уже налажены связи, имеются определенные договоренности. Логист рассылает

на них письмо запрос и потом сводит полученную информацию для выбора оптимального варианта.

3. Немного слов о составлении письма. Письмо должно быть точным, не содержать фраз «если, то». Если у вас есть какие-либо варианты запроса, лучше их выдать после ответного письма от поставщика, если он вас не удовлетворил, и потом самому свести данные. Какие-то мелочи можно уточнить по телефону после отправки письма, когда поставщик уже ознакомится с вашим запросом. Письмо должно содержать точную информацию о заказываемом элементе, количество, и желаемые сроки, если они устанавливаются. Не надо писать лишнего, т.к. это техническое письмо, которое при открытии должно быстро дать максимум информации и минимум «воды». Рекомендуется в письме указывать свой контактный телефон, название вашей фирмы, полный адрес и ваше имя. Все эти данные помогут поставщику понять с кем он работает и в случае необходимости он может оперативно вам позвонить, уточнить какие-то вопросы. Например, если вы указали корпоративный номер телефона, но не указали имени, будет сложно персонализировать вас. Также рекомендуется использовать корпоративную почту для отправки запроса, а не личный электронный ящик.

Поговорим о том, как и где заказать изготовление печатной платы. Для принятия решения о заказе печатной платы, нам необходимы следующие данные:

- Сложность платы.
- Технические особенности платы.
- Срочность изготовления.
- Прототипирование или серийный заказ.
- Кем будет осуществляться монтаж компонентов.

В приложении Б приведен образец бланка заказа печатной платы компании с сайта "RCM Group" г. Санкт-Петербург: <http://www.rcmgroup.ru/pechatnye-platy.html>. Бланк представляет собой свод технических и организационных данных. Иногда существует возможность заполнения бланка непосредственно на сайте компании. Стандартного бланка не существует, т.к. каждая организация использует свой, удобный только ей вариант, поэтому часто возникают недопонимания со стороны заказчика в некоторых терминах указанных в бланке. В любом случае, целесообразно обратиться в службу технической поддержки компании для разъяснения всех вопросов. Помните, что заказ печатной платы – очень ответственная задача, требующая выяснения всех мельчайших деталей.

Существует большое число производителей печатных плат, особенно в Москве и Санкт-Петербурге. Одни компании имеют свое собственное производство, другие собирают заказы и передают их на выполнение третьей стороне. На первоначальном этапе необходимо определиться насколько сложную плату разработали проектировщики. Сложность платы определяется следующими основными параметрами:

- Общая толщина платы.
- Количество слоев.
- Минимальные расстояния между проводниками.
- Минимальная толщина проводников.
- Минимальный диаметр отверстий.
- Наличие «глухих» переходных отверстий.
- Наличие специфических краевых металлизаций.

- Особые требования к диэлектрикам.
- Особые требования к металлизации.
- Прочие особенности.

Не каждая организация способна выполнить задачи современного проектирования. Для ознакомления приведем ограничения компании ООО «Таберу», г. Москва для одно- и двухсторонних печатных плат: http://www.smtservice.ru/platy/dv_pl.php, для многослойных и гибких плат: http://www.smtservice.ru/platy/mn_pl.php. Данная компания не является производителем, но она – посредник со штатом квалифицированных инженеров. В компетенцию сотрудников таких компаний входит детальный анализ полученных входных данных. Часто в ответ на запрос вы получаете несколько уточняющих запросов. В зависимости от сложности ваша плата будет изготовлена либо на мощностях Российского производства, либо за рубежом – в случае многослойных плат. Стоит сказать, что основное производство «сложных» печатных плат сосредоточено в юго-восточной части Азии. Китайские производители берутся практически за любые сложности платы, при этом заказчик получает очень высококачественный продукт, прошедший несколько стадий контроля. Кроме этого, стоимость плат оказывается невысокой. Организации-посредники избавляют заказчика от необходимости работы с таможней и забот по доставке продукции, поэтому в случае небольших объемов заказа и, тем более, на этапе прототипирования рекомендуется воспользоваться их услугами.

В случае одно-, двухсторонних и многослойных плат невысокой сложности рекомендуется воспользоваться услугами Российских производителей. Их можно найти во многих регионах РФ. Например, существует группа компаний «PS electro», имеющая филиалы в шести городах РФ, которая размещает заказы на мощностях завода "Электроконнект", г. Новосибирск. Официальный сайт компании: <http://www.pselectro.ru/main/>.

Основным критерием размещения заказа является стоимость производства. Обычно, стоимость заказа складывается из двух основных частей: подготовка производства и собственно производство. Подготовка производства – это разовые затраты, то есть при повторном заказе вы уже не тратите средства на подготовку, а завод использует материалы от предыдущего заказа. Однако, шаблоны и трафареты имеют определенный срок службы и при большом заказе потребуются их повторное изготовление. В любом случае, данный этап рассчитывается индивидуально для каждого нового заказа. Стоимость производства вычисляется из стоимости необходимых материалов для изготовления, сложности заказываемых плат и стоимости различных технологических операций.

Как было указано, важным критерием является срочность изготовления и формат заказа (серийное производство или прототипирование). Эти факторы в значительной степени влияют на стоимость заказа. Часто, в случае «прототипа», компании-производители предоставляют некоторую скидку при заказе платы. Однако, при переходе от прототипа к серии придется заново оплачивать стоимость подготовки производства. Стоимость заказа можно оценить, используя прайс-листы производителя или воспользовавшись удобным онлайн калькулятором на сайте, например: <http://www.pselectro.ru/calc/>.

Существует большое число организаций, которые осуществляют «контрактное» производство. Вы можете воспользоваться услугами монтажа компонентов. Вариант,

когда вы заказываете изготовление плат и монтаж в одной организации, является более выгодным. Кроме этого, такие организации предоставляют услуги проектирования, логистики комплектующих элементов и корпусирования.

Если говорить о корпусах РЭС, то, как показывает опыт, Российская промышленность на данный момент времени может предложить лишь изделия из листового материала. Штампованные гибочные изделия у нас умеют делать относительно дешево, аналогично обстоят дела с окраской. Однако пластиковые изделия и любое другое литье под давлением влечет в большую стоимость матриц. Данное обстоятельство практически исключает возможность прототипирования и мелких серий. Аналогичная ситуация наблюдается и в Азии, где целесообразность изготовления собственных пластиковых корпусов приемлемого качества начинается при заказах от 100 тыс. штук. Относительно доступным вариантом является использование существующих корпусов, которыми располагает производственная фабрика и небольшая адаптация их под собственные нужды. Это не требует таких больших капиталовложений, однако ограничивает возможности дизайна.

Задачи на практическое занятие:

1. Подобрать недорогую микросхему преобразователь интерфейса UART в интерфейс RS232. Микросхема должна иметь два передатчика и два приемника. Скорость передачи не ниже 115 kbps. Напряжение питания 5В. Сложные климатические условия. Выбрать поставщика и составить макет письма с запросом компонента.

2. Подобрать недорогую микросхему - формирователь шины 8 разрядов, двунаправленный, с возможностью перехода в 3-е состояние. Напряжение питания 3,3В. (например, 74LVC245A) Выбрать поставщика и составить макет письма с запросом компонента.

3. Подобрать недорогую микросхему – логический двухходовой элемент И. Напряжение питания 3,3В. (напр. 74V1G08) Выбрать поставщика и составить макет письма с запросом компонента.

4. Подобрать недорогую микросхему – инвертирующий элемент НЕ. Напряжение питания 3,3В. (напр. SN74LVC1G14) Выбрать поставщика и составить макет письма с запросом компонента.

5. Подобрать недорогую микросхему – логический двухходовой элемент ИЛИ. Напряжение питания 3,3В. (напр. 74V1G32) Выбрать поставщика и составить макет письма с запросом компонента.

Приложение А

Образец бланка заказа печатных плат

Сведения о заказчике

Название фирмы-заказчика	
Контактное лицо	
Телефон, факс	
Электронная почта	
Дата заполнения заказа	
Количество плат	

Общие сведения о плате

Размер платы X*Y, мм	
Толщина платы, мм	
Количество слоев	
Тип материала (FR4, FR4 High TG, CEM1, Rogers, другой)	
Минимальный проводник	
Минимальный зазор	
Минимальное металлизированное отверстие	
Контроль волнового сопротивления (да/нет) ²	
Маскирующее покрытие (да/нет)	
Цвет маски	Зеленый по умолчанию
Маркировка (да/нет, кол-во сторон)	
Цвет маркировки	Белый по умолчанию
Покрытие контактных площадок (ПОС-61, иммерсионное золото, иммерсионное олово, другое)	
Переходные отверстия открыты от маски? ³	
Несквозные отверстия (да/нет)	
Золочение на разъеме (да/нет)	
Внутренние вырезы (да/нет)	
Фаска на разъеме (да/нет)	
Электроконтроль (да/нет)	
Технология монтажа (свинцовый, бессвинцовый, смешанный) ⁴	
Военная приемка ПЗ (приемка №«5»)	Да/Нет
Лазерная маркировка ⁵	Да/Нет
Класс изделия по IPC ⁶	2 (по умолчанию)

Сведения о файле заказа

² Если «Да», в дополнительных требованиях указать параметры для контроля волновых сопротивлений (слои, ширину проводников, зазоры для дифф. пар, значение импеданса);

³ Если файлы заказа в формате Gerber данное поле заполнять не надо;

⁴ В случае бессвинцового монтажа необходимо применять высокотемпературные материалы (например FR4 High Tg), а также покрытия не содержащие свинец (например иммерсионное золото);

⁵ Индивидуальная маркировка ПП (штрих-код) методом лазерной гравировки. Размер и местоположение маркировки согласовываются с заказчиком;

⁶ Справочная информация: <http://www.rcmgroup.ru/Standarty.181.0.html>

Название файла (файлов)	
Формат файла (PCAD 4.x, PCAD 8.x, PCAD 200x, Orcad, Protel, Gerber, другой)	
Единицы измерения (дюймы, псевдодюймы, мм) ⁷	
Включать вращение стеков контактных площадок ⁸	

Таблица соответствия конструкторских и технологических примитивов

Тип пина PCAD	Форма контактной площадки	Диаметр отверстия	Размер контактной площадки	Металлизировать?
0				
1				

Перечень технологических слоев⁹

Назначение слоя	Название	Примечание	Пояснение
Контур и вырезы			Обработка контура (по центру линии данного слоя)
Маркировка стороны компонентов			Шелкографическая маркировка верхнего слоя
Маскирующее покрытие стороны компонентов			Паяльная маска верхнего слоя
Топология стороны компонентов			Медь верхнего слоя
Внутренний слой 1			Медь 2-го слоя
Внутренний слой 2			Медь 3-го слоя
Внутренний слой 3			Медь 4-го слоя
Внутренний слой 4			Медь 5-го слоя
Топология стороны пайки			Медь нижнего слоя
Маскирующее покрытие стороны пайки			Паяльная маска нижнего слоя
Маркировка стороны пайки			Шелкографическая маркировка нижнего слоя
Токопроводящее покрытие (Carbon Ink) стороны компонентов			Дополнительное покрытие графитом (например, для контактных групп)
Токопроводящее покрытие (Carbon Ink) стороны пайки			наносится методом шелкографии
Сверловка (металлизированные отверстия)			Первый цикл сверления

⁷ Для PCAD 4.x, PCAD 8.x, или если единицы измерения не совпадают с заданными в проекте;

⁸ Только для PCAD 4.x, PCAD 8.x;

⁹ Названия слоев в CAD/CAM системе или имена Gerber файлов

Сверловка (неметаллизированные отверстия)			<i>Второй цикл сверления</i>
Сверловка (несквозные отверстия) ¹⁰			<i>Слепые или погребенные отверстия</i>

Дополнительные требования

На все печатные платы наносится логотип «Абрис СПб» или RCM group в слое паяльной маски

¹⁰ Необходимо указать диапазон(ы) слоев для сверления

Практическое занятие №8. Рассмотрение способов наращивания слоев интегральной микросхемы.

Наращивание слоёв

ИС имеет многослойную структуру. Основной структуры ИС является пластина полупроводника — подложка, на которую в ходе технологических процессов изготовления наносится новые слои материалов: полупроводников; металлов; диэлектриков. Существует множество способов наращивания слоёв различных материалов.

Окисление (обычно называемое термическим окислением) — процесс, при котором на поверхности кремниевой подложки выращивается защитная пленка диоксида кремния (SiO_2). Процесс выполняют при температуре от 800 до 1300 °С, в атмосфере, содержащей либо кислород (O_2) (**сухое окисление**), либо кислород в смеси с водяным паром (H_2O) (**жидкостное окисление**).

Физическое парофазное осаждение (Physical Vapor Deposition, PVD-процесс) — физический процесс напыления, при котором покрытие получается путём прямой конденсации пара наносимого материала (или нескольких материалов).

Химическое парофазное осаждение (Chemical Vapor Deposition, CVD-процесс) — химический процесс напыления, при котором пары наносимого материала (или нескольких материалов) производят на поверхности подложки необходимое вещество вступая в реакцию и/или разлагаясь.

Эпитаксиальное выращивание (эпитаксия) — ориентированный рост одного кристалла на поверхности другого (подложки). Различают **гетероэпитаксию**, когда вещества подложки и нарастающего кристалла различны (процесс возможен только для химически не взаимодействующих веществ с близкой кристаллической структурой, например выращивание пленки кремния на сапфировой подложке), и **гомоепитаксию**, когда они одинаковы (например кремния на кремнии).

Неэпитаксиальное выращивание — образование устойчивого соединения материала не повторяющего кристаллическую структуру подложки.

Для выращивания эпитаксиальных слоев применяются три основных метода:

- ▲ парофазная эпитаксия,
- ▲ жидкостная эпитаксия,
- ▲ молекулярно-лучевая эпитаксия.

Парофазная эпитаксия (VPE) — эпитаксиальное выращивание пленки посредством парофазного осаждения молекул Пары, содержащие кремний и контролируемое количество примесей р- или n- типа в газе носителе (обычно водород), пропускаются над нагретыми пластинами, чтобы осадить кремниевые слои с введенными

примесями. Этот процесс обычно осуществляется при атмосферном давлении и температуре от 900 до 1300 °С..

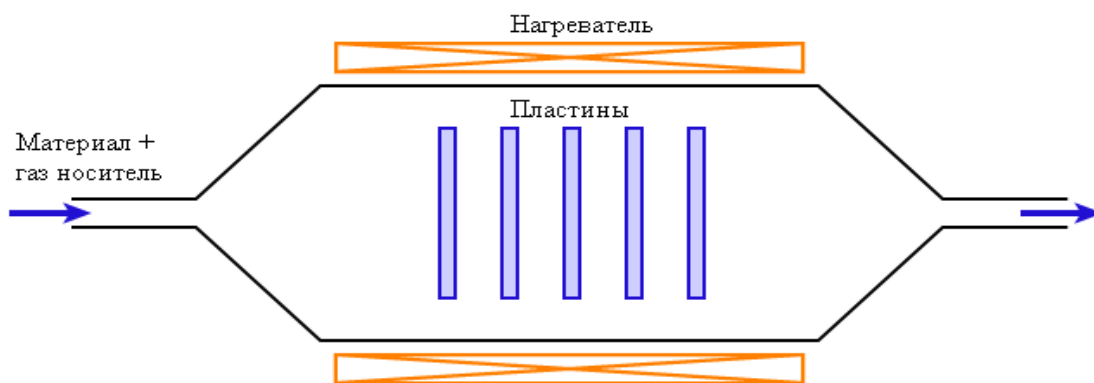


Рисунок 15.1 – Парофазная эпитаксия

Жидкофазная эпитаксия (LPE) — эпитаксия из жидкой фазы. Расплав смеси (шихты) из вещества наращиваемого слоя, легирующей примеси (может быть подана и в виде газа) и металла-растворителя, имеющего низкую температуру плавления и хорошо растворяющего материал подложки (Ga, Sn, Pb), наносится на поверхность подложки, частично растворяя её, и удаляя загрязнения и дефекты. После выдержки при максимальной температуре около 1000 °С начинается медленное охлаждение. Избытки полупроводника осаждаются на подложку, играющую роль затравки.

Процесс проводят в атмосфере азота и водорода (для восстановления оксидных плёнок на поверхности подложек и расплава) или в вакууме (предварительно восстановив оксидные плёнки).

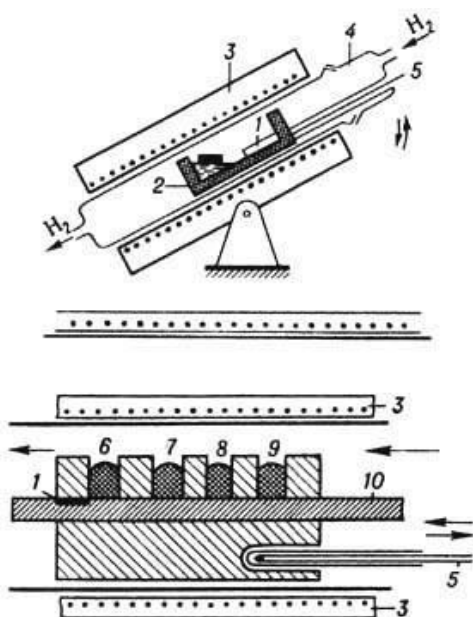


Рисунок 15.2 - Схема устройства для жидкофазной эпитаксии со сливом раствора с поверхности плёнки (вверху) и принудительным удалением раствора (внизу): 1 -

подложка; 2- контейнер; 3- печь сопротивления; 4- кварцевая ампула; 5 - термопара; 6-9- растворы; 10- ползунок; 11- кассета.

Молекулярно-лучевая эпитаксия (МВЕ) — физическое парофазное осаждение испаренного в молекулярном источнике вещества на кристаллическую подложку в условиях сверхвысокого вакуума (около 10^{-8} Па). Чистота испаряемых материалов должна достигать 99,999999 %. Молекулярный источник должен быть способен испарять тугоплавкие вещества (такие как металлы) и иметь возможность регулировки плотности потока вещества.

Молекулярно-лучевая эпитаксия позволяет выращивать гетероструктуры заданной толщины с моноатомно гладкими гетерограницами и с заданным профилем легирования. В установках имеется возможность исследовать качество плёнок прямо в ростовой камере во время роста. Для процесса эпитаксии необходимы специальные хорошо очищенные подложки с атомарногладкой поверхностью. Особенностью такой эпитаксии является невысокая скорость роста пленки (обычно менее 1000 нм в час).

Молекулярно-лучевая эпитаксия GaAs заключается в применении системы сверхвысокого вакуума, в которой имеются источники атомных или молекулярных пучков Ga и As, и нагретой пластины подложки. Источники молекулярных пучков - обычно контейнеры для жидкого Ga или твердого As с отверстием в направлении подложки. Когда диффузионная печь (или контейнер) нагревается, атомы Ga или молекулы As испаряются через отверстие. Выращивание GaAs обычно происходит при температуре подложки выше 450 °С.

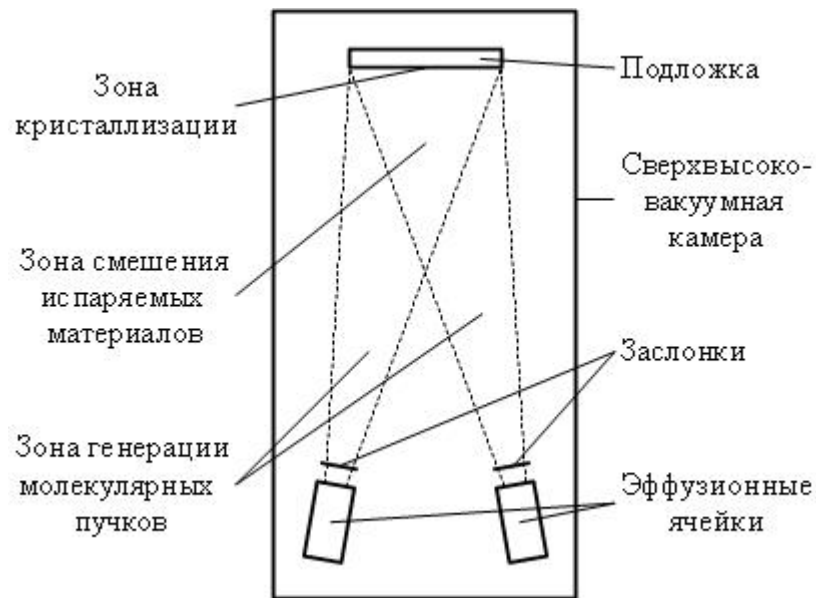


Рисунок 15.3 – Молекулярно-лучевая эпитаксия

Литография.

Литография — технология переноса рисунка с шаблона на конкретную поверхность.

Фотолитография — метод получения рисунка на поверхности материала путём нанесения и засвечивания светочувствительного покрытия (**фоторезиста**) через шаблон-негатив (**фотошаблон**) с последующим снятием соответствующей части фоторезиста и вытравливанием незащищённой поверхности. После травления оставшийся фоторезист так же снимается. Для получения рисунка используется свет определённой длины волны. Минимальный размер деталей рисунка — половина длины волны (определяется дифракционным пределом).



Рисунок 15.4 – Технологический процесс фотолитография

На окисленную поверхность пластины наносится слой фоторезиста — полимер на основе растворителей. С помощью центрифуги его распределяют тонким равномерным слоем по поверхности пластины. Резистивные материалы могут быть негативными и позитивными в зависимости от того, уменьшается их растворимость в проявителе (негативные) или увеличивается (позитивные) под действием излучения.

Для обеспечения адгезии резистивного слоя к пластине на нее наносится вещество связывающее молекулы воды на поверхности пластины.

После нанесения резиста пластины перемещаются в печь с азотной атмосферой и контролируемой температурой. Умеренная температура (от 70 до 90 °С) вызывает затверждение фоторезиста (**мягкий отжиг**) и испарение остатков растворителей оставляя полимерную пленку.

Пластина с плёнкой фоторезиста помещается в установку экспонирования. В качестве негатива используется прецизионная **маска (фотошаблон)** — пластина кварцевого стекла с топологическим рисунком одного слоя одной ИС (в масштабе), образованным плёнкой хрома. По специальным знакам, заранее сформированным на поверхности пластины, установка автоматически выравнивает пластину, настраивает фокус и засвечивает светочувствительный слой через маску и систему линз с уменьшением так, что на пластине получается изображение кристалла в масштабе 1:1.

Затем пластина сдвигается, экспонируется следующая ИС и так далее, пока не обработаются все ИС на пластине.



Рисунок 15.5

После нанесения рисунка неполимеризованные участки резиста растворяются и удаляются. Проявитель, основанный на растворителе, наносят на покрытую резистом поверхность пластины посредством погружения, распыления или разбрызгивания. После проявителя обычно применяется растворитель (n-бутиловый ацетат, изопропиловый спирт, ацетон и др.) для удаления остатков материалов. Резист, остающийся после проявления, защищает отдельные слои во время последующей технологической обработки.

DUV литография (Deep UltraViolet — глубокое ультрафиолетовое излучение) — фотолитография использующая ультрафиолетовое излучение с длиной волны 248 нм, 193 нм и 157 нм.

EUV литография (Extreme UltraViolet — сверхжесткое ультрафиолетовое излучение) — фотолитография использующая ультрафиолетовое излучение с длиной волны 13,5 нм.

Переход с DUV- на EUV-литографию обеспечивает более чем 10-кратное уменьшение длины волны и переход в диапазон, где свойственные транзисторам размеры сопоставимы с размерами всего нескольких десятков атомов. Однако технология с применением EUV-излучения обладает дополнительной сложностью.

Свет с длиной волны 13,5 нм поглощается всеми материалами, в том числе стеклом, из которого изготавливаются традиционные линзы, поэтому в EUV-литографии используется полностью отражающая, а не пропускающая оптика. Технология предполагает применение отражающей маски и серии из четырех (?) специальных выпуклых зеркал, которые уменьшают и фокусируют изображение, полученное после использования маски. Каждое такое зеркало содержит около 80 отдельных металлических слоев толщиной примерно в 10 атомов. Вся система должна находиться в вакууме, поскольку световые волны диапазона EUV поглощаются воздухом.

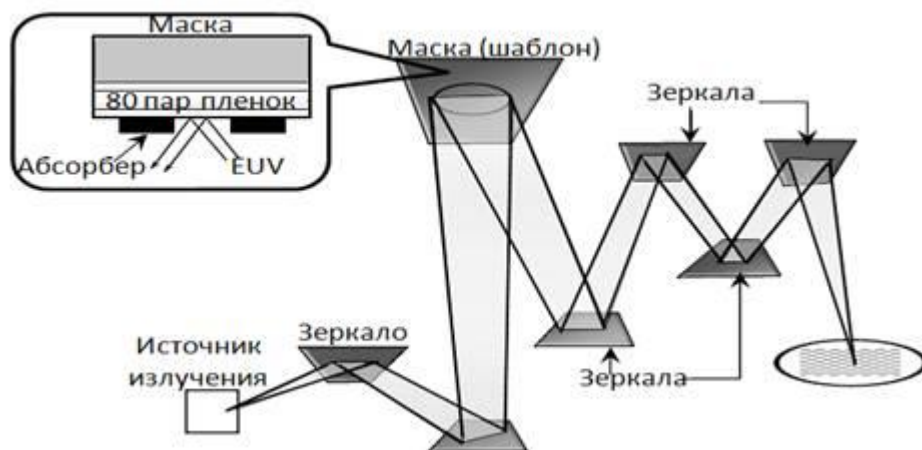


Рисунок 15.6 – EUV литография

Шаблон с фазовым сдвигом — маска в которой, на одну из двух соседних прозрачных линий накладывается фазовый фильтр, сдвигающий фазу проходящей волны на 180° . В результате интерференции волн в противофазе происходит их взаимное ослабление в области между двумя экспонируемыми линиями, что делает их хорошо различимыми и повышает разрешающую способность. (Применяется как часть DUV литографии с длиной волны 193 нм, техпроцесс 45 нм.)

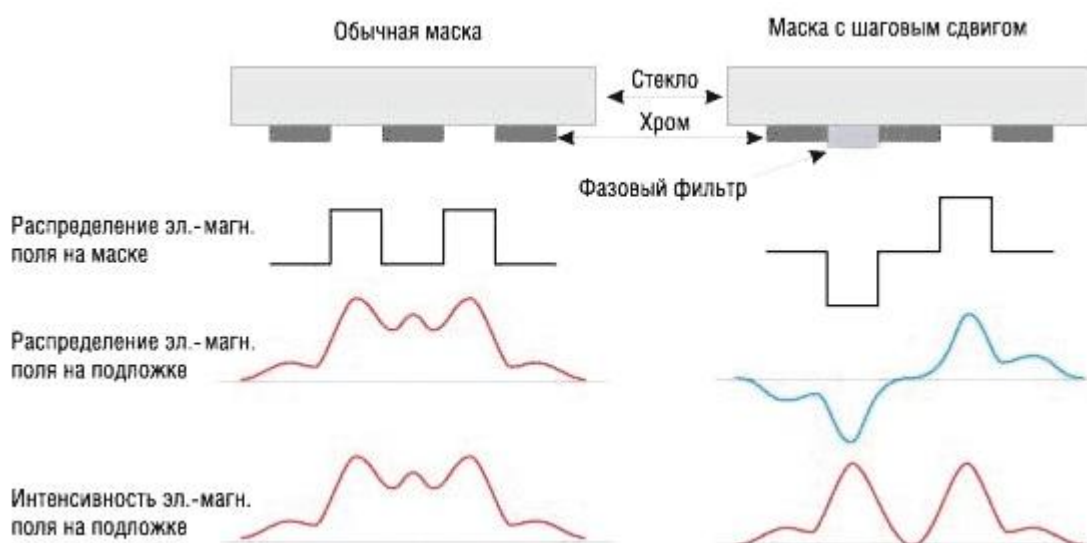


Рисунок 15.7

Иммерсионная литография — фотолитография в процессе которой кремниевые пластины с нанесенным слоем фоторезиста помещаются в воду (жидкость). Коэффициент преломления воды выше, чем коэффициент преломления вакуума, что эквивалентно уменьшению эффективной длины волны проходящего через воду излучения в n раз, где n — показатель преломления используемой жидкости. Уменьшение длины волны излучения позволяет повысить разрешающую способность литографии. (Применяется как

часть DUV литографии с длиной волны 193 нм, техпроцесс 32 нм.)

Технология двойной экспозиции — применяется две маски и, соответственно, два процесса экспозиции фоторезиста. Каждая маска содержит часть топологического рисунка, элементы которой разнесены на расстояние исключающее интерференцию волн. Фактически двойная экспозиция позволяет повысить разрешающую способность в два раза, но требует вдвое больше масок, и технологических операций следовательно — в два раза дороже, чем одинарная. Если использовать фоторезист с нелинейными свойствами, то можно сначала сделать двойную экспозицию, а потом уже приступить к этапам проявления и травления. (Применяется как часть DUV литографии с длиной волны 193 нм, техпроцесс 22 нм.)

Рентгенолитография — литография в которой для засвечивания резиста применяются рентгеновские лучи, в остальном эквивалентна фотолитографии. Длина волны рентгеновского излучения — 0,2-0,5 нм.

Проекционная электронно-лучевая литография — литография в которой для засвечивания резиста применяются широкий нефокусированный поток электронов. В такой системе фотокатод расположен на поверхности оптической маски с заданным рисунком. Ультрафиолетовые лучи облучают фотокатодный слой через маску, что вызывает эмиссию электронов с фотокатода в облученных местах рисунка. Эти электроны проецируются на поверхность резиста с помощью однородных электростатических и магнитных полей. В остальном метод эквивалентен фотолитографии. Дебройлевская длина волны электрона менее 0,1 нм.

Сканирующая электронно-лучевая литография — литография в которой топологический рисунок прорисовывается на резисте сфокусированным пучком электронов, последовательно перемещаемым в плоскости рисунка. Применение маски не требуется.

Сканирующая электронно-лучевая литография обладает большим временем экспонирования, используется при создании масок для фотолитографии и в производстве штучных компонентов, где требуется нанометровое разрешение.

Электронная литография SPEL (self-powered electron lithography) — литография в которой резист засвечивается потоком электронов через маску, источником электронов является тонкая плёнка радиоизотопа. Данная система позволяет сразу засвечивать большие площади подложек с фоторезистом, значительно ускоряя процедуру.

Наноимпринт литография (NanoImprint Lithography — NIL) — базируются на принципе механического модифицирования полимерной пленки при помощи нанощаблона (**стемпер**), с последующей термомеханической обработкой (горячее

тиснение) либо обработкой ультрафиолетом.

УФ наноимпринт литография — литография в которой полимерная плёнка (фоторезист) засвечивается через наложенный на неё стемпер ультрафиолетовым излучением.



Рисунок 15.8

Наноимпринт литография с горячим теснением — литография в которой полимерная плёнка и стемпер перед наложением нагревается до температуры выше стеклования, а после наложения стемпера остужается до температуры ниже стеклования.



Рисунок 15.9

Ожидалось что в 32 и 22 нм процессах будет применяться EUV литография, однако более доступным оказалось применение иммерсионной DUV литографии при длине волны 193 нм в паре с технологией двойной экспозиции. На следующих этапах планируется развитие EUV литографии, электронно-лучевой литографии, наноимпринта.

Трудности внедрения EUV литографии и рентгенолитографии связаны с

проблемами поглощения и отражения излучения фотошаблонами. Электронно-лучевая литография — слишком малопродуктивный и очень дорогой метод. Для увеличения его пропускной способности создаются многолучевые установки.

Литография	Длина волны, нм	Техпроцесс, нм
DUV литография	248	350, 250, 180
	193	180, 130, 90, 65
	157	
EUV литография	13,5	45, 32
Иммерсионная DUV литография с двойной экспозицией	193	32, 22
Рентгенолитография	0,4-0,5	
Проекционная электронно-лучевая литография		
Сканирующая электронно-лучевая литография	0,1	10, 1
SPEL		35, 20
Наноимпринт литография		10

Взрывная (lift off) литография применяется для создания топологических рисунков без травления. После снятия неполимеризованного фоторезиста проводится осаждение многослойного или однослойного металлического покрытия. Этот процесс подразумевает образования слоев металла на всей площади образца, обращенной к источнику материала. После осаждения покрытия образец погружается в органический растворитель, растворяющий фоторезист и обеспечивающий его удаление с поверхности полупроводника. При этом вместе с фоторезистом удаляются ненужные слои осажденного металла.

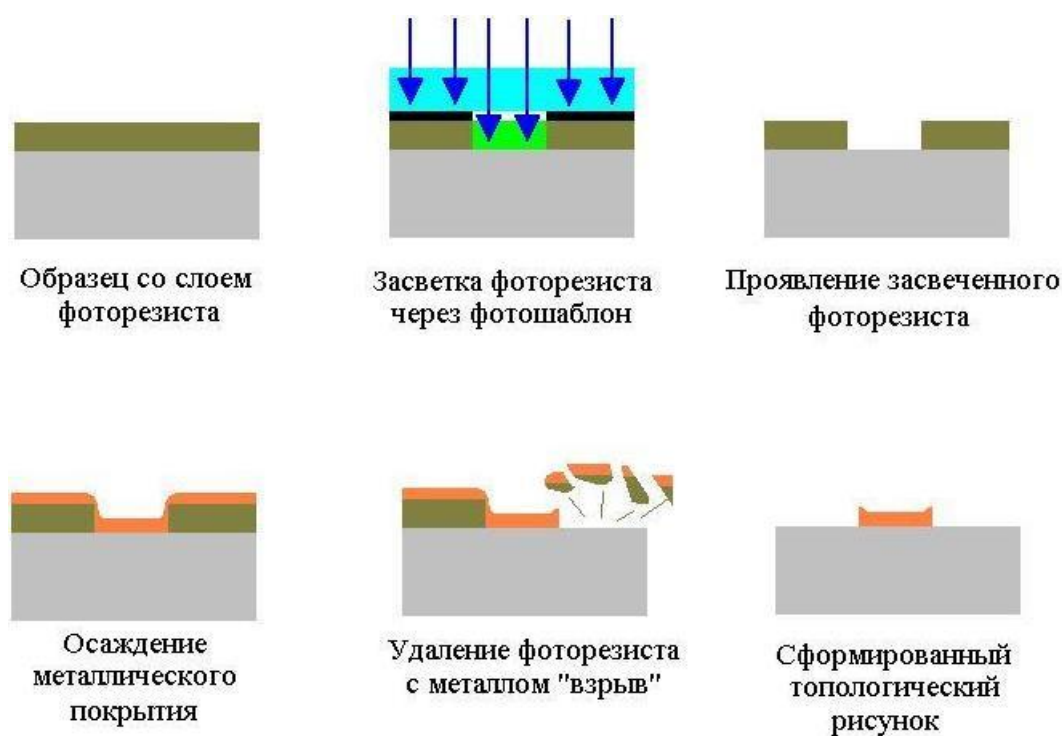


Рисунок 15.10 – Взрывная литография

Объёмная структура ИС создается слой за слоем, каждый слой имеет свой топологический рисунок, технологический цикл литографии (нанесение фоторезиста, экспонирование, травление) будет повторён множество раз. Именно этот этап производства ИС является критическим в плане ошибок: пылинка или сдвиг в сторону при наложении очередной маски приводит к негодности ИС.

ЛИТЕРАТУРА

Шарапов А.В. Аналоговая схемотехника: Учебное пособие. – Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2003. – 128 с.

Образцов Н.С. Конструирование радиоэлектронных устройств: Учебно-метод. пособие для студ. спец. I-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС», I-39 02 02 «Проектирование и производство РЭС», I-38 02 03 «Техническое обеспечение безопасности» дневн. и заоч. форм обуч./ Н.С. Образцов, Н.И. Каленкович, А.М. Ткачук и др. – Мн.: БГУИР, 2006. – 71 с.

Пирогова Е.В. Проектирование и технология печатных плат: Учебник.
– М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2005. – 560 с. (Высшее образование).