

Министерство высшего и среднего  
специального образования РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ С.П.КОРОЛЕВА

Кафедра "Конструирование  
и производство радиоаппаратуры"

К О Н С Т Р У И Р О В А Н И Е  
И Р А С Ч Е Т М И К Р О С Х Е М

Методические указания  
к курсовому проекту

К у й б ы ш е в 1 9 7 5

Методические указания предназначены для выполнения курсового проекта по курсу "Конструирование и расчет микросхем". В них рассмотрены особенности расчета электрических и конструктивно-технологических характеристик пассивных элементов гибридных пленочных микросхем, особенности проектирования топологии микросхем, сборки и защиты, содержатся сведения о выборе материалов и навесных элементов, приведены правила оформления конструкторской документации.

Составитель М е р к у л о в А.И.

Рецензенты: доцент Ч у д и н о в А.А.,  
ст.преподаватель М а к а р о в а Л.В.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Увеличение функций, выполняемых радиоэлектронной аппаратурой (РЭА), при одновременном уменьшении ее габаритов, веса, повышении надежности возможно лишь при коренном изменении принципов конструирования и технологии производства, при переходе на микросхемное исполнение.

Интенсивное развитие микроэлектроники привело к включению в программу обучения студентов специальности 0705 - "Конструирование и производство радиоаппаратуры" курса "Конструирование и расчет микросхем", по которому выполняется курсовой проект. К сожалению, учебника по названному курсу пока нет. Сведения по конструированию и расчету микросхем, имевшиеся в отечественной и зарубежной литературе, разрозненны и содержатся, как правило, в периодических изданиях.

В настоящих методических указаниях сделана попытка обобщить взаимосвязанно изложить имеющиеся у автора материалы и соображения применительно к разработке методов расчета параметров пассивных пленочных элементов, к решению задачи уменьшения габаритов, веса и увеличения надежности гибридных пленочных микросхем частного применения.

В методические указания включены сведения по выполнению и оформлению курсового проекта, материал для расчета и конструирования пленочных резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, контактных переходов, тонкопленочных  $RC$  - цепей с распределенными параметрами, приведены характеристики подложек, активных элементов, корпусов для микросхем и другие сведения.

При разработке указаний использованы материалы аналогичных изданий Казанского авиационного института - редактор Ю.И. Ермолаев, Таганрогского радиотехнического института - автор В.П. Попов, Владимирского политехнического института - автор В.Н. Устюжанинов, Рязанского радиотехнического института - автор А.С. Семин, редактор П.В. Коробейников.

## 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

**Ц е л ь р а б о т ы:** проект выполняется с целью закрепления полученных на лекциях теоретических знаний и приобретения практических навыков в самостоятельном проектировании гибридных пленочных микросхем.

### Тематика курсовых проектов

Тема курсового проекта должна представлять собой задание на расчет и конструирование гибридных пленочных микросхем функциональных узлов РЭА частного применения.

Для проектирования студенту выдается принципиальная электрическая схема функционального узла (усилителя, преобразователя, генератора, триггера, логической схемы) или устройства (счетчика, регистра, сумматора), несложного блока или части блока радиоустройства со всеми необходимыми для проектирования данными. Темой курсового проекта также может быть:

разработка принципиально новой конструкции микросхемы на основе новейших достижений науки и техники;

исследование характеристик активных и пассивных элементов микросхем, изготавливаемых по новой технологии с применением новых материалов;

исследование новых физических явлений в твердом теле или тонких пленках;

опытная проверка новых теоретических положений в микроэлектронике;

разработка новых методов расчета и проектирования интегральных схем;

постановка новых лабораторных работ по микроэлектронике.

Для того, чтобы студенты имели возможность ознакомиться с рекомендуемыми для проектирования темами, их список

должен быть вывешен на кафедре задолго до начала работ.

### Задание на курсовой проект

Задание на проектирование выдается студенту на типовом бланке (см. прил. 4). В задании указываются тема курсового проекта, исходные электрические и конструктивные данные, ТУ на проектирование и эксплуатацию, особые указания.

В бланке задания также указываются сроки выдачи задания и защиты проекта, фамилии с инициалами руководителя и студента, номер группы. Задание подписывается руководителем и утверждается ведущим преподавателем.

### Содержание и объем курсового проекта

Курсовой проект должен состоять из расчетно-пояснительной записки (не более 40 листов рукописного текста) и графической части (чертежей).

Расчетно-пояснительная записка должна включать следующие разделы:

1. Задание на проектирование.
2. Введение с обоснованием поставленной задачи.
3. Описание примерной работы схем. Проверочный электрический расчет схем.
4. Анализ задания на проектирование (анализ объекта проектирования, технических условий на проектирование и эксплуатацию).
5. Обоснование расчленения схем на микросхемы (при необходимости).
6. Выбор и обоснование техпроцесса изготовления проектируемой микросхемы.
7. Выбор материалов для изготовления микросхем, определение оптимальных значений  $R_0$  и  $C_{\text{вз}}$ .
8. Конструктивный, тепловой, точностной расчеты элементов микросхем, расчет переходных сопротивлений и паразитных связей в микросхемах.

9. Выбор и обоснование топологии проектируемой схемы.
10. Выбор и обоснование параметров технологического процесса изготовления микросхемы, выбор технологического и измерительного оборудования.
11. Выбор и обоснование общей конструкции микросхемы, способов ее сборки и герметизации.
12. Расчет надежности проектируемой микросхемы (по указанию преподавателя).
13. Выводы, рекомендации.
14. Список использованной литературы.
15. Содержание.

Графическая часть проекта должна содержать:

1. Принципиальную электрическую схему узла (с нумерацией входных, выходных, контрольных точек и точек подключения питания), формат 22 или 12.
2. Сборочный чертеж микросхемы, формат 22 или 24.
3. Сборочный чертеж функционального узла (блока), формат 22 или 24.
4. Топологический чертеж микросхемы.
5. Чертежи слоев микросхемы (чертежи масок).
6. Чертежи специальных деталей (при необходимости).

Количество чертежей и их форматы устанавливаются руководителем проекта. Ориентировочно графическая часть должна содержать 2-3 листа формата 24.

При наличии большой экспериментальной или теоретической части объем расчетной и графической частей проекта может быть сокращен по согласованию с преподавателем.

Графическая часть выполняется в соответствии с требованиями ЕСКД, а также МНСЧХ и РТМ на микросхемы гибридные пленочные (конструирование и изготовление) НПО.ОЮ.ОЮ редакция I-67 или "Микросхемы. Топология РТМ ЮГО.052.002".

Выполнение курсового проекта

Выполнение проекта следует начинать с ознакомления с заданием, настоящими методическими указаниями и подбора литературы.

Во время работы над курсовым проектом студент должен показать умение самостоятельно решать технические задачи, работать с литературой. Студенту должна принадлежать инициатива выбора топологии, конструкции, технологии, методов герметизации и т.д. Руководитель обязан лишь одобрить или аргументированно отклонить предложенный студентом вариант решения, чтобы предостеречь его от ошибок в работе.

Вся работа над проектом должна быть проникнута стремлением студента применить новую прогрессивную технологию, использовать последние достижения в микроэлектронике. Однако следует помнить, что применение несовместимых техпроцессов может привести к увеличению стоимости аппаратуры.

Руководитель следит за своевременным выполнением курсового проекта, отмечает процент готовности и подает сведения на кафедру.

В случае невыполнения студентом календарного графика кафедры ставит об этом в известность деканат.

Не позднее чем за месяц до начала защит преподаватель вывешивает на доске объявлений кафедры график. Расчетно-пояснительные записки должны быть сданы на проверку преподавателю не позднее чем за неделю до дня защиты.

Защита курсового проекта производится перед комиссией в составе 2-3 человек, назначаемой заведующим кафедрой. Письменное заключение на защиту проекту дает руководитель проекта, который в обязательном порядке входит в состав комиссии.

Защита заключается в кратком изложении задания и содержания проекта, в обосновании и разъяснении принятых решений, в ответах на вопросы. На сообщение отводится 5-7 минут.

Разрешается досрочная защита проектов.

### Оформление курсового проекта

Оформление конструкторской документации курсового проекта (пояснительной записки, чертежей, схем, спецификаций, технических условий и т.д.) должно производиться в полном и строгом соответствии с требованиями ЕСКД и правилами оформ-

ления технической документации на гибридные пленочные интегральные схемы (см. раздел III).

Пояснительную записку пишут от руки чернилами или тушью на одной стороне листа формата 11. Слева необходимо оставлять поле для подшивки (2-3см). Все листы записки должны быть пронумерованы (номер страницы указывается в средней части листа) и аккуратно переплетены.

Поясняющие текст, графики, чертежи, схемы, таблицы выполняют чернилами или тушью непосредственно на листах записки или вычерчивают на отдельных листах ватмана, кальки или миллиметровой бумаге того же формата 11 и вклеивают в соответствующие места текста. Они должны иметь свои порядковые номера, на которые в тексте даются ссылки (например, рис.1, табл.1 и т.д.). Кроме того, желательно давать подписи, поясняющие смысл иллюстраций.

Содержание записки должно быть изложено в строгой последовательности, быть кратким, точным и технически правильным.

Пояснительная записка должна начинаться с титульного листа, образец которого дан в прил. 5. За титульным листом должен следовать полностью заполненный бланк задания на проект. Страницы на этих первых двух листах обычно не проставляются, хотя и подразумеваются.

Для удобства обозрения и чтения записки текст ее следует разделить на главы и параграфы. Каждый новый абзац записки должен начинаться с красной строки и относиться к одной какой-либо мысли, выражаемой одним или несколькими предложениями. Абзацы не должны быть слишком большими.

Во всей записке необходимо поддерживать единство принятой терминологии, условных обозначений и допускаемых сокращений слов. Обозначения электрических величин следует применять в соответствии с утвержденным стандартом.

Список использованных при выполнении данного проекта книг, журналов, статей, методических пособий и т.д. приводится в разделе "литература". На каждый источник должна быть



ссылка в тексте.

При составлении списка литературы вначале указывается фамилия автора с инициалами, затем - полное и точное название книги (журнала, статьи и др.), город, издательство и год издания. Например: Аренков А.Б. Печатные и пленочные элементы радиоэлектронной аппаратуры, Л., "Энергия", 1971.

Список составляют в алфавитном порядке по фамилиям авторов и приводят в конце пояснительной записки. В списке вначале указываются отечественные издания (на русском языке), затем - иностранные (на иностранном языке).

При ссылке на источники в тексте записки указывается только порядковый номер его в перечне, заключенный в квадратные скобки.

Оглавление записки допускается помещать в начале текста, непосредственно за бланком задания на проект.

В оглавлении должны быть перечислены все главы и параграфы пояснительной записки с указанием их начальных страниц. Главы обозначаются арабскими цифрами. Переносы и сокращения слов в заголовках не допускаются. Точка в конце заголовка не ставится.

Чертежи графической части выполняются в карандаше на листах ватмана соответствующего стандартного формата. Исключение может быть сделано для электрических принципиальных схем и послойных чертежей, которые допускается выполнять в карандаше или в туши на листах миллиметровой бумаги формата 11 или 12 и затем подшивать в пояснительную записку в качестве приложений.

Форматы чертежей и других конструкторских документов выбираются согласно ГОСТ 2.301-68 "ЕСКД. Форматы". Обозначения и размеры основных форматов даны для справки в табл. 1.

Таблица 1.1

Обозначение формата	44	24	22	12	11
Размеры сторон формата	1189x841	594x841	594x420	297x420	297x210

В правом нижнем углу чертежей должен быть типовой штамп, выполненный по ГОСТ 2.104-68 "ЕСКД". Основные надписи".

Чертежи изделий (деталей) вспомогательного производства (деталировочные чертежи) должны иметь штамп по форме № 2 ГОСТ 5293-60.

Текстовые документы (спецификация и др.) также должны иметь угловые штампы, отличные от рассмотренных выше. Различны штампы для заглавного и последующих листов текстовых документов. Так, для заглавного листа (первый лист спецификации) применяется штамп по форме 2 ГОСТ 2.104-68, для последующих листов (продолжение спецификации) - штамп по форме 2А ГОСТ 2.104-68 ЕСКД.

Местоположение штампа относительно сторон формата следует выбирать согласно ГОСТ 2.106-68 ЕСКД.

Чертежи выполняются в определенных масштабах в соответствии с ГОСТ 2.302-68 "ЕСКД. Масштабы". Наиболее предпочтительным является масштаб 1:1. Допускается пользоваться масштабами для уменьшения - 1:2; 1:5, 1:10; для увеличения - 2:1, 5:1, 10:1.

Схемы выполняются без соблюдения масштаба. Элементы схем изображаются в виде графических обозначений в условном масштабе. Увеличение или уменьшение размеров элементов (ГОСТ 2.747-68 ЕСКД) производится произвольно, но пропорционально для всех элементов данной схемы.

Чертеж общего вида устройства (конструкции разработанного узла или блока) должен иметь такое число проекций (се-

чений, разрезов), которое дает ясное представление о конструкции в целом и о расположении всех входящих в нее деталей. На сборочных чертежах указываются только габаритные и установочные размеры.

Спецификация сборочных чертежей, а также электрической принципиальной схемы выполняется на листах ватмана формата 11 по ГОСТ 2.108-68 ЕСКД и подшивается к пояснительной записке.

Чертежи деталей должны иметь все размеры с соответствующими допусками, необходимыми для изготовления деталей.

Все чертежи должны иметь стандартные условные обозначения и оформляться аккуратно.

Образцы оформления конструкторской документации вывешиваются на кафедре.

## 2. РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОСХЕМ

### 2.1. Тонкопленочные резисторы

#### 2.1.1. Конструктивно-технологические особенности

Резисторы являются наиболее распространенными элементами пленочных микросхем. Резистивные элементы гибридных микросхем получают напылением на диэлектрическое основание (подложку) узких резистивных пленочных полосок 1 (рис.2.1) различной конфигурации и контактных площадок 2, имеющих с ними некоторую зону перекрытия 3.

Конструкция пленочных резисторов должна учитывать особенности топологической структуры пленочного функционального узла (размеры подложки, количество и расположение выводов и т.д.), величину номинала, характеристики используемых материалов, технологию производства, требуемую и возможную точность воспроизведения номинала, условия эксплуатации микросхем.

Наилучшими конфигурациями пленочных резисторов признаны прямоугольная и типа "Меандр", так как в их контуре отсутствуют кривые линии, что позволяет применять при изготовлении фотооригиналов резистивных слоев координатографы с программным управлением. Даже в тех случаях, когда необходимо изготавливать высокоомные резисторы, предпочтительной является конструкция из нескольких последовательно соединенных резистивных полосок прямоугольной формы (рис.2.1, в, г). Такая конфигурация обеспечивает высокую механическую жесткость масок и плотное прилегание их к подложкам.

Электрические характеристики и величина номинала зависят от конструкции резистора, материалов подложки, резистивной пленки и контактных площадок, а также в сильной степени от технологии изготовления. Наиболее распространенным в настоящее время является метод термического нанесения тонких резистивных пленок в вакууме. Его достоинства:

возможность получения резистивных пленок различных материалов с широким диапазоном изменения удельного поверхностного

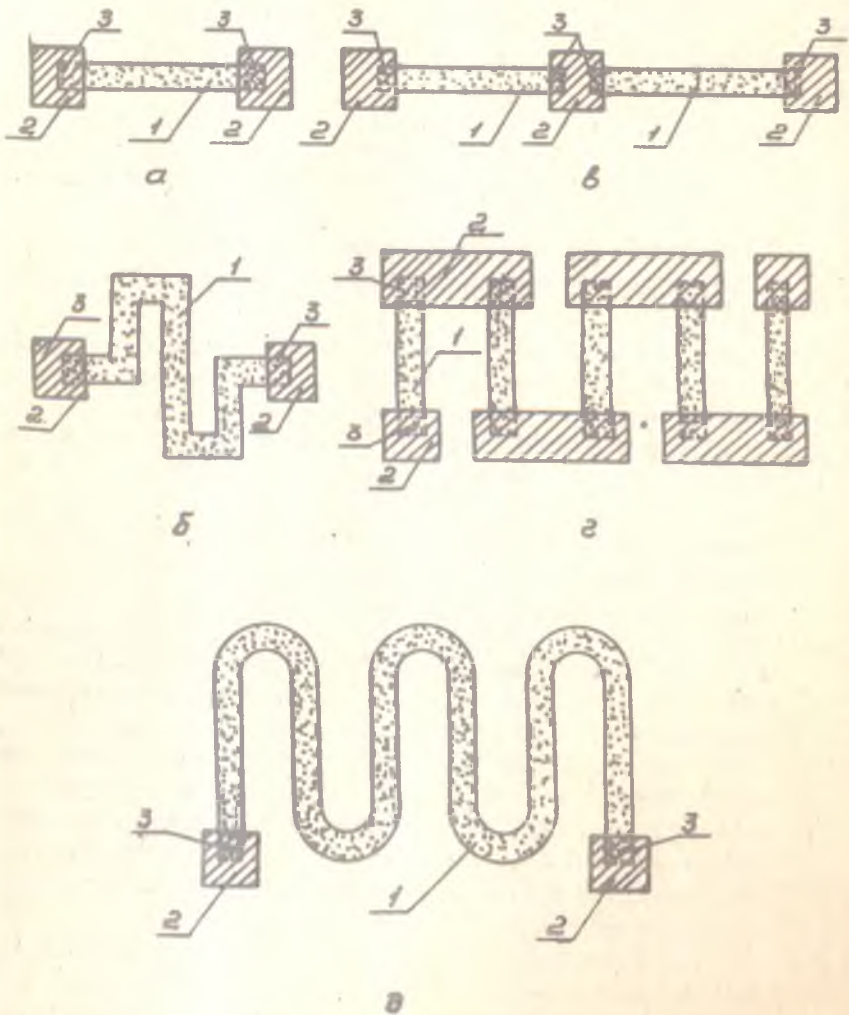


Рис.2.1. Конструктивные формы пленочных резисторов:  
а-прямоугольная; б-типа "Меандр"; вг-последовательное соединение резистивных пленочных полосок; д-типа "Змейка"

сопротивления  $R_a$  ;

относительная простота технологического контроля, обеспечивающая хорошую воспроизводимость номиналов резисторов;

совместимость техпроцессов получения резистивных, проводящих и диэлектрических пленок;

высокая производительность при напылении тонкопленочных элементов.

Некоторую трудность при термическом напылении представляет получение тонких пленок тугоплавких металлов, сплавов, и окислов.

В настоящее время перспективными являются такие способы получения тонких пленок, как катодное и ионноплазменное распыление, осаждение из газовой и паровой фазы.

Широкий диапазон изменения номиналов резисторов, используемых в пленочных микросхемах, вынуждает применять материалы резистивных пленок с различными удельными поверхностными сопротивлениями, которые могут обеспечивать: хорошую адгезию к подложке, температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), близкий к ТКЛР подложки, относительно низкую температуру испарения, высокую температурную и временную стабильность пленочных резисторов, постоянство химического состава (стехиометрию) и отсутствие взаимодействия резистивной пленки с подложкой и пленками других материалов.

Разнообразие предъявляемых требований ограничивает количество материалов, пригодных для изготовления резистивных пленок. Основные электрофизические характеристики наиболее распространенных материалов, используемых для производства пленочных резисторов методом термического вакуумного нанесения, приведены в табл. 2.1.

При выборе толщины резистивной пленки (или значения  $R_a$ ) следует помнить, что сопротивление и ТКС тонких (100-300 Å) пленок сильно зависят от толщины. Толщина резистивной пленки выбирается с учетом номинала резистора, требуемой температурой стабильности, условий эксплуатации и

Таблица 2.1

Материал	R <sub>e</sub> , Ом	R <sub>p</sub> , Вм/см <sup>2</sup>	d <sub>к</sub> · 10 <sup>-4</sup> 1/эпож.		ЗРС шупов при D=20/см <sup>2</sup> мм/В. мм 1/2	Изменчив- ность отбоя Δ · 10 <sup>-3</sup> /40с	Спарение за 100 часов при R <sub>п</sub> 20/см <sup>2</sup> ±0,5%	2,0
			(-60 + +250) / 25 → 125	+1,8 +0,6				
Утом, 10, Гост 5905-67	200- 500	2,0			1 · 10 <sup>-3</sup> 10,0 · 10 <sup>-3</sup>	2,6 - 3,1	1,6 - 3,2	2,0
Низром 120НВ Гост 8803-58	100- 300	1,0	-0,4 → +0,1 -0,1 → -0,4	-0,9 → +0,2 -3,1 → +0,1	5 · 10 <sup>-3</sup>	—	1,1 - 1,3	0,1-0,4
Сплав МЛТ-3М, БНУ. 028.005ТУ	300- 500	1,0	±(1,2-1,8) ±(1,9-2,4)		5 · 10 <sup>-3</sup>	1,8	± 0,5	± 0,1
Картон SiO-Ск, ЕТО.021.013ТУ	500- 3000	2,0	3-7	0,5-2	0,5 · 10 <sup>-3</sup>	0,0	± 1,0	± 0,3
Тампак СУО.021.041ТУ	300- 500	2,0	-15 -2,6		—	—	—	2,6-3,2
Алюминий А-99 Гост 61-32-63	0,1-0,2	1,0	0,24		—	—	—	—
Сплав МС-3	100- 500	2,0	±(1,2-2,4)		0,15	—	—	± 0,1
Сплавы: РС-4800 РС-3710 РС-3001 РС-1004 ЕТО.021.048ТУ	300-1000 500-3000 800-1500 10т. - 40т.	2,0	± 2,0 0,5-2,0 ± 1,0 ± 1,0		—	—	—	< 2,0 < 2,0 < 1,0 < 2,0

технологических характеристик производства. Тонкие резистивные пленки имеют большое  $R_a$ , но они нестабильны, воспроизводимость их свойств никака, окружающая среда сильно влияет на их свойства. Резистивные пленки относительно большой толщины более стабильны и менее подвержены влиянию окружающей среды, но на их основе нельзя получить высокоомные резисторы. Обычно толщину резистивной пленки выбирают в пределах от нескольких сотен до тысячи ангстрем.

Каждый резистор кроме резистивной пленки содержит контактные площадки. Конструкция и техпроцесс изготовления контактных площадок должны обеспечивать следующее:

минимальное переходное сопротивление между резистивной пленкой и контактами;

хорошую адгезию контактной площадки к подложке;

равномерное распределение линейной токи в контактном переходе;

отсутствие выпрямляющего контакта между материалами резистивной пленки и контактной площадки;

химическую инертность материалов друг к другу;

хорошие условия для контактирования навесных проводников к тонкой пленке контактной площадки.

Перечисленным требованиям лучше всего удовлетворяют многослойные контактные площадки. В качестве первого слоя, называемого подслоем, способного образовывать прочное сцепление с подложкой и последующими слоями, используются очень тонкие (100-200 Å) металлические пленки, чаще всего пленки хрома, никрома или марганца.

Основной слой контактной площадки напыляется из материала с высокой проводимостью (алюминий, медь, золото) на подслой и имеет толщину в несколько тысяч ангстрем. Для предотвращения окисления поверхности основного слоя на него наносят защитный слой.

Выбор подслоя, слоя и защитного слоя зависит от используемого материала резистивной пленки. Электрофизические характеристики пленочных контактных площадок и проводников представ-



Электровизические характеристики плавочных контактных площадок и проводников

Название слоя	Материал	Толщина, мкм	$R_0$ , Ом	Рекомендуемый способ контактирования
Слой	Алюминий А-99	300 - 600	0,08 - 0,16	Пайка
Подслои	Нихром Х20Н80 (хром Х0) Алюминий А-99	10 - 30 300 - 600	0,08 - 0,16	Пайка, сварка
Подслои	Нихром Х20Н80 (хром Х0) Алюминий А-99	40 - 50 250 - 350	0,1 - 0,2	Пайка, сварка
Покрывные	Никель	50		
Подслои	Нихром Х20Н80 (хром Х0) Медь МВ	10 - 30 600 - 800	0,02 - 0,04	Сварка
Слой	Никель	80 - 120		
Покрывные	Нихром Х20Н80 (хром Х0) Медь МВ Серебро Ср 999,9	10 - 30 400 - 1000 80 - 100	0,02 - 0,04	Пайка, сварка
Подслои	Нихром Х20Н80 (хром Х0) Медь МВ	10 - 30 600 - 800	0,02 - 0,04	Пайка, сварка
Слой	Золото Зл. 999,9	50 - 60		
Покрывные	Нихром Х20Н80 (хром Х0) Золото Зл. 999,9	10 - 30 600 - 800	0,02 - 0,04	Пайка, сварка
Подслои	Нихром Х20Н80 (хром Х0) Золото Зл. 999,9	10 - 30 600 - 800	0,03 - 0,04	Пайка, сварка
Слой	Золото Зл. 999,9	50 - 60		

лены в табл. 2.2. Размеры и форма контактных площадок выбираются с учетом используемого метода контактирования и плотности тока через резистор.

### 2.1.2. Проектирование и расчет

#### А. Расчет линейных резисторов

Линейными называют резисторы прямоугольной формы (рис.2.2).

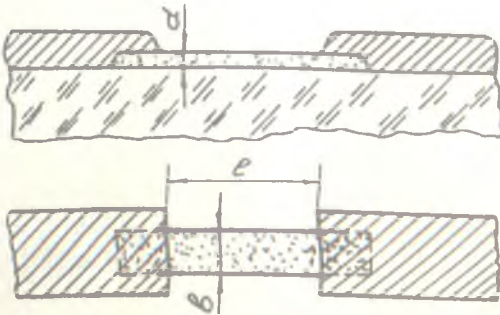


Рис.2.2. Размеры пленочного резистора  
прямоугольной формы

Исходными являются следующие данные для расчета  
прямоугольных резисторов:

номинальная величина сопротивления резистора  $R$ , Ом ;

допустимая относительная погрешность сопротивления  
резистора  $\gamma_R, \%$  ;

мощность, рассеиваемая резистором,  $P$ , Вт ;

коэффициент нагрузки резистора  $K_n$ , равный отно-  
шению фактически рассеиваемой резистором мощности  
 $P$  к номинальной мощности  $P_{ном}$  (выбирается в  
пределах 0,5-0,8);

минимальная допустимая ширина пленочного резистора  $b'_{\text{мин}}$ , мкм, определяемая производственными возможностями изготовителя; при использовании биметаллических масок  $b'_{\text{мин}} = 200$  мкм;

абсолютные производственные погрешности геометрических размеров резистора  $\Delta l$  и  $\Delta b$ , мкм;

погрешность установки и совмещения масок  $\Delta l_y$ , мкм;

удельное поверхностное сопротивление резистивной пленки  $R_{\square}$ , Ом;

максимально допустимая удельная мощность рассеяния  $P_0$ , Вт/см<sup>2</sup>;

максимальная температура окружающей среды  $t_{\text{макс}}$ , °C;

предполагаемая длительность работы микросхемы  $T$ , час;

температурный коэффициент сопротивления резистора

$\alpha_R$ , 1/градус;

удельное переходное сопротивление контактов  $R_k$ , Ом·мм<sup>2</sup> (зависит от условий напыления).

Сопротивление резистора прямоугольной формы рассчитывается по формуле

$$R = R_{\square} K_{\phi}, \quad (2.1)$$

где  $K_{\phi} = \frac{l}{b}$  - коэффициент формы резистора.

Можно показать [1], что точность номинала пленочного резистора зависит от большого количества факторов. Относительная погрешность  $\gamma_R = \frac{\Delta R}{R}$  сопротивления пленочного резистора выражается следующей зависимостью:

$$\gamma_R = \gamma_{R_{\square}} + \gamma_{K_{\phi}} + \gamma_{R_t} + \gamma_{R_{ct}} + \gamma_{R_k}, \quad (2.2)$$

где  $\gamma_{R_{\square}} = \frac{\Delta R_{\square}}{R_{\square}}$  - относительная погрешность удельного поверхностного сопротивления резистивной пленки;

$\gamma_{K_{\phi}} = \frac{\Delta K_{\phi}}{K_{\phi}}$  - относительная погрешность коэффициента формы; здесь  $\gamma_{K_{\phi}} = \gamma_l + \gamma_b$ ,  $\gamma_l = \frac{\Delta l}{l}$  - относительная погрешность длины

пленочного резистора,  $\gamma_{\xi} = \frac{\Delta b}{b}$  - относительная погрешность ширины пленочного резистора;

$\gamma_{R_t}$  - относительная температурная погрешность сопротивления

$$\gamma_{R_t} = \alpha_R (t - 20^\circ\text{C});$$

$\gamma_{R_{ст}}$  - относительное изменение сопротивления резистора в процессе старения (см. табл. 2.1);

$\gamma_{R_k}$  - относительная погрешность сопротивления, обусловленная образованием переходных сопротивлений  $R_k$  (см. п. 2.1.3),  $\gamma_{R_k} = \frac{2R_k}{R}$ .  
Обычно величина  $R_k$  составляет 1-3%.

Анализ формулы (2.2) показывает, что при заданной (допустимой) величине относительной погрешности резистора  $\gamma_{R \text{ доп}}$  конструктор прежде всего обеспечит необходимую точность резистора, варьируя величиной коэффициента  $\gamma_{K\phi}$ . Варьирование любого из оставшихся слагаемых правой части равенства (2.2) ведет к необходимости изменения техпроцесса изготовления резисторов или к необходимости применения другого материала. При этом происходит трудно контролируемое изменение всех, кроме  $\gamma_{K\phi}$ , коэффициентов.

Допустимая относительная погрешность коэффициента формы оценивается по формуле

$$\gamma_{K\phi \text{ доп}} = \gamma_{R \text{ доп}} - \gamma_{R_0} - \gamma_{R_t} - \gamma_{R_{ст}} - \gamma_{R_k}. \quad (2.3)$$

Учитывая, что  $\gamma_{K\phi} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta b}{b}$ , можно получить выражения для расчета минимальных размеров резистора

$$b''_{\text{мин}} = \frac{\Delta b + \frac{\Delta l}{K\phi}}{\gamma_{K\phi \text{ доп}}}; \quad (2.4)$$

$$l_{\text{мин}} = \frac{\Delta l + \Delta b K\phi}{\gamma_{K\phi \text{ доп}}}. \quad (2.5)$$

Величина  $K_{\Phi}$  определяется из выражения (2.1). Минимальные размеры пленочного резистора определяются не только требованиями к его точности. От размеров резистора зависит рассеиваемая им мощность. Поэтому размеры должны быть такими, чтобы при работе пленочной микросхемы действительная удельная мощность рассеяния  $P_{\text{деств}}$  не превосходила предельную удельную мощность  $P_0$ , которая является характеристикой материала пленки и определяется экспериментально. Для наиболее часто применяемых материалов значения удельной мощности приведены в табл. 2.1.

Из условия рассеяния всей мощности, выделяющейся в пленочном резисторе, его размеры определяются по формулам:

$$b_{\text{мин}}''' = \sqrt{\frac{P R_{\square}}{P_0 R}}; \quad (2.6)$$

$$l_{\text{мин}} = \sqrt{\frac{P R}{P_0 R_{\square}}}. \quad (2.7)$$

Ширина пленочного резистора, таким образом, должна выбираться наибольшей из трех величин:  $b'$ ,  $b''$  и  $b'''$ . Длина резистора  $l$  находится по формуле

$$l = b K_{\Phi}. \quad (2.8)$$

Расчет пленочных резисторов начинают с выбора материала и  $R_{\square}$ , затем определяют  $K_{\Phi}$ , величину  $\gamma_{K_{\Phi}}$  (по формуле 2.3), величину  $b$  и величину  $l$ . Если  $l > 10 \text{ мм}$ , то резистор необходимо выполнять в виде "Меандра" или "Змейки". Нецелесообразно принимать значения  $K_{\Phi} < 1$ , так как при этом понижается точность изготовления резистора, увеличивается площадь контактных переходов, и электрическое поле в переходе может быть неоднородным.

В заключение определяется площадь, занимаемая резистором на подложке (без учета площади контактных переходов)

$$S = l b. \quad (2.9)$$

Б. Расчет резисторов сложной формы

В результате исследований установлено, что электрическое поле в резисторах сложной формы ("меандрах", "змейках" и т.д.) неравномерно. Наибольшего значения градиент плотности тока достигает в местах излома или изгиба резистивной пленки. Неравномерность электрического поля приводит к сокращению электрической длины пленочного резистора, что сопровождается уменьшением его сопротивления. В связи с этим расчет сопротивления резисторов сложной формы по длине геометрической средней линии является неточным. Исследования показывают [2], что сопротивление изогнутых участков пленочных резисторов можно выразить в виде произведения некоторого коэффициента на величину удельного поверхностного сопротивления резистивной пленки  $R_0$ .

Для расчета сопротивления резисторов сложной формы (например, изображенных на рис.2.1.б,д) резистивная полоска условно разбивается на элементы сопряжения типа изображенных на рис.2.3 и участки прямолинейной формы. Сопротивление элементов

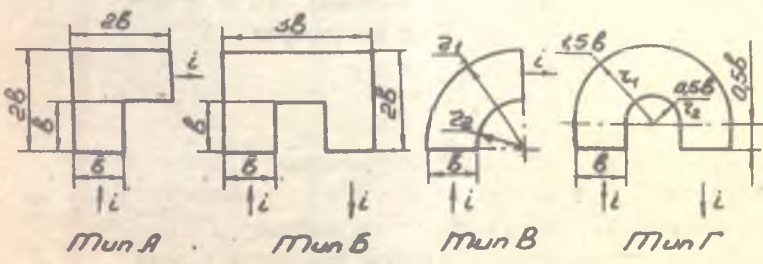


Рис. 2.3. Элементы сопряжения  
сопряжения рассчитывается по следующим формулам:

$$R = 2,55 R_0 \quad (\text{Тип А}); \quad (2.10)$$

$$R = 4 R_0 \quad (\text{Тип Б}); \quad (2.11)$$

$$R = \frac{1,57}{l_n \frac{1}{2}} R_0 \quad (\text{Тип В}); \quad (2.12)$$

$$R = 3,86 R_0 \quad (\text{Тип Г}). \quad (2.13)$$

Общее сопротивление резистора определяется как сумма сопротивлений всех элементов сопряжения и сопротивлений участков прямоугольной формы.

### 2.1.3. Расчет сопротивления контактных переходов

Эквивалентное сопротивление контактного перехода, образованного резистивной и инкоомной пленками, зависит от геометрических размеров контакта, проводимости резистивной пленки и от величины удельного переходного сопротивления  $\rho_k$ .

Под удельным переходным сопротивлением  $\rho_k$  понимают сопротивление единицы площади контактного слоя  $\mathcal{Z}$  (рис. 2.4) току, протекающему по нормали к слоям контакта.

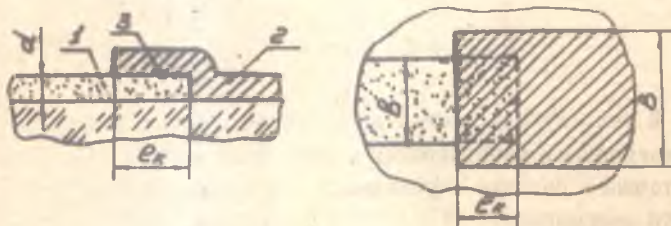


Рис. 2.4. Контактный переход пленочного резистора:  
1-резистивная пленка; 2-инкоомная пленка;  
3-контактный слой

Удельное переходное сопротивление  $\rho_k$ , определяемое экспериментально для каждой вакуумной установки, для многопозиционных установок, в которых напыление резистивных пленок и контактных площадок производится без съема вакуума, равно 0,05-0,25 Ом·мм<sup>2</sup>.

Если при изготовлении микросхемы используют несколько установок, каждая из которых приспособлена для напыления тонких пленок из одного материала, то при перестановке подложек из одной установки на другую пленки, нанесенные на них, подвергаются воздействию атмосферы. Удельное переходное сопротивление в этом случае увеличивается ( $\rho_k = 2,5 - 5,0$  Ом·мм<sup>2</sup>), и соответственно возрастает эквивалентное сопротивление контактного перехода.

Наименьшее возможное значение переходного сопротивления при известных физических свойствах контактирующих пленок ( $R_a$  и  $\rho_k$ ) и известной ширине перекрытия определяется по формуле

$$R_{k \text{ мин}} = \frac{\sqrt{R_a \rho_k}}{b} \quad (2.14)$$

Длина перекрытия пленок, при которой превышение сопротивления переходного контакта по сравнению с  $R_{k \text{ мин}}$  составляет не более 10%, выражается соотношением

$$l_{\text{мин}} \geq 1,5 \sqrt{\frac{\rho_k}{R_a}} \quad (2.15)$$

В тех случаях, когда длина переходного контакта по топологическим соображениям оказывается меньше  $l_{\text{мин}}$ , для точного расчета переходного сопротивления следует ввести коэффициент  $\mu$ :

$$R_k = R_{k \text{ мин}} \mu, \quad (2.16)$$

где

$$\mu = \frac{1}{\text{th}(\ell \sqrt{\frac{R_a}{\rho_k}})}$$



Полная длина контактного перехода  $l_k$  и ширина пленки проводника  $B$  определяются с учетом погрешностей изготовления масок  $\Delta l$  и  $\Delta b$ , установки и совмещения их с подложкой  $\Delta l_y$ :

$$l_k \geq l_{k \text{ мин}} + \Delta l + \Delta l_y; \quad (2.17)$$

$$B \geq b + 2(\Delta b + \Delta l_y). \quad (2.18)$$

#### 2.1.4. Расчет точных пленочных резисторов

Схемное назначение некоторых резисторов требует высокой точности их изготовления, превосходящей технологические возможности современного оборудования для нанесения микросхем. В таких случаях при конструировании микросхем применяют специальные пленочные резисторы, сопротивление которых можно изменять после изготовления. Подгонка величины

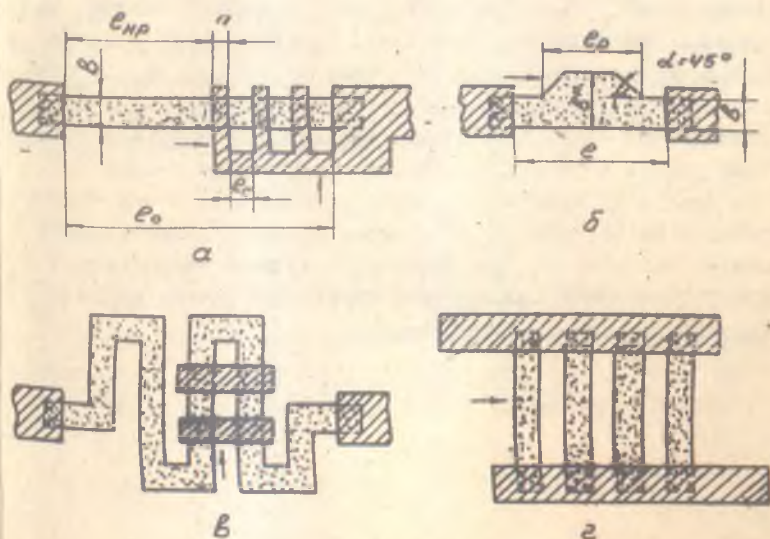


Рис. 2.5. Конструкции подгоняемых тонкопленочных резисторов

сопротивления может производиться либо скачками - путем удаления заранее предусмотренных шунтирующих перемычек не проводящей или реэистивной пленки, либо плавно - путем постепенного удаления части реэистивной пленки. В обоих случаях изменять сопротивление можно лишь в сторону его увеличения.

В настоящее время известны различные способы подгонки сопротивления пленочных реэисторов: лучом лазера, иглой микроманипулятора, электрической искрой.

Некоторые конструкции подгоняемых тонкопленочных реэисторов приведены на рис.2.5. Наибольшее распространение получили конструктивные формы, изображенные на рис.2.5, а и б.

#### А. Расчет реэисторов со ступенчатой подгонкой

Рассмотрим конструктивный расчет реэисторов со ступенчатой подгонкой (рис.2.5,а). Участок подгонки реэистора представляет собой  $n$  последовательно включенных секций, вкороченных при напылении нижеслойной пленкой. Если величина сопротивления реэистора при напылении получилась меньше значения, соответствующего нижней границе допуска, подгонка осуществляется последовательным подключением одной или нескольких секций к основному участку реэистивной пленки.

По заданному номиналу пленочного реэистора  $R$  и относительному допуску  $\gamma_R$ , за пределы которого сопротивление не должно выходить за все время эксплуатации микросхемы в условиях повышенной температуры, определяем максимальное и минимальное значения сопротивления:

$$R_{\max} = R \left( 1 + \frac{\gamma_R - \gamma_{R\pm} - \gamma_{R\sigma}}{100} \right); \quad (2.19)$$

$$R_{\min} = R \left( 1 - \frac{\gamma_R - \gamma_{R\pm} - \gamma_{R\sigma}}{100} \right). \quad (2.20)$$

Значения сопротивлений, определяемые выражениями (2.19) и (2.20) являются границами диапазона подгонки. При вычислении  $R_{\max}$  и  $R_{\min}$  подразумевалось, что коэффициенты  $\gamma_{Rt}$  и  $\gamma_{Ret}$  могут принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Для того, чтобы при подгонке не "перескочить" через поле допуска, необходимо, чтобы шаг подгонки, равный сопротивлению одной секции, был не больше величины  $\Delta R = R_{\max} - R_{\min}$ .

Точность настройки может быть выше, если шаг подгонки будет меньше этой величины.

Минимальное число  $n$  секций подгонки определяется по формуле

$$n = \frac{\gamma_{R\alpha} + \gamma_{Kp}}{\gamma_R'} , \quad (2.21)$$

где  $\gamma_R' = \frac{\Delta R}{R}$ .

Определим теперь длину нерегулируемого участка резистора  $l_{н.р}$  и длину одной секции подгонки  $l_c$ . При заданных значениях  $R_\alpha$ ,  $b$  и  $R$  величину  $l_{н.р}$  следует выбирать такой, чтобы она соответствовала наибольшему допустимому значению сопротивления при наибольшем  $R_\alpha$  и наименьшем значении ширины резистора  $b$

$$l_{н.р} = \frac{R_{\max} b_{\min}}{R_{\alpha \max}} - \Delta l , \quad (2.22)$$

где  $b_{\min} = b - \Delta b$ ;  $R_{\alpha \max} = R_\alpha \left(1 + \frac{\gamma_{R\alpha}}{100}\right)$ .

Затем определяется наименьшее возможное сопротивление резистора, т.е. сопротивление нерегулируемого участка резистора при наименьшем значении  $R_\alpha$  и наибольшем значении ширины резистора  $b$

$$R_{\min.возм} = \frac{R_{\alpha \min} l_{н.р}}{b_{\max}} , \quad (2.23)$$

где  $b_{\max} = b + \Delta b$ ;  $R_{\text{д мин}} = R_{\text{д}} \left(1 - \frac{\gamma R_{\text{д}}}{100}\right)$ .

Если полученное значение  $R_{\text{мин.возм}}$  выходит за предел допуска, т.е. если  $R_{\text{мин.возм}} < R_{\text{мин}}$ , то необходимо предусмотреть регулируемый участок, подключение которого могло бы компенсировать технологические погрешности и довести величину сопротивления до минимального допустимого значения.

Общая длина резистора с учетом длин нерегулируемого и регулируемого участков определяется по минимально допустимому значению сопротивления при  $R_{\text{д мин}}$  и  $b_{\max}$

$$l = l_{\text{н.р}} + l_{\text{р}} = \frac{R_{\text{мин}} b_{\max}}{R_{\text{д мин}}} + \Delta l(n+1). \quad (2.24)$$

Длина одной секции подгонки равна

$$l_{\text{с}} = \frac{l - l_{\text{н.р}}}{n}. \quad (2.25)$$

Далее необходимо выбрать ширину перемычки  $h$ , учитывая технологические возможности изготовления масок и стремясь при этом получить минимальное значение  $R_{\text{к}}$  (см. п. 2.1.3). Обычно  $h = 0,2 - 0,5 \text{ мм}$ .

Длина резистора с учетом перемычек равна

$$l_0 = l + n h. \quad (2.26)$$

### Б. Расчет резисторов с плавной подгонкой

Плавная подгонка применяется в тех случаях, когда требуется обеспечить узкий допуск на сопротивление резистора. Точность плавной подгонки достигает долей процента. Наиболее приемлемая конструкция резистора с плавной подгонкой изображена на рис. 2.5, б.

Ширина регулируемого участка  $b^*$  выбирается исходя из следующих соображений: при малых значениях  $b^*$  мал диапазон регулировки; при больших значениях  $b^*$  увеличивается площадь регулировочной секции и снижается эффективность подгонки (съем одинаковой площади резистивной пленки отражается на

изменении сопротивления при больших  $l^*$  меньше, чем при малых).

Углы расширения подстраиваемого участка рекомендуется выбирать в пределах 40-50°. Увеличение угла расширения приводит к резкой концентрации плотности тока в местах перехода от узкого участка к широкому. Малые углы расширения резистивной пленки на регулируемом участке сужают диапазон регулировки.

Исходными являются следующие данные для расчета точных подгоняемых резисторов:

- номинальное сопротивление  $R$  и допуск  $\gamma_R, \%$  ;
- сопротивление квадрата пленки  $R_{\square}$  и допуск  $\gamma_{R_{\square}}, \%$  ;
- ширина резистора  $b$  и допуск  $\Delta b, \text{мм}$ .

Погрешностью длины и базировки пренебрегаем, так как в этом случае они слабо влияют на точность изготовления резисторов. Так как изменение сопротивления при плавной подгонке возможно лишь в сторону его увеличения, предельные размеры резистора необходимо устанавливать, исходя из наименьшего допустимого значения сопротивления. При этом длина резистора определяется по формуле

$$l = R_{\text{мин}} \frac{b_{\text{макс}}}{R_{\square \text{ мин}}}, \quad (2.27)$$

из которой видно, что даже при сочетании  $b_{\text{макс}}, R_{\square \text{ мин}}$  путем подгонки можно достичь нижней границы допуска.

Если же в процессе изготовления резистора  $b$  примет минимальное, а  $R_{\square}$  максимальное значение, то сопротивление определяется по формуле

$$R_{\text{макс.возм}} = R_{\square \text{ макс}} \frac{l}{b_{\text{мин}}}. \quad (2.28)$$

Если окажется, что  $R_{\text{макс.возм}} > R_{\text{макс}}$ , необходимо предусмотреть регулирующую секцию, наличие которой позволило бы уменьшить величину  $R_{\text{макс.возм}}$  до  $R_{\text{макс}}$ .



$\frac{R^*_{max}}{R^*_{min}}$

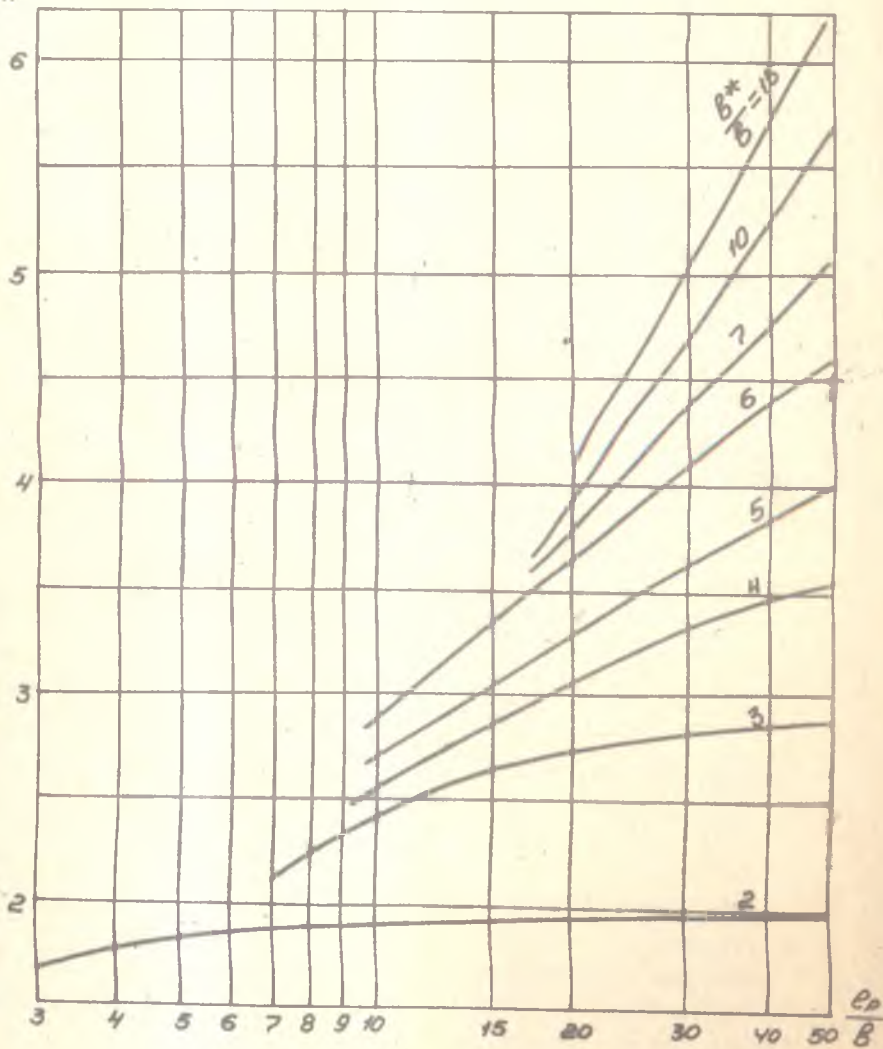


Рис.2.6,б.Графики для расчета точных подгоняемых резисторов

Следует заметить, что при изготовлении точных резисторов необходимо выбирать материал и режим техпроцесса изготовления такими, чтобы выполнялось неравенство

$$\delta_{R_t} + \delta_{R_{ст}} \leq \delta_R,$$

в противном случае никакая точность подгонки не поможет. Номинал резистора будет уходить за пределы допуска под действием температуры окружающей среды и старения.

Расчет размеров регулируемой секции производится следующим образом [3]:

1. Вычисляется отношение  $\frac{R_{\max \text{ в.ч.}}}{R_{\max}}$  и по графикам рис. 2.6, а на его основании выбираются (из конструктивно-технологических соображений) отношения  $R^*_{\max}/R^*_{\min}$  и  $R_{н.р}/R^*_{\max}$ . Здесь  $R_{н.р}$  - сопротивление нерегулируемого участка резистора,  $R^*_{\max}$  и  $R^*_{\min}$  - максимальное и минимальное сопротивления участка резистора, на котором есть подстраиваемая секция.  $R^*_{\max}$  соответствует сопротивлению этого участка при полностью удаленной подстроечной секции. Необходимая степень подгонки может быть обеспечена при различных отношениях  $R^*_{\max}/R^*_{\min}$  и  $R_{н.р}/R^*_{\max}$ . Нетрудно заметить, что

$$\frac{R_{н.р}}{R^*_{\max}} = \frac{l_{н.р}}{l_p}, \quad (2.29)$$

откуда, учитывая, что  $l_{н.р} + l_p = l$ , получаем

$$l_p = \frac{l}{1 + \frac{R_{н.р}}{R^*_{\max}}}. \quad (2.30)$$

2. В зависимости от выбранного отношения  $R^*_{\max}/R^*_{\min}$  и отношения  $l_p/l$ , которое можно получить, определив из выражения (2.30) величину  $l_p$ , по графикам рис. 2.6, б находится отношение  $b^*/b$  и вычисляется  $b^*$  - ширина подстраиваемого участка резистора.

### 2.1.5. Оценка сопротивления и индуктивности пленочных проводников

В связи с малой толщиной пленок коммутационные провод-



Индуктивности и сопротивления пленочных проводников из алюминия на ВЧ

$\epsilon$ , мм	$b$ , мм	$f$ , мГц	$L$ , мкГн	$R_f$ , Ом	$R_0$ , Ом
11	1,2	107	0,008	1,0	0,9
15	1,5	105	0,01	1,25	1,0

Таблица 2.4

Индуктивности и сопротивления соединительных проводников микросхем на ВЧ

Материал	$\phi$ , мм	$\epsilon$ , мм	$f$ , мГц	$L$ , мкГн	$R_f$ , Ом
Медь	0,1	10	110	0,011	0,37
		30	78	0,031	0,45
Серебро	0,05	10	107	0,012	0,39
		36	70	0,043	0,65
Золото	0,05	10	107	0,012	0,41
		36	70	0,044	0,76
Золото	0,1	10	107	0,01	0,27
		30	81	0,029	0,39

ники в микросхемах имеют значительное активное сопротивление, пренебрегать которым можно далеко не во всех случаях. На высоких частотах возрастает реактивное сопротивление проводников. Индуктивность соединительных проводников микросхемы (как пленочных, так и проволочных) необходимо учитывать уже при рабочей частоте 60-100 МГц. На этих и более высоких частотах величина индуктивности соединительных проводников микросхемы становится соизмеримой с величиной индуктивности контурных катушек, а модуль их полного сопротивления - с сопротивлением  $Z_{г}$  транзистора.

У пленочных проводников, имеющих относительно большое сопротивление на постоянном токе, на высоких частотах комплексное сопротивление еще больше увеличивается за счет того, что толщина пленки намного меньше глубины проникновения поля (толщины скин-эффекта). В этом случае несколько увеличивается индуктивность проводника.

Индуктивность пленочного проводника может быть определена по следующей формуле:

$$L = 2\ell \left( 1,35 + 2,3 \lg 2K_{\Phi} + \frac{0,2235}{K_{\Phi}} \right) 10^{-9} \text{ мкГн}, \quad (2.31)$$

где  $K_{\Phi} = \frac{\ell}{b}$  - коэффициент формы проводника;  
 $\ell$  - длина проводника, мм.

Некоторые параметры соединительных проводников гибридных микросхем, определенные экспериментально, приведены в табл. 2.3 и 2.4. В таблицах приняты следующие обозначения:

- $f$  - частота, на которой производилось измерение комплексного сопротивления;
- $R_f$  - комплексное сопротивление на частоте измерения;
- $R_0$  - сопротивление проводника, измеренное на постоянном токе.

### 2.1.6. Частотные свойства пленочных резисторов

Если резистор предназначен для работы в цепях высокой частоты, необходимо произвести оценку его частотных свойств, так как сопротивление в этом случае нельзя рассматривать как чисто активное. Реактивная составляющая сопротивления резистора появляется в связи с наличием распределенной емкости, собственной индуктивности и потерь в материале подложки.

Относительное изменение сопротивления на высокой частоте  $\frac{|R_f|}{R_0}$  можно определить по формуле

$$\frac{|R_f|}{R_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega R_0 C_{пр})^2}}, \quad (2.32)$$

где  $|R_f|$  - модуль сопротивления резистора на частоте  $f$ ,  
 $\omega$  - круговая частота,  
 $C_{пр}$  - приведенная емкость, действие которой эквивалентно совместному действию распределенной емкости и сопротивления потерь

$$C_{пр} \approx 0,3 - 0,5 \text{ пФ}.$$

Резистор считается частотнонезависимым, если на рабочей частоте его полное сопротивление отличается от сопротивления постоянному току не более чем на 0,5%. Условия частотной независимости для резисторов имеют вид:

а) для высокоомных

$$f_{\text{макс}} \leq \frac{0,1}{R_0 C_{пр}}, \quad (2.33)$$

б) для низкоомных

$$f_{\text{макс}} \leq \frac{R_0}{62,8 L}, \quad (2.34)$$

где  $L$  - собственная индуктивность резистора.

## 2.2. Тонкопленочные конденсаторы

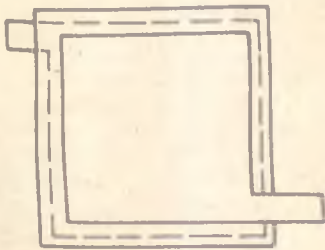
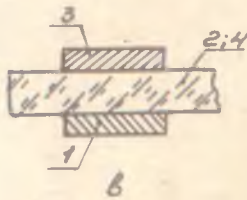
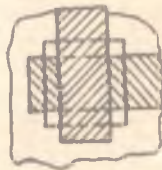
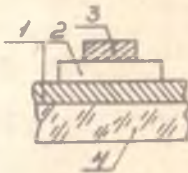
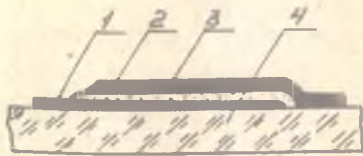
### 2.2.1. Конструктивно-технологические особенности

Конденсаторы являются широко распространенными элементами пленочных микросхем. По конструктивному признаку тонкопленочные конденсаторы (ТПК) можно разделить на три группы: однослойные, многослойные и гребенчатые. Однослойными принято считать такие конденсаторы, которые состоят из двух обкладок и одного слоя диэлектрика (рис. 2.7, а, б, в). Многослойные конденсаторы имеют более чем один слой диэлектрика (рис. 2.7, г). Конструктивной особенностью гребенчатых конденсаторов является одностороннее расположение обкладок (рис. 2.7, д).

Большинство характеристик ТПК: величина номинала, стабильность, рабочее напряжение, температурная и временная стабильность, частотные свойства, добротность, полярность, надежность и др. зависят от выбранных материалов и технологии изготовления.

Материал, применяемый для изготовления диэлектрических слоев, должен иметь хорошую адгезию к материалам подложки и обкладок, не вступать с ними в химические реакции. Диэлектрическая пленка должна быть достаточно плотной, иметь высокую электрическую прочность, малые диэлектрические потери, незначительную величину температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР), сравнимую с ТКЛР подложки, иметь высокую диэлектрическую проницаемость и не разлагаться при нагревании. Лучше других этим требованиям удовлетворяют характеристики диэлектриков, приведенных в табл. 2.5.

Кроме материалов, приведенных в этой таблице, для изготовления ТПК могут применяться оксиды тантала, двуокись титана, титанат бария и др. Эти материалы имеют большие значения  $\epsilon$ , чем  $SiO_2$  или  $GeO_2$  и на их основе можно изготавливать ТПК большой емкости. Однако из-за больших диэлектрических потерь добротность таких конденсаторов низка, в связи с чем их можно применять только в низкочастотных цепях и цепях постоянного тока. ТПК с диэлектриком из титаната бария, кроме



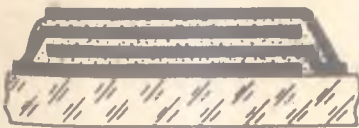
а

б

в

д

- 1. Нижняя обкладка
- 2. Диэлектрик
- 3. Верхняя обкладка
- 4. Подложка



г

Рис.2.7.Конструкции тонкопленочных конденсаторов:  
а-однослойный ТПК;б-ТПК малой емкости;в-двухсторонняя конструкция ТПК;г-многослойный ТПК;д-гребенчатый ТПК

Электродинамические характеристики материалов для пленочных конденсаторов

Материал, ТУ или ГОСТ	E	E пр, В/10 <sup>6</sup> мм	U проб, В	Св макс, нФ/см <sup>2</sup>	Резонансная частота f <sub>рез</sub> , кГц	tg δ на f = 1 кГц	ТКС (α × 10 <sup>-4</sup> ) 1/град. (α <sub>0</sub> + α <sub>1</sub> × 10 <sup>3</sup> × t) на f = 10 МГц, макс. средн.		Изменение параметров на f = 10 МГц, α % на 1 гδ	Старение в муфт. камерах за 1000 час
							3,5	1,0		
Монокись кремния, SiO 5.10.028.004ТУ	5-6	2-4	15	15000	8000	0,002- 0,02	3,5	1,0	3-5 ± 0,02	± (1,5-6)
Монокись германия, Ge E10.021.014ТУ	10-11	0,5-1,5	10-15	20.000	10.000- 12.000	0,001- 0,005	5,0	3,0	3-5 ± 0,02	-1,0
Трехсернистая сурьма S <sub>8</sub> S <sub>3</sub> , MOTUS-09-2058-08	18-21	0,2-1,0	4,0	30.000	10.000- 15.000	0,004- 0,01	5,0	-	3-5 ± 0,02	± 15
Двуокись кремния SiO <sub>2</sub>	5	3-4	15	12.000	8000	0,002	1,0	-	-	-
Стекло XГ-114	9-10	0,4	10	20.000	10.000- 15.000	0,004- 0,02	28,0	-	-	28,0
Стекло УКС-24, PMO.1096-61	5-6	0,4	8	10.000	5.000- 10.000	± 0,02	5-9	-	-	-

того, имеют большое значение ТКЕ. Все большее применение для изготовления ТПК находят окислы редкоземельных металлов: лантана, иттрия и др. Для обеспечения наименьших потерь на высоких частотах обкладки ТПК чаще всего напыляют из материалов с низким электрическим сопротивлением. Материал обкладок должен легко испаряться, иметь низкую подвижность атомов при образовании пленки и невысокую энергию испаренных частиц (во избежание диффузии и внедрения атомов металла в диэлектрик).

Практика показала, что для нанесения обкладок ТПК наилучшим материалом является алюминий, применение которого обеспечивает более высокий процент выхода годных ТПК по сравнению с другими металлами. Это объясняется сравнительно низкой температурой испарения алюминия и невысокой подвижностью его атомов на поверхности подложки. Удельное поверхностное сопротивление алюминиевой пленки достаточно мало и при ее толщине 2500-5000 Å находится в интервале 0,2-0,06 Ом/кв. см. Это обеспечивает высокую добротность ТПК.

Рекомендуется одновременно с изготовлением обкладок ТПК наносить и тонкопленочные проводники: при этом ускоряется и упрощается техпроцесс изготовления микросхем и сокращается расход алюминия.

Следует помнить, что при температуре выше 180°C в алюминиевых пленках образуются игольчатые кристаллы, способные в ряде случаев проколоть тонкую диэлектрическую пленку. Поэтому температуру подложки и термообработки нельзя выбирать слишком высокой.

Использование многослойных тонкопленочных структур хотя и позволяет увеличить удельную емкость ТПК, ограничено тем обстоятельством, что с ростом числа слоев увеличивается сложность технологического процесса изготовления конденсаторов, увеличивается процент брака и снижается их надежность.

Если площадь конденсатора ( $S$ ) больше 5 мм<sup>2</sup>, то ТПК проектируют в виде однослойной конструкции типа изображенной на рис. 2.7, а. Если же полезная площадь конденсатора полу-

чается меньше, необходимо либо выбрать меньшее значение удельной емкости  $C_0$ , либо проектировать конденсатор в виде системы последовательно включенных конденсаторов. Конденсаторы с малой величиной емкости рекомендуется проектировать в виде двух пересекающихся проводящих полосок, разделенных слоем диэлектрика.

Делательно, чтобы все конденсаторы, расположенные на одной подложке, были изготовлены на основе одной диэлектрической пленки.

Нижняя обкладка ТПК должна выступать за край верхней не менее чем на 200 мкм, а диэлектрик - не менее чем на 200 мкм за край нижней обкладки. Выводы обкладок ТПК в местах коммутации с другими элементами должны выступать за слой диэлектрика не менее чем на 500 мкм.

Для повышения точности и надежности ТПК необходимо выбирать наиболее простую форму обкладок. Суммарная площадь, занимаемая ТПК на микросхеме, не должна превышать  $2 \text{ см}^2$ , минимальная площадь ТПК -  $0,5 \times 0,5 \text{ мм}^2$ .

### 2.2.2. Исходные данные и основные расчетные соотношения

Для расчета ТПК исходными данными являются следующие:

номинальная величина емкости ТПК  $C, \text{ пФ}$ ,  
диэлектрическая проницаемость диэлектрика  $\epsilon$ ,  
рабочее напряжение на ТПК  $U_p, \text{ В}$ ,  
допустимая относительная погрешность емкости  $\gamma_{\text{доп}}, \%$ ,  
удельная емкость  $C_0, \text{ пФ/см}^2$ ,  
абсолютные производственные погрешности изготовления размеров верхней обкладки  $\Delta L$  и  $\Delta B, \text{ мм}$ ,  
погрешность установки и совмещения масок  $\Delta \ell_y, \text{ мм}$ ,  
максимальная температура окружающей среды  $t, \text{ }^\circ\text{C}$ ,  
предполагаемая длительность работы микросхемы  $T, \text{ час}$ .

В общем случае емкость  $C$  ТПК можно вычислить по формуле

$$C = 0,0884 \frac{\epsilon S (n-1)}{d} = C_0 S, \quad (2.35)$$



где  $S$  - активная площадь конденсатора, равная площади перекрытия обкладок, см<sup>2</sup>;

$d$  - толщина диэлектрического слоя, см;

$n$  - число обкладок.

Формула (2.35) не учитывает дополнительной емкости, образующейся по контуру обкладок из-за краевого эффекта. Однако на точность расчетов это почти не влияет, так как краевая емкость очень мала (доли пикофарады).

Проектирование однослойных ТПК следует начинать с выбора материала диэлектрической пленки (см. табл. 2.5).

При этом необходимо учитывать номинальное значение емкости, требования к стабильности, условия эксплуатации и технологичность изготовления ТПК. Затем по формуле

$$d \text{ (мкм)} \geq \frac{K_3 U_p}{E_{np}} \quad (2.36)$$

определяется толщина диэлектрической пленки.

Здесь  $K_3$  - коэффициент запаса электрической прочности конденсатора (для ТПК  $K_3 = 2-4$ );

$E_{np}$  - электрическая прочность материала диэлектрика, В/мкм.

Практика показывает, что диэлектрические пленки, толщиной 2000-3000 Å и менее, нередко оказываются несплошными, и ТПК на их основе являются ненадежными элементами. Многие конденсаторы с такой толщиной диэлектрика после изготовления оказываются негодными из-за замыкания обкладок. В связи с этим в тех случаях, когда значение  $d$ , полученное на основании формулы (2.36), оказывается меньше 3000 Å, за расчетное значение толщины пленки диэлектрика принимается величина  $d \geq 3000 \text{ Å}$ .

Далее по формуле

$$C_0 = 0,0884 \frac{\epsilon}{d} \quad (2.37)$$

определяется значение удельной емкости.

Активную площадь и размеры верхней обкладки конденсатора можно вычислить по следующим формулам:

$$S = \frac{C}{C_0} ; \quad (2.38)$$

$$L_2 = \sqrt{K_{\text{ф}} S} ; \quad (2.39)$$

$$B_2 = \sqrt{\frac{S}{K_{\text{ф}}}} , \quad (2.40)$$

где  $K_{\text{ф}} = \frac{L_2}{B_2}$  - коэффициент формы конденсатора.

### 2.2.3. Расчет ТПК с учетом точностных характеристик

#### А. Расчет ТПК без подстроечных секций

Приведенная в п.2.2.2. методика расчета ТПК очень проста и удобна для ориентировочных расчетов на стадии эскизного проектирования при разработке топологии микросхем.

Однако задача конструктора состоит не только в том, чтобы удачно расположить все элементы микросхемы, но и в том, чтобы спроектировать такую конструкцию, при изготовлении которой брак был бы минимальным, а сама конструкция удовлетворяла всем предъявляемым к ней требованиям в течение установленного срока работы. Поэтому конструктор с помощью различных конструктивно-технологических приемов должен обеспечить заданную точность изготовления радиоэлементов.

Точность изготовления ТПК определяется воспроизводимостью удельной емкости  $C_0$  и размеров обкладок [1]. На точность емкости также влияет погрешность установки масок и совмещения их с подложками  $\Delta \ell_y$  (рис.2.8).

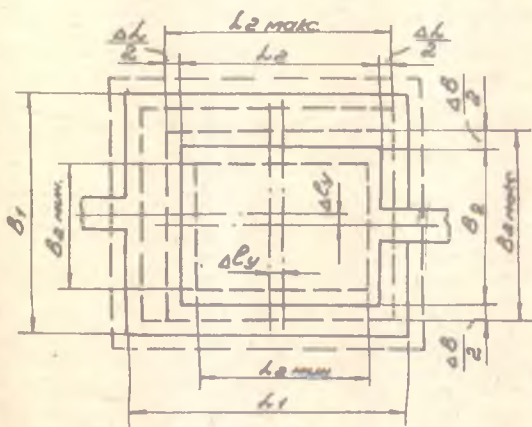


Рис. 2.8. Одно из предельных взаимных расположений обкладок ТПК

Эту погрешность можно исключить, увеличив размеры нижней обкладки:

$$L_1 \geq L_2 + \Delta L + 2\Delta l_y \quad (2.41)$$

$$B_1 \geq B_2 + \Delta B + 2\Delta b_y, \quad (2.42)$$

где  $L_1, B_1$  - размеры нижней обкладки,

$L_2, B_2$  - размеры верхней обкладки ТПК.

Относительная погрешность емкости конденсатора, обусловленная технологическими факторами, а также воздействием температуры окружающей среды, во время эксплуатации микросхемы определяется выражением [1]

$$\gamma_c = \gamma_{c_0} + \gamma_s + \gamma_{c_t} + \gamma_{c_{cr}}, \quad (2.43)$$

где  $\gamma_{c_0}$  - относительная погрешность удельной емкости (зависит от воспроизводимости свойств и толщины диэлектрической пленки); обычно определяется экспериментально или задается в пределах от  $\pm 5$  до  $\pm 10\%$ ;

$\gamma_S$  - относительная погрешность активной площади ТПК, определяется по формуле

$$\gamma_S = \Delta L \frac{1 + K_{\varphi}}{\sqrt{K_{\varphi} S_2}}, \quad (2.44)$$

(здесь  $K_{\varphi} = \frac{L_2}{B_2}$  - коэффициент формы ТПК,  $S_2$  - площадь верхней обкладки);

$\gamma_{c_t}$  - относительное изменение емкости под действием температуры окружающей среды

$$\gamma_{c_t} = \alpha_c (t - 20^\circ \text{C}), \quad (2.45)$$

(здесь  $\alpha_c$  - температурный коэффициент емкости ТПК, определяется из табл.2.5.

$\gamma_{c_{cr}}$  - относительное изменение емкости во времени, определяется из табл.2.5.

Для обеспечения заданной точности емкости необходимо, чтобы выполнялось условие  $\gamma_c \leq \gamma_{c_{дон}}$ ,

где  $\gamma_{c_{дон}}$  - допуск на изготовление емкости, т.е. должно выполняться неравенство

$$\gamma_{c_{дон}} \geq \gamma_{c_0} + \gamma_S + \gamma_{c_t} + \gamma_{c_{cr}}. \quad (2.46)$$

Так как все величины неравенства (2.46), кроме  $\gamma_S$ , конструктору, как правило, заданы, значение  $\gamma_S$  можно определить по формуле

$$\gamma_S = \gamma_{c_{дон}} - \gamma_{c_0} - \gamma_{c_t} - \gamma_{c_{cr}}. \quad (2.47)$$

Из формулы (2.44) видно, что требуемое значение  $\gamma_S$  можно обеспечить, задаваясь различными значениями  $\Delta L, K_{\varphi}$  и  $S$

Так как величина  $\Delta L$ , определяемая уровнем технологии, как правило, известна, а значение  $K_{\phi}$  выбирается исходя из топологических соображений, определяют величину  $S$  по формуле

$$S_2 \geq \left( \frac{\Delta L}{\gamma_S} \right)^2 \frac{(1 + K_{\phi})^2}{K_{\phi}}. \quad (2.48)$$

Если в выражении (2.48) выполняется равенство, получаем

$$C_{0 \text{ макс}} = C \left( \frac{\gamma_S}{\Delta L} \right)^2 \frac{K_{\phi}}{(1 + K_{\phi})^2}. \quad (2.49)$$

Анализ выражения (2.44) показывает, что существует оптимальное значение  $K_{\phi}$ , при котором величина  $\gamma_S^*$  минимальна. Это значение равно единице. При  $K_{\phi} = 1$  выражения (2.48) и (2.49) принимают вид

$$S_2 = 4 \left( \frac{\Delta L}{\gamma_S} \right)^2; \quad (2.50)$$

$$C_{0 \text{ макс}} = C \left( \frac{\gamma_S}{2 \Delta L} \right)^2. \quad (2.51)$$

После определения  $S_2$  по формулам (2.39) и (2.40) вычисляют размеры верхней, а по формулам (2.41) и (2.42) - размеры нижней обкладок ТПК. Размеры диэлектрического слоя вычисляют по формулам:

$$L_0 \geq L_1 + \Delta L + 2 \Delta l_y; \quad (2.52)$$

$$B_0 \geq B_1 + \Delta B + 2 \Delta l_y. \quad (2.53)$$

#### Б. Расчет ТПК повышенной точности

Если допуск на номинал емкости  $\gamma_{c \text{ доп}}$  мал, а величины  $\gamma_{c_1}$ ,  $\gamma_{c_2}$  и  $\gamma_{c \text{ ср}}$  относительно велики, то величина  $\gamma_S$  может оказаться отрицательной. Это значит, что при изготовлении ТПК может быть большой процент брака. При положительных, но очень малых значениях  $\gamma_S$  величина  $S_2$  может оказаться слишком большой, а величина

$C_{0 \text{ макс}}$  — малой, что невыгодно с точки зрения миниатюризации ТПК.

В таких случаях целесообразно проектировать ТПК с регулировочными секциями (рис. 2.9).

Отсоединение секций у конденсатора, изображенного на рис. 2.9, а, позволяет уменьшать его емкость. Подсоединение или отсоединение секций ТПК, изображенного на рис. 2.9, б, позволяет изменять емкость как в сторону увеличения, так и

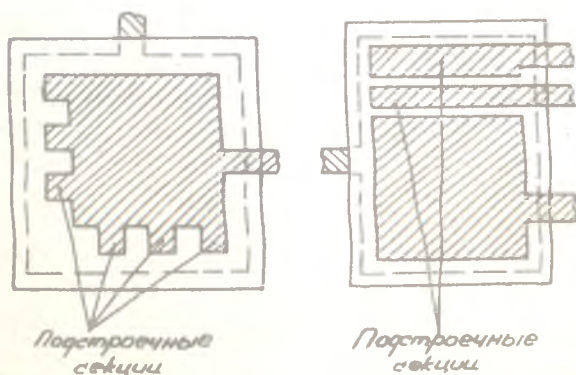


рис. 2.9. ТПК с подстраиваемыми секциями

уменьшения.

Для конструктивного расчета подстраиваемых ТПК необходимо знать минимальное и максимальное значения емкости. Их можно определить из выражений

$$C_{\text{макс}} = C \left( 1 + \frac{\gamma_c - \gamma_{c_1} - \gamma_{c_{\text{н}}}}{100} \right); \quad (2.54)$$

$$C_{\text{мин}} = C \left( 1 - \frac{\gamma_c - \gamma_{c_1} - \gamma_{c_{\text{н}}}}{100} \right), \quad (2.55)$$

где относительные погрешности выражены в процентах. В процессе настройки номинал емкости обязательно должен попасть в диапазон  $C_{\text{мин}} - C_{\text{макс}}$ .

Шаг подгонки, равный емкости одной секции, должен быть больше поля допуска:  $\Delta C = C_{\max} - C_{\min}$ .

Число подстраиваемых секций можно определить из отношения

$$n = \frac{\gamma_{c_0} + \gamma_{\Sigma}}{\gamma_{c_0} - \gamma_{c_{\alpha}}} \quad (2.56)$$

Максимальная площадь основной части верхней обкладки  $S_{\text{осн. макс}}$  определяется по формуле

$$S_{\text{осн. макс}} = \frac{C_{\max}}{C_{0 \max}}, \quad (2.57)$$

где  $C_{0 \max}$  максимальная удельная емкость

$$C_{0 \max} = C_0 (1 + \gamma_{c_0}/100);$$

величина  $C_0$  вычисляется по формуле (2.37).

При  $K_{\Phi} = 1$  размеры верхней обкладки определяются из соотношения

$$L_{\text{осн}} = B_{\text{осн}} = \sqrt{S_{\text{осн. макс}}} - \Delta L. \quad (2.58)$$

Площадь одной подстроечной секции равна

$$S_{C \min} = \frac{S_{\Sigma \min} - S_{\text{осн. мин}}}{n}, \quad (2.59)$$

где

$$S_{\Sigma \min} = \frac{C_{\min}}{C_{0 \min}};$$

$$C_{0 \min} = C_0 (1 - \frac{\gamma_{c_0}}{100});$$

$$S_{\text{осн. мин}} = B_{\text{осн. мин}} L_{\text{осн. мин}};$$

$$B_{\text{осн. мин}} = B - \Delta B;$$

$$L_{\text{осн. мин}} = L - \Delta L.$$

Дальнейшее конструирование заключается в рациональном расположении подстроечных секций на одной или двух сторонах верхней обкладки. Расстояние между секциями и их ширина выбирается исходя из топологических соображений с учетом технологических ограничений. Высота секции вычисляется по формуле

$$h_c = \frac{S_{смин}}{b_c - \Delta L} . \quad (2.60)$$

Чтобы не допустить повреждения диэлектрика, которое может произойти при подгонке номинала конденсатора, изображенного на рис. 2.9, а, иногда применяют другую конструкцию регулируемого ТПК (рис. 2.10) с так называемыми "матричными" секциями.

В местах перекрещивания полосок, принадлежащих обкладкам 1 и 2, образуются подстроечные секции конденсатора 3, которые можно отсоединить разрывом перемычек 4.

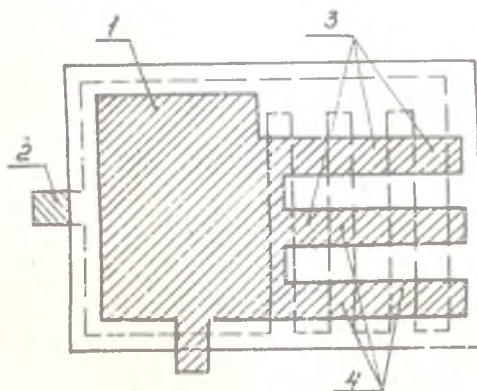


Рис. 2.10. ТПК с матричными подстраиваемыми секциями



### 2.2.4. Расчет гребенчатых конденсаторов

Если расчетная величина активной площади ТПК меньше  $1\text{мм}^2$ , рекомендуется конструировать гребенчатый пленочный конденсатор, внешний вид которого показан на рис.2.11.

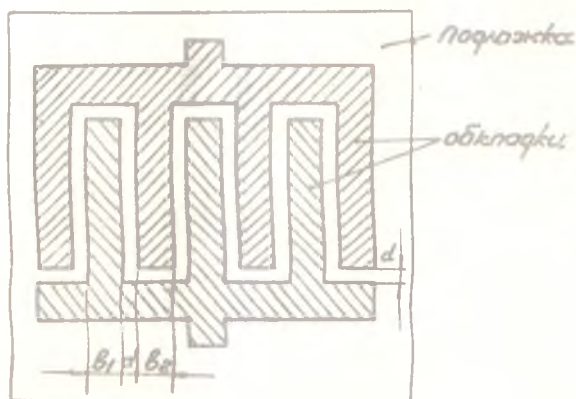


Рис. 2.11. Гребенчатый конденсатор

Емкость такого конденсатора ( $\text{пФ}$ ) в основном состоит из паразитной емкости, обусловленной краевым эффектом, и определяется по эмпирической формуле

$$C = \epsilon_r \beta l, \quad (2.61)$$

где  $\beta$  - коэффициент, зависящий от ширины пленочных проводников и расстояния между ними, определяется по графику (рис. 2.12);

$l$  - длина совместной границы проводников, см;

$\epsilon_r$  - расчетное значение относительной диэлектрической проницаемости:

для конденсатора, не имеющего защитного покрытия,

$$\epsilon_r = \frac{1 + \epsilon_n}{2}, \quad (2.62)$$

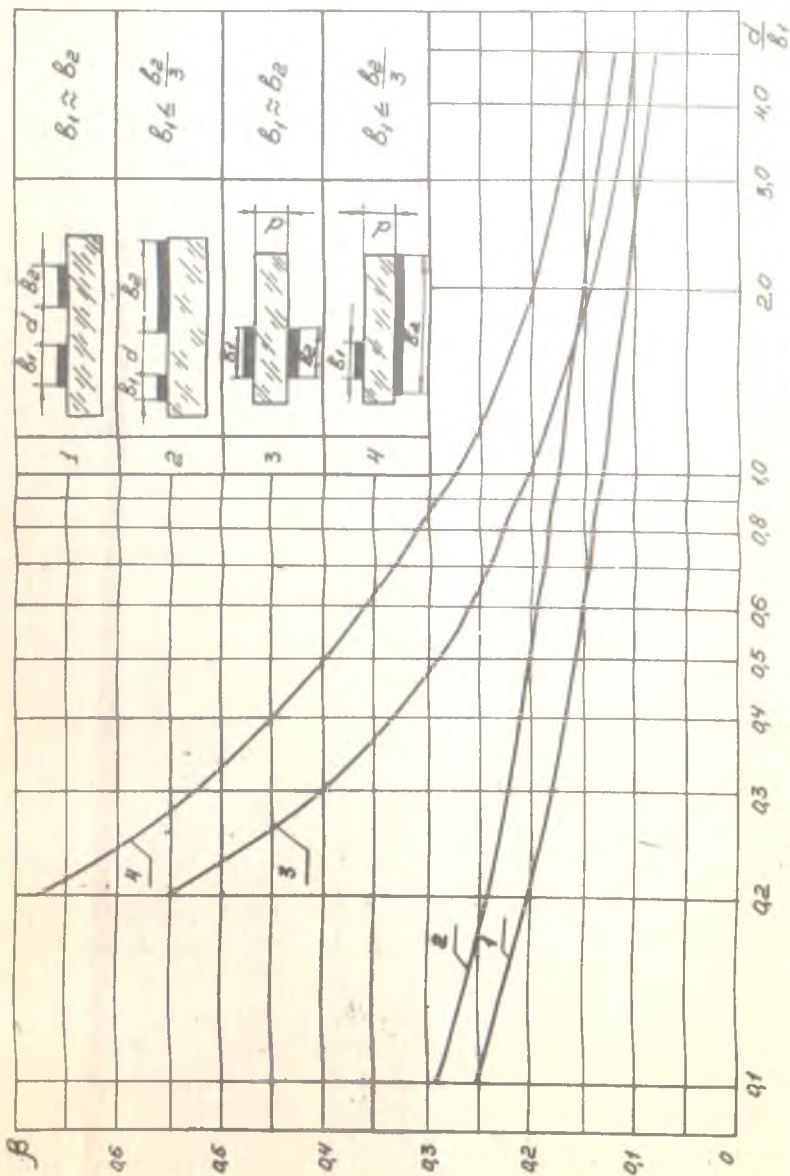


Рис. 2.12. Зависимость коэф-та  $\beta$  от расположения элементов графитового конденсатора

для конденсатора, покрытого защитным слоем,

$$\epsilon_p = \frac{\epsilon_d + \epsilon_n}{2}, \quad (2.63)$$

где  $\epsilon_n$  - относительная диэлектрическая проницаемость материала подложки;

$\epsilon_d$  - относительная диэлектрическая проницаемость слоя покрытия.

### 2.2.5. Добротность ТПК

О качестве ТПК на рабочей частоте можно судить по величине угла потерь  $\operatorname{tg} \delta$  или обратной ей величине, называемой добротностью  $Q$ :

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta}. \quad (2.64)$$

Потери энергии в ТПК складываются из следующих составляющих:

потерь энергии в диэлектрических слоях: в основном диэлектрическом слое ТПК, в подложке, в защитном слое;

потерь энергии в металлических элементах ТПК: обкладках, выводах конденсатора.

В связи с этим эквивалентную схему ТПК можно представить в виде последовательного соединения емкости без потерь  $C$ , эквивалентного сопротивления диэлектрических потерь  $Z_{дд}$  и эквивалентного сопротивления потерь в металлических элементах конденсатора  $Z_{эм}$  (рис. 2.13).

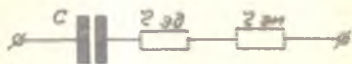


Рис. 2.13. Эквивалентная схема ТПК

Тангенс угла потерь можно представить в виде суммы

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_0 + \operatorname{tg} \delta_m. \quad (2.65)$$

- где  $\operatorname{tg} \delta_0$  - тангенс угла потерь в диэлектрических материалах;  
 $\operatorname{tg} \delta_m$  - тангенс угла потерь в металлических элементах ТПК.

Значения  $\operatorname{tg} \delta_0$  для некоторых диэлектрических материалов приведены в табл. 2.5. Величина  $\operatorname{tg} \delta_m$  может быть вычислена по формуле

$$\operatorname{tg} \delta_m = \omega C \tau_{эм}, \quad (2.66)$$

- где  $\omega = 2\pi f$  - круговая частота ( $f$  - рабочая частота, Гц);  
 $C$  - емкость конденсатора,  $\varphi$ ;  
 $\tau_{эм}$  - эквивалентное сопротивление потерь переменному току в обкладках и выводах

$$\tau_{эм} = \tau_{э.об} + \tau_{э.выв}. \quad (2.67)$$

Сопротивление выводов ТПК определяется выражением

$$\tau_{э.выв} = R_{э.выв} K_{\varphi.выв},$$

а эквивалентное сопротивление обкладок ТПК переменному току можно определить как

$$\tau_{э.об} = \frac{2}{3} R, \quad (2.68)$$

где  $R$  - сопротивление одной обкладки конденсатора постоянному току ( $\Omega$ ), вычисляемое по формуле

$$R = R_{об} K_{\varphi.об}. \quad (2.69)$$

Формула (2.68) справедлива, если выполняется условие

$$\omega RC \leq 0,04,$$

при котором распределение тока в обкладках подчинено линейному закону.

После преобразований формула (2.64) может быть представлена в виде

$$Q = \frac{1}{tg \delta_0 + \omega C R_{aob} \left( \frac{2}{3} K_{ф.об} + K_{ф.вкл} \right)}. \quad (2.70)$$

При выводе формулы (2.70) предположено, что обкладки и выводы ТПК изготовлены из одного материала, по единой технологии и имеют одинаковую толщину, т.е. выполняется условие

$$R_{aob} = R_{aвкл}.$$

В диапазоне частот 10-150 МГц для определения добротности ТПК емкостью 50-1000 пФ с диэлектриком из монооксида кремния существует эмпирическая формула

$$Q = \frac{1,2 \cdot 10^5}{f C}, \quad (2.71)$$

где  $f$  - рабочая частота, МГц,

$C$  - емкость ТПК, пФ.

Она применима, если удельная емкость  $C_0$  находится в пределах 500-1000 пФ/см<sup>2</sup>, а удельное сопротивление материала обкладок не превышает 0,1 Ом/квadrat, что характерно для алюминиевых обкладок, толщиной не менее 300-500 нм.

### 2.3. Пленочные индуктивности

Изготовление катушек индуктивности для гибридных пленочных микросхем представляет большие трудности. Наибольшее распространение в мегагерцовом диапазоне частот получили плоские спиральные катушки (рис. 2.14). Ограниченные размеры подложек пленочных микросхем и конечная ширина проводящей полоски не позволяют изготовить однослойные плоские пленочные катушки с индуктивностью более 5-7 мкГн. Это означает, что наиболее реальным является изготовление микросхем с колеба-

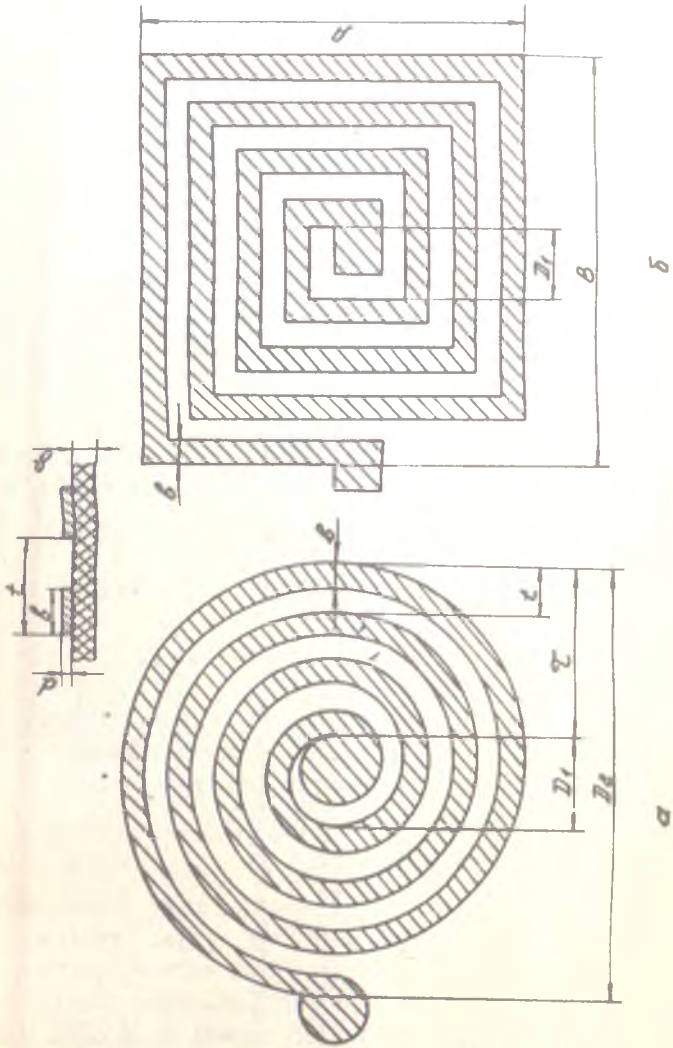


Рис.2.10. Плоские катушки индуктивности:  
а-круглая; б-квадратная спираль

тельными контурами, резонансная частота которых соответствует нескольким десяткам мегагерц. Методы увеличения индуктивности плоских спиральных катушек, основанные на нанесении ферритовых пленок, позволяют увеличить индуктивность катушек лишь на 10-40%, но значительно усложняют технологический процесс их изготовления.

Различные схемные эквиваленты индуктивностей, в которых используются активные элементы, пока не нашли широкого применения из-за зависимости их параметров от частоты и температуры.

Исходными данными для расчета являются:

величина индуктивности -  $L$  ;  
величина добротности -  $Q$  ;  
рабочая частота -  $f$  ;  
ориентировочный размер подложки.

По ним выбираются:

форма катушки, ее наружный размер  $D_2$  ;  
материал проводника катушки ;  
материал подложки ;  
способ изготовления катушки ;  
способ получения фотооригинала.

В результате расчетов необходимо определить:

шаг спирали -  $t$  ;  
ширину витка -  $b$  ;  
толщину витка -  $d$  ;  
внутренний диаметр катушки -  $D_1$  ;  
число витков -  $N$ .

При проектировании пленочных катушек индуктивности нужно учитывать следующие положения [4,5]:

1. Главным фактором, определяющим индуктивность одновитковой петли является площадь, заключенная в плоскости петли.
2. Для заданной площади кольцеобразная петля соответствует наименьшей длине проводника и, следовательно, наиболее высокой добротности.
3. При условии, что связь между витками достаточно силь-

ная, индуктивность катушки возрастает пропорционально квадрату числа витков.

4. Поперечные размеры проводника катушки слабо влияют на ее индуктивность и существенно влияют на добротность.

5. При одинаковых габаритных размерах индуктивность квадратной катушки примерно на 12% больше, чем круглой, добротность ее на 10% ниже.

Расчет пленочных катушек индуктивности производится в следующей последовательности:

1. Выбирается внутренний размер катушки  $D_1$ . Из технических соображений его не следует брать меньше 2мм.

2. Определяется шаг спирали по формуле

$$t = K \frac{D_1 \sqrt{D_1}}{\sqrt{L}}, \text{ мм}, \quad (2.72)$$

где  $L$  - индуктивность катушки, мкГн;

$D_1$  - внутренний диаметр катушки, мм;

$K$  - коэффициент, зависящий от отношения  $\frac{D_2}{D_1}$ , определяется по графику рис. 2.15.

3. Из условия  $d \geq (2-4)d_c$  определяется толщина проводника катушки  $d$ .

Здесь  $d_c$  - толщина слоя скин-эффекта в мкм, рассчитываемая по формуле

$$d_c = K_1 \sqrt{\lambda}, \quad (2.73)$$

где  $\lambda$  - длина волны, см ( $\lambda = \frac{c}{f}$ );

$K_1$  - коэффициент, учитывающий материал пленки:

для серебра  $K_1 = 0,37$ ;

для меди  $K_1 = 0,39$ ;

для алюминия  $K_1 = 0,51$ .



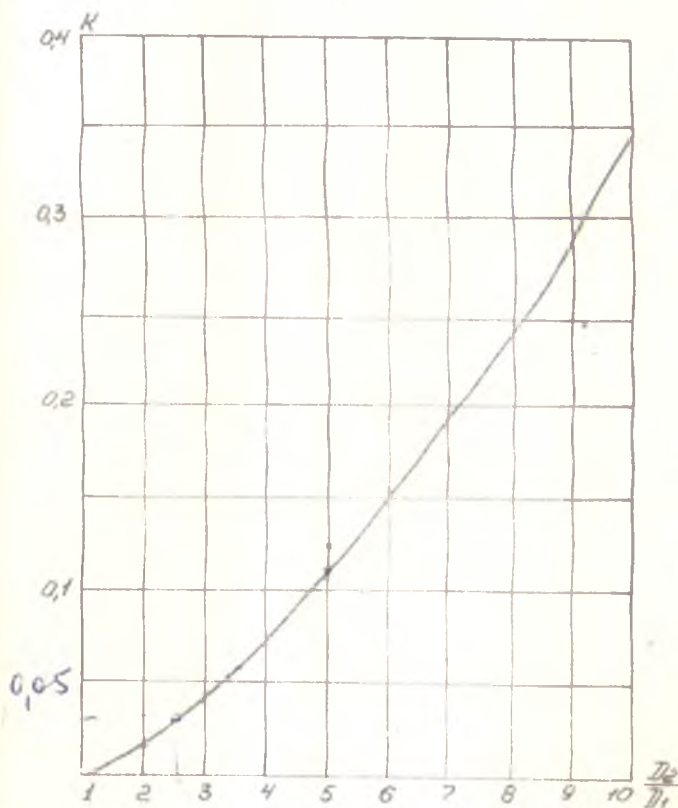


Рис. 2.15. Зависимость коэффициента  $K$  от размеров пленочной катушки

4. Определяется ширина витка, при которой получается заданная добротность катушки

$$b = \frac{\rho t \left[ \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^2 - 1 \right] Q 10^{14}}{16 f D_1 K^2 d}, \quad (2.74)$$

- где  $b$  - ширина витка, мм;  
 $\rho$  - удельное объемное электрическое сопротивление материала проводника, Ом·см;  
 $t$  - шаг спирали, мм;  
 $D_1, D_2$  - внутренний и внешний размеры катушки, мм;  
 $f$  - частота, МГц;  
 $K$  - коэффициент, определяемый из графика рис. 2.15;  
 $d$  - толщина проводника катушки, мм.

Так как формула (2.74) выведена без учета влияния скин-эффекта, то ширину витка, рассчитанную по этой формуле, следует увеличить и выбирать равной  $(1,5-2)b$  для  $d = (2-4)d_c$ .

Если новое значение ширины ( $b'$ ) получится больше  $t$  следует, оставляя прежним внутренний размер спирали  $D_1$  и задаваясь шагом спирали  $t > b'$ , из формулы (2.72) определить внешний размер спирали  $D_2$ , при котором можно получить заданную индуктивность, а затем по формуле (2.74) определить ширину витков  $b$ .

б. Определяется число витков по формуле

$$N = \frac{D_2 - D_1}{2t}, \quad (2.75)$$

где  $t$  - шаг намотки.

Расчет плоской прямоугольной спиральной катушки сводится к расчету круглой с эквивалентным наружным диаметром:

$$D_2' = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{AB}. \quad (2.76)$$

Здесь  $A$  и  $B$  - габаритные размеры прямоугольной спиральной катушки.

При расчете и конструировании пленочных катушек индуктивности необходимо учитывать влияние близлежащих металлических поверхностей (стенок корпуса, подложек с нанесенными пленками) на индуктивность и добротность. Это влияние проявляется в уменьшении  $L$  и  $Q$ . Зависимость индуктивности и

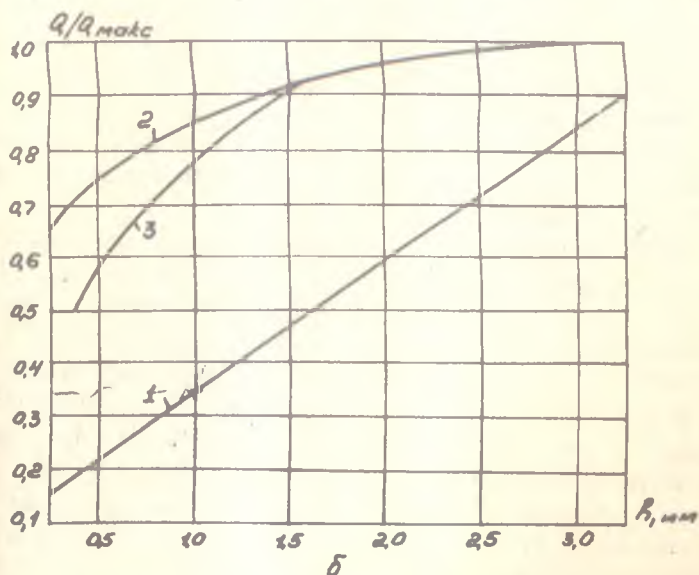
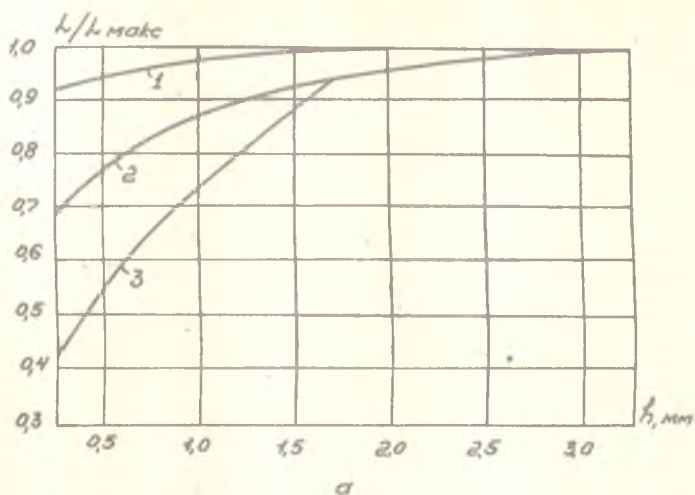


Рис. 2.16. Влияние плоских металлических поверхностей на индуктивность (а) и добротность (б):  
 1-алюминиевая пленка на частотах 20-100МГц; 2, 3 - ла-  
 тунный лист на частотах 100 и 200 МГц

добротности плоских катушек, расположенных на расстоянии  $h$  от металлической поверхности, приведена на рис. 2.16, где

$L_{\text{макс}}$  и  $Q_{\text{макс}}$  - величины индуктивности и добротности при  $h \rightarrow \infty$  ;

$L$  и  $Q$  - величины индуктивности и добротности при конечном значении  $h$  .

Вычисленные при расчете электрической схемы  $L$  и  $Q$  должны быть перед конструктивным расчетом катушки индуктивности увеличены с учетом размагничивающего влияния металлических поверхностей в соответствии с экспериментальными данными, приведенными на рис. 2.16.

#### 2.4. Пленочные RC - цепи с распределенными параметрами

В связи с трудностью создания малогабаритных индуктивных элементов для схем, работающих на низких частотах, при разработке частотно-избирательных фильтров, фазосдвигающих цепей и др. нередко применяют тонкопленочные RC - цепи с распределенными параметрами [6,7]. Их конструкция представляет собой трехслойную структуру, состоящую из последовательно нанесенных на диэлектрическую подложку резистивной диэлектрической и проводящей пленок.

Наибольшее распространение (из-за простоты конструкции и методики расчета) получили однородные RC - структуры (табл. 2.6, пункт "а"), у которых погонные значения (на единицу длины) сопротивления и емкости не изменяются вдоль длины. Однако с целью улучшения электрических характеристик RC - цепей, часто используют неоднородные RC - структуры (табл. 2.6 п. б и в), у которых погонные значения сопротивления и емкости вдоль длины структуры неодинаковы. Недостатками RC - структуры типа "б" являются сложность форм, некомпактность, неоднородность электрического поля в резисторе. Этих недостатков в значительной мере лишена ступенчатая неоднородная RC - структура (тип "в").

Тонкпластинные RC-цели с распределенными параметрами

Обла- стные	Конструкция RC-цели	Расчетные формулы
а		<p><u>Известны и выбраны:</u> <math>f_{cp}, \Gamma_4; m = \omega RC; P, Bm; R_0, Om;</math>  <math>C_0, \varphi, \rho_0, Bm/км^2; \omega RC = 2,43; \omega RC</math></p> <p>1) <math>e = \sqrt{\frac{2,43}{R_0 C_0 2\pi} f_{cp}, см; 2) S_{мин} = \frac{P}{\rho_0}; 3) B = \frac{S}{e};</math>          4) <math>R = R_0 \frac{e}{B}; 5) C = C_0 S.</math></p> <p><u>Известны и выбраны:</u> <math>f_{cp}, \Gamma_4; m = \omega RC; P, Bm; R_0, Om;</math>  <math>C_0, \varphi, \rho_0, Bm/км^2</math></p> <p>1) <math>e = \sqrt{\frac{m}{2\pi f_{cp} R_0 C_0 K_1 K_2}, см; K_1 = \frac{2-1}{2 \cdot e n 2}; K_2 = \frac{2-1}{e n 2};}</math>          (для различных значений <math>K_1</math> и <math>K_2</math> даны в табл. 2.7)          2) <math>S_{мин} = P/\rho_0; 3) B(e) = S_{мин}/e; 4) B = B(e) \cdot e; 5) e = R_0 \cdot \frac{e}{B} \cdot K_1;</math>          6) <math>C = C_0 \cdot e \cdot B \cdot K_2.</math> Для построения: <math>B(x) = B e^{ax}; L = \frac{1}{e} e n 2.</math></p>
б		<p><u>Известны и выбраны:</u> <math>f_{cp}, \Gamma_4; e; m = \omega RC; M, N; a; P, Bm; R_0, Om;</math>  <math>C_0, \varphi, \rho_0, Bm/км^2</math></p> <p>1) <math>e = \sqrt{\frac{m}{2\pi f_{cp} R_0 C_0 [1 + a(\frac{1}{M} - 1)] (1 + aN)}, см; S_{мин} = \frac{P}{\rho_0};}</math>          3) <math>B = \frac{S_{мин}}{e}; 4) C_0(x) = N C_0; 5) R_{от} = \frac{R_{02}}{M};}</math>          6) <math>R = R_0 [1 + a(\frac{1}{M} - 1)],</math> где <math>R_0 = R_{02} \frac{e}{B};}</math>          7) <math>C = C_0 (1 + aN).</math></p>

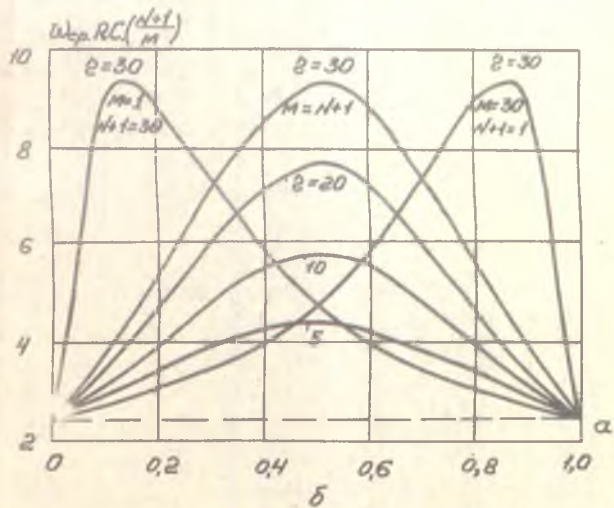
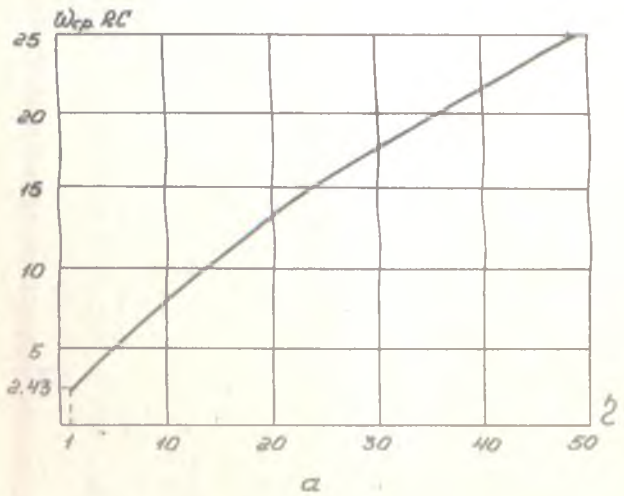


Рис. 2.17. Зависимость обобщенной частоты среза  $RC$ -структур от конструктивных параметров:

а-для экспоненциальной структуры; б-для ступенчатой

Значения коэффициентов  $R$ -структур

2	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
	1,0000 1,0000	0,8221 1,2332	0,7213 1,4127	0,6548 1,6370	0,6068 1,8205	0,5702 1,9956	0,5410 2,1640	0,5171 2,3270	0,4971 2,4853
2	5,5	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0
	0,4790 2,6397	0,4521 2,9883	0,4405 3,0834	0,4301 3,2250	0,4208 3,3663	0,4123 3,5045	0,4046 3,6410	0,3975 3,7756	0,3909 3,9087
2	10,5	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0
	0,3849 4,0402	0,3738 4,2991	0,3689 4,4267	0,3643 4,5531	0,3599 4,6785	0,3558 4,8027	0,3519 4,9260	0,3482 5,0483	0,3447 5,1698
2	15,5	16,5	17,0	17,5	18,0	18,5	19,0	19,5	20,0
	0,3413 5,2903	0,3351 5,5291	0,3322 5,6773	0,3294 5,7648	0,3268 5,8816	0,3248 5,9977	0,3217 6,1132	0,3184 6,2281	0,3171 6,3424
2	20,5	21,5	22,0	22,5	23,0	23,5	24,0	24,5	25,0
	0,3119 6,4060	0,3108 6,6818	0,3089 6,7938	0,3069 6,9053	0,3051 7,0164	0,3031 7,1270	0,3015 7,2371	0,2999 7,3468	0,2982 7,4560
2	25,5	26,5	27,0	27,5	28,0	28,5	29,0	29,5	30,0
	0,2967 7,5618	0,2936 7,7812	0,2922 7,8887	0,2908 7,9959	0,2894 8,1027	0,2880 8,2092	0,2867 8,3153	0,2855 8,4210	0,2842 8,5264

Исходными данными для расчета являются:

частота среза ( $f_{ср}$ );

мощность рассеяния на резистивной пленке  $P$ ;

требования к избирательности  $RC$ -цепи (при использовании ее в качестве частотно-избирательного фильтра) и габаритам устройства.

По этим данным выбираются:

1. Тип структуры. При невысоких требованиях к избирательности фильтра лучше всего применить однородную  $RC$ -структуру. При повышенных требованиях к избирательности фильтров применяют структуру типа "б" или "в" в зависимости от удобства ее размещения на микроплате и технологичности. Следует помнить, что неоднородные  $RC$ -структуры занимают на подложке значительно большую площадь, чем однородные (приблизительно в 9 раз при степени неоднородности, равной 30).

2. Значение степени неоднородности  $\zeta$ . По рис. 2.17. на основании выбранного значения  $\zeta$  определяется значение обобщенной частоты  $\omega_{ср}RC$  (у однородных  $RC$ -структур  $\omega_{ср}RC = 2.43$ ). Для ступенчатых структур по значению  $\zeta$  выбираются подходящие значения  $M, N$  и  $a$ , а затем -  $\omega_{ср}RC$ .

3. Материал резистивной и диэлектрической пленок и, соответственно,  $R_a, C_o$  и  $P_o$ .

4. Способ изготовления  $RC$ -структур.

В результате расчетов по формулам, приведенным в табл. 2.6. определяют параметры  $RC$ -структур. Последовательность расчетов определяется порядковым номером формул.

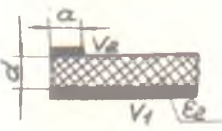
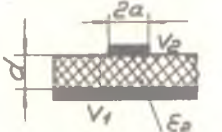
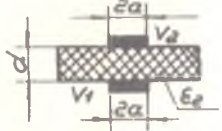
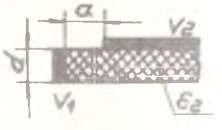
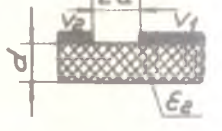
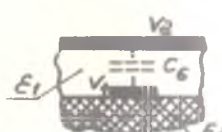
Кроме изложенной методики для расчета  $RC$ -цепей с распределенными параметрами можно использовать литературу [6,7].

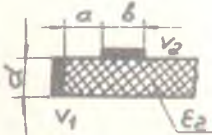

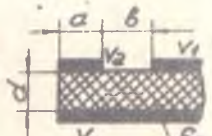
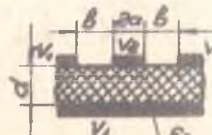
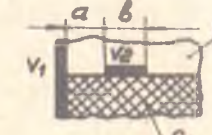
#### 2.5. Паразитные связи в пленочных микросхемах

Величину емкости между двумя пленочными проводниками или пленочным проводником и плоской поверхностью можно определить по формуле

$$C = 0,0884 \epsilon_r C_r \ell, \quad (2.77)$$



Размещение проводящих элементов в пленочной микросхеме	$\epsilon_1 = \epsilon_2 \gg \epsilon_1$	$\epsilon' = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2}$
1) 	$C_1 = \frac{\kappa}{\kappa'}$ $\kappa = \epsilon h \frac{\pi a}{2d}$ $\kappa' = \sqrt{1 - \kappa^2}$	—
2) 	$C_2 = 2C_1$	—
3) 	$C_3 = C_1$	—
4) 	$C_4 = \frac{1}{C_1}$	—
5) 	$C_5 = \frac{1}{2} C_4$	—
6) 	—	$C_6 = (1,3 - 1,4) C_2$

Размещение проводящих элементов в пленочной микросхеме	$\epsilon' = \epsilon_2 \gg \epsilon_1$	$\epsilon' = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2}$
<p>7)</p> 	$C_7 = \frac{K'}{K}$ $K = \frac{\text{th} \frac{\pi a}{2d}}{\text{th} \frac{\pi(a+b)}{2d}}$ $K' = \sqrt{1 - K^2}$	<p>—</p>
<p>8)</p> 	$C_8 = \frac{1}{2} C_7$	$C_8 = \frac{K'}{K}$ $K = \frac{a}{a+b}$ $K' = \sqrt{1 - K^2}$
<p>9)</p> 	$C_9 = \frac{1}{C_7}$	$C_9 = 2 \frac{K'}{K}$ $K = \sqrt{\frac{b}{b+a}}$ $K' = 1 - K^2$
<p>10)</p> 	$C_{10} = 2C_9$	$C_{10} = 2C_9$
<p>11)</p> 	<p>—</p>	$C_{11} = 2C_8$

Полные эллиптические интегралы первого рода

$k^2$	$K$	$K/K'$	$K'/K$	$K'$	$(K')^2$
0,00	1,57080	0,00000	$\infty$	$\infty$	1,00
1	57475	42611	2,34682	3,69564	0,99
2	57874	47068	2,12457	35414	98
3	58278	50153	1,99388	15587	97
4	58687	52613	90067	01611	96
0,05	1,59100	0,54705	1,82799	2,90834	0,05
6	59519	56552	76828	82075	94
7	59942	58223	71754	74707	93
8	60371	59761	67334	68355	92
9	60805	61194	63414	62777	91
0,10	1,61244	0,62544	1,59877	2,57809	0,10
11	61089	63825	56680	53333	89
12	62139	65047	53734	49264	88
13	62595	66221	51009	45534	87
14	63058	67353	48471	42093	86
0,15	1,63526	0,68449	1,46094	2,38902	0,15
16	64000	69513	43858	35926	84
17	64481	70550	41744	33141	83
18	64968	71562	39738	30523	82
19	65462	72553	37829	28055	81
0,20	1,65962	0,78526	1,36007	2,25721	0,20
21	66470	74481	34262	28507	79
22	66985	75422	32588	21402	78
23	67507	76349	30978	19397	77
24	68037	77265	29425	17483	76
0,25	1,68575	0,78171	1,27926	2,15662	0,25
$(K')^2$	$K'$	$K'/K$	$K/K'$	$K$	$k^2$

$R$	$K$	$K/K'$	$K'/K$	$K'$	$(R')^2$
0,25	1,68575	0,78171	1,27926	2,15652	0,75
26	69121	79066	26476	13897	74
27	69676	79975	25070	12213	73
28	70237	80836	23707	10595	72
29	70809	81712	22381	09037	71
0,30	1,71389	0,82583	1,21091	2,07536	0,70
31	71978	83449	19834	06088	69
32	72578	84312	18607	04680	68
33	73186	85172	17409	03337	67
34	73806	86030	16238	02028	66
0,35	1,74435	0,86887	1,15091	2,00760	0,65
36	75075	87744	13986	1,99530	64
37	75727	88600	12867	98337	63
38	76390	89457	11786	97178	62
39	77065	90315	10723	96052	61
0,40	1,77752	0,91175	1,09679	1,94957	0,60
41	78452	92037	08652	93891	59
42	79165	92903	07640	92853	58
43	79892	93771	06642	91841	57
44	80633	94644	05659	90855	56
0,45	1,81388	0,95522	1,04688	1,89892	0,55
46	82159	96404	03730	88953	54
47	82946	97293	02782	88036	53
48	83749	98188	01845	87140	52
49	84569	99090	00918	86264	51
0,50	1,85407	1,00000	1,00000	1,85407	0,50
$(R')^2$	$K'$	$K'/K$	$K/K'$	$K$	$R^2$

Значения гиперболического тангенса

$x$	$thx$	$x$	$thx$	$x$	$thx$	$x$	$thx$
0,00	0,00000	1,00	0,76159	2,00	0,96403	3,00	0,99505
0,05	0,04996	1,05	0,78181	2,05	0,96740	3,05	0,99552
0,10	0,09966	1,10	0,80005	2,10	0,97045	3,10	0,99595
0,15	0,14889	1,15	0,81775	2,15	0,97323	3,15	0,99633
0,20	0,19738	1,20	0,83365	2,20	0,97547	3,20	0,99668
0,25	0,24492	1,25	0,84828	2,25	0,97803	3,25	0,99700
0,30	0,29181	1,30	0,86172	2,30	0,98010	3,30	0,99728
0,35	0,33638	1,35	0,87405	2,35	0,98197	3,35	0,99754
0,40	0,37999	1,40	0,88535	2,40	0,98367	3,40	0,99777
0,45	0,42190	1,45	0,89569	2,45	0,98522	3,45	0,99790
0,50	0,46212	1,50	0,90515	2,50	0,98661	3,50	0,99818
0,55	0,50052	1,55	0,91379	2,55	0,98788	3,55	0,99835
0,60	0,53705	1,60	0,92167	2,60	0,98903	3,60	0,99851
0,65	0,57167	1,65	0,92866	2,65	0,99007	3,65	0,99865
0,70	0,60437	1,70	0,93544	2,70	0,99101	3,70	0,99878
0,75	0,63515	1,75	0,94138	2,75	0,99186	3,75	0,99889
0,80	0,66404	1,80	0,94681	2,80	0,99263	3,80	0,99900
0,85	0,69107	1,85	0,95175	2,85	0,99333	3,85	0,99909
0,90	0,71630	1,90	0,95624	2,90	0,99396	3,90	0,99918
0,95	0,73978	1,95	0,96032	2,95	0,99454	3,95	0,99926
1,00	0,76159	2,00	0,96403	3,00	0,99505	4,00	0,99933

где  $C$  - емкость, пФ ;

$\epsilon_p$  - расчетное значение относительной диэлектрической проницаемости;

$C_r$  - геометрическая ("бевараамерная") погонная емкость;

$l$  - длина совместной границы проводников, см.

Значение  $\epsilon_p$  в зависимости от наличия защитного слоя определяется из соотношений

$$\epsilon_p = \epsilon_n \quad \text{при } \epsilon_n \gg \epsilon_d ;$$

$$\epsilon_p = \frac{\epsilon_n + \epsilon_d}{2} \quad \text{при } \epsilon_n \approx \epsilon_d ,$$

где  $\epsilon_n$  - относительная диэлектрическая проницаемость материала подложки;

$\epsilon_d$  - относительная диэлектрическая проницаемость защитного покрытия.

Значения погонной емкости  $C_r$  для различных конструктивных вариантов расположения проводящих поверхностей приведены в табл.2.8. где приняты следующие обозначения:

$V_1$  и  $V_2$  - потенциалы поверхностей, между которыми рассчитывается емкость;

$K$  и  $K'$  - основной и дополнительный полные эллиптические интегралы первого рода с модулями  $k$  и  $k'$  соответственно.

Табулированные значения полных эллиптических интегралов приведены в табл.2.9. Значения гиперболического тангенса, необходимые для вычисления модулей  $k$  и  $k'$ , приведены в таблице 2.10.

### 3. КОНСТРУИРОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ МИКРОСХЕМ

Работа гибридных пленочных микросхем включает следующие этапы: анализ технического задания, эскизное проектирование микросхем, конструктивный расчет элементов микросхем и разработку топологии, конструктивное оформление микросхем, разработку технической документации. В этом разделе рассматривается содержание перечисленных этапов и приводятся некоторые сведения,

полезные при конструировании микросхем.

### 3.1. Анализ технического задания

Анализ технического задания необходим для выявления особенностей микросхемы, уточнения техпроцесса изготовления и его характеристик, для сопоставления возможных конструктивно-технологических характеристик микросхемы с уровнем производства, достигнутым промышленностью.

Техническое задание на разработку микросхемы содержит основные сведения о характеристиках проектируемой микросхемы, а именно:

- принципиальную электрическую схему
- номиналы пассивных элементов и допуски на них;
- признаки воздействующего сигнала: частота, амплитуда, длительность, форма сигнала, уровень помех и т.д.;
- характеристики навесных элементов;
- напряжения источников питания;
- рабочие напряжения конденсаторов;
- мощности, рассеиваемые резисторами (при выполнении курсового проекта мощности, рассеиваемые резисторами, и рабочие напряжения конденсаторов рассчитываются студентами).

В некоторых случаях в техническом задании указываются тип и размеры корпуса для разрабатываемой микросхемы, условия эксплуатации и другие данные.

Принципиальная электрическая схема позволяет судить о сложности коммутации между отдельными элементами, числе контактных площадок для внешних соединений и навесных элементов, возможном размещении контактных площадок. Функциональные узлы с большим числом входов и выходов (например, устройства дискретной вычислительной техники) обычно реализуются на подложке с двухсторонним расположением контактных площадок по широкой стороне подложки. Аналоговые функциональные узлы (например, многокаскадные усилители) часто имеют малое число входов и выходов. Склонность таких устройств к самовозбуждению обуславливает разность входные и выходные контакт-

ные площадки, располагая их по узким сторонам подложки.

Анализ номиналов пассивных элементов и допусков на них позволяет сделать вывод о возможности реализации этих элементов в пленочном исполнении или о необходимости применения навесных и подстроечных (тонкопленочных или навесных) элементов.

Наличие в схеме резисторов и конденсаторов с большим диапазоном номиналов усложняет технологический процесс изготовления микросхем и ухудшает их характеристики. В таких случаях для раздельного изготовления пассивных элементов с малыми и большими номиналами приходится применять материалы с различными свойствами, что позволяет получить хорошие конструктивные характеристики микросхем, но усложняет техпроцесс.

Заданная величина допусков на номиналы пассивных элементов влияет на их конструктивные параметры и налагает дополнительные ограничения на характеристики техпроцесса. Увеличение геометрических размеров  $R$  и  $C$  элементов в ряде случаев позволяет снизить погрешности воспроизведения номиналов, но размеры микросхемы при этом возрастают.

Особое внимание следует обращать на рабочие напряжения конденсаторов и мощности, рассеиваемые резисторами, так как от их величины зависит выбор материалов  $R$  и  $C$  элементов, материала и размеров подложки, условий изготовления микросхем. Иногда изготовление тонкопленочных конденсаторов с большим рабочим напряжением и резисторов с большими рассеиваемыми мощностями оказывается нецелесообразным из-за сложности техпроцесса изготовления и усложнения конструкции микросхем. В таких случаях необходимо применять навесные элементы.

Характеристики воздействующего сигнала необходимо учитывать при выборе материала подложки, материалов для изготовления пассивных элементов, выборе конструкции и взаимного расположения элементов. Так, например, длительность фронта импульса позволяет судить о ширине спектра импульсного сигнала. Материал диэлектрической пленки ТПК должен обеспечивать малые потери на верхних частотах спектра. При выполне-



При этом условия возможно прохождение сигнала по цепям микросхемы без искажения фронтов. Следует помнить, что частотные характеристики  $R$  и  $C$  элементов зависят от их конструкции.

При повышенных требованиях к помехоустойчивости необходимо максимальное разнесение контактных площадок и проводников входных и выходных цепей, обеспечение низкого сопротивления шин питания и заземляющих проводников, применение металлических корпусов.

В процессе анализа технического задания выясняются возможные конструктивно-технологические мероприятия, направленные на обеспечение требуемой надежности и снижение стоимости микросхемы. Для обеспечения надежности по постепенным отказам необходимо оценить допуски на отдельные технологические операции изготовления пассивных элементов. Вероятность возникновения внезапных отказов уменьшается при рациональном выборе материалов (с учетом условий эксплуатации) и применении конструктивных мер повышения надежности.

Выводы, сделанные в процессе анализа технического задания, позволяют получить о конструктивно-технологических особенностях разрабатываемой микросхемы предварительную информацию, которая совместно с дополнительными сведениями (экономические показатели, требования к габаритам и весу, надежности и т.д.) используется для разработки эскизного варианта микросхемы.

### 3.2. Эскизное проектирование микросхемы

На этапе эскизного проектирования необходимо проделать следующее:

- 1) рассчитать оптимальное число элементов на подложке;
- 2) рассчитать (ориентировочно) площадь подложки;
- 3) выбрать подходящий типоразмер корпуса из числа нормализованных.

### 3.2.1. Расчет оптимального числа элементов на подложке

К числу основных задач, возникающих перед конструкторами микроэлектронной аппаратуры, относится выбор рациональной сложности отдельных микросхем. Эта сложность определяется рядом факторов: принципом действия и схемой изделия, способами компоновки узлов, ремонтноспособностью, технологией производства и т.д. Основным фактором, определяющим сложность узла, является функциональный принцип деления изделия.

Однако принципиально новая технология изготовления тонкопленочных схем выдвигает в число основных факторов, определяющих целесообразную сложность узлов, и другие, которые в ряде случаев могут оказаться решающими. Это вынуждается такими особенностями производства, как комплексное изготовление большинства элементов схем, невозможность замены пленочных элементов, ограниченная возможность подстройки и другие. При недостаточно совершенной технологии на первое место выступают выход годных узлов и изделий, экономические затраты на их производство.

Одним из основных преимуществ тонкопленочной технологии является возможность одновременного получения большого числа элементов. На основании этого преимущества целесообразно применять подложки с наибольшим числом тонкопленочных элементов на них, так как чем больше элементов, тем меньше технологических операций приходится на один элемент, тем ниже должна быть относительная стоимость микросхем.

Однако, с другой стороны, с увеличением числа элементов на подложке повышается вероятность брака всей подложки из-за некачественного изготовления того или иного элемента. Это обстоятельство приводит к большому проценту отбраковки подложек с негодными элементами, что, в свою очередь, снижает выгpыш в производительности подложек в большем числе элементов.

Очевидно, что для каждого конкретного случая в зависи-

ности от вероятности брака различных элементов существует их оптимальное число на подложке, при котором в процессе изготовления схем будет изготовлено наименьшее число плат.

### А. Расчет оптимальной сложности схем с однотипными элементами

Вероятность брака при изготовлении однотипных элементов (матриц сопротивлений, конденсаторов, магнитных элементов и др.) может быть принята одинаковой для всех элементов. Следовательно, стоимость продукции без учета затрат на оборудование, оснастку и отработку процесса изготовления определяется общим числом изготовленных плат как годных, так и бракованных.

Согласно теории вероятностей, вероятность изготовления годной подложки с  $N$  элементами будет равна

$$P_N = p^N, \quad (3.1)$$

где  $p$  - вероятность изготовления годного элемента,  
 $p = 0 - 1$ .

Если обозначить через  $m$  количество элементов в схеме, то для определения общего количества плат  $n$  с учетом брака, которые необходимо изготовить, справедливо равенство

$$n = \frac{m}{N p^N} \quad (3.2)$$

Из формулы (3.2) видно, что число изготовленных подложек будет минимальным, если произведение  $N p^N$  примет наибольшее значение. Максимальное значение функции  $y = N p^N$  можно найти, взяв первую производную от этой функции

$$y' = N p^N \ln p + p^N.$$

Приравняв ее к нулю, после преобразования получим

$$N_{opt} = \frac{1}{\ln p}, \quad (3.3)$$

где  $N_{opt}$  - оптимальное (соответствующее минимуму затрат на изготовление) число элементов на подложке. Вероятность изготовления  $P$  одного годного элемента определяется из статистических данных

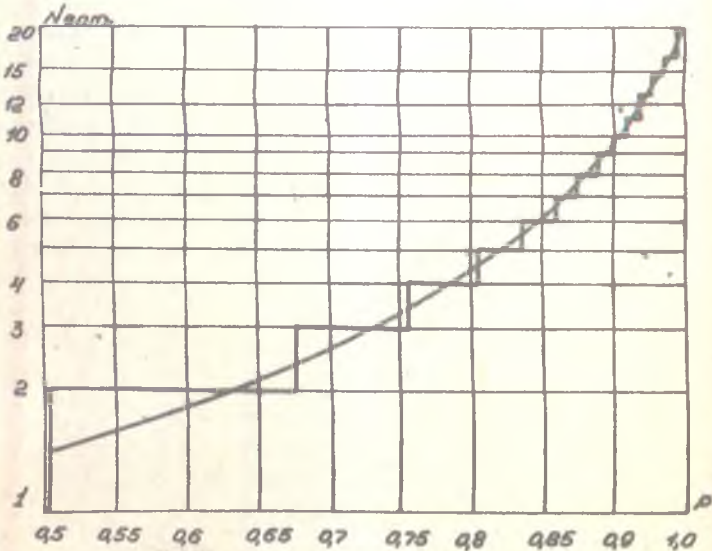


Рис.3.1. Зависимость оптимального числа элементов на подложке от вероятности изготовления  $P$  годного элемента

На основании формулы (3.3) на рис. 3.1 приведена зависимость оптимального числа элементов на подложке от вероятности изготовления годного элемента. Так как  $N$  может принимать только целые значения, зависимость представлена в виде ступенчатой кривой.

Для выявления приемлемых отклонений числа однотипных элементов на подложке от оптимального был проведен анализ, который показал, что отклонение величины  $N$  от  $N_{opt}$  на

40-50% приводит к необходимости увеличения числа изготавливаемых подложек примерно на 10%.

Б. Расчет оптимальной сложности схем с элементами, имеющими различную вероятность брака

Рассмотренный случай имеет ограниченное применение, так как вероятность брака у различных элементов колеблется в довольно широких пределах. Пусть  $N_1, N_2, \dots, N_k$  - число элементов на подложке с примерно одинаковой вероятностью брака ( $N_1 + N_2 + \dots + N_k = N_{\Sigma}$ ), а  $P_1, P_2, \dots, P_k$  - средние вероятности изготовления годного элемента в группах. Будем считать, что вероятность брака одного элемента не отражается на вероятности брака другого даже при их одновременном изготовлении.

По аналогии с приведенными выше рассуждениями уравнение (3.2) с учетом теоремы умножения вероятностей можно представить в виде

$$n = \frac{m}{N_{\Sigma} P_1^{N_1} P_2^{N_2} \dots P_k^{N_k}} \quad (3.4)$$

Из-за наличия многих независимых переменных ( $N_1, N_2, \dots, N_k$ ) определение оптимального числа элементов на подложке затруднено. В этом случае целесообразно с помощью формулы (3.4) сравнить несколько наиболее интересных вариантов компоновки микросхемы, а затем, выбрав наилучший, произвести определение  $N_{opt}$  по следующей методике.

1. Подсчитать вероятность изготовления годной подложки  $P_0$  :

$$P_0 = P_1^{N_1} P_2^{N_2} \dots P_k^{N_k}$$

2. На основании известного общего числа элементов на подложке  $N_{\Sigma}$  и полученного значения  $P_0$  по графику рис. 3.2 определить среднюю вероятность изготовления годного элемента  $P_{cp}$ .

3. Используя график рис.3.1 по значению  $P_{cp}$  определить  $N_{opt}$ .

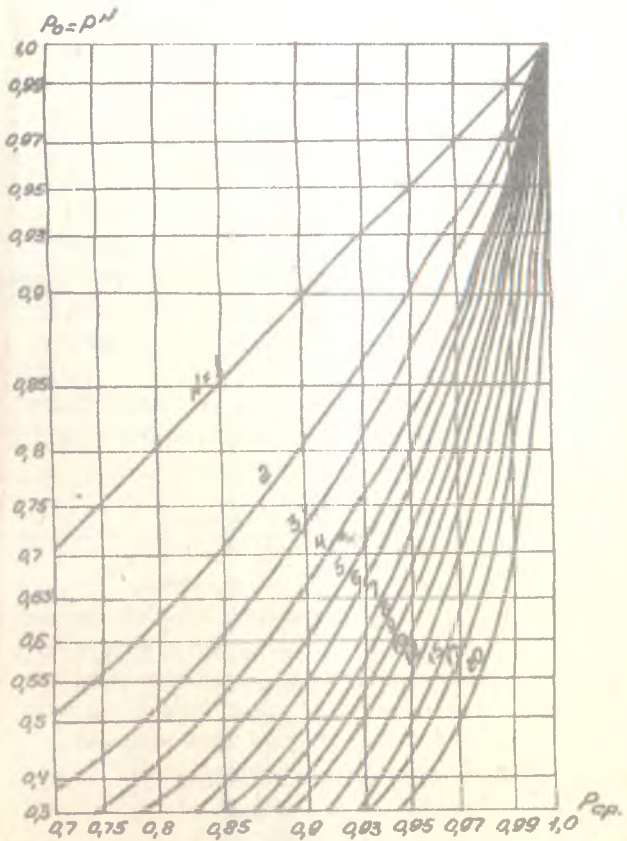


Рис. 3.2. Зависимость функции  $P^N = P_0$  от значений  $P$  и  $N$

Если оптимальное число элементов отличается от выбранного на величину, большую 40-50%, рекомендуется изменить выбранное число элементов ( $N_1, N_2, \dots, N_k$ ). При этом следует иметь в виду, что особенно сильно на  $N_{opt}$  влияют

и уменьшение числа элементов с большей вероятностью брака.

### 3.2.2. Ориентировочный расчет площади подложки

Площадь подложки гибридной пленочной микросхемы, необходимую для размещения всех элементов, ориентировочно можно вычислить по формуле

$$S = K \left( \sum_{i=1}^n S_{Ri} + \sum_{i=1}^m S_{Ci} + \sum_{i=1}^k S_{Li} + \sum_{i=1}^l S_{Ai} + N S_K \right), \quad (3.5)$$

- где  $K$  - коэффициент использования площади подложки (для ориентировочных расчетов его значение берется равным 2-3);
- $S_{Ri}$  - площадь  $i$ -го резистивного элемента;
- $S_{Ci}$  - площадь  $i$ -го емкостного элемента;
- $S_{Li}$  - площадь  $i$ -го индуктивного элемента;
- $S_{Ai}$  - площадь, занимаемая  $i$ -м навесным активным или пассивным элементом;
- $N$  - число контактных площадок;
- $S_K$  - площадь одной контактной площадки;
- $n, m, k, l$  - число пленочных резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности и активных элементов соответственно.

Для определения числа контактных площадок целесообразно на основе заданной принципиальной электрической схемы (рис. 3.3, а) составить коммутационную схему (рис. 3.3, б). Она представляет собой преобразованную принципиальную электрическую схему, на которой не изображают навесные элементы, а выводы их показывают контактными площадками.

Для определения по формуле (3.5) ориентировочной площади подложки необходимо, используя соотношения, приведенные в разделе 2, вычислить габаритные размеры всех пленочных элементов.

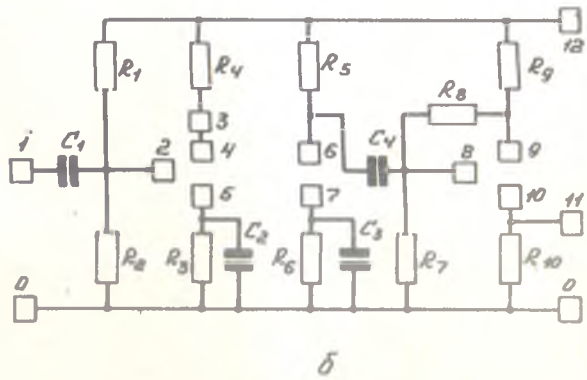
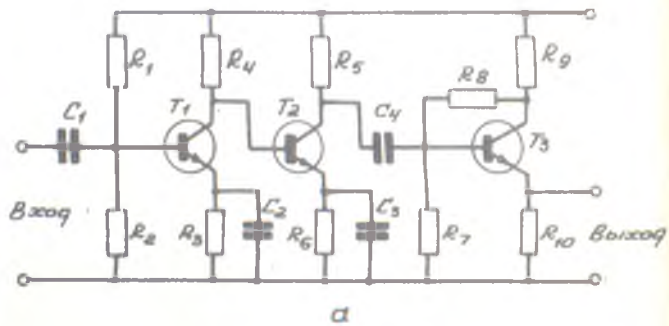


Рис.3.3. Преобразование принципиальной электрической схемы усилителя (а) в коммутационную схему (б)

По вычисленному значению  $S$  выбирает типоразмер подложки из ряда рекомендуемых (табл.3.1).



Таблица 3.1

Рекомендуемые размеры подложек, мм

Ширина	30	24	20	16			12		10	
Длина	48	30	24	60	30	20	48	30	16	12

Материал подложки выбирает, исходя из электрических параметров разрабатываемой микросхемы. Характеристики материалов, наиболее часто применяемых для изготовления подложек, приведены в табл.3.2.

### 3.2.3. Выбор корпуса для микросхемы

По выражению (3.5) и коммутационной схеме (рис. 3.3,б) можно определить конструктивные признаки корпуса для микросхемы. По найденным признакам из числа нормализованных подбирается подходящий корпус (прил. 2).

При выборе корпуса кроме величины следует учитывать тип микросхемы (аналоговая, дискретная), число контактных площадок для внешних соединений, рабочую частоту, число каскадов, рассеиваемую микросхемой мощность.

Многокаскадные аналоговые функциональные узлы более устойчиво работают при последовательном расположении каскадов на подложке. В сочетании с малым числом входных и выходных контактных площадок такая особенность делает предпочтительным применение подложек с соотношением сторон от 1:1,5 до 1:3 в зависимости от числа каскадов и расположение контактных площадок по узким сторонам подложки. Выбор подложки с нормализованными размерами сторон предопределяет размеры соответствующего такой подложке корпуса.

Микросхемы дискретного действия часто содержат большое количество навесных элементов и имеют много выводов. Выбор размеров подложки для таких микросхем должен производиться с учетом других соображений: при большом числе (15-30) контактных площадок нередко удается разместить их только на широких сторонах подложки. Поэтому длина широкой стороны подложки выбирается с учетом числа контактных пло-

Таблица 3.4

Механические и электрофизические характеристики подложек

	Керамика						
	Ситалл СТ80-1 1100, 0,27, 0,027, 1100, 0,27, 0,027	Стекло СЧ4-1 1100, 0,27, 0,027, 1100, 0,27, 0,027	Стекло СЧ8-3 1100, 0,27, 0,027, 1100, 0,27, 0,027	22ХС 100, 0,27, 0,027, 100, 0,27, 0,027	Полукор 100, 0,27, 0,027, 100, 0,27, 0,027	99% окисл борнит 100, 0,27, 0,027, 100, 0,27, 0,027	глазуро- ваный
Характеристика	13-14	14	14	12	14	< 11	14
Класс испытаний по ГОСТ 2789-59	46-50	40-43	46-50	55-80	70-75	60-62	73-78
Температурный коэффициент линейного расширения, $\alpha \cdot 10^{-7}$ , /градус, в интервале температуру 20-300°C	$\geq 34$	—	2-32	$\geq 20$	60-90	500	25-35
Теплопроводность, $\lambda \cdot 10^3$ дин/см.с.град	8,5	7,5	6,8	$\leq 10,3$	10,5	6,3	13-15
Диэлектрическая проницаемость при $f=10^6$ Гц и $t_0+20^\circ$	$20 \cdot 10^{-4}$	$\leq 20 \cdot 10^{-4}$	$\leq 15 \cdot 10^{-4}$	$\leq 6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	—	$18 \cdot 10^{-4}$
Плотность при $f=10^6$ Гц и $t_0+20^\circ$ С	$\geq 40$	$\geq 40$	$\geq 40$	$\geq 50$	—	—	$\geq 50$
Электрофизическая прочность, кВ/мм							

падок и шага их расположения.

Для уточнения конструктивных признаков корпуса необходимо учитывать также ряд специфических требований технического задания, важнейшими из которых являются условия эксплуатации, надежность, габариты, вес, стоимость и другие.

При выборе типа корпуса необходимо также учитывать требования к размещению разрабатываемой микросхемы на основании (печатной плате). Это необходимо для упрощения коммутационной схемы печатных проводников.

### 3.3. Разработка топологии гибридной пленочной микросхемы

Одним из основных этапов конструирования гибридных пленочных микросхем является разработка топологии. На этом этапе решается задача компоновки пленочных элементов микросхемы с учетом требований технического задания, особенностей электрической принципиальной схемы и технологических возможностей производства, выводов, сделанных на этапе эскизного проектирования. В процессе разработки топологии определяется взаимное расположение и уточняется форма пленочных элементов микросхемы, рассчитываются и уточняются их геометрические размеры, выбираются места расположения контактных площадок.

Исходными данными для разработки топологии являются: электрические и конструктивные данные и требования; основные технологические данные и ограничения.

Общие и специальные электрические и конструктивные данные и требования разрабатываются на этапе предварительного проектирования, включающего в себя разработку электрической схемы и общей компоновки проектируемой микросхемы. Основные технологические данные и ограничения формулируются в соответствии с достигнутым уровнем технологии микросхем и могут изменяться и уточняться в процессе совершенствования технологических процессов.

### 3.3.1. Электрические и конструктивные данные, необходимые для разработки топологии

Общие электрические и конструктивные требования, обязательные для всех разработчиков микросхем, определяются действующей нормативно-технической документацией и направлены на унификацию электрических и конструктивных параметров микросхем. При учебном проектировании необходимо учитывать следующие общие требования:

микросхемы должны разрабатываться в виде функциональных и конструктивно законченных изделий, надежно защищенных от воздействий внешних условий;

микросхемы одного типа должны быть взаимозаменяемыми при всех эксплуатационных условиях и режимах работы, оговоренных в техническом задании;

микросхемы общего применения должны выпускаться только в унифицированных корпусах;

номинальные значения питающих напряжений должны выбираться из следующего ряда: 1,2; 3,0; 4,0; 5,0; 6,3; 10,0; 12,6;  $\infty$  и 27В;

условия и режимы применения навесных элементов должны находиться в пределах требований соответствующих стандартов, нормалей и ТУ. Для повышения надежности рекомендуется использовать все элементы в облегченных режимах;

вероятность безотказной работы микросхем в течение 500 часов должна быть не менее 0,95;

микросхемы должны разрабатываться на подложках, размеры которых соответствуют ряду, приведенному в табл.3.1; конструкция микросхем должна исключать возможность появления локальных перегревов, превышающих допустимую температуру для элементов, расположенных в зоне

нагрева;

каждая микросхема должна иметь маркировку, нанесенную несмываемой и нестираемой краской, с обозначением товарного знака предприятия-изготовителя, номера основного конструкторского документа на микросхему, месяца и года изготовления. На микросхеме должно быть предусмотрено место для нанесения клейма ОТК и указано место расположения первого вывода (ключ).

Специальные электрические и конструктивные требования к микросхеме приводятся в техническом задании на проектирование. К числу специальных требований относятся:

основные электрические параметры микросхем;  
номинальные значения основных технических параметров пленочных и навесных элементов, их стабильность и допуски;

допустимый уровень паразитных связей между отдельными цепями микросхем;

требования по устойчивости к механическим и климатическим воздействиям;

рекомендуемый тип корпуса;

рекомендуемая цоколевка микросхем.

### 3.3.2. Основные технологические данные и ограничения, учитываемые при разработке топологии

При разработке топологии гибридной пленочной схемы необходимо ориентироваться на один из нижеследующих вариантов последовательности нанесения тонкопленочных слоев.

Для микросхем, не содержащих конденсаторов:

первый слой- резистивный;

второй слой- выводы резисторов, контактные площадки, часть проводников;

третий слой-диэлектрический слой в местах пересечения проводников;

четвертый слой-оставшаяся часть проводников;

пятый слой— защитный.

Для микросхемы с конденсаторами:

первый слой—резистивный;

второй слой—выводы резисторов, контактные площадки и часть проводников;

третий слой—диэлектрик в местах пересечения проводников;

четвертый слой—часть проводников;

пятый слой— нижние обкладки конденсаторов и при необходимости часть проводников;

шестой слой—диэлектрический слой конденсаторов;

седьмой слой—верхние обкладки конденсаторов и при необходимости часть проводников;

восьмой слой— защитный.

В зависимости от сложности схемы и особенностей технологического процесса количество напыляемых слоев и последовательность их нанесения могут меняться. Необходимо стремиться к тому, чтобы число наносимых слоев было минимальным.

Предложенная последовательность нанесения слоев микросхемы характерна для техпроцесса получения конфигурации тонких пленок путем термического напыления материалов на подложку через ватящийся трафарет (маску). Последовательность нанесения слоев и технология формирования рисунка микроэлементов при использовании метода фотолитографии, который находит все большее применение при изготовлении компактных и точных микросхем, подробно описаны в литературе [8,9].

Разрабатывая эскизный чертёж топологии микросхемы, следует учитывать следующие требования и технологические ограничения:

контактные площадки, коммутационные проводники, диэлектрические слои рекомендуется располагать от краев подложки на расстоянии не менее 0,5мм;

резисторы, обкладки ТПК, пленочные катушки индуктивности следует располагать от краев подложки на рас-

стоянии не менее 0,7 - 1,0 мм;

для сокетения элементов, лежащих в разных слоях, должно быть предусмотрено перекрытие не менее чем на 200 мкм;

расстояние между различными пленочными элементами, лежащими в одном слое, должно быть не менее 200 мкм, лежащими в разных слоях - не менее 300 мкм;

минимально допустимые размеры контактной площадки для пайки -  $500 \times 500 \text{ мкм}^2$ , для сварки -  $500 \times 300 \text{ мкм}^2$ , для контроля параметров элементов -  $300 \times 300 \text{ мкм}^2$

у однослойных ТНЧ нижняя обкладка должна выступать за край верхней не менее чем на 200 мкм, а диэлектрик - не менее чем на 200 мкм за край нижней обкладки;

граница диэлектрика должна отстоять от края контактной площадки на расстоянии не менее 500 мкм;

минимально допустимая ширина пленочного резистора (при использовании затеняющей маски) равна 200 мкм;

целесообразно ограничить минимальное сопротивление пленочных резисторов величиной 50 Ом, при этом их длина должна быть не менее 0,5 мм;

минимально допустимые расстояния между контактными площадками для сварки и пайки - 500 мкм;

не допускается припайке или приварке двух и более навесных проводников или выводов навесных элементов к одной контактной площадке;

во избежание возникновения паразитных связей не рекомендуется применять один пленочный коммутационный проводник для подвода питания к нескольким функциональным узлам, расположенным на одной подложке;

в большинстве случаев недопустимо использовать одну нижнюю обкладку для нескольких пленочных конденсаторов, входящих в схему одного узла;

в нижнем левом углу подложки необходимо разместить ключ (треугольник), необходимый для ее ориентации при сборке.

Выбор места установки навесного элемента и расположения контактных площадок для его подсоединения определяется цоколевкой навесного элемента, длиной и жесткостью его выводов. Допускается установка навесных элементов на пленочные проводники и маломощные резисторы, предварительно защищенные слоем диэлектрика. Минимальное расстояние от края контактной площадки до навесного элемента, вывод которого подключается к этой площадке, - 500 мкм, максимальное - 3000 мкм.

Указанные ограничения сформулированы для современного уровня технологии изготовления гибридных пленочных микросхем и могут уточняться и видоизменяться по мере ее совершенствования. Перечисленные рекомендации не являются исчерпывающими, однако их выполнение позволяет при разработке микросхемы предупредить возникновение грубых ошибок.

### 3.3.3. Последовательность разработки топологии

Разработку топологии тонкопленочной микросхемы рекомендуется выполнять в несколько этапов.

На первом этапе производится преобразование принципиальной электрической схемы, из которой исключаются все навесные элементы; выводы последних заменяются контактными площадками. Схема перечерчивается таким образом, чтобы уменьшить число пересечений проводников и сократить их длину. Для подсоединения внешних выводов и выводов навесных элементов производится предварительное размещение контактных площадок с учетом конструктивных и электрических требований, оговоренных в техническом задании. Как отмечалось выше, принципиальная схема, переработанная указанным образом, носит название коммутационной схемы.

После проработки нескольких вариантов коммутационной схемы и получения оптимального (с точки зрения минимальной длины соединительных проводников и минимального числа пересечений между ними) варианта производится уточненный расчет



геометрических размеров тонкопленочных элементов.

Следующим этапом разработки топологии является размещение пленочных элементов и выбор их форм. Предварительные размеры подложки и места расположения контактных площадок определяются на этапе эскизного проектирования и к настоящему этапу уже известны. Однако окончательный размер подложки устанавливается после проработки вариантов размещения всех элементов и выбора оптимального из них.

При размещении элементов необходимо стремиться к тому, чтобы их форма была наиболее простой, а занимаемая площадь - минимальной. Рекомендуется проектировать топологию микросхем в прямоугольной системе координат. Придание элементам форм, содержащих отрезки прямых, не параллельных осям координат, допустимо лишь в тех случаях, когда это приводит к значительному упрощению форм элементов.

Каждый пленочный элемент ( $R, C, L$ ) должен быть спроектирован таким образом, чтобы имелась возможность проконтролировать его параметры после напыления.

Вычерчивание пленочных элементов в процессе их размещения рекомендуется производить на миллиметровой бумаге в масштабе 10:1 или 20:1. Для удобства просмотра конфигураций отдельных слоев целесообразно производить их окраску в различные цвета.

После составления эскиза топологии рекомендуется произвести расчет паразитных емкостных связей между пленочными элементами (если это требование записано в техническом задании).

На основе откорректированного топологического чертежа микросхем (см. рис. П.3) изготавливаются чертежи слоев, где приводятся координаты всех точек пересечения линий контуров элементов, отсчитываемые от координатных осей  $OX$  и  $OY$ , образующих базовый угол микросхем.

#### 3.4. Сборка и защита гибридных интегральных пленочных микросхем

Гибридная интегральная пленочная схема состоит из пленочной схемы и навесных пассивных и активных элементов. Навес-

ные элементы монтируют непосредственно на подложке с напыленной схемой, либо устанавливают на основании корпуса, в котором размещается интегральная пленочная микросхема (ИПС), либо соосируют на отдельной плате.

В качестве навесных активных элементов в гибридных пленочных микросхемах применяются миниатюрные (корпусные) и бескорпусные транзисторы, диоды, транзисторные и диодные матрицы. Основными требованиями, предъявляемыми к активным элементам гибридных ИПС, являются требования малых габаритов и веса. Этим требованиям отвечают бескорпусные активные элементы, в которых кристаллы полупроводника защищены методом пассивации поверхности или с помощью лаков, эмалей, смол, компаундов и т.д.

Электрические и конструктивные характеристики некоторых типов транзисторов приводятся в прил. 1 а, диодов и диодных матриц - в прил. 1 с. Габаритные чертежи некоторых элементов гибридных схем приведены в прил. 1 в.

Навесные элементы устанавливаются на промежуточную плату или на основание корпуса в том случае, когда диаметр выводов этих элементов больше 100 мкм. Механическое закрепление навесных элементов осуществляют путем приклеивания их к подложке или основанию корпуса с помощью клеев холодного отверждения, изготовленных на основе эпоксидной смолы ЭД-5, ГОСТ 10587-63.

Присоединение выводов навесных элементов к контактным площадкам или непосредственно к внешним выводам, а также контактных площадок к внешним выводам производится пайкой или сваркой. Соединение контактных площадок с выводами корпуса осуществляется с помощью проволоочных перемычек теми же методами.

Сварку микросхем производят на установках типа УКМ-1, контакт-ЗА, пайку - на установках ПИН-1 и др.

От воздействий внешней среды гибридные пленочные микросхемы защищают, помещая их в герметичные металлокерамические, металло-полимерные или пластмассовые корпуса. Бескорпусная защита (лаками, компаундами) применя-

ется в качестве предварительной или при кратковременном пребывании ГИС (до двух суток) в условиях повышенной влажности.

В качестве защитного покрытия применяются лаки Ф 976-1 и УР-231. Схемы, защищенные лаком УР-231, могут работать в диапазоне температур от  $-60$  до  $+90^{\circ}\text{C}$ . Метод сушки лака может быть конвекционным (6 часов при  $80-90^{\circ}\text{C}$ ) или терморационным (40 минут при  $80^{\circ}\text{C}$ ). Лак УР-231, ВТУ ГИПИ-4 Ф 366-62 обладает высокой влагостойкостью и хорошими электроизоляционными свойствами.

Корпусная защита рекомендуется при эксплуатации ГИС в условиях повышенной влажности (98% при  $+40^{\circ}\text{C}$ ) в течение 10 и более суток. Пластмассовые и металлополимерные корпуса просты по конструкции, имеют низкую стоимость, но не обеспечивают надежную защиту микросхем при работе в сложных климатических условиях. Более высокую герметичность и надежность при работе в трудных условиях имеют металло-стеклянные и металло-керамические корпуса.

Герметизация корпусов осуществляется электронно-лучевой сваркой крышки с основанием корпуса по периметру, холодной сваркой, пайкой или склеиванием.

Дополнительные сведения о защите микросхем можно найти в литературе [1,9].

### 3.5. Оформление технической документации на гибридные пленочные интегральные микросхемы

В комплект конструкторской документации на пленочные гибридные микросхемы входят:

- принципиальная электрическая схема;
- технические условия;
- сборочный чертеж микросхем;
- топологический чертеж микросхем (платн);
- чертежи слоев микросхем.

На принципиальной электрической схеме изображаются пленочные и навесные элементы микросхемы. Каждому элементу присваивается буквенно-цифровое позиционное обозначение ( $R_{1, \dots, C_{1, \dots}, T_{1, \dots}, D_{1, \dots}$ ). На схеме проставляются также обозначения контактов в соответствии с нумерацией контактных площадок топологи-

ческого чертежа микросхем. Последовательность присвоения порядковых номеров позиционным обозначениям должна соответствовать последовательности расположения условных графических обозначений элементов на схеме, считая сверху вниз в направлении слева направо.

Все элементы, которым на схеме присвоены позиционные обозначения, должны быть внесены в перечень элементов, форма которого установлена ГОСТ ЕСКД (рис. 3.4).

При записи в перечень плоских элементов графу "Обозначение" следует прочеркивать. В графу "Примечание" следует вписывать обозначение топологического чертежа платы, в которую входит данный элемент. Запись в перечень навесных элементов производится в соответствии с ГОСТ 2.701-68. Перечень элементов располагается на чертеже над основной надписью.

Поз. обозн.	Обозначение	Наименование	кол.	Примечание
R <sub>2</sub>	—	Резистор 5кОм ± 10%, 0,1мВт	1	Входит в А57.100.000
C <sub>5</sub>	—	Конденсатор 100нФ ± 20%, 10В	1	Входит в А57.100.000
T <sub>1...T<sub>5</sub></sub>		Транзистор 2Т307А		
		СБ0.336.026ТУ	5	
20	50	70	10	
185				

Рис. 3.4 Перечень элементов

Он может быть выполнен также на отдельном листе, но в комплекте конструкторских документов должен находиться непосредственно за принципиальной схемой.

Топологический чертеж микросхемы выполняют в увеличенном масштабе (10:1; 20:1). Подложку со всеми нанесенными на нее эле-

ментами изображают с указанием позиционных обозначений в соответствии с принципиальной электрической схемой. Топологическому чертежу присваивается наименование "плата". Как правило, топологический чертеж выполняют на нескольких листах. На первом листе, как указано выше, должна быть изображена подложка со всеми нанесенными элементами, на последующих листах помещается изображение каждого слоя.

На каждый слой на первом листе топологического чертежа наносят штриховку. Вид штриховки расшифровывается в таблице на том же листе (см. рис. П.3,а). При штриховке нижней обкладки конденсатора допускается штриховать только те участки, которые выступают за край верхней. Диэлектрик можно не заштриховывать, его контур обозначается штриховой или сплошной линией.

Контактные площадки на первом листе топологического чертежа должны быть пронумерованы. Нумерацию начинают с левого нижнего угла платы и ведут в направлении против часовой стрелки. Вначале нумеруют внешние контактные площадки, служащие для подсоединения к выводам корпуса, затем — внутренние (очередными порядковыми номерами). Нумерацию внутренних контактных площадок проводят с нижнего левого угла снизу вверх и слева направо.

Если микросхема помещается в корпус, выводы которого пронумерованы, нумерация внешних контактных площадок должна соответствовать нумерации выводов корпуса. Соответствие должно сохраняться и в том случае, когда используются не все выводы корпуса.

Технические требования помещают на первом листе топологического чертежа. К ним относятся:

специальные требования к изготовлению и свойствам подложки ( $\epsilon$ , чистота поверхности);

данные по изготовлению отдельных слоев (ссылка на соответствующие таблицы);

требования к точности изготовления элементов;

требования к внешнему виду платы;

данные и указания по проверке параметров элементов (ссылка на таблицы)

указания о соответствии нумерации контактных площадок нумерации выводов принципиальной схемы, нумерации выводов корпуса.

Данные по напылению отдельных слоев и их характеристикам приводятся на первом листе топологического чертежа в той же таблице, где приведены условные обозначения слоев (рис. п.3,а).

Данные, необходимые для проверки электрических параметров микросхем после изготовления, следует помещать в виде таблицы (рис. 3.5).

№	№	Пол. обозна- чение	Точки измерения	Проверяемый номинал и допуск
	изме- рени			
30	1	R <sub>2</sub>	1 - 4	10 кОм ± 15%
	10	30	30	
110				

Рис. 3.5. Таблица электрических параметров пленочных элементов

В комплект конструкторских чертежей на гибридную тонкопленочную микросхему входят топологические чертежи отдельных слоев (так называемые послойные чертежи). На каждый слой дается отдельный чертеж. Размеры пленочных слоев задаются в прямоугольной системе координат и сводятся в таблицу, помещаемую на поле чертежа соответствующего слоя. Вершины фигур, очерчивающих пленочные слои, нумеруются. Рекомендуется производить сплошную нумерацию вершин в пределах одного листа, причем нумерацию вершин каждого элемента следует начинать от нижней левой вершины и продолжать по часовой стрелке. Переход от элемента к элементу при нумерации осуществляется от нижнего

левого угла по направлению снизу вверх и слева направо.

На послойных чертежах могут помещаться специфические требования, относящиеся к конкретному слою.

Сборочный чертеж микросхем оформляют по общим правилам, установленным ГОСТ 2.109-68. Сборочный чертеж должен содержать достаточное число видов, проекций, сечений и разрезов для показа взаимного расположения всех составных частей микросхем и способов их соединения. В технических требованиях, приводимых на сборочном чертеже, должны содержаться сведения о сборке, защите, окраске, маркировке изделия и ссылка на документы, регламентирующие электрические параметры изделия и способ их измерения.

### 3.6. Классификация интегральных микросхем

По технологическому исполнению интегральные микросхемы подразделяются на 3 вида, которым присваиваются следующие обозначения:

Вид интегральных микросхем:	обозначение
полупроводниковые и совмещенные	1,5,7
гибридные	2,4,6,8
пленочные	3

По характеру выполнения электрических функций интегральные микросхемы подразделяются на классы, которые в свою очередь разделяются по групповым признакам. Классы, группы, обозначения классов и групп, а также буквенные индексы интегральных микросхем приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3.

К л а с с		Г р у п п а		Буквенный индекс
Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение	
1	2	3	4	5
Усилители	1	Синусоидальные	С	УС
		постоянного тока	Т	УТ
		идеоусилители	В	УВ
		импульсные	И	УИ

1	2	3	4	5
Генераторы	Г	Повторители	Э	УЭ
		Прочие	П	УП
		Синусоидальных колебаний	С	ГС
Преобразователи	П	Сигналов специальной формы	Ф	ГФ
		Частоты	С	ПС
		Фазы	Ф	ПФ
		Формы	М	ПМ
		Напряжения	Н	ПН
		Кодирующие	К	ПК
		Декодирующие	Д	ПД
Модуляторы	М	Уровня (согласователи)	У	ПУ
		Прочие	П	ПП
		Амплитудные	А	МА
		Частотные	С	МС
		Фазовые	Ф	МФ
Детекторы	Д	Импульсные	И	МИ
		Прочие	П	МП
		Амплитудные	А	ДА
		Частотные	С	ДС
		Фазовые	Ф	ДФ
Триггеры	Т	Импульсные	И	ДИ
		Прочие	П	ДП
		Со счетным запуском	С	ТС
		С отдельным запуском	Р	ТР
		С комбинированным запуском	К	ТК
Электронные ключи	К	Шмитта	Ш	ТШ
		Динамические	Д	ТД
		Транзисторные	Т	КТ
		Диодные	Д	КД
		Оптоэлектронные	Э	КЭ



1	2	3	4	5		
Электронные ключи Фильтры	К Ф	Прочие	П	КП		
		Верхних частот	В	ФВ		
		Нижних частот	Н	ФН		
		Полосовые	П	ФП		
		Заградительные	Г	ФГ		
Линии задержки	Ш	Сглаживающие	С	ФС		
		Схемные	С	ШС		
Логические элементы	Л	Прочие	П	ШП		
		Элементы "И"	И	ЛИ		
		Элементы "ИЛИ"	Л	ЛЛ		
		Элементы "НЕ"	Н	ЛН		
		Элементы "И" НЕ/ИЛМ-НЕ"	Ь	ЛБ		
		Элементы "И-ИЛИ"	С	ЛС		
		Элементы "И-ИЛИ-НЕ"	Р	ЛР		
		Расширители	Э	ЛЭ		
		Элементы "И-ИЛИ-НЕ/И - ИЛИ"	К	ЛК		
		Элементы "ИЛИ-НЕ/ИЛИ"	М	ЛМ		
		Прочие	П	ЛП		
		Элементы запоминающих устройств	Я	На магнитных пленках	Л	ЯЛ
				Матрицы	м	ЯП
Элементы арифметических и дискретных устройств	И	Регистры	Р	ИР		
		Сумматоры	С	ИС		
		Полусумматоры	Л	ИЛ		
		Счетчики	Е	ИЕ		
		Шифраторы	Ш	ИШ		
		Дешифраторы	Д	ИД		
		Комбинированные	К	ИК		
		Прочие	П	ИП		
Набор элементов	Н	Резисторов	С	НС		
		Конденсаторов	Е	НЕ		
		Диодов	Д	НД		

1	2	3	4	5
Наборы элементов	Н	Транзисторов	Т	НТ
		Комбинированные	К	НК
Схемы селекции и сравнения	С	Амплитудные	А	СА
		Временные	В	СВ
		Частотные	С	СС
		Фазовые	Ф	СФ
Многофункциональные схемы	И	Аналоговые	А	ИА
		Импульсные	И	ИИ
		Логические	Л	ИЛ
		Аналого-импульсные	Е	ИЕ
		Аналого-логические	В	ИВ
		Импульсно-логические	Г	ИГ
		Аналого-импульсно-логические	К	ИК
		Напряжения	Н	ЕН
Стабилизаторы	Е	Тока	Т	ЕТ

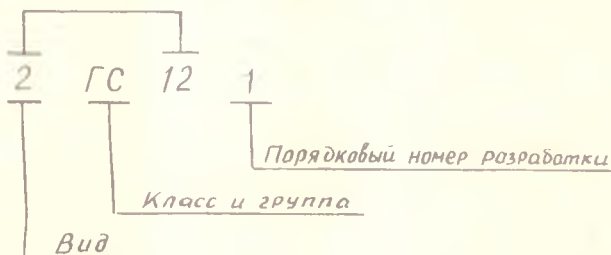
Обозначение интегральной микросхемы состоит из трех элементов:

конструктивно-технологическая серия - три цифры, первая из которых стоит в начале обозначения и указывает на вид микросхемы, а вторая и третья проставляются после буквенного индекса;

функциональный класс и группа класса - буквенный индекс (см. табл. 3.3);

порядковый номер разработки микросхемы по функциональному признаку в данной серии.

Пример: гибридная микросхема серии 212, представляющая собой генератор синусоидальных колебаний с порядковым номером разработки 1 обозначается следующим образом: 2ГС121-У.



Четвертый буквенный элемент в обозначении (У) указывает учебную разработку микросхемы, он отсутствует в обозначениях промышленных микросхем.

Литература

1. Конструирование аперодических пленочных усилителей. Под ред. Коробейникова П.В., м., "Сов.радио", 1972.
2. Берри, Холл П. Гаррос. Тонкопленочная технология. Перевод с английского, М., "Энергия", 1972.
3. Ермолаев Ю.И., Алимова Р.А., Федосеева Н.Я. Основы конструирования и расчета микропленочных пассивных элементов. Казань, 1965.
4. Аренков А.Б. Печатные и пленочные элементы радиоэлектронной аппаратуры. Л., "Энергия", 1971.
5. Дьюкс Д.М. Печатные схемы. Перевод с английского под ред. Ю.М. Овчинникова и И.С.Файнберга. М., ИЛ, 1963.
6. Кейзер, Кастро, Никольс. Схемы с распределенными постоянными на тонких пленках. "Зарубежная радиоэлектроника" 1963, № 4.
7. Колосов А.А., Горбунов Ю.И., Наумов Ю.Е. Полупроводниковые твердые схемы. М., "Сов.радио", 1965.
8. Микроэлектроника. Теория, конструирование и производство. Перевод с английского под ред. Богородицкого Н.И. М., "Сов.радио", 1966.
9. РТМ. Микросхемы. Конструирование и изготовление ГИС.
10. Данилин Б.С. Вакуумное нанесение тонких пленок. "Энергия", 1967.
11. Ермолаев Ю.П., Эльсинг О.Г., Каримова Ф.Г., Анфимов Г.И. Конструирование и расчет контактов в интегральных пленочных схемах. Казань, 1967.
12. Единая система конструкторской документации (ЕСКД)
13. Иванов-Ксипович Н.К. Инженерные основы пленочной микроэлектроники. Л., "Энергия", 1968.
14. Иоссель Ю.Я. Расчет электрической емкости. Л., "Энергия", 1972.
15. Краткий справочник конструктора РЭА. М., "Сов.радио", 1972.
16. Малорацкий Л.Г., Явич Л.Р. Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях. "Сов.радио", 1972.

17. Петров Г.А., Косачева Д.И., Чтение чертежей микросхем, М., "Энергия", 1973.
18. Печатные платы. Изд. И Л., М., 1963.
19. Пленочная микроэлектроника под общей редакцией Холлэнда, М., "Мир", 1968.
20. РТМ. Микросхемы гибридные пленочные. Конструирование и изготовление. НПО.010.010, 1968.
21. Слуцкая В.В. Тонкие пленки в технике сверхвысоких частот. "Советское радио", 1967.
22. Цыбалюк В.С., Крюков Ю.Г., Грибов Э.Б. Миниатюризация приемо-усилительной аппаратуры. "Связь", 1968.
23. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. "Наука", 1964.

## Линейные бескорпусные транзисторы

Тип активного элемента, ГОСТ, ГОСТУ	$f_T$ , МГц	$I_{к макс}$ , В	$I_{к макс}$ , мА	$S_k$ , пФ	$f_{изл}$	$R_k$ , мВг	Конструктивные
							данные
1	2	3	4	5	6	7	8
КТ319 КОС.БЕС.КМТУ	А				> 15		Бескорпусный, кобаритные размеры 1,1 x 1,1 x 0,8 мм
	Б	6,0	15,0	< 11,0	> 25	15,0	
	В				> 40		
КТ307	А				> 20		Бескорпусный, кобаритные размеры 0,7 x 0,7 x 0,8 мм
	Б	250	10,0	< 6,0	> 40	15,0	
	В				> 40		
	Г				> 80		
КТ318	А				30 - 90		Бескорпусный
	Б	400	5,0	< 4,0	50 - 150	15,0	
	В				70 - 280		
КТ331	Г	400	15,0	< 5,0	40 - 120	15,0	Бескорпусный
	Д	500	15,0	< 5,0	40 - 120 80 - 220	15,0	Бескорпусный

1	2	3	4	5	6	7	8
КТ 324	А	100	20,0	< 2,5	20 - 60	150	Бескорпусной, лабиринтные размеры 0,7 x 0,7 x 0,8 мм
	Б				40 - 120		
	В				80 - 250		
КТ 336	Г	10,0	20,0	< 5,0	40 - 120	50,0	Бескорпусной
	Д				> 80		
	Е				60 - 250		
ГТ 109В ЖКЗ 3365, 1387У	≥ 1,0	6,0	20,0	≤ 30,0	20 - 60	30,0	Металлический корпус D <sub>макс</sub> = 37 мм; H = 26 мм
					60 - 130		
ГТ 310 ЖКЗ 3366, 1387У	Б	10,0	10,0	≤ 4,0 ≤ 5,0	60 - 180	20,0	Металлический корпус D <sub>макс</sub> = 37 мм; H = 26 мм
					20 - 70		

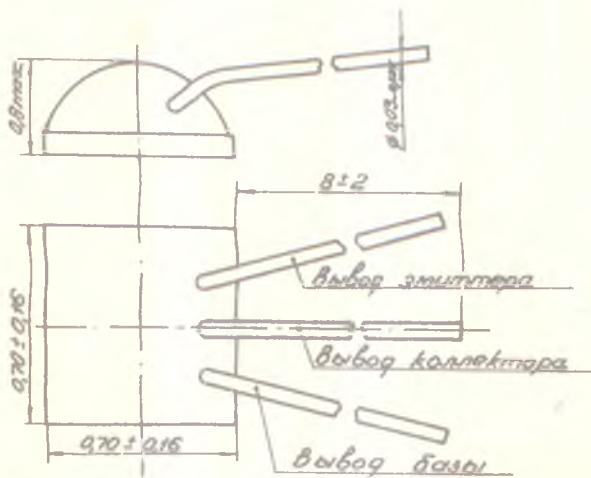
## Приложение 10

## Миниатюрные и бескорпусные диоды и диодные матрицы

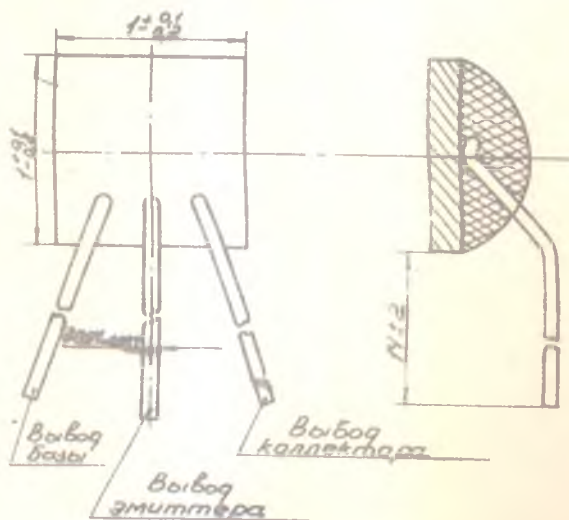
Тип	Краткая характеристика	Прямое напряжение (В) при прямом токе (мА) (В) при обратном токе (мА)	Обратный ток (мА) при обратном напряжении (В)	Параметры емкости, пФ	Время выключения, мкс, нсек.	Максимальное обратное напряжение, В	Конструктивные данные
КД-201 170.306 201.7V	Диодная матрица из 4 диодов с об- щим катодом	0,4/0,01 0,7/1,0	0,2/10	< 4,0	20	10	Бескорпусная, габаритные размеры 1,4 x 0,9 x 1,2 мм
КД-202	Диодная матрица из 4 диодов с об- щим анодом	0,55/0,01 0,82/1,0	0,2/50	< 2,0	10	5	Бескорпусная, габаритные размеры 1,4 x 0,9 x 1,2 мм
КД-204	Диодная матрица из 4 диодов с об- щим анодом	0,45/0,01 0,8/1,0	0,2/10	< 2,5	10	10	Бескорпусная, габаритные размеры 1,4 x 0,8 x 1,2 мм
КД-203	Диодная матрица из 8 диодов с об- щим катодом	—	—	< 15,0	150	—	Пластмассовый корпус 12x6 x 2,5 мм
КД-208	Зингулированная (5,8V) диодная матрица из 8 диодов с об- щим катодом	1,2/2,0	10/40	< 5,0	6	40	Плоский керамический корпус
КД-209	Диодная матрица из 8 диодов с об- щим катодом	—	—	< 5,0	50	—	Пластмассовый корпус 12x6 x 2,5 мм



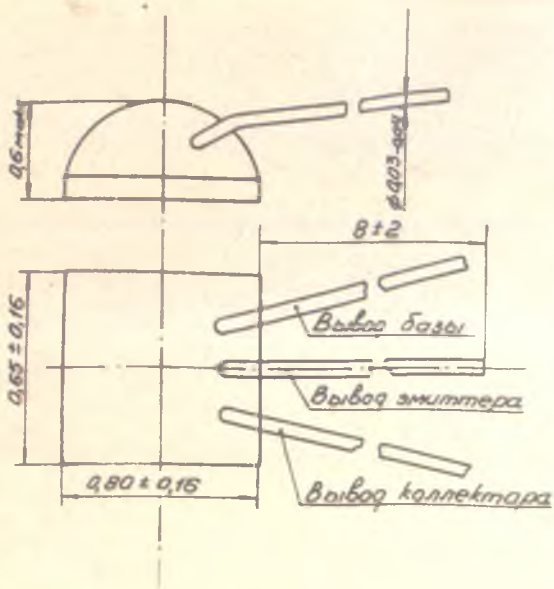
Габаритные чертежи некоторых навесных элементов ГЭС



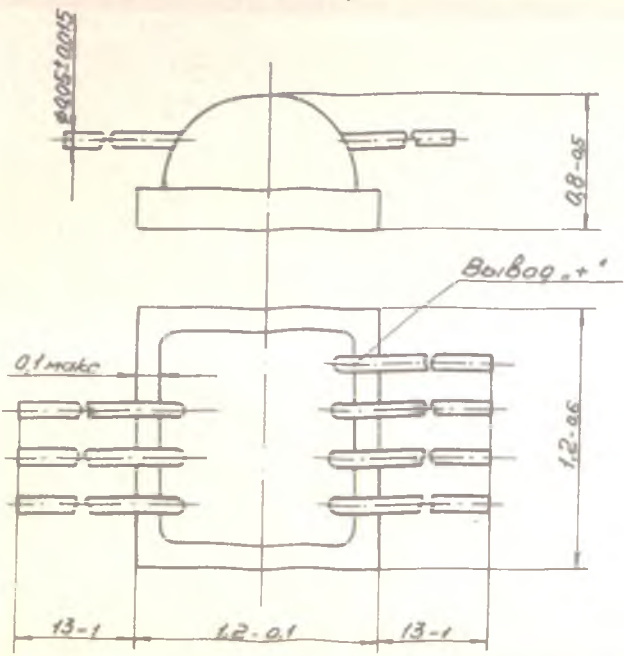
Габаритный чертеж транзистора 2Т307, СБ0336.026ТУ.



Гибридная микросхема транзистора 4-571

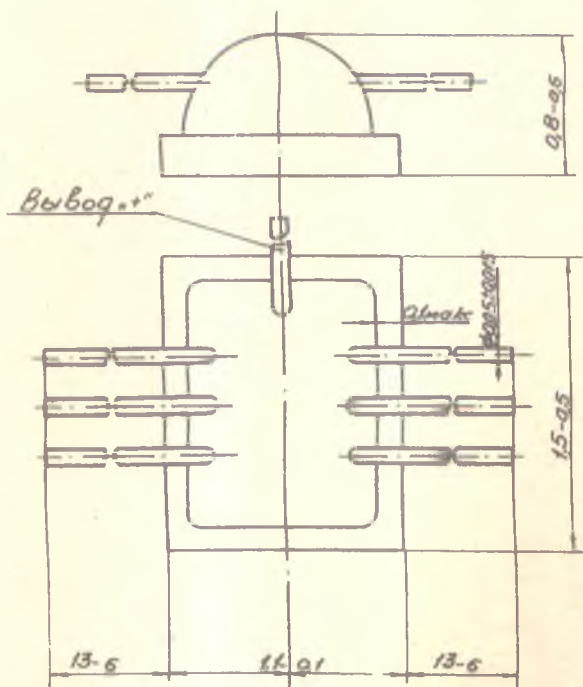


Габаритный чертёж диодной матрицы  
 КД902А-дД902Г, ТИС.УБ2.034ТУ



количество диодов в матрице не менее:  
 КД 902А-1; дД 902В-2; КД 902В-3; дД 902Г-4

Габаритный чертеж диодной матрицы  
КД 901А - КД 901Г, ТТО 336 001 ТУ



Количество диодов в матрице не менее

КД 901А - 1

КД 901Б - 2

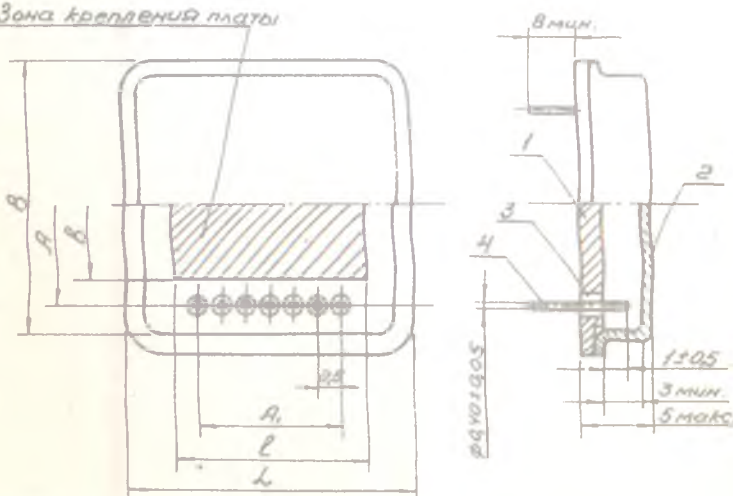
КД 901В - 3

КД 901Г - 4

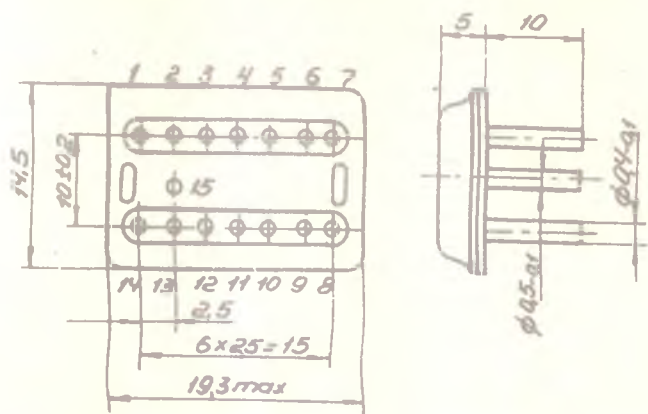
# Корпусы для микросхем

## Конструкция металлокерамических корпусов 251МС6-257МС30, НО. 070.001

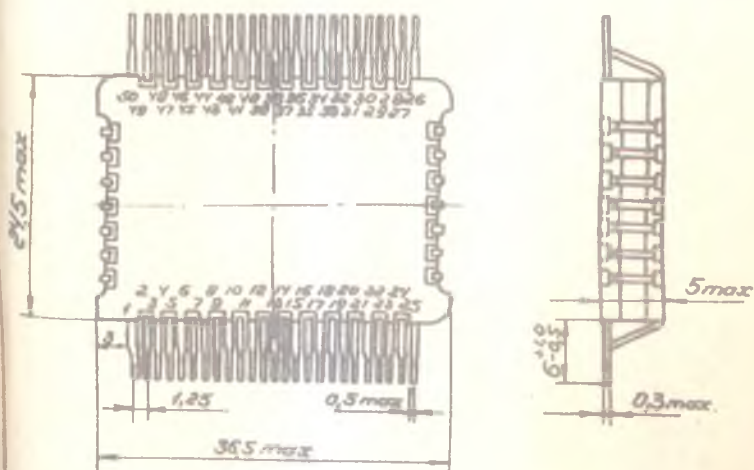
Зона крепления платы



Тип корпуса	Число выводов	Размеры, мм					
		L	B	A <sub>1</sub>	A	l	B
251 МС6	6	9,5	14,5	5	10	6,2	8,2
252 МС14	14	19,5	14,5	15	10	16,2	8,2
253 МС14	14	19,5	32,0	15	17,5	16,2	15,5
255 МС30	14	19	29,0	15	25	16,2	22,5
256 МС30	30	39	34,0	35	20	36	17,5
256 МС30	30	39	29	35	25	36	32,5
257 МС30	30	39	58	35	52,5	36	50



Прямоугольный металлостеклянный корпус 252МС15-4,  
15 выводов



Прямоугольный керамический корпус К-421, 50 выводов

Топологический чертёж микросхем

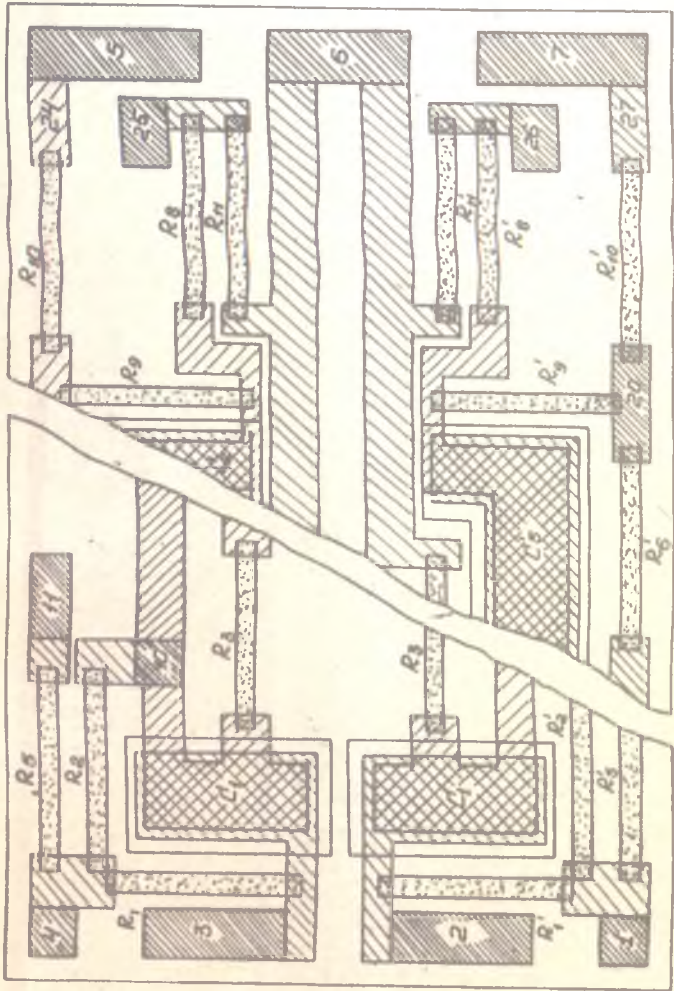




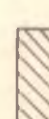


Таблица характеристик слоев микрохема

Номер слоя	Условное обозначение	Наименование слоя	Обозначение материала	Электрические характеристики	Метод нанесения слоя
1		Резисторы	Сплав МЛТ-3М ХХХ. ХХХТУ	$R_0 = 300 \text{ Ом}$	Напыление в вакууме
2		Контактные площадки	БрНМцТ5-2-01	$R_0 = 0,07 \text{ Ом}$	—
3		Нижние обкладки конденсаторов и проводники.	Алюминий А99 Гост 11069-64	$R_0 = 0,08 \text{ Ом}$	—
4		Диэлектрик	Монокристалл кремния	$C_0 = 5000 \text{ пф/см}^2$	—
5		Верхние обкладки конденсаторов и проводники	Алюминий А99 Гост 11069-64	$R_0 = 0,08 \text{ Ом}$	—



МВССО РСФСР  
Куйбышевский ордена Трудового Красного  
Знамени авиационный институт им. академика  
С.П. Королева

Кафедра „Конструирование и производство радиоаппаратуры“

**З А Д А Н И Е**  
на курсовой проект по конструированию  
и расчету микросхем (спец. 0705)

Студент \_\_\_\_\_ группа \_\_\_\_\_  
Руководитель \_\_\_\_\_  
Дата выдачи задания \_\_\_\_\_  
Дата защиты проекта \_\_\_\_\_  
Тема проекта: \_\_\_\_\_

Исходные данные: +

(В принципиальной электрической схеме, напряжение питания,  
частотный диапазон, условия эксплуатации, тип корпуса,  
тип производства, годовая программа выпуска и т.д.  
по указанию руководителя)

Руководитель проекта \_\_\_\_\_  
Ведущий преподаватель \_\_\_\_\_

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ им. академика С. П. КОРОЛЕВА

Кафедра «КОНСТРУИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО РАДИОАППАРАТУРЫ»

# РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

## к курсовому проекту

### по курсу:

---

---

Студент \_\_\_\_\_

Группа \_\_\_\_\_

Консультант \_\_\_\_\_

Оценка за проект \_\_\_\_\_

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

П р е д и с л о в и е . . . . .	3
1. Методические указания по выполнению и оформлению курсового проекта . . . . .	4
2. Расчет элементов микросхем . . . . .	12
2.1. Тонкопленочные резисторы . . . . .	12
2.2. Тонкопленочные конденсаторы . . . . .	36
2.3. Пленочные индуктивности . . . . .	53
2.4. Пленочные $RC$ -цепи с распределенными параметрами . . . . .	60
2.5. Паразитные связи в пленочных микросхемах . . . . .	64
3. Конструирование гибридных интегральных пленочных микросхем . . . . .	70
Л и т е р а т у р а . . . . .	100
П р и л о ж е н и я . . . . .	102

Меркулов Анатолий Игнатьевич

КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ МИКРОСХЕМ

Методические указания

Редактор К а с а т к и н а Н.В.

Технический редактор К а л е н ю к Н.М.

Корректор Г у б а р е в а Л.А.

Подписано в печать 7/Х-1975г. формат 60x84/16. .  
Объем 7,25 п.л. Тираж 500 экз.  
Цена 38 коп.

Куйбышевский авиационный институт им.С.П.Королева,  
г.Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Ротапринтный цех типографии им. Мяги, Куйбышев, -  
Венцека, 60. Заказ № 8372