

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

Ульяновский государственный технический университет

М.П. Романова

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГИБРИДНО - ПЛЕНОЧНЫХ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ**

Учебное пособие

Ульяновск 2006

УДК 621.38.049.77(075)
ББК 32.85 я 7
Р69

Рецензенты: директор Ульяновского филиала ИРЭ РАН доктор. техн. наук,
профессор В. А. Сергеев;
зав. кафедрой «Микроэлектроника» УлГУ доктор физ.-мат. наук,
профессор Н.Т. Гурин

Утверждено редакционно-издательским советом УлГТУ
в качестве учебного пособия

Романова, М. П.

Р69 Проектирование гибридно-пленочных интегральных микросхем: учебное
пособие / М. П. Романова. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 73 с.

ISBN 5 – 89146 –

В учебном пособии изложен систематизированный материал по проектированию и расчету пленочных интегральных схем. Рассмотрены основные принципы проектирования топологической структуры гибридных интегральных схем. Основное внимание уделено методике расчета основных тонкопленочных элементов. Рассмотрена методика оценки теплового режима гибридных интегральных микросхем.

Пособие предназначено для самостоятельной работы студентов специальности 21020165, изучающих дисциплину «Проектирование и технология микросхем».

УДК 621.38.049.77(075)
ББК 32.85 я 7

© М. П. Романова, 2006

ISBN5 – 89146 –

© Оформление. УлГТУ, 2006.

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
1. ТОНКИЕ ПЛЕНКИ В РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ	5
1.1. Особенности методов получения тонких пленок	5
1.2. Материалы для подложек тонких пленок	6
2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ	8
2.1. Необходимые данные для проектирования и расчета топологической структуры интегральных схем	9
2.2. Основные принципы проектирования топологической структуры интегральных схем	13
2.3. Определение степени интеграции принципиальной электрической схемы устройства	17
2.4. Компоновка топологической структуры интегральных схем	18
3. ПЛЕНОЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ	21
3.1. Пленочные интегральные резисторы	21
3.2. Расчет тонкопленочных резисторов	24
3.3. Пленочные переходные контакты и межсоединения	31
4. ТОЧНЫЕ ПЛЕНОЧНЫЕ РЕЗИСТОРЫ	35
4.1. Расчет резисторов со ступенчатой подгонкой	36
4.2. Расчет резисторов с плавной подгонкой	37
4.3. Оценка сопротивления и индуктивности пленочных проводников	41
4.4. Частотные свойства пленочных резисторов	42
5. ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ	44
5.1. Расчет тонкопленочных конденсаторов без подстроечных секций	48
5.2. Расчет гребенчатых конденсаторов	51
5.3. Расчет тонкопленочных конденсаторов повышенной точности	53
5.4. Добротность тонкопленочных конденсаторов	55
6. ПЛЕНОЧНЫЕ ИНДУКТИВНОСТИ	57
6.1. Исходные данные для расчета	57
6.2. Расчет пленочных катушек индуктивности	59
7. ТЕПЛОВЫЙ РАСЧЕТ МИКРОСХЕМ	63
7.1. Оценка теплового режима микросхем	63
7.2. Обеспечение теплового режима микросхем	66
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	68
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	70
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	71
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	73

ПРЕДИСЛОВИЕ

При конструировании современной радиоэлектронной аппаратуры используются новые разработки в области микроэлектроники и нанотехнологии. Но вопрос получения и использования тонких пленок до сих пор актуален, т.к. на их основе разрабатываются гибридно-пленочные интегральные микросхемы.

Тонкопленочные элементы применяются не только в гибридных, но и в некоторых полупроводниковых микросхемах, например, аналоговых СВЧ диапазона на арсениде галлия. В кремниевых цифровых БИС используются резистивные слои поликристаллического кремния. В СВЧ диапазоне также используются тонкопленочные конденсаторы с емкостями порядка десятых долей пикофарады. В этом же диапазоне находят применение гребенчатая структура конденсатора, плоские прямоугольные или круглые пленочные индуктивные элементы.

В настоящем учебном пособии рассматриваются вопросы проектирования и расчета пленочных элементов различного назначения.

В первой главе представлены общие сведения о технологии получения тонких пленок, особенности методов их получения и приведены характеристики материалов подложек для изготовления гибридно-пленочных интегральных микросхем (ГПИМС).

Вторая глава посвящена изучению последовательности (алгоритма) разработки топологии гибридно-пленочных интегральных микросхем. В ней также приведены необходимые данные для проектирования и расчета структуры ГИС.

В третьей главе рассмотрены различные конструкции тонкопленочных резисторов и контактных площадок. Приведена методика выбора материалов для резистивных пленок, контактных площадок и соединений, а также последовательность расчета вышеуказанных элементов.

Четвертая глава посвящена изучению методики расчета особо точных (прецизионных) резисторов. В этой главе также приводится оценка сопротивления и индуктивности пленочных проводников, рассмотрены частотные свойства пленочных резисторов.

Пятая глава содержит описание различных конструкций тонкопленочных конденсаторов, методику расчетов конденсаторов без подстроечных секций и конденсаторов повышенной точности. В ней также обоснован выбор материала для диэлектрических пленок тонкопленочных конденсаторов.

В шестой главе представлена методика расчета различных пленочных индуктивных элементов.

В седьмой главе рассматриваются вопросы обеспечения теплового режима микросхем в зависимости от их конструктивных особенностей.

Это пособие может быть полезно в качестве дополнительной литературы для самостоятельной работы студентов, обучающихся по специальности 2102.0165 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств».

1. ТОНКИЕ ПЛЕНКИ В РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ

Термин «тонкие пленки» обозначает покрытия толщиной не более 10 мкм. Пассивные компоненты интегральных схем формируются избирательным осаждением тонких пленок на подложках. Тонкие пленки широко используются в полупроводниковых и гибридных интегральных микросхемах для создания проводниковых соединений, таких как резисторы, конденсаторы и изоляция между элементами и проводниками. Помимо необходимых электрофизических параметров от них требуется хорошая адгезия (прочность связи) к материалу, на который наносится пленка. Некоторые материалы имеют плохую адгезию с подложками, например, золото с кремнием. Тогда на подложку сначала наносят тонкий подслои с хорошей адгезией, а на него – основной материал, имеющий хорошую адгезию с подслоем. Для предотвращения повреждений пленок при колебаниях температуры желательно, чтобы ТКР пленок и подложек как можно меньше отличались друг от друга.

1. 1. Методы получения тонких пленок

В настоящее время существует довольно много методов получения тонких пленок, основанных на различных физических процессах.

Основными из них являются следующие процессы:

1. Термическое вакуумное испарение.

По этому методу тонкие пленки получаются в результате нагрева, испарения и осаждения вещества на подложку в замкнутой камере при сниженном давлении газа в ней.

Недостатками данного способа являются невысокая воспроизводимость параметров пленки из-за плохого контроля температуры и кратковременности процесса, а также невозможность воспроизведения химического состава испаряемого вещества (например, сплава или химического соединения) из-за разной скорости испарения входящих в него компонентов. Поэтому термическое вакуумное испарение применяется, в основном, только для чистых металлов.

2. Распыление ионной бомбардировкой.

Ионно-плазменное напыление происходит в тлеющем разряде и состоит в распылении материала отрицательно заряженного электрода - мишени под действием ударяющихся о него ионизированных атомов газа и осаждении распыленных атомов на подложку.

По сравнению с термическим вакуумным испарением данный процесс позволяет получать пленки тугоплавких металлов, наносить диэлектрические пленки, соединения и сплавы, точно выдерживая их состав, обеспечивать равномерность и точное воспроизведение толщины пленок на подложках большей площади, а также малую инерционность процесса.

3. Химическое осаждение из газовой фазы.

Химическое осаждение происходит в результате химической реакции в газовой фазе при повышенной температуре и осуществляется в эпитаксиальных или диффузионных установках.

Этот способ используется для получения пленок поликристаллического кремния и диэлектриков. Достоинствами химического осаждения из газовой фазы являются простота, хорошая технологическая совместимость с другими процессами создания полупроводниковых микросхем и сравнительно невысокая температура, благодаря чему практически отсутствует нежелательная разгонка примеси в пластинах. Скорость осаждения определяется температурой и концентрацией реагирующих газов в потоке нейтрального газа – носителя и составляет в среднем несколько сотых долей микрометра в минуту.

4. Химическое осаждение из водных растворов.

Применяемое в технологии гибридных микросхем химическое осаждение из водных растворов основано на восстановлении металлов из растворов их солей. Таким образом, можно получать не только тонкие, но и толстые пленки (20 мкм и более), применяемые, например, для создания жестких и балочных выводов бескорпусных полупроводниковых микросхем, транзисторов, а также металлических масок (трафаретов).

1.2. Материалы для подложек

Подложка в конструкции гибридной интегральной микросхемы является основанием, на котором располагаются пленочные элементы и навесные компоненты. От ее свойств во многом зависит качество всей конструкции. Подложки, используемые при изготовлении гибридных интегральных микросхем, должны удовлетворять следующим требованиям: иметь значительную механическую прочность при небольших толщинах; обладать высоким удельным электрическим сопротивлением и малыми потерями на высоких частотах ($\text{tg}\delta$) и при высокой температуре; быть химически инертными к осаждаемым веществам; не иметь газовыделений в вакууме; сохранять физическую и химическую стойкость при нагревании до 400 - 500°C; иметь температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), близкий к ТКЛР осаждаемых пленок; способствовать обеспечению высокой адгезии осаждаемых пленок; иметь гладкую поверхность (R_z мкм на длине 0,08 мм); обладать высокой электрической прочностью; иметь низкую стоимость.

Основные электрофизические и механические свойства материалов, которые используются для изготовления подложек гибридных ИМС, приведены в таблице 1.1 «Характеристики подложек».

Наиболее широкое применение при создании тонкопленочных гибридных ИМС находят подложки из ситалла СТ 50-1, стекла С 48-3, «Поликора» и бериллиевой керамики. Промышленностью выпускаются подложки различных типоразмеров. Однако в качестве базовых преимущественно используются

подложки размером 100x100 и 50x50 мм из стекла и 48x60 мм из ситалла и керамики. Другие типоразмеры подложек получаются делением сторон базовой подложки на части. Например, для подложек из ситалла в качестве делителя чаще всего используют цифры 2 и 3 или кратные им. По толщине наибольшее распространение получили подложки размером 0,06, 1 и 1,6 мм. В технически обоснованных случаях применяют и более тонкие подложки до 0,2 мм.

Таблица 1.1.

Характеристики подложек

Материал диэлектрика	Удельное сопротивление, Ом·см	Диэлектрическая постоянная	Диэлектрические потери на частоте 10^6 Гц	Теплопроводность, кал/см·с·°С	Коэффициент линейного расширения, $10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Боросиликатное стекло	10^7	4,6	$6,2 \cdot 10^{-3}$	0,0027	3,25
Алюмооксидная керамика типа «Поликор»	10^{14}	10,8	$2 \cdot 10^{-4}$	0,075 – 0,08	7,5 – 7,8
Алюмооксидная керамика	10^{14}	9,1	$2,7 \cdot 10^{-3}$	0,03 – 0,06	6,4
(96% Al_2O_3)	10^{16}	6,6	$3 \cdot 10^{-4}$	0,25 – 0,5	7 – 9
Кварцевое стекло	10^{16}	4	$3,8 \cdot 10^{-4}$ – $2 \cdot 10^{-5}$	0,0036	0,56 – 0,6
Ситаллы	10^{13} – 10^{14}	6,5	10^{-3} – $6 \cdot 10^{-3}$	0,005 – 0,009	5
Лейкосапфир	10^{11}	8,6	$2 \cdot 10^{-4}$	0,0055	5

2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ ГИС

Гибридная схема должна выполняться в виде функционально законченного узла, но допускать возможность контроля над параметрами.

Разработка ГИС производится в следующей последовательности:

1. Производится анализ принципиальной электрической схемы устройства, отработанной в навесном исполнении с учетом особенностей и возможностей пленочной технологии: получения пленочных элементов необходимых номиналов с заданной точностью, пробивным напряжением, рассеиваемой мощностью и др. Учитываются параметры и конструкции активных элементов, надежность и экономические факторы.

2. Сложные схемы с большим количеством напыляемых элементов разбиваются на несколько функциональных узлов. При этом учитывается необходимость наибольшей унификации ГИС.

3. Разрабатывается конструкция ГИС.

4. Разрабатывается топология и морфология ГИС.

5. Оформляются чертежи ГИС.

6. Изготавливается экспериментальный образец.

7. Проводятся испытания ГИС, предусмотренные в технических условиях на изделие.

8. Производится корректировка технической документации.

По принципиальной электрической схеме определяется перечень напыляемых элементов. В перечне приводятся сведения о номиналах, допусках, максимальной рассеиваемой мощности (для резисторов), максимальное напряжение (для конденсаторов). Расположение и размеры контактных площадок зависят от принятого способа контактирования или сварки, а также от расположения жестких выводов.

Для разработки топологии и морфологии необходимо указать:

1. Паразитные связи утечки, возникающие между элементами или узлами схемы, и элементы и узлы, паразитные связи и утечки между которыми должны быть минимальными.

2. Диапазон рабочих частот разрабатываемого устройства.

3. Величину сопротивления коммутационных проводников и проводников, подводящих питание.

4. Шаг и пределы регулировки - для элементов, с помощью которых осуществляются регулировка и настройка.

Разработку топологии следует выполнять с учетом особенностей конструкции ГИС и устройства в целом: его габаритов, расположения выводов и др.

При конструировании ГИС и разработке топологии учитываются следующие основные ограничения:

1. Пассивные элементы, к точности которых предъявляются жесткие требования, располагаются на расстоянии не менее 1000 мкм от краев подложки и осевых линий прижимных перегородок.

2. Если элементы расположены в различных слоях, для их совмещения преду-

считывается перекрытие не менее 200 мкм.

3. При формировании двухпластинчатого пленочного конденсатора нижняя его пластина должна выступать за край верхней не менее чем на 200 мкм, диэлектрическая пленка должна выступать за край нижней пластины также не менее чем на 200 мкм.

4. При формировании многослойных конденсаторов их обкладки в местах коммутации с другими элементами должны выступать за слой диэлектрика не менее чем на 400 мкм.

5. Для контроля и тренировки конденсаторов в напыленной микросхеме предусматриваются выводы от каждой обкладки.

6. Минимальный номинал пленочного резистора устанавливается в 50 Ом, при этом длина резистора не должна быть меньше 500 мкм.

7. Допуск на резисторы с номинальными значениями 50 - 100 Ом составляет $\pm 20\%$, для $\rho = 3004-500 \text{ Ом/}\mu\text{м}$. Максимально допустимая величина резистора ограничивается конструкцией ГИС.

8. Минимально допустимые размеры контактной площадки - рабочего поля, необходимого для подпайки навесных элементов. - Устанавливаются равными 700 на 700 мкм.

9. Минимально допустимые размеры контактной площадки для сварки установлены 400 на 400 мкм.

10. Минимально допустимые размеры контактной площадки для контроля номиналов пассивных элементов - резисторов и конденсаторов - в напыленной схеме составляют 300 на 300 мкм.

11. Минимально допустимые расстояния между пленочными элементами схемы составляют 300 мкм.

12. Минимально допустимые расстояния между контактными площадками для подпайки составляют 500 мкм.

13. Граница диэлектрика должна отстоять не менее чем на 500 мкм от края контактных площадок.

14. Минимально допустимая ширина пленочного резистора - 200 мкм.

15. Ширина перегородок между линиями резисторов в криволинейных конфигурациях должна быть не менее 300 мкм.

2.1 Необходимые данные для проектирования и расчета топологической структуры ГИС

Схемотехнические данные являются основными для проектирования радиоэлектронного устройства, так как они определяют связи и параметры элементов, их функциональное назначение и условия эксплуатации.

Принципиальная электрическая схема устройства гибридно-пленочной конструкции может быть выполнена в виде модуля (законченной единичной конструкции) или в виде ряда модулей. В этом случае схема интегрируется, т. е. разбивается на отдельные схемы по уровням конструктивных решений -

модулям, субмодулям, отдельным панелям и т. д.

Принципиальные электрические схемы устройств, представленные к разработке в гибридно-пленочной конструкции, подразделяются на две категории:

1. Схемы, морфологическая структура и схемотехнические данные которых разработаны с учетом особенностей и ограничений, накладываемых интегральной гибридной технологией.
2. Схемы, переводимые в гибридно-пленочный вариант.

Отличительными признаками схем, разработанных для гибридно-пленочной технологии изготовления, являются:

- а) отсутствие резисторов с номинальными значениями, более 20 кОм.
- б) отношение $R_{\text{макс}}/R_{\text{мин}}$ не превышает 50.
- в) соответствие номиналов резисторов непрерывной шкале.
- г) отсутствие тенденции подведения номиналов резисторов по точности изготовления под нормализованный ряд номиналов (такая тенденция свойственна конструированию изделий на дискретных компонентах).
- д) мощность рассеяния резисторов указывается соответствующей их режиму в схеме (максимальному режиму).
- е) отсутствие или возможное уменьшение числа реактивных элементов схемы.
- ж) отсутствие в процессе изготовления ГИС настраиваемых или подбираемых компонентов.

Параметры элементов схемы, подвергающейся конструктивному расчету при проектировании топологической структуры, приводятся в спецификации. Она должна обеспечивать возможность проведения конструктивного расчета и выбора материалов.

Для резисторов указывается:

номинальное значение R , Ом, кОм; погрешность номинального значения γ_R , %; номинальная мощность или мощность, на которую следует рассчитывать конструкцию резистора, P , мВт; точность отношения номиналов отдельных резисторов γ_{Ri} / R_i , %; ТКС в рабочем диапазоне температур, $1 / \text{град}$; стабильность резистора во времени δ_R , %.

Для конденсаторов указывается:

номинальное значение C , пФ; погрешность номинального значения γ_C , %; рабочее напряжение U_p , В; диэлектрические потери $\text{tg } \delta$; ТКЕ в рабочем диапазоне температур, $1 / \text{град}$; точность отношения номиналов отдельных конденсаторов γ_{Ci} / C_i , %; стабильность во времени δ_C , %.

Указываемые на резисторы и конденсаторы параметры ТКС, ТКЕ, δ_R и δ_C необходимы для выбора материала, используемого для напыления указанных элементов и для учета γ_R и γ_C в заданном диапазоне температур. Они определяют при разработке топологической структуры возможные и допустимые топологические погрешности резисторов и конденсаторов. Кроме указанных основных параметров, для большей определенности результата проектирования элементов приводятся дополнительные сведения.

К ним относятся:

1. По принципиальной электрической схеме: величина сопротивления наиболее критичных коммутационных связей (проводников) и тип питания, величина паразитных параметров между наиболее опасными с точки зрения взаимосвязи элементами или узлами схемы; допустимая величина емкости шин питания между собой и относительно нулевой (земляной) шины; рабочий диапазон частот схемы; общая мощность, рассеиваемая схемой; наличие контрольных точек и необходимость доступа к ним.

2. По параметрам элементов - пределы изменения номиналов резисторов и конденсаторов, требующих подгонки после изготовления.

Конструктивно-компоновочные данные подразделяются на общие и частные. К общим данным относятся объем отдельного модуля или всего устройства, необходимая геометрическая форма устройства: куб, параллелепипед, плоский субмодуль, плоский модуль. К частным конструктивно-компоновочным данным относятся: размер подложки, максимально возможное количество внешних выводов с подложки, порядок расположения выводов в микросхеме (модуле) или в группе модулей; формирование единой топологической структуры для ряда схем, которые могут образовываться введением дополнительных перемычек или коммутационных слоев пленки; обеспечение контроля отдельных элементов и конструктивное оформление контрольных точек и доступа к ним; данные и компоновочно-монтажные требования к активным и другим навесным элементам, располагаемым непосредственно на микросхеме, данные по допустимому тепловому режиму микротранзисторов. Выбор конкретных данных при проектировании производится технологом, выполняющим разработку микросхемы в контакте с разработчиком схемы устройства.

Технологические данные характеризуют возможность изготовления схемы (модуля) или устройства (группы модулей) с заданными параметрами. Это данные о качественных параметрах технологии получения пленок и сложных пленочных структур (например, тип конденсатора); данные о параметрах пленок различного назначения (резистивные, проводниковые, контактные, диэлектрические, защитные) и о комбинации различных пленок (конденсатор, резистивно-проводящий переход и др.); данные о количестве наносимых слоев в различной последовательности напыления материалов и др.

Точность изготовления геометрического контура пленочных элементов микросхемы.

Точность изготовления геометрического контура элемента ИПС в технологической оснастке (трафареты, негативы), с помощью которых получают рисунок микросхемы, ее топологическую структуру, определяется следующими погрешностями: ошибкой по контуру для данной технологии изготовления рисунка в оснастке - трафаретах - Δ ; ошибкой в линейном размере - Δd ; ошибкой в линейном размере, перпендикулярном первому, - Δl .

Затеняющие трафареты, изготовленные фотохимическим способом из биметаллической заготовки, имеют ошибку ± 10 мкм. Отверстия в таком трафарете для изготовления прямолинейного резистора имеют ошибку по ширине и по длине резистора $\Delta d = \Delta l = \pm 10$ мкм. При изготовлении пленочного резистора или конденсатора через такой трафарет вакуумным напылением возникают, кроме того, искажения ширины d и длины l резистора на величину $\Delta_{\text{иск}}$ за счет так называемого эффекта тени, возникающие в результате подпыления распыляемого материала под трафарет. При наложении одного вида пленки на другой, например резистивной на проводниковую, неизбежны неточности в наложении - так называемые ошибки совмещения трафарета с подложкой $\Delta_{\text{совм}}$. Ошибку совмещения необходимо учитывать при разработке топологической структуры ГИС. Для совмещения элементов, лежащих в разных слоях, предусматривается перекрытие не менее 200 мкм.

Точность воспроизведения электротехнических параметров пленок.

Точность воспроизведения физических свойств пленки в процессе их изготовления является важным условием при выборе пленок для элементов. Точность воспроизведения резистивной пленки определяется относительной погрешностью в номинальном значении удельного сопротивления квадрата изготовленной пленки. Эта погрешность зависит от номинального значения удельного сопротивления $\gamma_{\rho i} = f(\rho_i)$.

Другим важным параметром является достоверность получения данного ρ_i с заданной точностью $\gamma_{\rho i}$ его воспроизведения. Она относится к части или ко всей площади подложки. Например, при подложке 100 на 100 мм пленку с $\rho_i = 500 \text{ Ом/}\square$ можно получить с точностью $\pm 10\%$ и достоверностью 0,8 на площади 70 см^2 . Иногда, кроме указанных характеристик, необходимо знать величину градиента неравномерности данного удельного сопротивления квадрата пленки на ее поверхности. Градиент неравномерности $\text{grad } \rho_i$, проц/ см^2 , относится к единице поверхности подложки. Этот параметр используется в случае, когда конструируются резисторы с заданной точностью отношения R_i/R_j .

Точность изготовления пленочных конденсаторов ГИС описывается аналогичными параметрами $\gamma_{C_0} = f(C_0)$ относительная погрешность воспроизведения номинального значения удельной характеристики C_0 .

Диэлектрические пленки предназначаются для получения пленочных конденсаторов методами интегральной вакуумной технологии и должны иметь параметры, обеспечивающие конструирование конденсаторов с заданными характеристиками, в частности технологической и эксплуатационной надежностью.

Основными параметрами пленки являются: диэлектрическая постоянная пленки ϵ и удельная электрическая емкость однослойного (двухпластинчатого) конденсатора C_0 - емкость, приходящаяся на единицу поверхности при некоторой толщине диэлектрической пленки и некоторой ее диэлектрической постоянной. При проектировании задается диапазон удельных значений, обеспечиваемый данной технологией, $C_{0 \text{ мин}} - C_{0 \text{ макс}}$, пФ/ см^2 .

Пленочные конденсаторы имеют тенденцию к замыканию накоротко при изготовлении и эксплуатации; несовершенство технологии зависит от площади конденсатора, поэтому необходимо знать параметр, показывающий частоту замыканий, или число замыканий, приходящееся на единицу поверхности конденсатора. Такой параметр позволяет установить наибольшую допустимую площадь (емкость) конденсатора при заданной его надежности изготовления (или выхода годных) и эксплуатации.

Справочные данные по диэлектрическим пленкам: 1) пробивное напряжение $U_{пр}$ в функции удельной емкости или в функции толщины пленки; 2) рабочее напряжение U_p ; 3) $\text{tg } \delta$ в функции удельной емкости (толщины) на частоте f или в диапазоне частот; 4) ТКЕ для данной пленки; 5) параметры стабильности при различных испытаниях и параметры надежности.

Справочные данные позволяют уточнить величину надежности спроектированной конструкции при ее эксплуатации. Для расчета взаимных емкостных связей между элементами микросхем необходимо задаться диэлектрической постоянной материала подложки ϵ' , диэлектрической постоянной среды, покрывающей элемент сверху, ϵ'' и удельным сопротивлением квадрата проводниковой и контактной пленки r_f .

В зависимости от геометрических размеров навесных элементов, методов и способов их присоединения (пайка, сварка, термокомпрессия) выбираются конструктивные размеры контактных площадок для таких соединений.

2.2. Основные принципы проектирования топологической структуры гибридной интегральной схемы

Особенно трудным в проектировании топологической структуры ГИС является этап компоновки (планировки) такой структуры. Ниже приводятся методические рекомендации по организации планировки топологической структуры ГИС. Предварительный анализ принципиальной схемы и схемно-технических данных выполняется с целью:

- а) выяснить возможность выполнения данной схемы устройства с ее схемно-техническими параметрами и конструктивно-компоновочными требованиями в гибридно-пленочной конструкции при имеющихся технических возможностях;
- б) определить минимальную площадь под гибридно-пленочную микросхему конкретного устройства;
- в) определить степень интеграции схемы всего устройства.

2.2.1. Выбор оптимального r_f квадрата резистивной пленки

Это важнейшая часть анализа, так как он определяет возможность реализации конкретного устройства в гибридно-пленочном варианте. В качестве критерия оптимальности r_f можно принять минимальную необходимую площадь, которую займут все резисторы схемы и которой соответствует значение

оптимума

$$R_{i \text{ опт}} = (1 - \gamma_\phi) \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n R_i}{\sum_{i=1}^n R_i^{-1}}} \quad (2.1)$$

где R - номинал i -го резистора; n - число резисторов;

γ_ϕ - погрешность геометрии резисторов, или коэффициент формы.

Если трудно получить таким путем оптимальное значение R_i , выбирают ближайшее по номиналу значение R_i , удовлетворяющее требованиям на резисторы для схемы устройства.

Полная технологическая погрешность резистора γ_R численно равна сумме погрешности геометрии резистора γ_ϕ и погрешности воспроизведения электрофизической характеристики R_i резистивной пленки γ_{Ri}

$$\gamma_R = \gamma_\phi + \gamma_{Ri} \quad (2.2)$$

Составляющие этой погрешности лежат в пределах: $\gamma_\phi = (0,1-0,5) \gamma_R$; $\gamma_{Ri} = (0,9 - 0,5) \gamma_R$. Выбранное R_i должно иметь технологическую характеристику: $\gamma_{Ri} < \gamma_R$.

Если отношение $R_{\text{макс}}/R_{\text{мин}}$ в схеме, расположенной на одной подложке, превышает 50, то в некоторых случаях целесообразно изготавливать резисторы из двух материалов, т. е. в виде двух различных пленок. Резисторы схемы разбиваются на две группы так, чтобы $R_{\text{макс}}$ первой группы было меньше, а $R_{\text{мин}}$ второй группы больше значения сопротивления, соответствующего $R_{i \text{ опт}}$, рассчитанному для всех резисторов схемы по формуле (2.1). Затем по той же формуле рассчитывается $R_{i \text{ опт}}$ для каждой группы резисторов в отдельности.

2.2.2. Выбор удельной емкости C_0 диэлектрической пленки конденсаторов.

Удельная емкость конденсатора с диэлектрической пленкой C_0 выбирается по наибольшему ее значению при условии удовлетворения всех остальных параметров пленки требованиям на конденсаторы схемы. Выбранное значение C_0 используется для оценки площади микросхемы. Избыток подложки может быть использован для улучшения параметров других элементов, например резисторов. При этом вырастает точность их изготовления. Увеличение площади под конденсаторы снижает значение C_0 и улучшает некоторые параметры конденсаторов: повышает рабочее напряжение и увеличивает надежность в отношении коротких замыканий.

2.2.3. Определение необходимой общей площади контактных площадок в

микросхеме.

Анализ принципиальной схемы на установление количества и типов контактных площадок для внешнего соединения микросхемы с выводами и вводами модульной конструкции, а также для внутреннего соединения навесных элементов с пленочными, производится расчетом, подтверждающим необходимость в таких площадках. Затем по характеристике присоединяемого элемента и справочным данным по технологии присоединения определяется величина необходимой площади контактной площадки для данного вида присоединения (внешний вывод, вывод транзистора, перемычка и т. д.). Общая необходимая площадь всех контактных площадок

$$S_k = \sum_{i=1}^m S_i \quad (2.3)$$

где S_i - площадь i -й площадки; m - общее число площадок.

2.2.4. Определение необходимой площади под пленочные конденсаторы.

Общая площадь всех однослойных конденсаторов в ГИС определяется по формуле:

$$S_C = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_0} \quad (2.4)$$

где C_i - емкость i -го конденсатора; n - количество конденсаторов;
 C_0 - удельная емкость конденсаторов, пФ/см².

2.2.5. Определение необходимой площади под пленку резисторов.

Расчет площади, занимаемой резисторами, может быть произведен двумя способами: в зависимости от точности геометрии резистора или в зависимости от мощности.

1. Площадь резистора в зависимости от точности геометрии резистора равна

$$S_{R(\Delta)} = k_\phi \times \left(\frac{\Delta l}{k_\phi \gamma_\phi} + \frac{\Delta b}{\gamma_\phi} + \Delta b \right)^2 \quad (2.5)$$

В этом выражении $k_\phi = R/\rho_l$; ρ_l - удельное сопротивление данного резистора; Δl и Δb - абсолютные ошибки геометрических размеров резистора (длина l и ширина b), определяемые выбранным методом изготовления микросхемы;

$\gamma_\phi = 0,1 - 0,5$.

2. Площадь резистора в зависимости от мощности, рассеиваемой на резисторе, равна

$$S_{R(P)} = P/P_0, \quad (2.6)$$

где P и P_0 - номинальная и допустимая удельная мощность, рассеиваемая на резисторе.

Площадь, занимаемая всеми резисторами микросхемы, равна сумме площадей, занимаемых отдельными резисторами

$$S_{\Sigma R} = \sum_{i=1}^n S_{Ri}, \quad (2.7)$$

где S_{Ri} — площадь i -го резистора.

2.2.6. Определение необходимой площади подложки для размещения топологической структуры микросхемы.

Из технологических соображений элементы микросхемы располагаются на некотором расстоянии от края подложки, т. е. полезная площадь подложки несколько меньше ее полной площади. Назовем коэффициентом заполнения или коэффициентом плотности топологической структуры микросхемы k_s отношение площади подложки S' к используемой ее части S , ограниченной контуром, в котором расположена топологическая структура микросхемы:

$$k_s = S'/S. \quad (2.8)$$

Тогда $S = S'/k_s$.

Величина k_s в среднем равна 0,45- 0,55 и определяется количеством элементов в схеме, типом элементов (резистор, конденсатор, контактная площадка, навесной элемент), количественным соотношением между элементами различных типов и сложностью связей между элементами, т. е. морфологической связью в схеме. С увеличением количества элементов в схеме при несложной связи между ними (простые схемы каскадов, отсутствие цепей обратной связи и др.) коэффициент k_s приближается к 0,5; при усложнении связей между элементами схемы k_s меньше 0,5; при этом возрастает площадь, занимаемая проводящей пленкой, - следствие проводниковых связей. С уменьшением количества элементов в схеме при простых связях между ними k_s больше 0,5; наибольшего значения этот коэффициент достигает, когда среди элементов микросхемы доминируют конденсаторы. Для топологической структуры схемы из нескольких конденсаторов k_s может достигнуть значений, близких к единице. Схемы высокочастотные и с большими мощностями рассеяния требуют большой площади микросхемы.

Необходимая площадь подложки определяется формулой

$$S = (S_{\Sigma R} + S_C + S_K + S_{ЭН})/k_s \quad (2.9)$$

где $S_{\Sigma R}$ и S_C - площадь, занимаемая всеми резисторами и конденсаторами схемы; S_K - площадь, занимаемая всеми контактными площадками; $S_{ЭН}$ - площадь, занимаемая навесными элементами, которые не могут быть расположены над пленочными элементами и занимают площадь на подложке.

Соотношение сторон подложки определяется на этапе графического анализа принципиальной электрической схемы. Окончательные размеры подложки устанавливаются после разработки топологической структуры - на этапе разработ-

ки конструкции модуля и выбора метода герметизации. Если $S > S_{\Pi}$, т. е. допустимая площадь больше площади конкретной подложки, то последняя определяется теми или иными конструктивными возможностями. Например, если $S/S_{\Pi} \leq 2$, то расположить схему устройства на подложке S_{Π} можно, применяя метод многослойного конструирования пленочных микросхем. Для $S/S_{\Pi} = 1,1 - 1,3$ при проектировании топологической структуры допускается частичная многослойность пленочной конструкции, например, используется структура конденсатора для конструирования шин питания.

При проектировании резисторов можно выбрать другое значение r_i , если ранее выбранное не обеспечивает минимума $S_{\Sigma R}$, или снизить требования к точности изготовления резисторов по их геометрии, или повысить значение P_0 для резисторов и C_0 для конденсаторов. Отношение $S/S_{\Pi} = 1,1$ осуществимо только при тщательной планировке топологической структуры микросхемы после ее графического анализа.

2.3. Определение степени интеграции принципиальной электрической схемы устройства.

Процесс конструктивной интеграции принципиальной электрической схемы является наиболее сложным в общем подходе к конструкции всего устройства.

Основными соображениями, которыми следует руководствоваться при решении этого вопроса, являются следующие:

1. Линия расчленения схемы должна проходить в местах наименьших связей между функционально законченными частями схемы, например, между каскадами усилителя без обратной связи.
2. Расчлененные части схемы должны иметь примерно одинаковый баланс потребляемой мощности.
3. Мощность единичной конструкции (модуля) не должна превышать допустимой удельной мощности для данного типа герметизации микросхемы (типа и размера корпуса модуля).
4. Нельзя расчленять элементы схемы, находящиеся в заданном отношении, например, резисторы делителя напряжения.
5. При расчленении количество входных и выходных цепей в каждой части схемы должно быть минимальным. Количество входов и выходов, включая подвод питания и выводы контрольных точек, не должно превышать общего количества выводов в единичной конструкции (модуле).
6. При расчленении схемы следует уменьшать длину связей, чувствительных к влиянию на них паразитных параметров.
7. При расчленении каждая часть схемы должна размещаться на заданном типоразмере подложки или каждая часть схемы должна требовать для своего размещения примерно одинаковую площадь подложки.
8. При расчленении схемы необходимо учитывать физико-технологические и технико-экономические условия изготовления микросхемы. С увеличением площади подложки и числа элементов на ней уменьшается вероятность выхо-

да годной подложки с заданной точностью пленочных элементов, падает производительность и возрастает стоимость производства микросхем.

2.4. Компоновка топологической структуры ГИС

Плоский план микросхемы, представляющий ее топологическую структуру, образуется в процессе компоновки на плоскости элементов схемы и связей между ними по выбранному оптимальному графу принципиальной электрической схемы. На этапе компоновки в конкретных геометрических формах элементов микросхемы обуславливается реализация электротехнических параметров схемы с учетом особенностей технологии изготовления ГИС. Каждому элементу схемы, в том числе и элементам коммутации - проводникам, придаются в плоскости конкретные геометрические формы и размеры с учетом взаимной ориентации элементов, соответствующей оптимальному графу. Предварительное вычерчивание компоновки производится на миллиметровой бумаге в масштабе 10:1 или 20:1. Окончательный вариант топологической структуры ГИС выполняется в увеличенном масштабе с точностью до деления координатной сетки. Изображается общий вид ГИС, где обозначается каждый слой соответствующей штриховкой.

При осуществлении компоновки можно придерживаться следующих рекомендаций:

1. Допустимая форма элементов контура при образовании топологической структуры.

Контур пленочного элемента может состоять из комбинаций прямых и кривых элементов - отрезков или прямых отрезков, расположенных под произвольными либо под определенными углами, например 90 и 45° или только 90°.

При изготовлении рисунка вручную возможна произвольная форма контура, с помощью координатографа воспроизводятся контуры из взаимно перпендикулярных отрезков, кибернетические системы могут воспроизводить сложную конфигурацию.

2. Последовательность составления эскизного варианта топологической структуры ГИС.

Первому эскизному наброску подвергаются элементы внутреннего и внешнего соединения - контактные площадки, проводниковые связи, соединяющие области расположения элементов схемы (резисторов, конденсаторов, навесных элементов). Затем размещаются конденсаторы и резисторы, площади которых известны. Резистивные элементы занимают наибольшую площадь подложки, область под отдельный резистор по площади должна быть пропорциональна коэффициенту формы резистора. Форма резистора зависит от конкретной ситуации, возникающей при предварительной планировке.

3. Форма элементов проводниковой связи.

Рекомендуются элементы проводниковой связи вместе с контактными площадками выполнять в системе прямоугольных координат Г-, Т-, Z- и П-образной формы.

4. Минимальный зазор между пленочными элементами.

Для фотохимического метода изготовления затеняющих трафаретов минимум зазора (минимальная перемычка) составляет 1-2 толщины материала трафарета: $d \geq (1-2)t$, где t - толщина трафарета. Ширина перемычки, превышающая утроенную толщину трафарета, допускается при общей длине перемычки не более $(30 - 40) t$. С увеличением длины перемычки ее ширина (зазор) возрастает. Для фотонегативов пределом является их разрешающая способность, которая составляет десятки микрон. Предельные расстояния зависят также от ошибки в совмещении одного слоя пленки с другим и от оптических и диффузионных факторов, например, от подпыления при нанесении пленок через затеняющие трафареты.

После предварительной планировки производится расчет резисторов сложной формы, затем всех остальных резисторов. Все резисторы должны иметь по возможности максимальную площадь.

Распределение пленочных элементов в плоскости должно быть равномерно насыщенным, т. е. в топологической структуре микросхемы не должно быть мест явной скученности или разряженности элементов. Минимальные зазоры между элементами должны быть одинаковыми - не слишком узкими и не слишком широкими. Отношение широкого зазора к узкому должно быть в пределах двух. Линии контура элементов должны быть предельно простыми. Излишки площади на подложке должны использоваться для улучшения технических характеристик и снижения чувствительности топологической структуры ГИС к несовершенству технологии изготовления. Средства к тому - увеличение контактных площадок и зазоров между элементами, упрощение формы элементов и т. д.

При наличии в принципиальной электрической схеме элементов R и C, взаимно шунтирующих друг друга, и при отсутствии возможности контролировать каждый элемент в отдельности в топологической структуре предусматриваются разрывы, которые после контроля перекрываются каплями припоя, перемычками или проводящими смолами.

При планировке и определении контуров пленочных компонентов микросхемы, расположенных в одном слое, элементы контуров следует располагать по возможности на одной линии: вертикальные - на вертикальных линиях, горизонтальные - на горизонтальных (рис.2.1). Этим достигается минимизация размеров цепей в слое.

Для навесных деталей, таких как микротранзисторы, микродиоды и другие, располагаемых на свободных от пленочных элементов местах подложки, делаются метки, обозначающие расположение (приклейку) этих элементов на подложке. Форма меток может повторить форму соответствующих микроэлементов, а ее ориентация должна соответствовать топологической структуре микросхемы.

Простановка размеров на чертеже слоя производится проведением абсцисс и ординат в системе прямоугольных координат X и Y через соответствующие элементы контуров, составляющих рисунок слоя. Против каждой ординаты и абсциссы ставится число, обозначающее расстояние в миллиметрах от начальной нулевой координаты. Местоположение нулевой координаты является ключом к ориентации слоев относительно друг друга. Принцип простановки размеров представлен на рис.2.1

Контур и размеры диэлектрической пленки можно не ограничивать необходимыми величинами для данного конденсатора или группы конденсаторов: диэлектрический слой может покрывать также требующие защиты пленочные элементы. При этом возможно одним трафаретом наносить диэлектрический слой пленки для конденсаторов и защитный слой всей микросхемы.

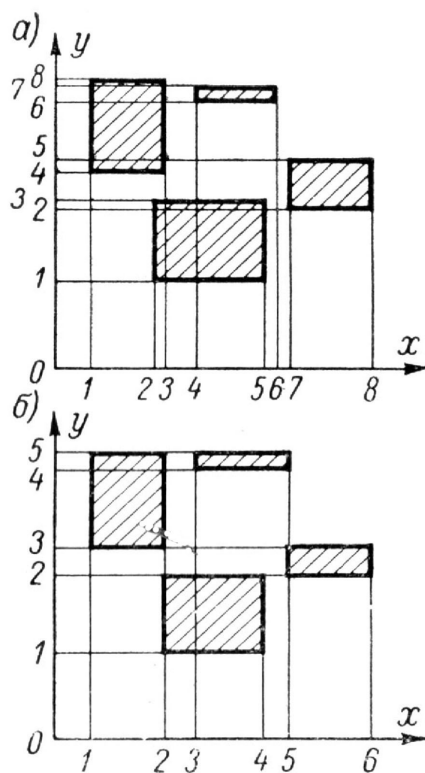


Рис.2.1. Схема расположения пленочных элементов на микроплате:

а- не рекомендуемое расположение, б - рекомендуемое

3. ПЛЕНОЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Пленочные элементы, такие как резисторы, конденсаторы, индуктивности, проводники, линии с распределенными параметрами и другие, находят широкое применение в конструкциях интегральных схем и микросборок.

3.1. Пленочные интегральные резисторы

Конструкция пленочных резисторов должна учитывать особенности топологической структуры функционального пленочного 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.

Электрические характеристики и величины номинала зависят от конструкции резистора, материала подложки, резистивной пленки и контактных площадок, а также в сильной степени от технологии изготовления.

Наиболее распространенным является метод термического испарения в вакууме, достоинства которого заключаются в следующем:

1. Возможность получения резистивных пленок с широки диапазоном изменения удельного поверхностного сопротивления.
2. Относительная простота технологического контроля, обеспечивающая хорошую воспроизводимость номиналов резистора.
3. Совместимость технологических процессов получения резистивных, проводящих и диэлектрических пленок.
4. Высокая производительность при напылении тонкопленочных элементов.

При получении тонких пленок тугоплавких металлов, сплавов и окислов используются такие способы как катодное ионно-плазменное распыление, осаждение из газовой и паровой фазы. Широкий диапазон изменения номиналов резисторов, используемых в пленочных микросхемах, вызывает необходимость применять материалы резистивных пленок с различными удельными поверхностными сопротивлениями, которые могут обеспечить 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), отсутствие взаимодействия резистивной пленки с подложкой и пленками других материалов (табл.3.1 «Основные параметры материалов тонкопленочных резисторов»).

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

1. Минимальное переходное сопротивление между резистивными пленками и контактами.
2. Хорошую адгезию контактной площадки к подложке.
3. Равномерное распределение линий тока в контактном переходе.

4. Отсутствие выпрямляющего контакта между материалами резистивной пленки и контактной площадкой.
5. Химическую инертность материалов друг к другу.
6. Хорошие условия для присоединения навесных проводников к тонкой пленке контактной площадки.

Таблица 3.1.

Основные параметры материалов тонкопленочных резисторов

Наименование материала	ρ_s , Ом/Å	Диапазон значений сопротивлений, Ом	$TKR \cdot 10^4$, град ⁻¹ в интервале $\Delta T = (-60 - +125)^\circ C$	Максимально допустимая удельная мощность рассеяния P_0 , Вт/см ²
Сплав РС – 3001	800 – 3000	50 – 30000	0,2	2
Сплав РС – 3710	100 – 2000	10 – 20000	2 – 5	2
Сплав РС – 1714	50 – 500	5 – 5000	7 – 10	-
Сплав РС – 4206	200 – 2000	20 – 20000	2	-
Сплав РС – 5406	5 – 100	0,5 – 1000	0,5	-
Кермет К-50С	1000 – 10000	100 – 100000	- 5 - +3	2
КС – 500	1000 – 3000	100 – 30000	0,5	-
Специальный сплав № 3 ОЖО.021.010.ТУ	350 – 500	100 – 50000	2	2
Нихром	50 – 300	5 – 3000	2,5	-
Тантал ТВЧ	10 – 100	1 – 1000	- 2	3
Хром	500	50 – 30000	0,6	1
Сплав	500	50 - 30000	± 2	2

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, марганца. Основной слой контактной площадки напыляется из материала с высокой проводимостью (алюминий, медь, золото) на подслон 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 резистив-

ной пленки (табл. 3.2. «Технические характеристики пленочных контактных площадок и проводников»).

Таблица 3.2.

Технические характеристики пленочных контактных площадок и проводников

Название слоя	Материал	Толщина, Нм	R_0 , Ом	Рекомендуемый способ контактирования
Слой	Алюминий А -99	300 - 600	0,08 – 0,16	Пайка
Подслой Слой	Нихром х20н80 Алюминий А -99	10 – 30 300 – 600	0,08 – 0,16	Пайка, сварка
Подслой Слой Покры- тие	Нихром х20н80 Алюминий А – 99 Никель	40 – 50 250 – 350 50	0,1 – 0,2	Пайка, сварка
Подслой Слой Покры- тие	Нихром х20н80 Медь МВ Никель	10 – 30 600 – 800 80 – 120	0,02 – 0,04	сварка
Подслой Слой Покры- тие	Нихром х20н80 Медь МВ Серебро Ср 999,9	10 – 30 400 – 1000 80 – 100	0,02 – 0,04	Пайка, сварка
Подслой Слой Покры- тие	Нихром х20н80 Медь МВ Золото Зл 999,9	10 – 30 600 – 800 50 - 60	0,02 – 0,04	Пайка, сварка
Подслой Слой	Нихром х20н80 Золото Зл 999,9	10 – 30 600 - 800	0,03 – 0,04	Пайка, сварка

На рис. 3.1 представлены конструкции тонкопленочных и толстопленочных резисторов. Введем конструкторские размеры резисторов: l – длина, b – ширина, d – толщина, δ – величина перекрытия пленочных слоев, которая, в свою очередь, зависит от технологии изготовления.

Тогда сопротивление резистора равно

$$R = \rho_v \cdot \frac{l}{d \cdot b}, \quad (3.1)$$

где ρ_v – удельное объемное электрическое сопротивление материала резистора, размерность которого есть [Ом · см].

Обозначим

$$\rho_v / d = \rho_s \quad (3.2)$$

и назовем этот параметр удельным поверхностным сопротивлением пленочного резистора.

Введем понятие коэффициента формы пленочного резистора K_ϕ

$$K_\phi = l / b \quad (3.3)$$

Тогда формулу (3.1) с учетом (3.2) и (3.3) запишем в виде

$$R = \rho_s \cdot K_\phi \quad (3.4)$$

Из выражения (3.4) следует

$$\rho_s = \frac{R}{K_\phi} = \frac{R \cdot b}{l} \quad (3.5)$$

Если резистор квадратной формы, то $b = l$ и $R = \rho_s$. Таким образом получается, что размерность ρ_s есть [Ом] или Ом/□. Последнее выражение размерности показывает, что ρ_s численно равно сопротивлению резистора квадратной формы и не зависит от размера квадрата.

Основными электрическими параметрами пленочного резистора являются:

R [Ом], ρ_s , K_ϕ и температурный коэффициент сопротивления α_R , равный

$$\alpha_R = \text{ТКС} = \frac{1}{R} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta T} [\text{град}^{-1}],$$

где ΔR - изменение сопротивления под действием изменения температуры ΔT .

Важным параметром является также максимальная удельная мощность рассеяния P_0 , равная

$$P_0 = \frac{P_{\max}}{l \cdot b} [\text{мВт/мм}^2],$$

где $P_{\max}$ – максимальная мощность, которую может рассеять резистор, не разрушаясь.

3. 2. Расчет тонкопленочных резисторов

Исходными для расчета пленочных резисторов данными являются:

- номиналы резисторов R , входящих в заданную электрическую схему;
- допуски на номиналы γ_R ;
- диапазон рабочих температур $\Delta T = T_{\max} \sim T_{\min}$;
- точность выполнения линейных размеров Δb , мкм;
- технологические ограничения;
- мощность рассеяния на каждом резисторе P_i .

В зависимости от заданной точности изготовления резисторов выбирают тот или иной метод формирования их конфигурации. В частности, при $\gamma_R \geq 10\%$ можно воспользоваться масочным методом, а при $\gamma_R \leq 5\%$ - фотолитографическим. Выбрав метод формирования конфигурации, определяют Δl , Δb и технологические ограничения. Максимальные значения рассеиваемых на каждом резисторе мощностей берутся по результатам расчета, исходя из заданного электрического режима работы схемы.

Рекомендуется следующая последовательность проведения расчета.

1. Определяется отношение ($R_{\max} / R_{\min}$) в схеме. Если данное отношение превышает 50, то в некоторых случаях целесообразно изготавливать резисторы из двух различных материалов. Для этого резисторы, входящие в состав данной схемы, разбивают на две группы так, чтобы $R_{\max}$ первой группы было меньше, а

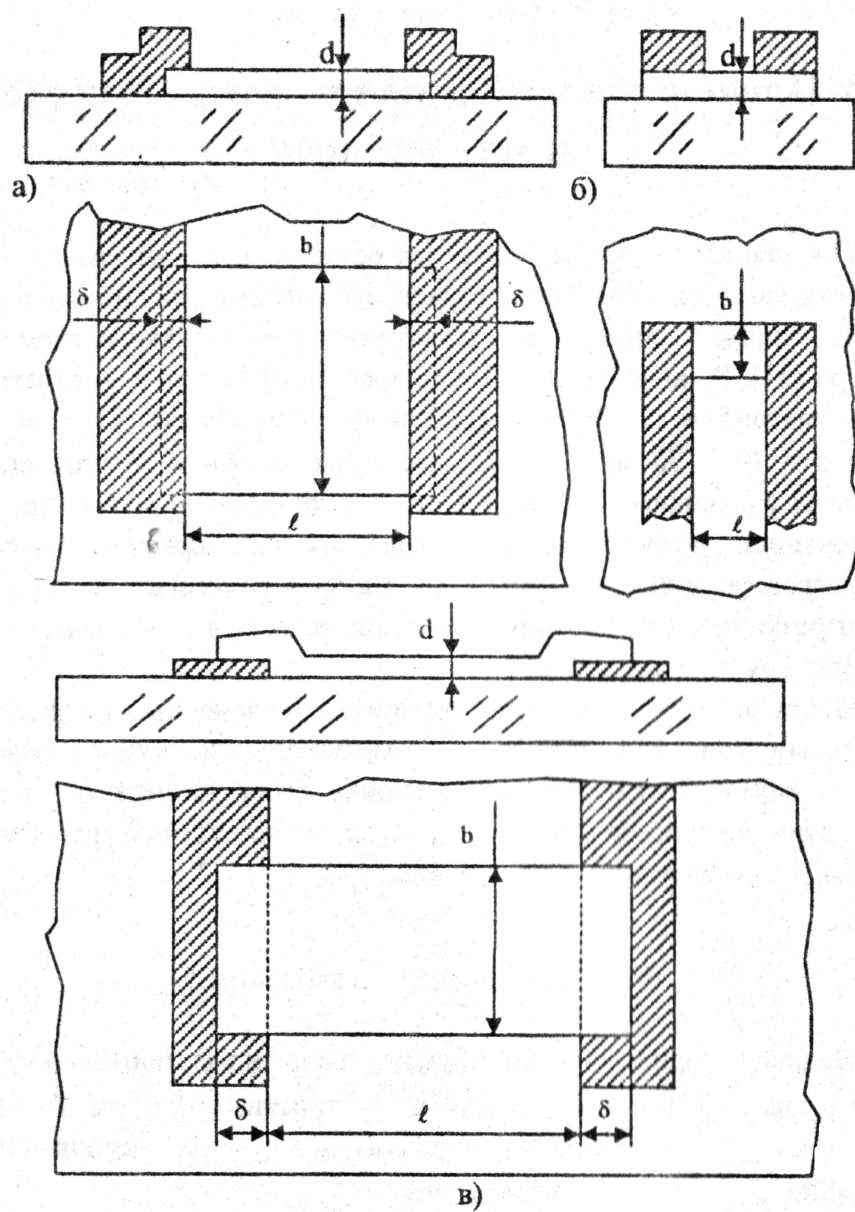


Рис. 3.1. Конструкции резисторов:
тонкопленочных – масочного (а) и фотолитографического (б),
толстопленочного резистора – в.

$R_{\min}$ второй группы - больше значения сопротивления, численно равного удельному электрическому сопротивлению, определяемому как

$$\rho_{s\text{ опт}} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n R_i\right) / \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}\right)}, \quad (3.6)$$

где R_i - номинал i -го резистора; n - число резисторов в схеме.

После разбивки по формуле (3.6) рассчитывают $\rho_{s\text{ опт}}$ для каждой группы резисторов в отдельности. Если же отношение $(R_{\max} / R_{\min}) \leq 50$, то рекомендуется все резисторы выполнять из одного материала.

2. Выбирается материал резистивной пленки (см. табл. 3.1) с удельным электрическим сопротивлением ρ_s , ближайшим к вычисленному $\rho_{s\text{ опт}}$, с учетом рекомендуемого диапазона номинальных значений резисторов. При этом необходимо, чтобы температурная погрешность была мала, а удельная мощность рассеяния P_0 велика.

3. Рассчитываются погрешности.

Суммарная относительная погрешность γ_R может быть представлена как сумма относительных погрешностей

$$\gamma_R = \gamma_{K\Phi} + \gamma_{\rho s} + \gamma_{RT} + \gamma_{CT} + \gamma_K \quad (3.7)$$

здесь $\gamma_{K\Phi}$ - погрешность коэффициента формы; $\gamma_{\rho s}$ - погрешность воспроизведения удельного электрического сопротивления резистивной пленки, в первом приближении можно определить $\gamma_{\rho s} \approx 0,5 \gamma_R$; γ_{RT} - температурная погрешность; γ_{CT} - погрешность, связанная со старением пленки; γ_K - погрешность переходных сопротивлений контактов.

Две последние составляющие формулы (3.7) важны для прецизионных резисторов и составляют в среднем не более 1 – 2 %.

Температурная погрешность равна

$$\gamma_{RT} = a_R \cdot \Delta T, \quad (3.8)$$

где a_R - температурный коэффициент сопротивления материала пленки, его значение определяется выбранным материалом пленочного резистора (см. табл.3.1); ΔT задано.

Рассчитывается $\gamma_{K\Phi}$

$$\gamma_{K\Phi} = \gamma_R - \gamma_{\rho s} - \gamma_{RT} - \gamma_{CT} - \gamma_K \quad (3.9)$$

4. Определяется коэффициент формы $K_{\Phi i}$ каждого резистора

$$K_{\Phi i} = R_i / \rho_s$$

где R_i - номинал i -го резистора.

Если $1 < K_{\Phi} \leq 10$, то резистор рекомендуется выполнять прямоугольной формы, длина l которого больше ширины b . При $0,1 \leq K_{\Phi} < 1$ - то же, но $l < b$; если $10 \leq K_{\Phi} \leq 50$, то резистору придают форму меандра. Конструкции резисторов с $K_{\Phi} < 0,1$ занимают большие площади на подложке и поэтому не рекомендуются. Наиболее распространенные конструкции пленочных резисторов схематично показаны на рис.3.2.

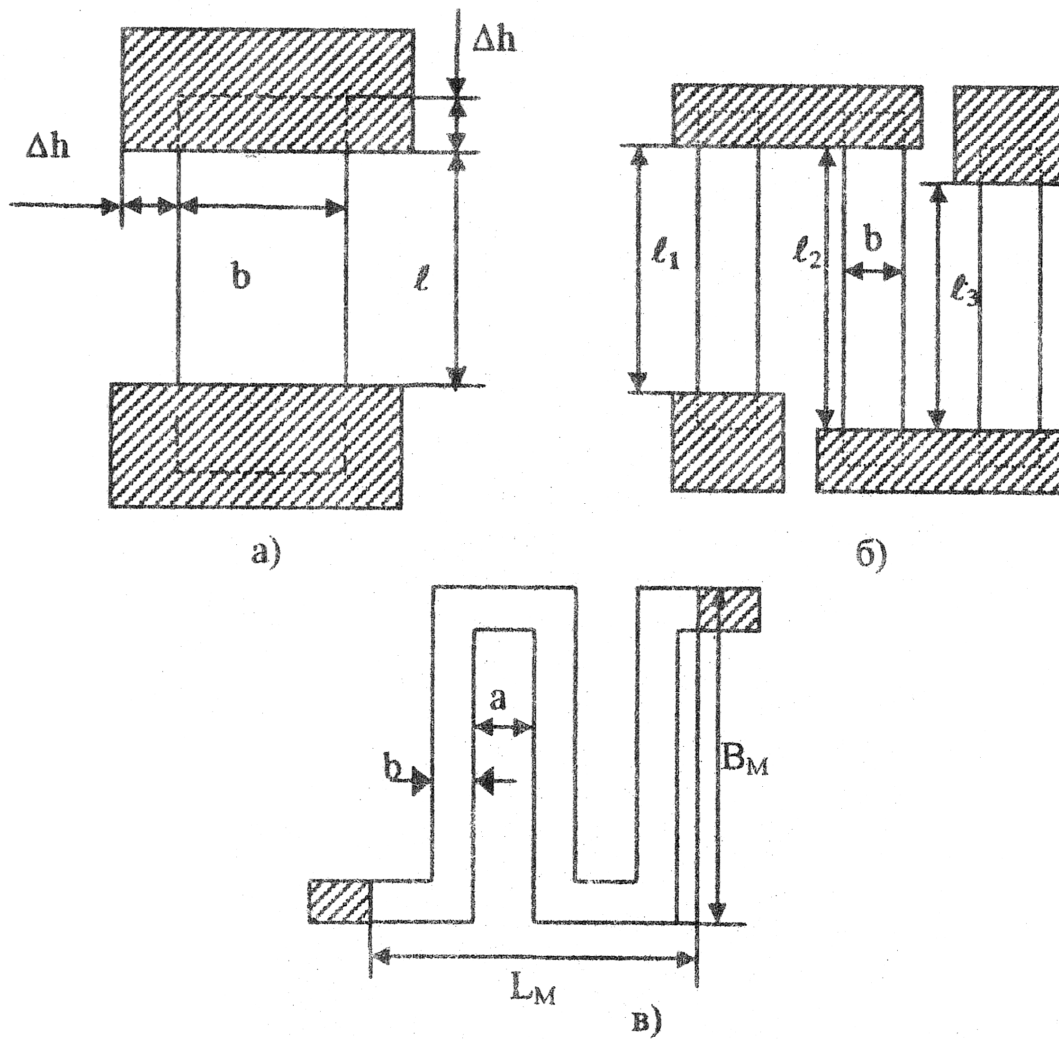


Рис. 3.2. Конфигурации наиболее распространенных пленочных резисторов:
 а – прямоугольной формы, б – в виде нескольких полосок, в - меандр

5. Определяется ширина резисторов, имеющих $K_\Phi > 1$. Расчетное значение ширины каждого резистора $b_{\text{расч}}$

$$b_{\text{расч}} \geq \max (b_{\text{техн}} , b_{\text{точн}} , b_P), \quad (3.10)$$

здесь $b_{\text{техн}}$ – минимальное значение ширины, определяемое технологическими факторами; $b_{\text{точн}}$ определяется заданной точностью изготовления; b_P – значение ширины, обеспечивающее необходимую мощность рассеяния

$$b_{\text{точн}} \geq [(\Delta b + \Delta l / K_\Phi)] / \gamma_{K\Phi} , \quad (3.11)$$

где K_Φ берется в долях единицы;

$$b_P = \sqrt{\frac{P_{\text{рас}}}{P_0 \times K_\Phi}} , \quad (3.12)$$

здесь P_0 – допустимая удельная мощность рассеяния резистора;

$P_{\text{рас}}$ – мощность, рассеиваемая на резисторе.

За ширину резистора b принимают ближайшее к $b_{\text{расч}}$ большее значение, кратное шагу координатной сетки H , принятому для чертежа топологии. Рекомендуется выбирать $H = 0,01$ мм

6. Определяется длина резисторов, имеющих $K_\Phi \geq 1$.

Расчетное значение $l_{\text{расч}}$ для каждого резистора с $K_\Phi > 1$.

$$l_{\text{расч}} \geq \max (l_{\text{техн}} , l_{\text{точн}} , l_P),$$

$$l_{\text{точн}} = (\Delta l + \Delta b \cdot K_\Phi) / \gamma_{K\Phi}$$

$$l_P = \sqrt{\frac{P_{\text{рас}} \times K_\Phi}{P_0}} \quad (3.13)$$

За длину резистора принимают ближайшее к $l_{\text{расч}}$ большее значение, кратное H .

7. Определяется ширина резистора с $K_\Phi < 1$.

Расчетное значение ширины каждого резистора определяется по формуле

$$b_{\text{расч}} = l / K_\Phi \quad (3.14)$$

Полученные значения $b_{\text{расч}}$ округляются в большую сторону с точностью до H . Таким образом получают b каждого резистора.

8. Определяется длина резисторов с $1 \leq K_\Phi \leq 10$.

Расчетное значение длины резисторов прямоугольной формы определяется по формуле

$$l_{\text{расч}} = b \cdot K_\Phi \quad (3.15)$$

За длину резистора l принимают ближайшее к $l_{\text{расч}}$ значение, кратное H .

При использовании конструкции, показанной на рис. 3.2.б, сумма длин резистивных полосок должна равняться длине $l_{\text{расч}}$, определенной по приведенной выше формуле.

9. Рассчитываются геометрические размеры резисторов с $K_\Phi > 10$.

Размеры пленочного резистора типа меандр приведены на рис. 3.3.

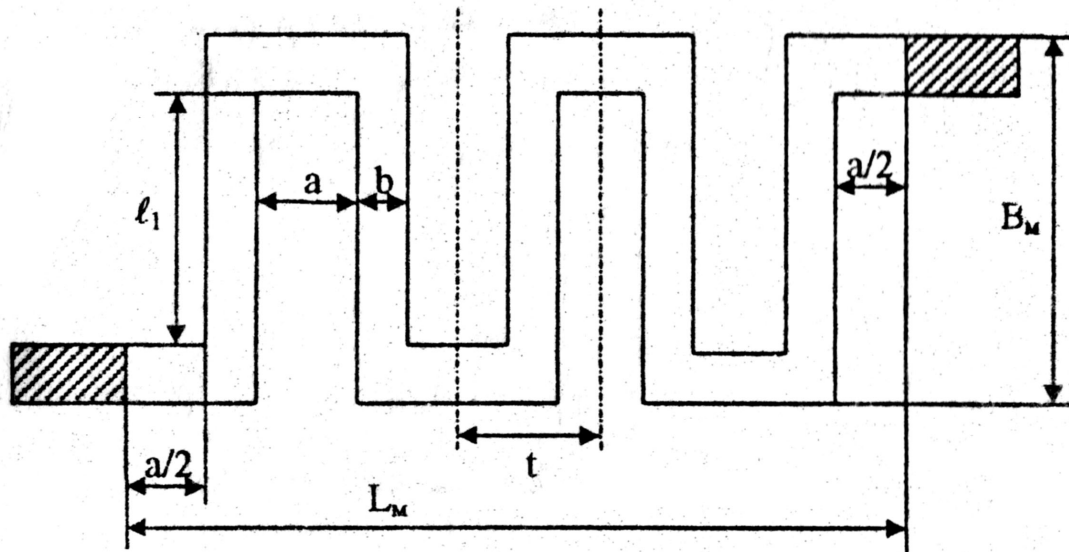


Рис. 3.3. Размеры пленочного резистора типа меандр.

Условные обозначения: b – ширина резистора; a – расстояние между резистивными полосками; t – шаг одного звена меандра, равный $t = a + b$; L_M – длина контура меандра; B_M – ширина контура меандра; l_{cp} – длина средней линии меандра; $n = L_M / t$ – число звеньев меандра

Расчет меандра ведется после определения ширины b резистора в следующей последовательности:

- определяется длина средней линии l_{cp} как $l_{cp} = b \cdot K_\Phi$
- задается расстояние a с учетом технологических ограничений при масочном методе формирования конфигурации $a_{\min} = 200$ мкм, при фотолитографическом $a_{\min} = 25$ мкм. Обычно выбирают $a = b$;
- определяется оптимальное число звеньев $n_{\text{опт}}$ при условии, что площадь, занимаемая меандром, минимальна. Это достигается в том случае, когда меандр вписывается в квадрат

$$n_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{a^2}{4t^2} + \frac{l_{cp}}{t} - \frac{a}{2t}} \quad (3.16)$$

Если отношение $(l_{cp} / b) \geq 10$, то вместо приведенной формулой пользуются приближенной формулой

$$n_{\text{опт}} = \sqrt{l_{cp} / t} \quad (3.17)$$

Вычисленную величину $n_{\text{опт}}$ округляют до ближайшего целого.

- определяется длина меандра

$$L = n(a + b) \quad (3.18)$$

- определяется ширина меандра

$$B = \frac{l_{cp} - a \cdot n}{n} \quad (3.19)$$

Расстояние a выбирается из конструктивных соображений. Оно должно удовлетворять условию: $(B - b) / a \leq 10$. Если это условие не выполняется, то необходимо изменить величину a и вновь вычислить $n_{\text{опт}}$, L и B .

е) выполняется коррекция размеров меандра с учетом того, что в резисторах типа меандр плотность тока в участках изгибов неравномерна.

Суть коррекции заключается в условной разбивке фигуры меандра на ряд последовательно включенных сопротивлений прямолинейных участков и сопротивлений уголков (изгибов)

$$R = R_{\text{и}} m + \frac{l_{\Sigma}}{b} \times \rho_s \quad (3.20)$$

где $R_{\text{и}}$ - сопротивление изгиба; m - число изгибов; l_{Σ} - суммарная длина прямолинейных участков.

Для изгибов под прямым углом, показанных на рис. 3.3, сопротивление $R_{\text{и}}$

$$R_{\text{и}} = 0,55 \cdot \rho_s$$

Расчетная длина прямолинейных участков резистора определяется как

$$\Sigma = \frac{R - mR_{\text{и}}}{\rho_s} \times b \quad (3.21)$$

Величина l_1 на рис. 3.3 определяется по формуле

$$l_1 = \frac{l_{\Sigma} - na}{n} \quad (3.22)$$

Окончательные искомые размеры меандра (см. рис.3.3.) L_M и B_M равны

$$B_M = l_1 + 2b$$

$$L_M = n \cdot b + n \cdot a.$$

10. Рассчитываются площади, занимаемые резисторами.

Для резистора прямоугольной формы

$$S = (1 + 2\Delta h) \cdot b, \quad (3.23)$$

для резистора типа меандр

$$S_M = (L_M + 2\Delta h) \cdot B_M, \quad (3.24)$$

где h - размеры перекрытий элементов, расположенных в разных слоях.

3.3. Пленочные переходные контакты и межсоединения

3.3.1. Конструирование пленочных переходных контактов.

Разновидности конструкций пленочных переходных контактов, формируемых к резисторам методом напыления через маски или методом фотолитографии, показаны на рис. 3.4. Минимальное сопротивление таких контактов определяется по следующей формуле:

$$R_{\kappa \min} = \frac{\sqrt{\rho_{\kappa \text{в}} \rho_{\kappa}}}{b}, \quad (3.25)$$

где $\rho_{\kappa \text{в}}$ – сопротивление квадрата резистивной пленки, Ом/кв; ρ_{κ} – удельное переходное сопротивление квадрата, Ом·мм²; $\rho_{\kappa} = 0,05 - 0,25$ Ом·мм² при получении контакта на многопозиционных вакуумных установках, позволяющих проводить цикл напылений без разгерметизации установок; $\rho_{\kappa} = 2,5 - 5$ Ом·мм² при создании контакта на нескольких установках (с разгерметизацией); b – ширина тонкопленочного резистора, мм (конструктивные параметры пленочных контактов указаны на рис. 3.5).

Максимально допустимую величину сопротивления пленочного переходного контакта вычисляют по формуле

$$R_{\kappa. \text{дон}} = \frac{\gamma_{R\kappa} R}{2}, \quad (3.26)$$

где R – сопротивление резистора, Ом; $\gamma_{R\kappa}$ – относительная погрешность сопротивления резистора, обусловленная образованием переходных контактов, % (величина $\gamma_{R\kappa}$ выбирается равной 1 – 3 % и в дальнейшем уточняется).

Затем проверяется выполнение условия

$$R_{\kappa \min} < R_{\kappa. \text{дон}}.$$

Если окажется, что данное условие не выполняется, то необходимо уменьшить значение $R_{\kappa \min}$ за счет увеличения ширины резистора. В этом случае находят применение гантелевидные резисторы (рис. 3.4).

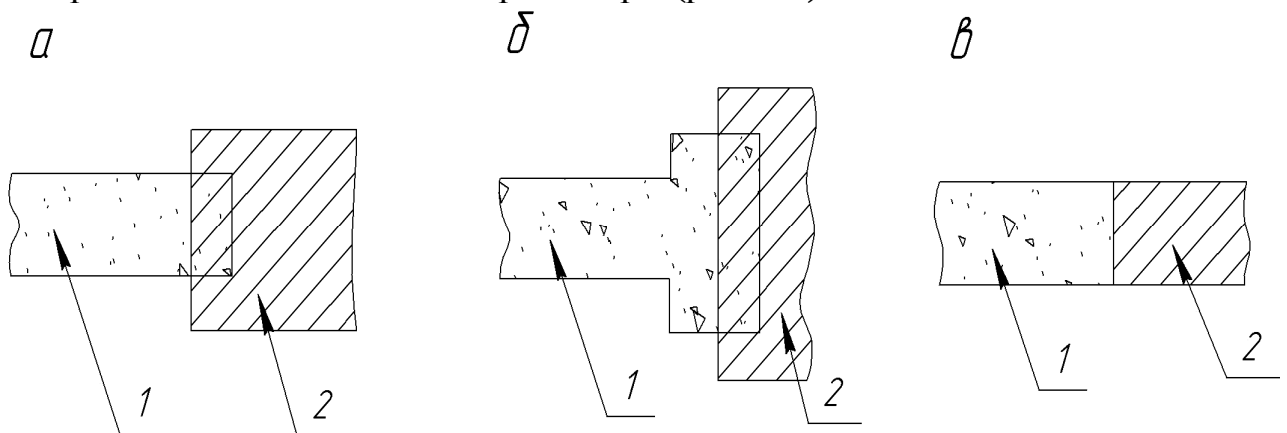


Рис. 3.4. Разновидности конструкций пленочных переходных контактов, формируемых различными методами: а, б – напыление через маски; в – фотолитография; 1 – резистивная пленка; 2 – контактная площадка.

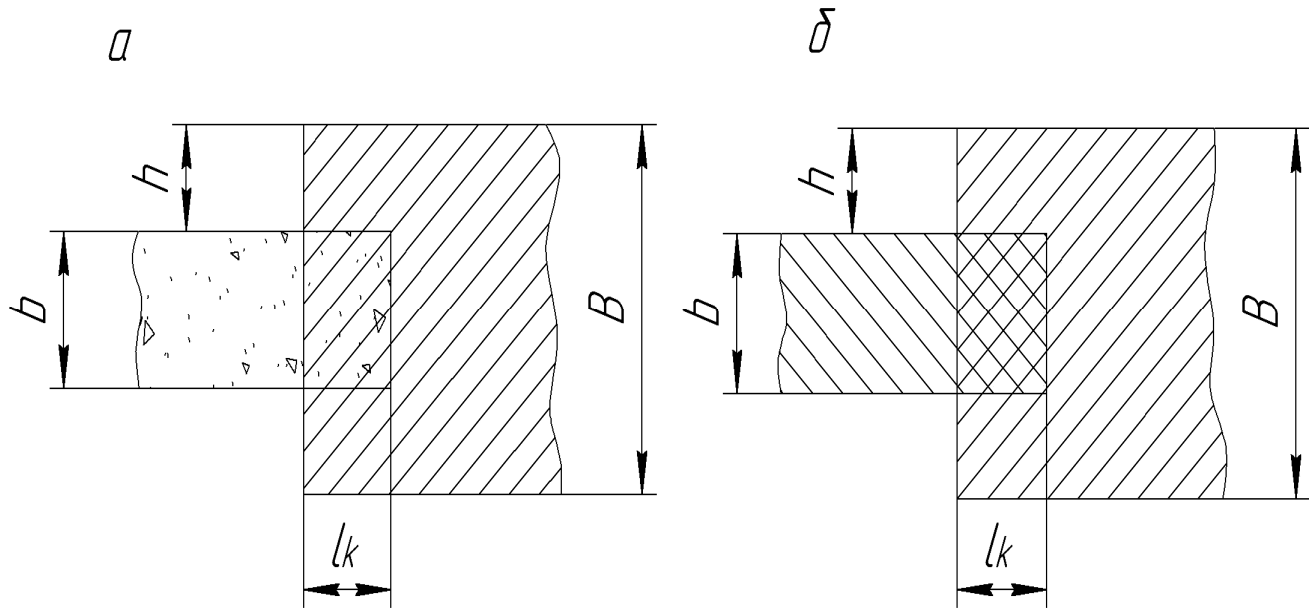


Рис. 3.5. Конструктивные параметры пленочных переходных контактов к резистивной (а) и проводящей (б) пленкам:
 b – ширина пленки; h – величина перекрытия;
 l_k – длина переходного контакта; B – ширина переходного контакта.

Минимальная длина переходного контакта определяется по формуле

$$l_{k \min} \geq 1,5 \sqrt{\frac{\rho_k}{\rho_{kv}}} \quad (3.27)$$

В заключение вычисляют полную длину переходного контакта и ширину проводящей пленки (рис.3.5, а):

$$l_k \geq l_{k \min} + \Delta l + \eta;$$

$$B \geq b + 2(\Delta b + \eta),$$

где Δb и Δl – погрешности изготовления масок, мм; η – погрешность установки масок и их совмещения при напылении переходных контактов, мм.

Величина перекрытия h (рис. 3.5) определяется суммой значений Δb и η , однако для масочного метода изготовления контактов $h \geq 0,2$ мм.

Для упрощения вычислений по формуле (3.27) можно воспользоваться номограммой, представленной на рис. 3.6.

В случае контакта двух проводящих пленок (рис. 3.5, б)

$$R_{k \min} = \rho'_{kv} \frac{l_k}{b} + \frac{\rho_k}{bl_k}, \quad (3.28)$$

где ρ'_{kv} – сопротивление квадрата проводящей пленки, Ом/кв; l_k – длина переходного контакта, мм.

Остальные конструктивные параметры переходного контакта (рис. 3.5, б) определяют аналогично параметрам контакта между проводящей и резистивной пленками.

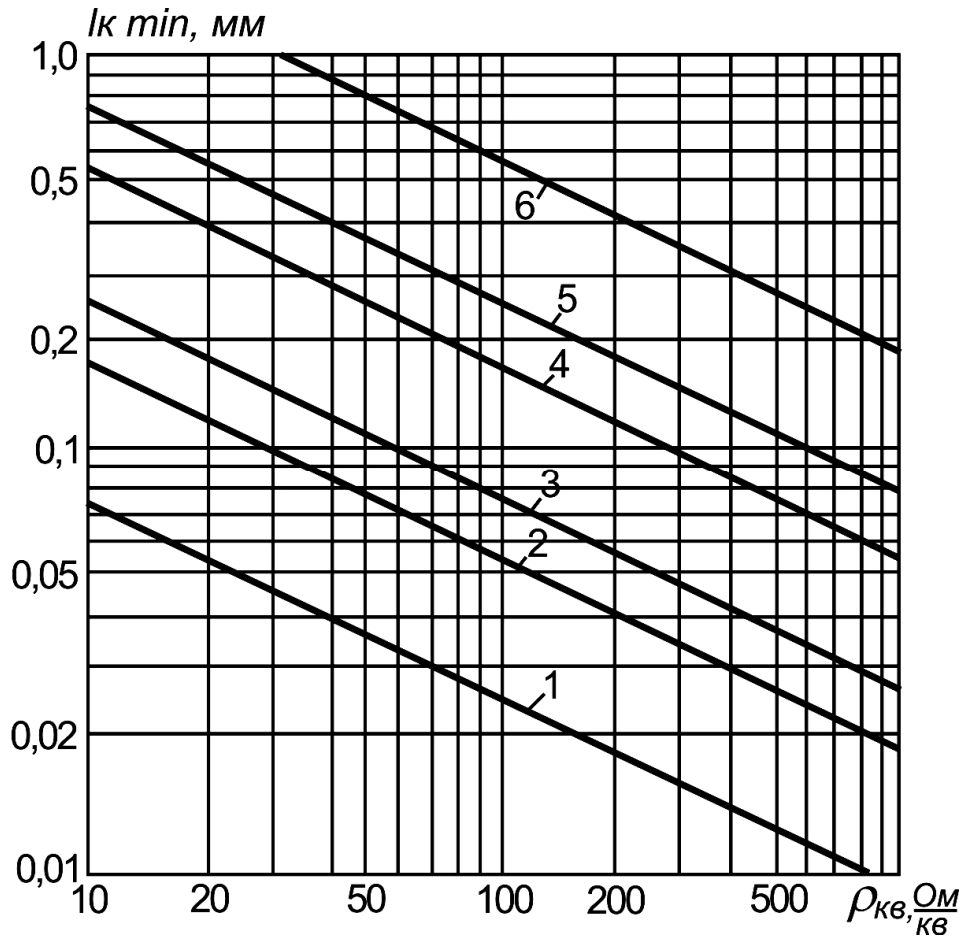


Рис. 3.6. Номограмма для определения минимальной длины $l_{k min}$ пленочного переходного контакта в зависимости от величины $\rho_{кв}$ резистивной пленки и следующих значений $\rho_{к}$, Ом·мм²:

1 – 0,01; 2 – 0,05; 3 – 0,1; 4 – 0,5; 5 – 1; 6 – 5.

3.3.2. Конструирование пленочных межсоединений

При конструировании гибридных ИМС, имеющих относительно небольшие размеры, сопротивлением пленочных межсоединений можно пренебречь.

Конфигурацию таких межсоединений выбирают в виде полосок минимальной ширины, определяемой возможностями технологии. Если необходимо учесть активное сопротивление пленочных проводников, то при расчете задают либо допустимую величину сопротивления пленочного проводника R , либо допустимую величину падения напряжения U на пленочном проводнике и максимальный ток I , протекающий по этому проводнику.

Геометрические размеры пленочного проводника должны удовлетворять следующему соотношению:

$$\rho_{\text{кв}} \cdot \frac{l}{b} \leq R = \frac{U}{I},$$

где $\rho_{\text{кв}}$ - сопротивление квадрата проводящей пленки, Ом/кв; l — длина проводника, мм; b - ширина проводника, мм.

Конструирование межсоединений можно вести также исходя из допустимой величины плотности тока в пленочных проводниках. Допустимую величину плотности тока принимают $j = 20 \text{ А/мм}^2$.

Собственная емкость C пленочного проводника прямоугольной формы может быть оценена по формуле

$$C = 0,0241 \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} \cdot \frac{l}{\lg \frac{4l}{b}} [нФ],$$

где ϵ_1 и ϵ_2 - диэлектрические проницаемости соответственно окружающей среды и материала подложки.

Собственная индуктивность L пленочного проводника прямоугольной формы может быть найдена по формуле

$$L = 0,002l \left(2,3 \lg \frac{2l}{b} + 0,2235 \frac{b}{l} + 0,5 \right) [мкГн].$$

4. РАСЧЕТ ТОЧНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ

Схемное назначение некоторых резисторов требует высокой точности их изготовления, превосходящей технологические возможности современного оборудования для напыления микросхем. В таких случаях при конструировании микросхем применяют специальные пленочные резисторы, сопротивление которых можно изменять после изготовления. Подгонка величины сопротивления может производиться либо скачками – путем удаления заранее предусмотренных шунтирующих перемычек из проводящей или резистивной пленки, либо плавно – путем постепенного удаления части резистивной пленки. В обоих случаях изменить сопротивление можно лишь в сторону его увеличения.

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

Некоторые конструкции подгоняемых тонкопленочных резисторов приведены на рис. 4.1. Наибольшее распространение получили конструктивные формы, изображенные на рис. 4.1, а, в и г.

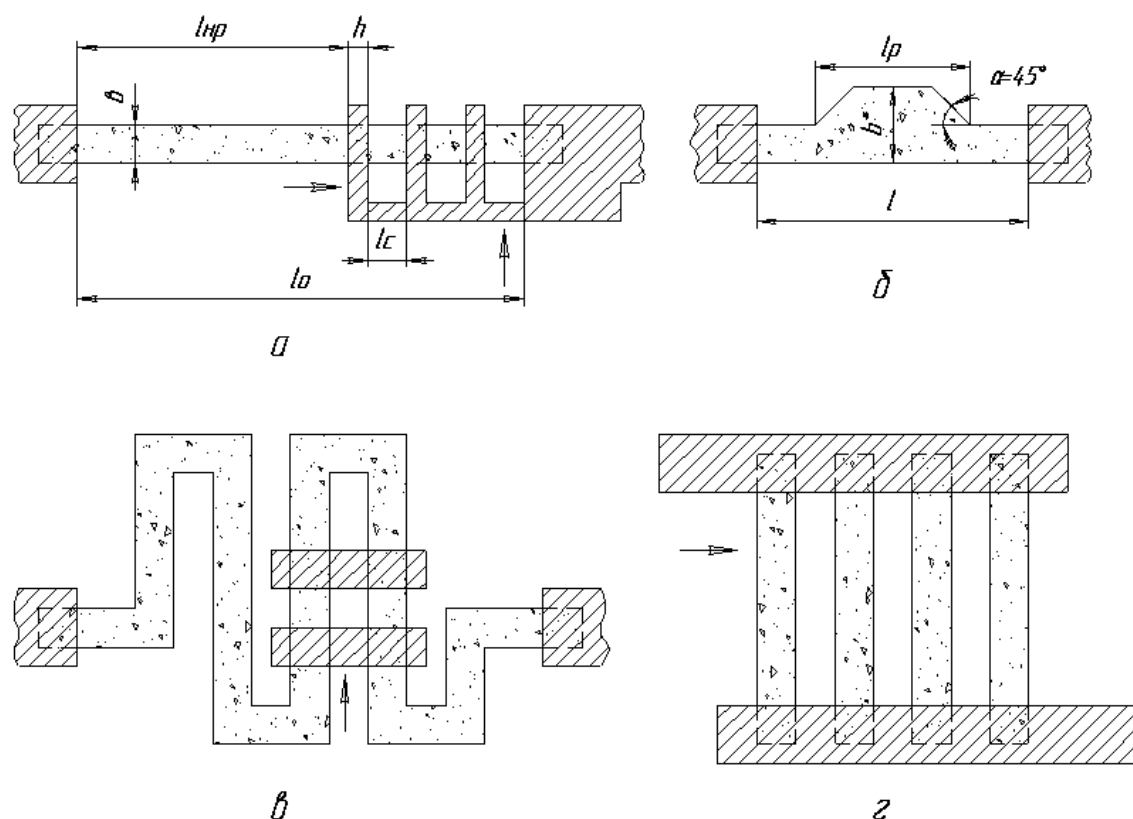


Рис. 4.1. Конструкции подгоняемых тонкопленочных резисторов

4.1. Расчет резисторов со ступенчатой подгонкой

Рассмотрим конструктивный расчет резисторов со ступенчатой подгонкой (рис. 4.1, а). Участок подгонки резистора представляет собой n последовательно включенных секций, закороченных при напылении низкоомной пленкой. Если величина сопротивления резистора при напылении получалось меньше значения, соответствующего нижней границе допуска, подгонка осуществляется последовательным подключением одной или нескольких секций к основному участку резистивной пленки.

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

$$R_{\text{макс}} = R \left(1 + \frac{\gamma_R - \gamma_{Rt} - \gamma_{Rcm}}{100} \right); \quad (4.1)$$

$$R_{\text{мин}} = R \left(1 - \frac{\gamma_R - \gamma_{Rt} - \gamma_{Rcm}}{100} \right). \quad (4.2)$$

Значения сопротивлений, определяемые выражениями (4.1) и (4.2) являются границами диапазона подгонки. При вычислении $R_{\text{макс}}$ и $R_{\text{мин}}$ подразумевалось, что коэффициенты γ_{Rt} и γ_{Rct} 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 $\Delta R = R_{\text{макс}} - R_{\text{мин}}$.

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

Минимальное число n секций подгонки определяется по формуле

$$n = \frac{\gamma_{R_{кв}} + \gamma_{K\phi}}{\gamma_R'}, \quad (4.3)$$

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

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

$$l_{н.р} = \frac{R_{\text{макс}} b_{\text{мин}}}{R_{кв \text{ макс}}} - \Delta l,$$

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

Затем определяется возможное наименьшее сопротивление резистора при наименьшем значении $R_{\kappa\text{в}}$ и наибольшем значении ширины резистора b

$$R_{\text{мин.возм}} = \frac{R_{\kappa\text{в мин}} l_{\text{н.р}}}{b_{\text{макс}}},$$

где $b_{\text{макс}} = b + \Delta b$; $R_{\kappa\text{в мин}} = R_{\kappa\text{в}} \left(1 - \frac{\gamma_{R\kappa\text{в}}}{100} \right)$

Если полученное значение $R_{\text{мин.возм}}$ выходит за пределы допуска, т.е. если $R_{\text{мин.возм}} < R_{\text{мин}}$, то необходимо предусмотреть регулируемый участок, подключение которого могло бы скомпенсировать 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 $R_{\kappa\text{в мин}}$ и $b_{\text{макс}}$

$$l = l_{\text{н.р}} + l_p = \frac{R_{\text{мин}} b_{\text{макс}}}{R_{\kappa\text{в мин}}} + \Delta l(n+1) \quad (4.4)$$

Длина одной секции подгонки равна

$$l_c = \frac{l - l_{\text{н.р}}}{n}$$

Далее необходимо выбрать ширину перемычки h , учитывая технологические возможности изготовления масок и стремясь при этом получить минимальное значение R_{κ} .

Обычно $h = 0,2 - 0,5$ мм.

Длина резистора с учетом перемычек равна

$$l_0 = l + nh.$$

4.2. Расчет резисторов с плавной подгонкой

Плавная подгонка применяется в тех случаях, когда требуется обеспечить узкий допуск на сопротивление резистора. Точность плавной подгонки достигается долей процента. Наиболее приемлемая конструкция резистора с плавной подгонкой изображена на рис. 4.1, 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 b^* 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 γ_R , %;
- сопротивление квадрата пленки $R_{кв}$ и допуск $\gamma_{R_{кв}}$, %;
- ширина резистора b и допуск Δb , 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

$$l = R_{мин} \frac{b_{макс}}{R_{кв мин}}, \quad (4.5)$$

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

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

$$R_{макс.возм} = R_{кв макс} \frac{l}{b_{мин}} \quad (4.6)$$

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

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

$$\gamma_{Rt} + \gamma_{Rct} \leq \gamma_R,$$

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:

1. Вычисляется отношение $R_{макс.возм} / R_{макс}$ и по графикам (рис. 4.2, а) на его основании выбираются (из конструктивно-технологических соображений) отношения $R^*_{макс} / R^*_{мин}$ и $R_{н.р} / R^*_{макс}$. Здесь $R_{н.р}$ – сопротивление нерегулируемого участка резистора, $R^*_{макс}$ и $R^*_{мин}$ – максимальное и минимальное сопротивления участка резистора, на котором есть подстраиваемая секция. $R^*_{макс}$ соответствует сопротивлению этого участка при полностью удаленной подстречной секции. Необходимая степень подгонки может быть обеспечена при различных отношениях $R^*_{макс} / R^*_{мин}$ и $R_{н.р} / R^*_{макс}$.

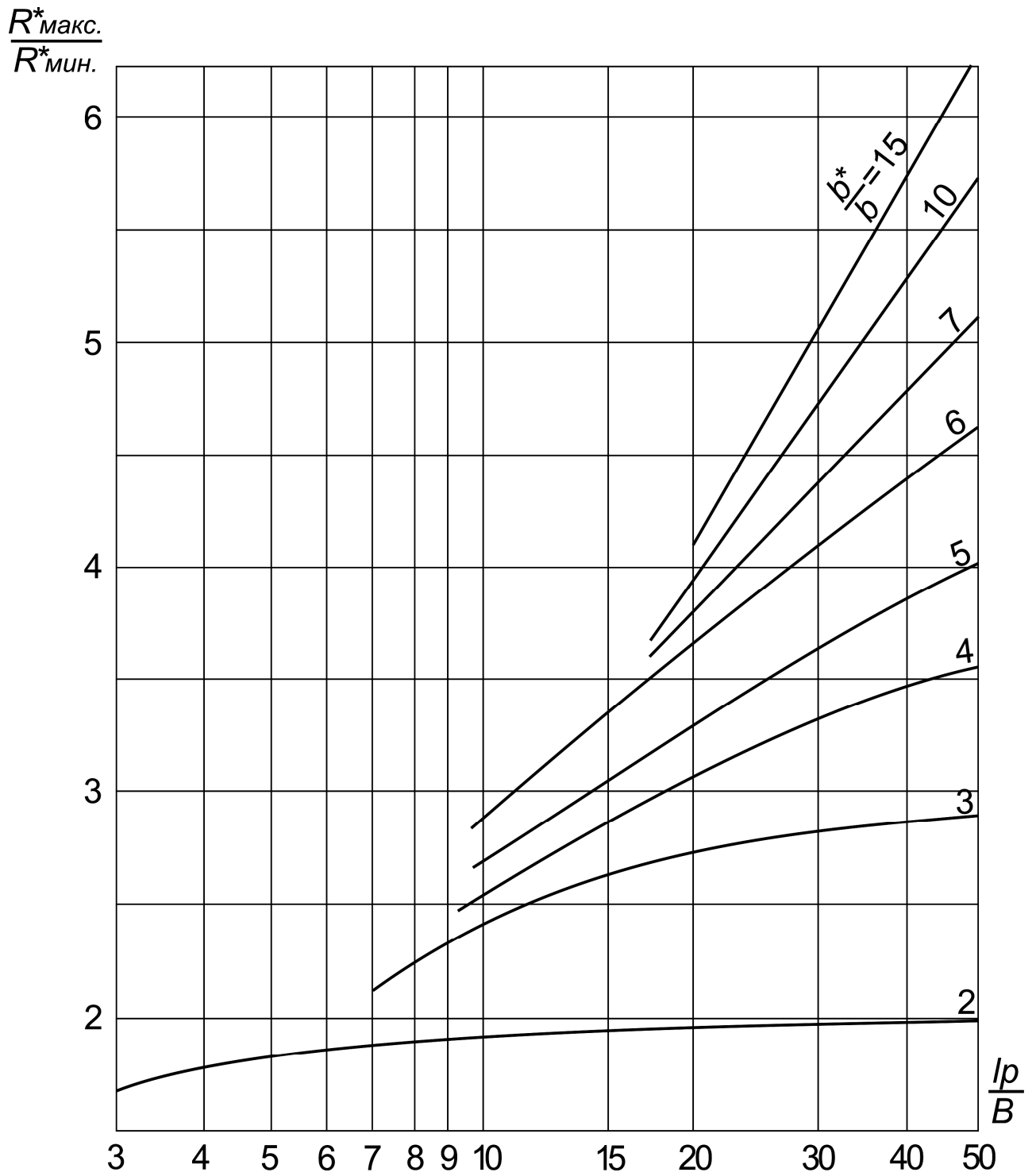


Рис. 4.2, б. Графики для расчета точных подгоняемых резисторов

Нетрудно заметить, что

$$\frac{R_{н.р}}{R_{\max}^*} = \frac{l_{н.р}}{l_p}$$

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

$$l_p = \frac{l}{1 + \frac{R_{н.р}}{R_{\max}^*}} \quad (4.7)$$

2. В зависимости от выбранного отношения $R_{\max}^* / R_{\min}^*$ и отношения l_p / b , которое можно получить, определив из выражения (4.7) величину l_p , по графикам (рис. 4.2,б) находится отношение b^* / b и вычисляется b^* – ширина подстраиваемого участка резистора.

4.3. Оценка сопротивления и индуктивности пленочных проводников

В связи с малой толщиной пленок коммутационные проводники 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 r_δ 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:

$$L = 2l \left(1,35 + 2,3 \lg 2K_\phi + \frac{0,2235}{K_\phi} \right) 10^{-4} \text{ мкГн}, \quad (4.8)$$

где $K_\phi = \frac{l}{b}$ – коэффициент формы проводника; l – длина проводника, мм.

Некоторые параметры соединительных проводников гибридных микросхем, определенные экспериментально, приведены в таблицах 4.1 и 4.2. 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.

Таблица 4.1

Индуктивности и сопротивления пленочных проводников из алюминия на высокой частоте (ВЧ)

l , 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 4.2

Индуктивности и сопротивления соединительных проволочных проводников микросхем на ВЧ

Материал	$\varnothing$, мм	l , 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
		38	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

4.4 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.

Наличие собственных реактивных параметров пленочного резистора в диапазоне сверхвысоких частот позволяет составить модель резистора в виде параллельного колебательного контура. Следовательно, на определенной рабочей частоте возникнет резонанс токов, в результате чего сопротивление резистора, оставаясь чисто активным, резко увеличивается, и микросхема не будет выполнять возложенные на нее определенные функции.

Поэтому важно уметь оценивать изменение сопротивления пленочного резистора на различных частотах.

Относительное изменение сопротивления $\frac{|R_f|}{R_0}$ с учетом только собственной емкости резистора на высокой частоте можно определить по формуле

$$\frac{|R_f|}{R_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega R_0 C_{np})^2}}, \quad (4.9)$$

где $|R_f|$ – модуль сопротивления резистора на частоте f ,

ω – круговая частота,

C_{np} – приведенная емкость, действие которой эквивалентно совместному действию распределенной емкости и сопротивления потерь

$$C_{np} \approx 0,3-0,5 \text{ нФ}.$$

Резистор считается частотно-независимым, 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

$$f_{\text{макс}} \leq \frac{0,1}{R_0 C_{np}},$$

б) для низкоомных

$$f_{\text{макс}} \leq \frac{R_0}{62,8 L},$$

где L – собственная индуктивность резистора.

5. ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Конденсаторы являются широко распространенными элементами пленочных микросхем. По конструктивному признаку тонкопленочные конденсаторы (ТПК) можно разделить на три группы: однослойные, многослойные и гребенчатые.

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. 5.1 «Основные характеристики диэлектрических материалов тонкопленочных конденсаторов».

Кроме материалов, приведенных в этой таблице, для изготовления ТПК могут применяться окислы тантала, двуокись титана, титанат бария и др. Эти материалы имеют большие значения ϵ , чем окись кремния SiO или окись германия GeO и на их основе можно готовить 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 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

Таблица 5.1

Основные характеристики диэлектрических материалов тонкопленочных конденсаторов

Наименование материала	Материал обкладок	Удельная емкость C_0 , пФ / см ²	Рабочее Напряжение U, В	ϵ на частоте $f = 1\text{кГц}$	$\text{tg } \delta$ на $f = 1\text{кГц}$	$U_{\text{пр}} \cdot 10^6$ В/см	$f_{\text{раб}}$, МГц	ТКС, град ⁻¹ В интервале $\Delta T = (-60 \div +125)^\circ \text{C}$
Моноокись кремния	Алюминий А99	5000 – 10000	60 – 30	5 – 6	0,01 - 0,02	2 – 3	500	2
Моноокись германия		5000-15000	10 – 5	11 – 12	0,005 - 0,007	1,0	-	3
Боросиликатное стекло (БСС)		2500 – 15000	24 – 8	4	0,001 – 0,0015	3 – 4	300	0,35
Стекло электровакуумное С41-1		15000 - 40000	12,6 – 6,3	5,2	0,002 – 0,003	3 – 4	300	0,5 – 1,8
Пятиокись тантала	Тантал ТВЧ	60000 – 100000	15 – 10	23	0,02	2	-	4
	Алюминий А99	200000	3					

2500-5000 Å находится в интервале 0,2-0,06 Ом/квadrat. 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.

Конденсаторы с малой величиной емкости рекомендуется проектировать в виде двух пересекающихся проводящих полосок, разделенных слоем диэлектрика.

Желательно, 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 микроплате, не должна превышать 2 см², минимальная площадь ТПК равна 0,5 x 0,5 мм².

Емкость пленочного конденсатора определяется по формуле

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{d} \times S = 0,0885 \frac{\varepsilon}{d} \times S (n\Phi) \quad (5.1)$$

где d - толщина диэлектрика, см; S - площадь перекрытия верхней и нижней обкладок, см², она называется активной площадью конденсатора; ε_0 - электрическая постоянная вакуума; $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; ε - относительная диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика.

Емкость на единицу площади называется удельной емкостью конденсатора C_0

$$C_0 = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 / d = 0,0885 \varepsilon / d \quad (5.2)$$

Конструкция пленочного конденсатора определяется площадью S (возможные варианты конструкции показаны на рис. 5.1).

При $S \geq 5$ мм² используется конструкция рис. 5.1,а, у которой площадь верхней обкладки меньше, чем нижней.

При $1 \leq S \leq 5$ мм² используется конструкция, представляющая собой пересечение пленочных проводников (рис. 5.1, б).

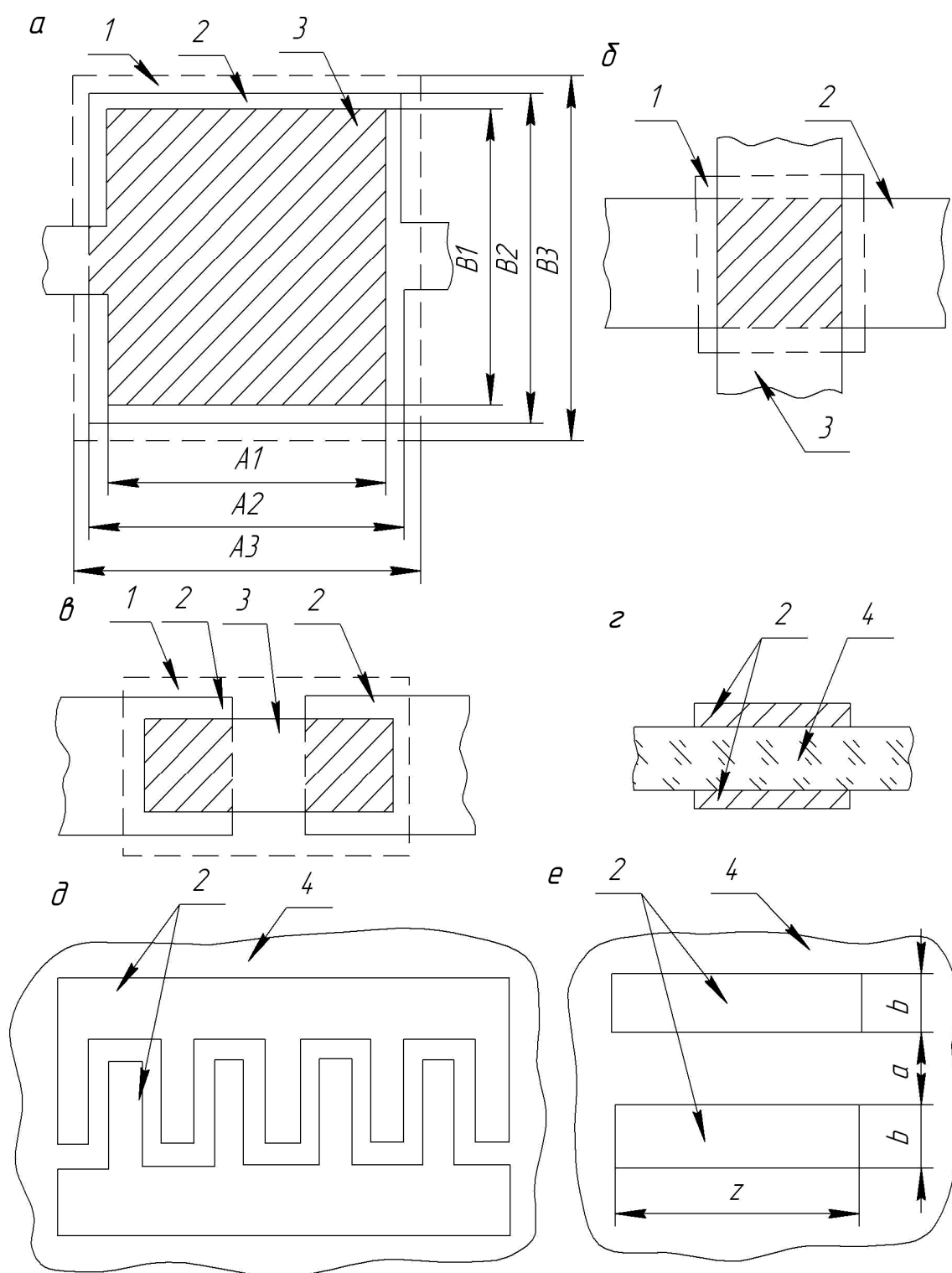


Рис.5.1 . Разновидности конструкций тонкопленочных конденсаторов:
 а – с активной площадью перекрытия обкладок $S > 5 \text{ мм}^2$; б – с $S = 1 - 5 \text{ мм}^2$;
 в, г – с $S < 1 \text{ мм}^2$; д – гребенчатая; е – в виде двух параллельно расположенных
 проводящих пленок; 1 – диэлектрик; 2 – нижняя обкладка; 3 – верхняя
 обкладка; 4 – подложка

При $0,1 \leq S \leq 1 \text{ мм}^2$ используются конструкции, представляющие собой последовательное соединение конденсаторов или конденсатор с диэлектриком - подложкой (рис. 5.1, в, г).

При $S < 0,1 \text{ мм}^2$ используется гребенчатая конструкция (рис. 5.1, д), расчет емкости проводится по эмпирической формуле (5.10).

5.1. Расчет тонкопленочных конденсаторов без подстроечных секций

Исходными данными для расчета ТПК являются следующие параметры:

- номинальная величина емкости ТПКС, пФ;
- диэлектрическая проницаемость ϵ ;
- рабочее напряжение на ТПК $U_{\text{раб}}$, В;
- допустимая относительная погрешность емкости $\gamma_{\text{С доп}}$, %;
- удельная емкость C_0 , пФ/см²;
- абсолютные производственные погрешности изготовления размеров верхней обкладки Δl и Δb , мм;
- погрешность установки и совмещения масок $\Delta l_{\text{в}}$, мм;
- максимальная температура окружающей среды t , °С;
- предполагаемая длительность работы микросхемы T , час.

Проектирование однослойных ТПК следует начинать с выбора материала диэлектрической пленки (см. табл. 5.1). Практика показывает, что диэлектрические пленки толщиной 2000 – 3000 Å и менее, нередко оказываются не сплошными, и ТПК на их основе являются ненадежными элементами. Многие конденсаторы с такой толщиной диэлектрика после изготовления оказываются негодными из-за замыкания обкладок.

Минимальная толщина диэлектрического слоя рассчитывается по формуле

$$d_{\min} \geq \frac{K_3 U_{\text{раб}}}{E_{\text{пр}}}, \quad (5.3)$$

где K_3 – коэффициент запаса электрической прочности ТПК и обычно равен $2 \div 4$, $E_{\text{пр}}$ – электрическая прочность материала диэлектрика, В/см.

В связи с этим, в тех случаях, когда значение d , полученное на основе вышеприведенной формулы, оказывается меньше 3000 Å, за расчетные значения толщины пленки диэлектрика принимается величина $d \geq 3000 \text{ Å}$.

Суммарная относительная погрешность емкости конденсатора определяется по формуле

$$\gamma_{\text{С}} = \gamma_{\text{С}_0} + \gamma_{\text{S}} + \gamma_{\text{С}_t} + \gamma_{\text{С}_{\text{СТ}}}, \quad (5.4)$$

где

$\gamma_{\text{С}_0}$ - относительная погрешность удельной емкости, характеризующая ее воспроизводимость, зависит от материала и погрешности толщины диэлектрика;
 γ_{S} - относительная погрешность активной площади конденсатора, зависящая от точности геометрических размеров, формы и площади верхних обкладок;

γ_{C_t} - температурная погрешность, которая зависит от ТКС материала диэлектрика;

$\gamma_{C_{CT}}$ - относительная погрешность, обусловленная старением пленок конденсатора, зависит от материалов. Обычно она не бывает выше 2-3%.

$$\gamma_{C_t} = \alpha_C \cdot (T_{\max} - 20^\circ \text{C})$$

$$\gamma_s = \frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta L \cdot B + \Delta B \cdot L}{L B},$$

где S, L, B - соответственно площадь, длина и ширина верхней обкладки; γ_s - минимальна, если обкладки имеют форму квадрата. Если форма отклоняется от квадрата, γ_s увеличивается.

Для учета этих отклонений используют коэффициент формы обкладок

$$K_\Phi = L / B. \quad (5.5)$$

Тогда относительная погрешность γ_s при $\Delta L = \Delta B$ определяется по формуле

$$\gamma_s = \Delta L \cdot \frac{1 + K_\Phi}{\sqrt{K_\Phi \cdot S}} \quad (5.6)$$

Для обеспечения заданной точности емкости необходимо выполнение условия $\gamma_s \leq \gamma_{s \text{ доп}}$, где

$$\gamma_{s \text{ доп}} = \gamma_C - \gamma_{C_0} - \gamma_{C_t} - \gamma_{C_{CT}} \quad (5.7)$$

Из (5.5) и (5.6) следует, что при выбранном из топологических соображений значении коэффициента формы, площадь верхней обкладки равна

$$S \geq \left(\frac{\Delta L}{\gamma_{s \text{ доп}}} \right)^2 \cdot \frac{(1 + K_\Phi)^2}{K_\Phi} \quad (5.8)$$

Если в (5.7) выполняется равенство, то получаем выражение для удельной емкости

$$C_{0 \text{ доп}} = C \cdot \left(\frac{\gamma_{s \text{ доп}}}{\Delta L} \right)^2 \cdot \frac{K_\Phi}{(1 + K_\Phi)^2} \quad (5.9)$$

В частном, наиболее характерном случае, когда $K_\Phi = 1$ (т.е. обкладки квадратной формы), приведенные выражения (5.6), (5.7) и (5.8) упрощаются

$$\frac{2 \Delta L}{\sqrt{S}} \leq \gamma_{s \text{ доп}}$$

$$S \geq 4 \cdot \left(\frac{\Delta L}{\gamma_{s \text{ доп}}} \right)^2$$

$$C_{0 \text{ точн}} = C \cdot \frac{\gamma_{s \text{ доп}}^2}{(2 \Delta L)^2}.$$

На основании выше приведенных рассуждений, рекомендуется следующий порядок расчета тонкопленочного конденсатора.

1. Выбирают материал диэлектрика по рабочему напряжению $U_{\text{раб}}$ в соответствии с данными таблицы 5.1. Из нее определяют ϵ , $\text{tg } \delta$, $E_{\text{пр}}$, α_c (ТСК).

2. Вычисляют температурную погрешность

$$\gamma_{ct} = \alpha_c (T_{\text{max}} - 20)$$

где T_{max} - максимально допустимая температура.

3. Определяют относительную погрешность активной площади конденсатора

$$\gamma_{s \text{ доп}} = \gamma_c - \gamma_{c0} - \gamma_{ct} - \gamma_{c \text{ ст}}$$

4. Рассчитывают минимальную толщину диэлектрика, исходя из необходимости обеспечения электрической прочности

$$d_{\text{min}} = (k_3 \cdot U_{\text{раб}}) / E_{\text{пр}}$$

где k_3 - коэффициент запаса.

5. Определяют удельную емкость конденсатора, исходя из необходимости обеспечения его электрической прочности

$$C_{0 \text{ эл}} = (0,0885 \cdot \epsilon) / d$$

6. Определяют удельную емкость конденсатора, исходя из требуемой точности его изготовления

$$C_{0 \text{ точн}} = C \cdot \left(\frac{\gamma_{c \text{ доп}}}{2\Delta L} \right)^2$$

7. Выбирают минимальное значение удельной емкости C_0 , учитывая электрическую прочность и точность изготовления

$$C_0 \leq \min \{ C_{0 \text{ эл}}, C_{0 \text{ точн}} \}$$

8. Определяют коэффициент, учитывающий краевой эффект

$$K = 1 \text{ при } (C / C_0) \geq 5 \text{ мм}^2$$

$$K = 1,3 - 0,06 \cdot (C / C_0) \text{ при } 1 \leq (C / C_0) < 5 \text{ мм}^2$$

9. Вычисляют площадь верхней обкладки

$$S_{\text{вo}} = (C / C_0) \cdot K$$

10. Определяют размеры верхней обкладки конденсатора

$$L_{\text{в}} = B_{\text{в}} = \sqrt{S_{\text{вo}}}$$

Размеры $L_{\text{в}}$ и $B_{\text{в}}$ округляют до величины, кратной шагу координатной сетки.

11. Определяют размеры нижней обкладки конденсатора

$$L_{\text{н}} = B_{\text{н}} = L_{\text{в}} + 2q,$$

где q - величина перекрытия обкладок.

12. Определяют размер диэлектрика конденсатора

$$L_{\text{д}} = B_{\text{д}} = L_{\text{н}} + 2f,$$

где f - величина перекрытия нижней обкладки и диэлектрика,

13. Рассчитывают площадь конденсатора на подложке

$$S = S_{\text{д}} = L_{\text{д}} \cdot B_{\text{д}}$$

На основании полученных результатов выбирают конструкцию пленочного конденсатора (см. рис. 5.1). При необходимости вместо квадратной формы об-

кладок используют прямоугольную форму. Для этого задаются одной из сторон конденсатора, рассчитывают коэффициент формы обкладок и вычисляют размеры обкладок прямоугольной формы.

5.2. Расчет гребенчатых конденсаторов

Если расчетная величина активной площади ТПК меньше 1 мм^2 , рекомендуется конструировать гребенчатый пленочный конденсатор, внешний вид которого показан на рис. 5.2.

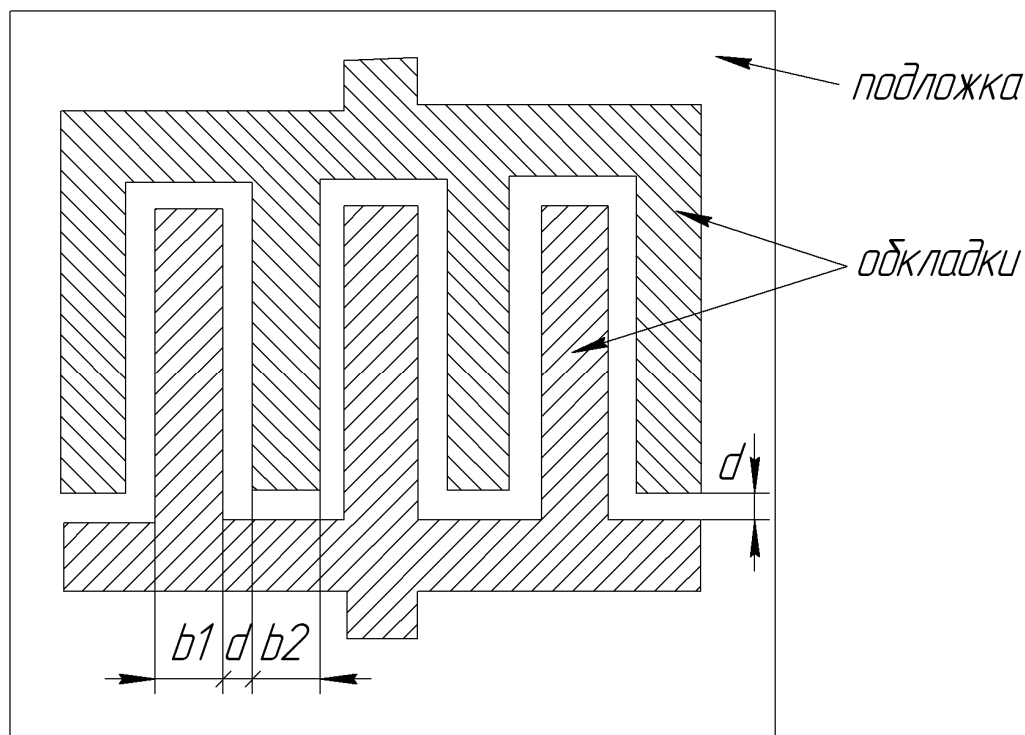


Рис. 5.2. Гребенчатый конденсатор

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

$$C = \varepsilon_p \beta l, \quad (5.10)$$

где β — коэффициент, зависящий от ширины пленочных проводников и расстояния между ними, определяется по графику (рис. 5.3);

l — длина совместной границы проводников, см;

ε_p — расчетное значение относительной диэлектрической проницаемости: для конденсатора, не имеющего защитного покрытия,

$$\varepsilon_p = \frac{1 + \varepsilon_{II}}{2},$$

для конденсатора, покрытого защитным слоем,

$$\varepsilon_p = \frac{\varepsilon_d + \varepsilon_{II}}{2},$$

где ε_{II} — относительная диэлектрическая проницаемость материала подложки;

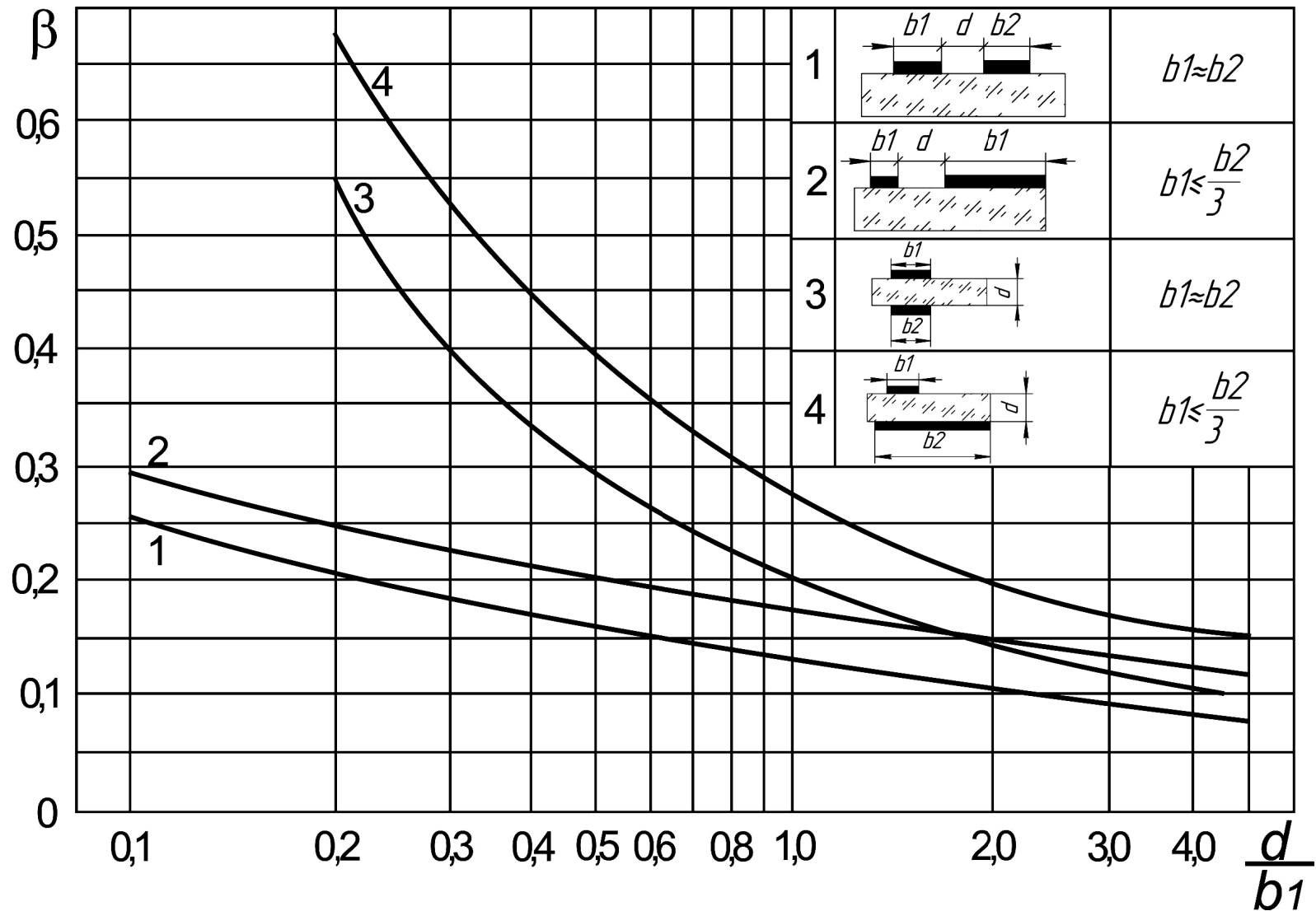


Рис. 5.3. Зависимость коэффициента β от расположения элементов гребенчатого конденсатора

5.3. Расчет тонкопленочного конденсатора повышенной точности

Если допуск на номинал емкости $\gamma_{с\ доп}$ мал, а величины $\gamma_{с0}$, $\gamma_{сt}$ и $\gamma_{ссм}$ и относительно велики, то величина γ_s может оказаться отрицательной. Это значит, что при изготовлении ТПК может быть большой процент брака. При положительных, но очень малых значениях γ_s величина S_2 может оказаться слишком большой, а величина $C_{0\ макс}$ – малой, что невыгодно с точки зрения миниатюризации ТПК.

В этих случаях целесообразно проектировать ТПК с регулировочными секциями (рис. 5.4).

Отсоединение секций у конденсатора, изображенного на рис. 5.4, а, позволяет уменьшать его емкость. Подсоединение или отсоединение секций ТПК, изображенного на рис. 5.4,б, позволяет изменять емкость как в сторону увеличения, так и уменьшения.

Для конструктивного расчета подстраиваемых ТПК необходимо знать минимальное и максимальное значения емкости.

Их можно определить из выражений

$$C_{\max} = C \left(1 + \frac{\gamma_C - \gamma_{Ct} - \gamma_{Cсм}}{100} \right); \quad (5.11)$$

$$C_{\min} = C \left(1 - \frac{\gamma_C - \gamma_{Ct} - \gamma_{Cсм}}{100} \right), \quad (5.12)$$

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

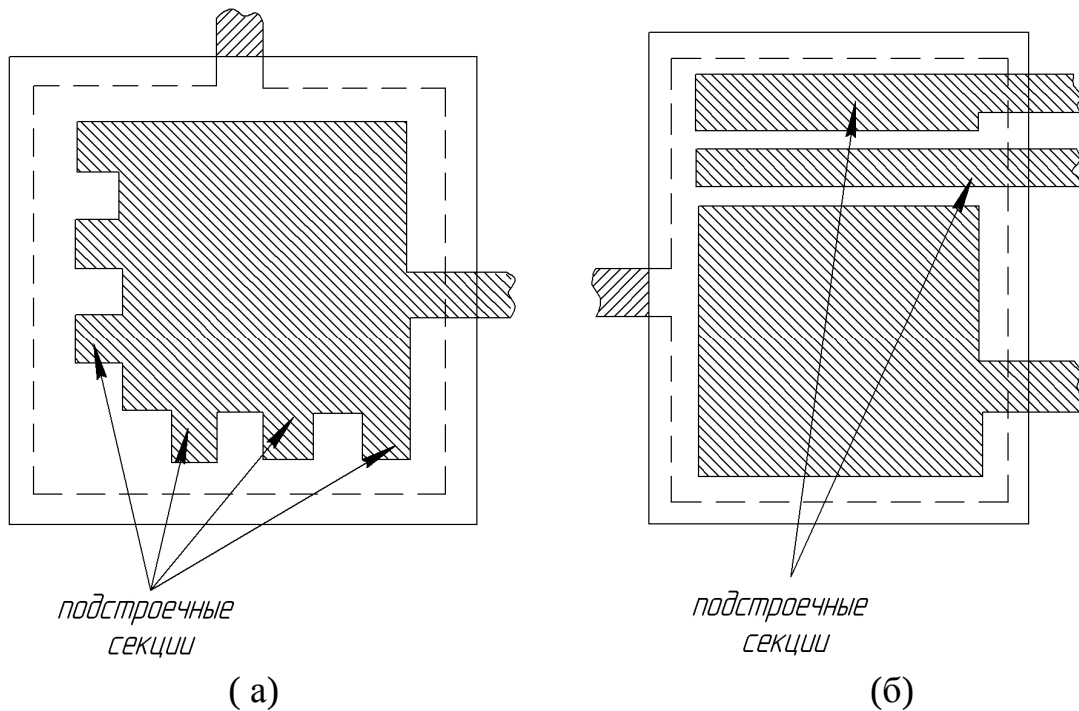


Рис. 5.4. Тонкопленочный конденсатор с подстраиваемыми секциями уменьшения.

Шаг подгонки, равный емкости одной секции, должен быть не больше поля допуска $\Delta C = C_{\text{макс}} - C_{\text{мин}}$.

Число подстраиваемых секций можно определить из отношения

$$n = \frac{\gamma_{Co} + \gamma_S - \gamma_C + \gamma_{Ct} + \gamma_{Cct}}{\gamma_C - \gamma_{Ct} - \gamma_{Cct}}. \quad (5.13)$$

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

$$S_{\text{осн. макс}} = \frac{C_{\text{макс}}}{C_{o \text{ макс}}}, \quad (5.14)$$

где $C_{o \text{ макс}}$ – максимальная удельная емкость

$$C_{o \text{ макс}} = C_o \left(1 + \frac{\gamma_{Co}}{100} \right), \text{ величина } C_o \text{ вычисляется по формуле (5.2).}$$

При $K_\phi = 1$ размеры верхней обкладки определяются из соотношения

$$L_{\text{осн}} = B_{\text{осн}} = \sqrt{S_{\text{осн. макс}}} - \Delta L \quad (5.15)$$

Площадь одной подстроечной секции равна

$$S_{c \text{ мин}} = \frac{S_{\Sigma \text{ мин}} - S_{\text{осн. мин}}}{n}, \quad (5.16)$$

где

$$\begin{aligned} S_{\Sigma \text{ мин}} &= \frac{C_{\text{мин}}}{C_{o \text{ мин}}}; \\ C_{o \text{ мин}} &= C_o \left(1 - \frac{\gamma_{Co}}{100} \right); \\ S_{\text{осн. мин}} &= B_{\text{осн. мин}} L_{\text{осн. мин}}; \\ B_{\text{осн. мин}} &= B - \Delta B; \\ L_{\text{осн. мин}} &= L - \Delta L. \end{aligned}$$

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

$$h_C = \frac{S_{c \text{ мин}}}{b_C - \Delta L} \quad (5.17)$$

Чтобы не допустить повреждения диэлектрика, которое может произойти при подгонке номинала конденсатора, изображенного на рис. 5.4, иногда применяют другую конструкцию регулируемого ТПК (рис. 5.5) 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.

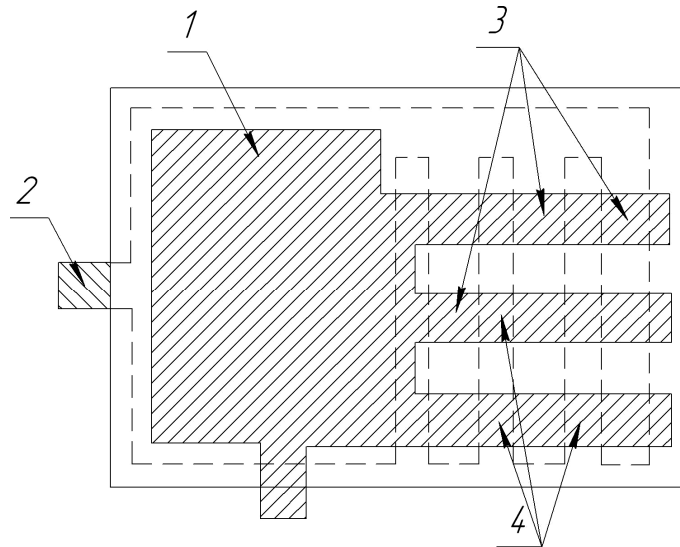


Рис. 5.5. Тонкопленочный конденсатор с матричными подстраиваемыми секциями

5.4. Добротность тонкопленочных конденсаторов

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

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta}. \quad (5.18)$$

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 $r_{\Sigma \delta}$ и эквивалентного сопротивления диэлектрических потерь в металлических элементах конденсатора $r_{\Sigma M}$ (рис. 5.6).

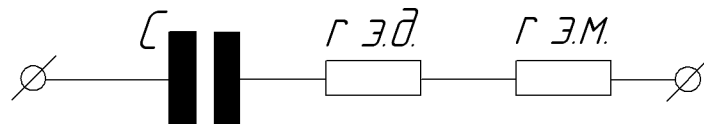


Рис. 5.6. Эквивалентная схема ТПК

Тангенс угла потерь можно представить в виде суммы

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_{\delta} + \operatorname{tg} \delta_{M},$$

где $\operatorname{tg} \delta_{\delta}$ – тангенс угла потерь в диэлектрических материалах;

$\operatorname{tg} \delta_{M}$ – тангенс угла потерь в металлических элементах ТПК.

Значения $tg\delta_\delta$ для некоторых диэлектрических материалов приведены в таблице 5.1. Величина $tg\delta_\delta$ может быть вычислена по формуле

$$tg\delta_\delta = \omega C r_{\Sigma M}, \quad (5.19)$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота (f – рабочая частота, Гц);

C – емкость конденсатора, Ф;

$r_{\Sigma M}$ – эквивалентное сопротивление потерь переменному току в обкладках и выводах $r_{\Sigma M} = r_{\Sigma об} + r_{\Sigma выв}$,

Сопротивление выводов ТПК определяется выражением

$$r_{\Sigma выв} = R_{кв\ выв} K_{\phi\ выв},$$

а эквивалентное сопротивление обкладок ТПК переменному току можно определить как

$$r_{\Sigma об} = (2/3)R, \quad (5.20)$$

где R – сопротивление одной обкладки конденсатора постоянному току (Ом), вычисляемое по формуле $R = R_{кв\ об} K_{\phi\ об}$.

Формула (5.20) справедлива, если выполняется условие

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

при котором распределение тока в обкладках подчинено линейному закону.

После преобразований формула (5.18) может быть представлена в виде

$$Q = \frac{1}{tg\delta_\delta + \omega C R_{кв\ об} \left(\frac{2}{3} K_{\phi\ об} + K_{\phi\ выв} \right)}. \quad (5.21)$$

При выводе формулы (5.21) предполагается, что обкладки и выводы ТПК изготовлены из одного материала, по единой технологии и имеют одинаковую толщину, т.е. выполняется условие

$$R_{кв\ об} = R_{кв\ выв}.$$

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

$$Q = \frac{1,2 \cdot 10^5}{f C}, \quad (5.22)$$

где f – рабочая частота, МГц, C – емкость ТПК, пФ.

Она применима, если удельная емкость C_0 находится в пределах 500÷1000 пФ/см², а удельное сопротивление материала обкладок не превышает 0,1 Ом/кв.см, что характерно для алюминиевых обкладок, толщиной не менее 300÷500 нм.

6. ПЛЕНОЧНЫЕ ИНДУКТИВНОСТИ

Изготовление катушек индуктивности для гибридных пленочных микросхем представляет большие трудности. Наибольшее распространение в мегагерцовом диапазоне частот получили плоские спиральные катушки (рис. 6.1). Ограниченные размеры подложек пленочных микросхем и конечная ширина проводящей полосы не позволяют изготовить плоские однослойные пленочные катушки с индуктивностью более 5–7 мкГн. Это означает, что наиболее реальным является изготовление микросхем с колебательными 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 индуктивности, в которых используются активные элементы, пока не нашли широкого применения из-за зависимости их параметров от частоты и температуры.

6.1. Исходные данные для расчета

Исходными данными для расчета являются параметры:

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

По ним выбирают:

- форма катушки, ее внутренний диаметр $D_{\text{вн}}$, который зависит от размеров внутренней контактной площадки и, как правило, выбирается равным 0,5 мм;
- материал проводника катушки;
- материал подложки;
- способ изготовления катушки;
- способ получения фото оригинала.

В результате расчетов необходимо определить:

- шаг спирали – t ;
- ширину витка – b ;
- толщина витка – d ;
- наружный размер спирали $D_{\text{нар}}$ определяемый из соотношения $D_{\text{вн}}/D_{\text{нар}}=0,4$ для круга, $D_{\text{вн}}/D_{\text{нар}}=0,362$ для квадрата.
- число витков – N .

При проектировании пленочных катушек индуктивности нужно учитывать следующие положения:

1. Главным фактором, определяющим индуктивность одно витковой петли является площадь, заключенная в плоскости петли.

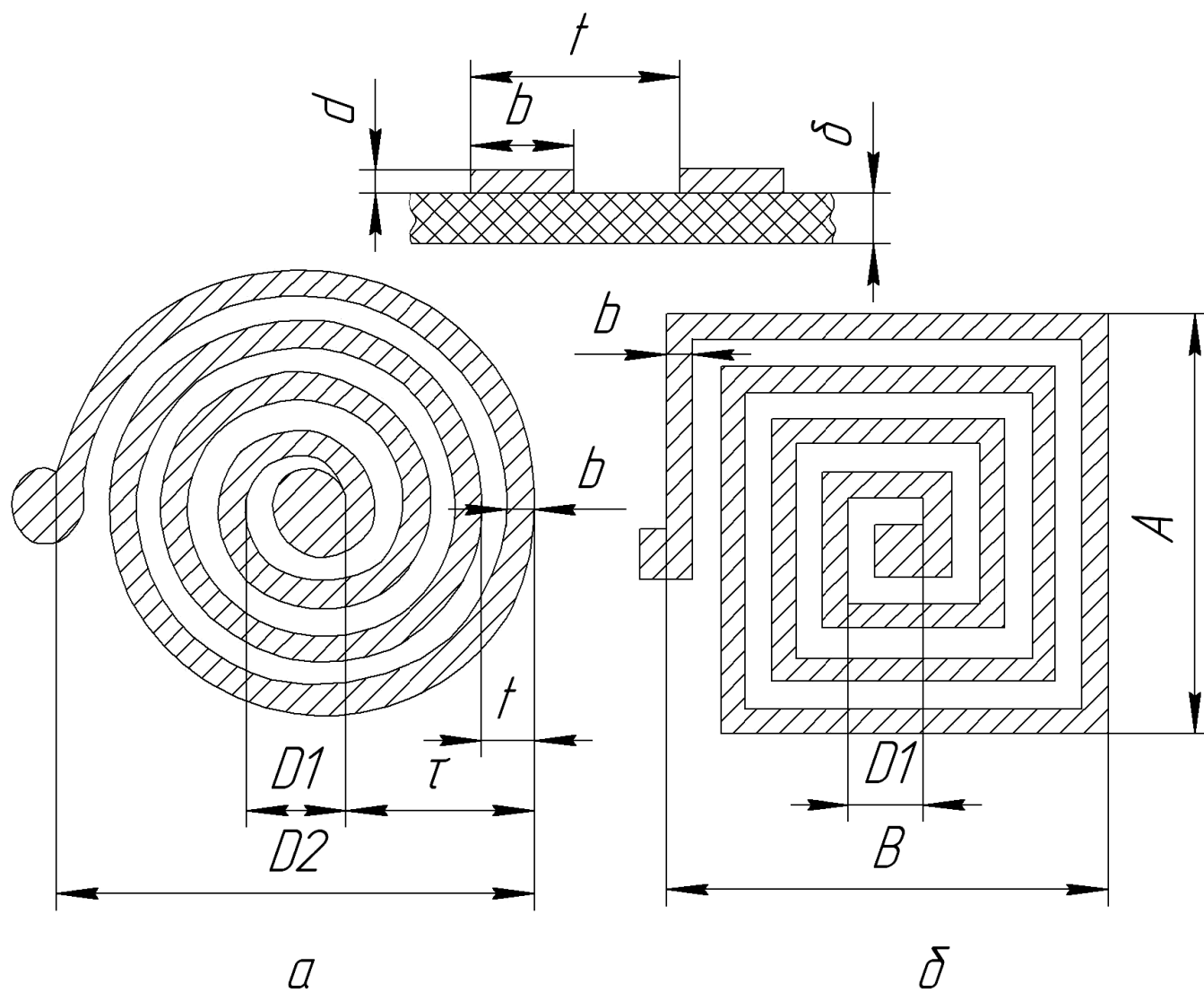


Рис. 6.1. Пленочные катушки индуктивности:
а – круглая спираль; б – квадратная спираль

2. Для заданной площади кольцеобразная петля соответствует наименьшей длине проводника и, следовательно, наиболее высокой добротности.
3. При условии, что связь между витками достаточно сильная, индуктивность катушки возрастает пропорционально квадрату числа витков.
4. Поперечные размеры проводника катушки слабо влияют на ее индуктивность и существенно влияют на добротность.
5. При габаритных одинаковых размерах индуктивность квадратной катушки примерно на 12% больше, чем круглой, а добротность ее на 10% ниже.

6.2. Расчет пленочных катушек индуктивности

Расчет пленочных катушек индуктивности производится в следующей последовательности:

1. Выбирается внутренний размер катушки $D_{вн}$. Из технологических соображений его не следует брать меньше 2 мм.
2. Определяется шаг спирали по формуле

$$t = K \sqrt{\frac{D_{вн}^3}{L}}, \quad (6.1)$$

где L – индуктивность катушки, мкГн;

$D_{вн}$ – внутренний диаметр катушки, мм;

K – коэффициент, зависящий от отношения $D_{вн}/D_{нар}$, определяется по графику рис. 6.2.

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

Здесь d_c – толщина слоя скин – эффекта в мм, рассчитываемая по формуле

$$d_c = K_1 \sqrt{\lambda},$$

где λ – длина волны, см $\left(\lambda = \frac{c}{f} \right)$;

K_1 – коэффициент, учитывающий материал пленки:

для серебра $K_1 = 0,37$;

для меди $K_1 = 0,39$;

для алюминия $K_1 = 0,51$.

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

$$b = \frac{\rho \cdot t \cdot \left(\frac{D_{нар}^2}{D_{вн}^2} - 1 \right) \cdot Q \cdot 10^4}{16 \cdot f \cdot D_{вн} \cdot K^2 \cdot d}, \quad (6.2)$$

где b – ширина витка, мм;

ρ – удельное объемное электрическое сопротивление материала проводника, Ом·см;

t – шаг спирали, мм;

$D_{вн}$, $D_{нар}$ – внутренний и внешний размеры катушки, мм;

f – частота, МГц;

K – коэффициент, определяемый из графика рис. ;

d – толщина проводника катушки, мм.

Так как формула (6.2) 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 $D_{вн}$ и задаваясь шагом спирали $t > b'$, из формулы (6.1) определить внешний размер спирали $D_{нар}$, а затем по формуле (6.2) определить ширину витков b .

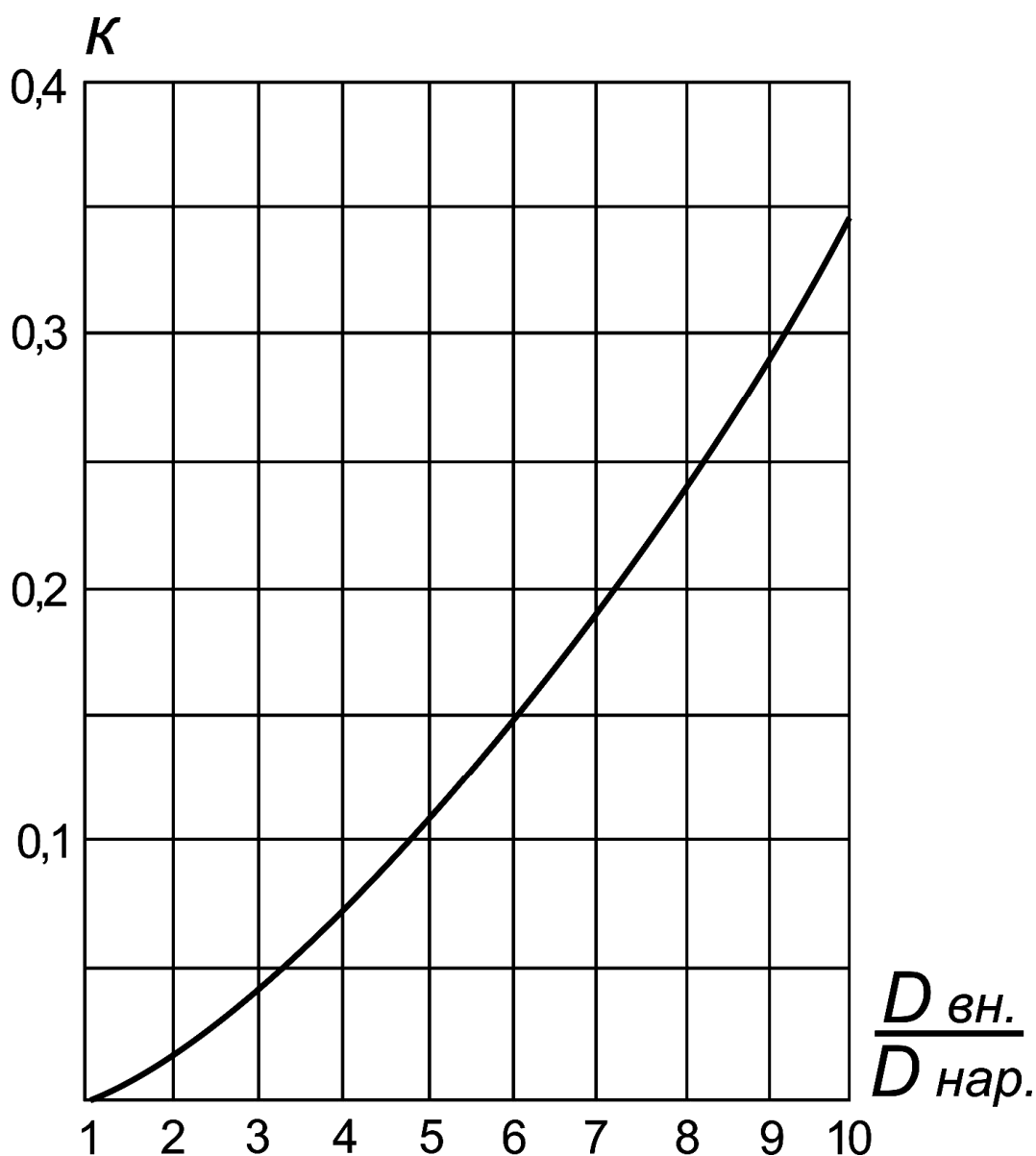


Рис. 6.2. Зависимость коэффициента K от размеров пленочной катушки

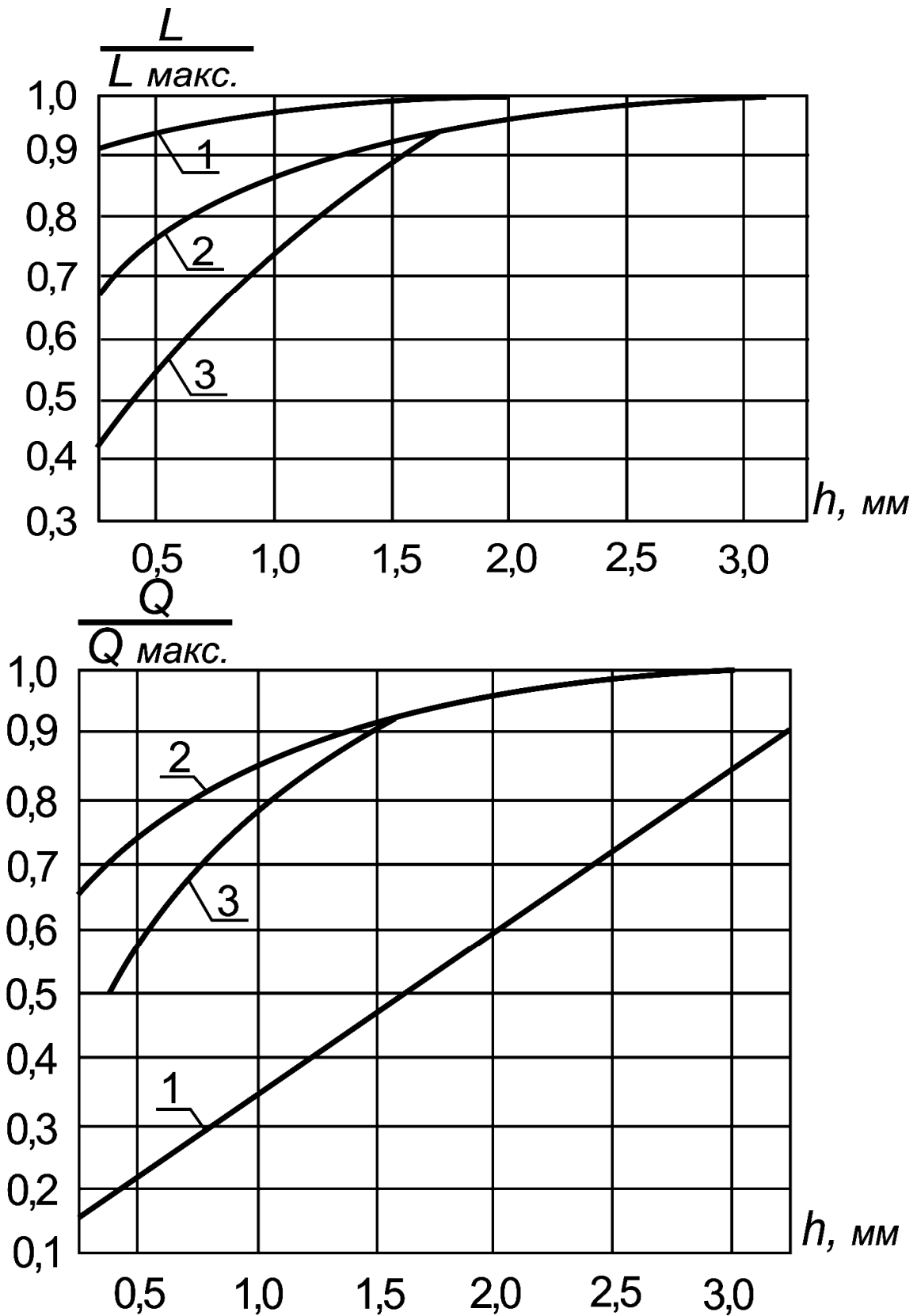


Рис. 6.3. Влияние плоских металлических поверхностей на индуктивность (а) и добротность (б): 1— алюминиевая пленка на частотах 20–100 МГц; 2, 3 — латунный лист на частотах 100 и 200 МГц

5. Определяется число витков по формуле

$$N = \frac{D_{нар} - D_{вн}}{2t},$$

где t – шаг спирали.

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

$$D'_{нар} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{AB}.$$

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 добротности плоских катушек, расположенных на расстоянии h от металлической поверхности, приведена на рис. 6.3, где

$L_{\max}$ и $Q_{\max}$ – 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. 6.3.

7. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ГИБРИДНЫХ МИКРОСХЕМ

Тепловой расчет гибридных ИМС ведут, как правило, в три этапа. Сначала оценивают тепловой режим микросхемы. Если он не обеспечивается, то определяют требования к разработке топологии. Эти требования связаны с обеспечением необходимых зон защиты тепловыделяющих элементов. Если при проектировании топологии не обеспечена необходимая ширина зон защиты для некоторых элементов, то переходят к третьему этапу – ведут расчет перегревов этих элементов.

Исходными данными для теплового расчета микросхемы являются: тип конструкции микросхемы, определяемой ее тепловыми свойствами; толщина платы $\delta_{\text{П}}$, м; коэффициент теплопроводности платы $\lambda_{\text{П}}$, Вт/(м·град); толщина слоя клея (компаунда) между платой и основанием корпуса микросхемы $\delta_{\text{К1}}$, м; толщина слоя компаунда между платой и крышкой корпуса микросхемы $\delta_{\text{К2}}$, м; коэффициент теплопроводности клея (компаунда) $\lambda_{\text{К}}$, Вт/(м·град); температура корпуса (основания) микросхемы $t_{\text{К}}$, °С; максимально допустимая температура пленочных резисторов $t_{\text{R max доп}}$, °С; максимально допустимая температура пленочных конденсаторов $t_{\text{С max доп}}$, °С; максимально допустимая температура навесных компонентов $t_{\text{н max доп}}$, °С; внутреннее тепловое сопротивление навесного компонента $R_{\text{Т.ВН}}$, град/Вт; мощность, рассеиваемая навесным компонентом, $P_{\text{н}}$, Вт; ширина навесного компонента $l_{\text{хн}}$, м; длина навесного компонента $l_{\text{ун}}$, м; суммарная удельная мощность, рассеиваемая в микросхеме, $P_{\text{о}}$, Вт/м².

7.1. Оценка теплового режима микросхемы.

При оценке теплового режима микросхемы определяют вначале тепловое сопротивление $r_{\text{Т}}$ и приведенную толщину δ теплопроводящих участков. Величины $r_{\text{Т}}$ и δ зависят от типа конструкции микросхемы. Основные типы конструкций микросхем, определяемые тепловыми свойствами системы плата - корпус, приведены на рис. 7.1. В данном случае тип I конструкции характеризуется креплением платы к корпусу методом стеклоспая или пайки, тип II предусматривает крепление платы к корпусу методом склеивания, в типе III плата крепится к металлополимерному основанию корпуса с помощью клея и тип IV предусматривает полную заливку платы компаундом.

В зависимости от типа конструкции микросхемы расчет величин $r_{\text{Т}}$ и δ ведут по следующим формулам:

а - для конструкции типа I

$$r_{\text{Т}} = \frac{\delta_{\text{П}}}{\lambda_{\text{П}}} \text{ [м}^2\text{·град/Вт]};$$

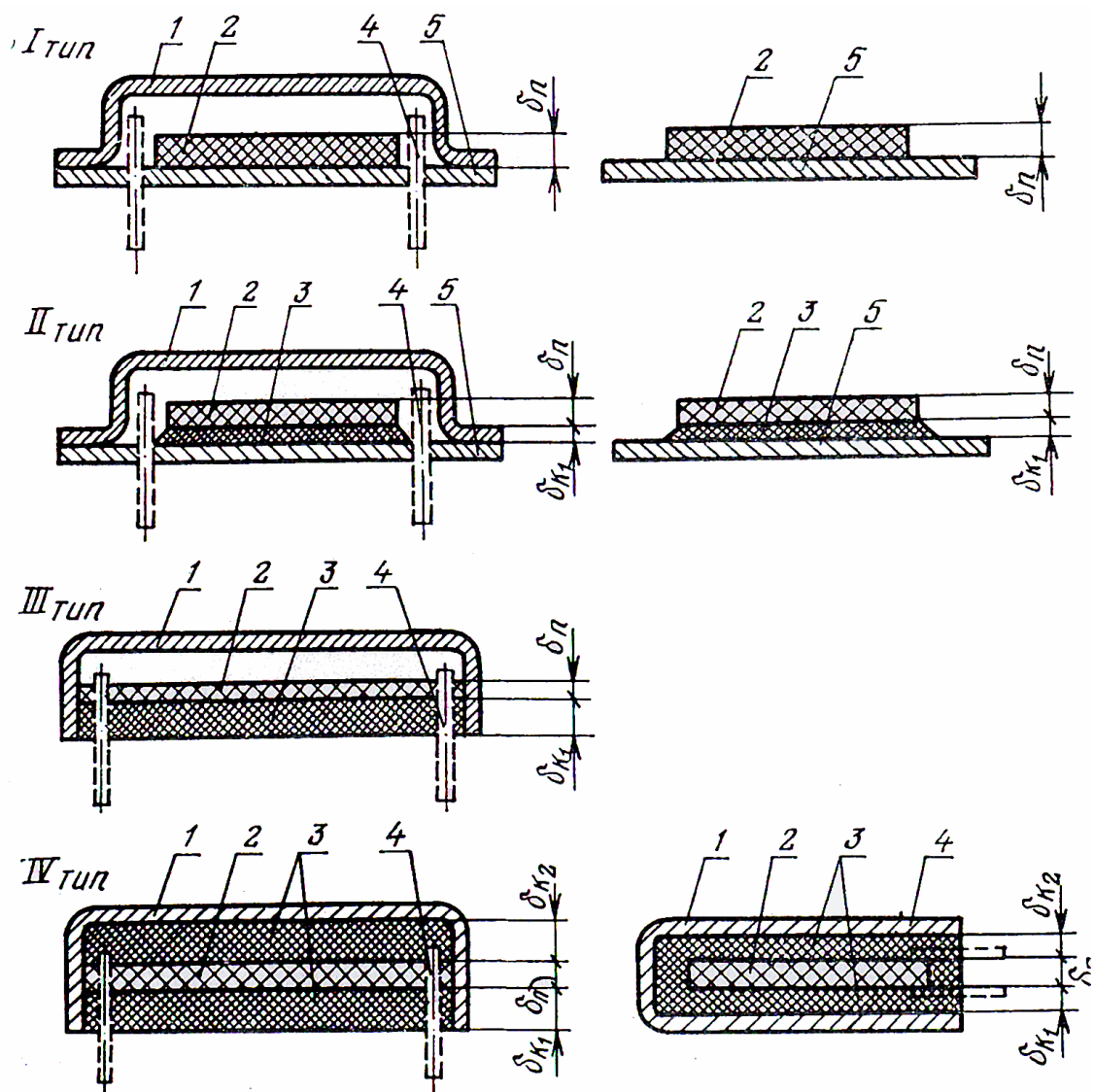


Рис. 7.1. Основные типы конструкций гибридных микросхем, определяемые тепловыми свойствами системы плата – корпус:

1 – крышка; 2 – подложка; 3 – клей (компаунд); 4 – вывод; 5 – основание корпуса

б - для конструкции типа II

$$r_T = \frac{\delta_{\Pi}}{\lambda_{\Pi}} + \frac{\delta_{\kappa 1}}{\lambda_{\kappa}} ;$$

$$\delta = \delta_n + \delta_{\kappa 1} \frac{\lambda_n}{\lambda_{\kappa}} ;$$

в - для конструкции типа III

$$r_T = \frac{\delta_{\Pi}}{\lambda_{\Pi}} + \frac{\delta_{\kappa 1}}{\lambda_{\kappa}} ;$$

$$\delta = \sqrt{\delta_n^2 + \delta_{\kappa 1}^2 + \delta_n \delta_{\kappa 1} \left(\frac{\lambda_n}{\lambda_{\kappa}} + \frac{\lambda_{\kappa}}{\lambda_n} \right)} ;$$

г - для конструкции типа IV

$$r_T = \frac{r_{T1} \cdot r_{T2}}{r_{T1} + r_{T2}} ,$$

где

$$r_{T1} = \frac{\delta_{\Pi}}{\lambda_{\Pi}} + \frac{\delta_{\kappa 1}}{\lambda_{\kappa}} ;$$

$$\delta_1 = \sqrt{\delta_n^2 + \delta_{\kappa 1}^2 + \delta_n \delta_{\kappa 1} \left(\frac{\lambda_n}{\lambda_{\kappa}} + \frac{\lambda_{\kappa}}{\lambda_n} \right)} ;$$

$$r_{T2} = \frac{\delta_{\kappa 2}}{\lambda_{\kappa}} ;$$

$$\delta = \delta_{\kappa 2} ;$$

$$\delta = \max\{\delta_1, \delta_2\} .$$

В дальнейшем определяют максимально допустимую удельную мощность рассеяния P'_0 конструкции при произвольном размещении на плате тепловыделяющих элементов. Расчеты ведут по следующей формуле:

$$P'_0 = \frac{t_{H \max} - t_{\kappa} - \Theta_{H \max}}{r_m} ,$$

где

$$\Theta_{n\max} = \max\{P_{n1}(R_{m.\text{вн}} + \frac{r_m}{l_{x\text{н}}l_{y\text{н}}})\}.$$

При выполнении условия $P_0 \leq P'_0$ дальнейший тепловой расчет микросхем не требуется. Однако в этом случае определяют максимально возможные температуры элементов и компонентов микросхемы. Это осуществляется по следующим формулам:

для пленочных резисторов

$$t_{R\max} = t_k + r_m(P_0 + P_{n\max});$$

для пленочных конденсаторов

$$t_{C\max} = t_k + 0,5r_m(P_0 + P_{n\max});$$

для навесных компонентов

$$t_{n\max} = t_k + r_m P_0 + \Theta_{n\max},$$

где

$$P_{n\max} = \max\{\frac{P_{ni}}{l_{x\text{н}} + l_{y\text{н}}}\}.$$

7.2. Обеспечение заданного теплового режима микросхемы.

Если величина $P_0 > P'_0$, то для обеспечения заданного теплового режима микросхемы необходимо отделить навесные компоненты от остальных тепловыделяющих элементов зонами защиты, свободными от источников тепла и предназначенными для ослабления теплового влияния на них остальных элементов микросхемы. Защита может быть двухсторонней (рис. 7.2,а) и по периметру (рис. 7.2,б).

Расчет зон защиты производят в следующем порядке.

Вначале определяют величины:

$$a = \frac{A}{\delta};$$

где A – ширина защищаемой зоны, м;

$$\Theta_{n.m} = P_{n.m}(R_{m.\text{вн}} + \frac{r_m}{l_{x\text{н}}l_{y\text{н}}}),$$

где $P_{n.т}$ - мощность, рассеиваемая наиболее нагруженным навесным компонентом.

Затем вычисляют минимально допустимую ширину зоны защиты по формуле

$$H = h\delta,$$

где h для выбранного варианта защиты определяют из рис. 7.2

Если при разработке топологии учтена требуемая ширина зон защиты тепловыделяющих элементов, то тепловой расчет гибридной интегральной микросхемы на этом заканчивают. В случае отклонения от установленных на данном этапе требований переходят к третьему этапу теплового расчета и определяют перегревы элементов и компонентов микросхемы.

Если результаты расчетов, проведенных на третьем этапе, свидетельствуют о том, что температура отдельных элементов или компонентов превышает максимально допустимое значение, то следует осуществить корректировку топологии с целью обеспечения нормального теплового режима работы микросхемы.

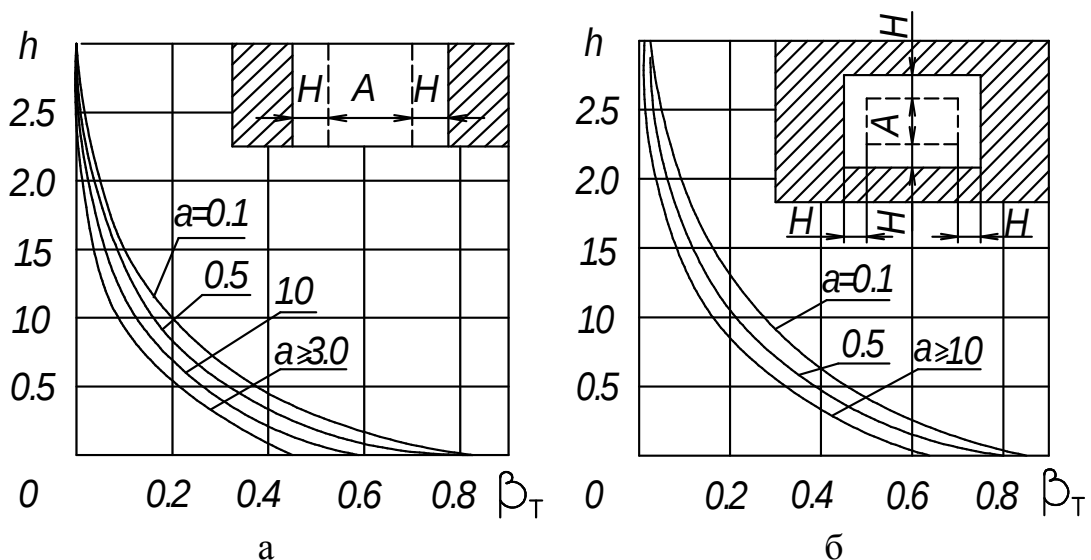


Рис. 7.2. Графики для расчета зон защиты термочувствительных элементов и компонентов:

а – при двухсторонней защите; б – при защите по периметру.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Раздел 1.

1. Перечислите наиболее известные методы получения тонких пленок.
2. Объясните особенности методов получения тонких пленок.
3. Объясните, какие требования предъявляются к подложкам ГПИМС.
4. Назовите основные характеристики материалов подложек.

Раздел 2.

1. Сформулируйте понятие гибридно-пленочной интегральной схемы.
2. Определите последовательность разработки ГПС.
3. Какими сведениями нужно обладать для разработки топологии и морфологии?
4. Какие данные необходимы для проектирования и расчета топологической структуры ГИС?
5. Какова точность воспроизведения электротехнических параметров пленок?
6. Назовите основные принципы проектирования топологической структуры ГИС?
7. Назовите, чем необходимо руководствоваться при определении степени интеграции принципиальной электрической схемы устройства.
8. Дайте определение понятию «компоновка топологической структуры гибридной интегральной схемы».

Раздел 3.

1. Перечислите, что влияет на электрические характеристики пленочных резисторов?
2. Какие требования предъявляются к материалу резистивных пленок?
3. Перечислите требования, предъявляемые к контактным площадкам.
4. Назовите основные параметры материалов тонкопленочных резисторов.
5. Перечислите основные технические характеристики пленочных контактных площадок и проводников.
6. Изобразите основные конструкции пленочных резисторов.
7. Перечислите исходные данные для расчета пленочных резисторов.
8. Сформулируйте рекомендованную последовательность расчета тонкопленочных резисторов.
9. Представьте последовательность расчета резистора типа «меандр».
10. Назовите разновидности конструкций пленочных переходных контактов.
11. Поясните, как определить основные конструктивные параметры переходных контактов.
12. Поясните, как произвести оценку частотных свойств пленочных резисторов.
13. Сформулируйте определение удельного поверхностного сопротивления пленки.

Раздел 4.

1. Перечислите способы подгонки тонкопленочных резисторов.
2. Изобразите основные конструкции подгоняемых тонкопленочных резисторов.
3. Объясните последовательность расчета резисторов со ступенчатой подгонкой.
4. Объясните последовательность расчета резисторов с плавной подгонкой.
5. Объясните суть оценки сопротивления и индуктивности пленочных проводников.

Раздел 5.

1. Объясните конструктивно-технологические особенности тонкопленочных конденсаторов.
2. Перечислите требования, предъявляемые к материалу диэлектрических пленок.
3. Назовите известные разновидности тонкопленочных конденсаторов.
4. Перечислите основные характеристики диэлектрических материалов тонкопленочных конденсаторов.
5. Приведите последовательность расчета тонкопленочных конденсаторов.
6. Перечислите необходимые исходные данные для расчета тонкопленочных конденсаторов.
7. Объясните, как осуществляется проектирование конденсаторов повышенной точности.
8. Поясните, что представляет собой «гребенчатый» конденсатор.
9. Объясните понятие «добротности» тонкопленочного конденсатора. От чего она зависит?

Раздел 6.

1. Поясните, в каком частотном диапазоне используются плоские пленочные спиральные катушки индуктивности.
2. Перечислите исходные данные для расчета пленочных катушек индуктивности.
3. Приведите последовательность расчета пленочных катушек индуктивности.
4. Поясните, какими факторами ограничивается получение больших значений индуктивности.
5. Объясните суть различия между «квадратной» и круглой катушкой.

Раздел 7.

1. Объясните, как производится оценка теплового режим ИМС.
2. Перечислите исходные данные, необходимые для теплового расчета.
3. Объясните влияние конструкции микросхемы на тепловой расчет.
4. Поясните, что называется «тепловым сопротивлением».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии, в доступной для самостоятельной работы форме, изложены вопросы, связанные с особенностями получения тонких пленок, представлены основные принципы проектирования топологических структур ИС и определения степени интеграции электрической схемы устройства, разрабатываемого в виде гибридной интегральной схемы.

Приведены методики расчетов геометрических размеров элементов тонкопленочных интегральных схем и порядок расчета теплового режима гибридно-пленочной интегральной микросхемы.

В заключение необходимо отметить следующее. Пленочные элементы могут изготавливаться как по тонкопленочной, так и по толстопленочной технологиям. Конфигурации тонко и толстопленочных элементов одинаковы, но их конкретные геометрические размеры (при заданных электрических параметрах) могут существенно различаться в связи с использованием совершенно разных материалов. Свойства пленочных элементов определяются конфигурацией, способом нанесения пленок, и, следовательно, их физическими, химическими, механическими и электрическими свойствами. Процесс проектирования гибридных ИМС носит комплексный характер, где решающую роль играют свойства пленок, возможности технологии, характеристики элементов и их влияние на выходные параметры ИМС.

В последнее время для проектирования различных электронных приборов используются новые физические и технологические принципы. Например, стали активно развиваться и применяться новые технологические процессы, такие как нанотехнология, микро и наноробототехника, интегральная наноэлектроника. Однако это не означает, что изложенный в учебном пособии материал теряет свою актуальность. В сантиметровом диапазоне СВЧ требуются элементы малых размеров (много меньше длины волны), которые следует воспроизводить с высокой точностью. Для этого как раз и необходима тонкопленочная технология. Она также обеспечивает меньшее сопротивление проводящих слоев по сравнению с толстопленочной технологией и более высокую добротность элементов. Очевидно, что в ближайшие годы, несмотря на быстрое развитие новых технологий, тонкопленочная технология не утратит своей актуальности.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Адгезия	5	Методы получения пленок	
Арсенид галлия	4	- термическое испарение	5
		- распыление	5
Величина номинала	48	Модуль	11
Гибридно-пленочная схема	6	Мощность	
Градиент неравномерности	12	- номинальная	15
		- рассеяния	24
		- удельная	28
Диэлектрические потери	10, 55	Напряжение	
Диэлектрическая		- пробивное	13
проницаемость	48	- рабочее	50
Добротность ТПК	55		
Допустимая мощность	15	Объемное сопротивление	23
Допуск	25		
Индуктивность	41,57	Перегрев элемента	66
Конденсатор		Переходной контакт	31
- гребенчатый	51	Пленочное межсоединение	33
- многослойный	44		
- прецизионный	53	Пленки тонкие	5
Конструкция		Погрешность	
- резистора	27	- относительная	50
- конденсатора	47	- технологическая	14
- индуктивности	58	- резистора	14
Компоновка	18	- совмещения масок	48
Корпус	63	Подгонка	36
Коррекция	30	- плавная	37
Коэффициент		- ступенчатая	36
- запаса	48	Подложка	6
- заполнения	16	- площадь подложки	15
- линейного расширения	6		
- формы	23	Расчет	
Маска	31	- резистора	24, 28
Масштаб	18	- конденсатора	48
Материалы		- индуктивности	59, 62
- пленочных резисторов	22	Резистор	
- контактных площадок	23	- пленочный	5, 21
- диэлектрических		- расчет	24
пленок	12, 45	- прецизионный	35
Меандр	26, 28	Регулируемая секция	38

Скин-эффект	59	Частотные свойства резистора	42
Сопротивление тепловое	63		
Степень интеграции	17		
Температурный коэффициент	24	Шаг	
Топология	8	- подгонки	54
Трафарет	11, 19	- координатной сетки	28
		Шунтирующая перемычка	55
Удельная емкость	50, 14	Элемент пассивный	8, 21
Удельное сопротивление	12, 13	Эквивалентное сопротивление	56
Химическое осаждение	6	Эскизный вариант	18

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Конструирование и технология изготовления микросхем, курсовое проектирование / Под ред. Л. А. Коледова. – М.: Высш. шк, 1984.
2. Матсон Э. А. Конструирование и технология микросхем. – Минск.: Высш. школа, 1979.
3. Матсон Э. А., Крыжановский Д. В. Справочное пособие по конструированию микросхем. – Минск.: Высш. шк, 1982.
4. Пономарев М. Ф. Конструкция и расчет микросхем и микроэлементов ЭВА. - М.: Радио и связь, 1982.
5. Основы микроэлектроники: Учеб. пособие для вузов / Л. А. Аваев, Ю. Е. Наумов, В. Т. Фролкин. – М.: Радио и связь, 1991.
6. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: учебник для вузов/ К. И. Билибин, А. И. Власов, Л. В. Журавлева / Под ред. В. А. Шахнова. – М.: МГТУ, 2002.
7. Коледов Л. А, Ильина Э.М. Проектирование тонкопленочных ГИМС. – М.: МИЭТ, 1985.
8. Симонов Б. М., Заводян А.В., Грушевский А. М. Конструкторско – технологические аспекты разработки ИС и микросборок: Учеб. пособие. – М.: Изд. МИЭТ, 1998.
9. Технологическое проектирование микросхем СВЧ: Учеб. пособие для техн. спец. вузов/И. П. Бушминский, Г. В. Морозов. – М.: МГТУ, 2001.
10. К. С. Петров. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника. – С-Пб.: Изд. «Питер», 2005.