

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Факультет радиотехники и электроники

Кафедра микро- и наноэлектроники

Б. С. Колосницын, Д. А. Котов

***РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ***

*Рекомендовано УМО по образованию в области
информатики и радиоэлектроники
в качестве учебно-методического пособия
для специальности 1-41 01 02
«Микро- и наноэлектронные технологии и системы»*

Минск БГУИР 2017

УДК 621.3.049.77(076)
ББК 32.844.1я73
К61

Рецензенты:

кафедра радиоэлектроники филиала
«Минский радиотехнический колледж»
учреждения образования «Белорусский государственный
университет информатики и радиоэлектроники»
(протокол №3 от 01.11.2014);

профессор кафедры микро- и нанотехники
Белорусского национального технического университета,
доктор технических наук, профессор В. А. Сычик

Колосницын, Б. С.

К61 Расчет параметров элементов интегральных микросхем : учеб.-метод. пособие / Б. С. Колосницын, Д. А. Котов. – Минск : БГУИР, 2017. – 68 с. : ил.
ISBN 978-985-543-268-6.

Рассмотрены методы проектирования и расчета таких пассивных элементов ИМС, как тонкопленочные и диффузионные резисторы, конденсаторы, индуктивности, интегрированные диоды, а также особенности проектирования биполярных структур ИМС. Приведены методики расчета пленочных резисторов, конденсаторов, индуктивностей, проводников и контактных площадок. Рекомендовано для студентов всех форм обучения по дисциплине «Полупроводниковые приборы и элементы интегральных микросхем».

УДК 621.3.049.77(076)
ББК 32.844.1я73

ISBN 978-985-543-268-6

© Колосницын Б. С., Котов Д. А., 2017
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПЛЕНОЧНЫХ ПАССИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОСХЕМ.	5
1.1 Общие сведения о подложках и их свойствах.	5
1.2 Конструкции пленочных резисторов	8
1.3 Расчет пленочных резисторов	12
1.4 Конструкции пленочных конденсаторов	22
1.5 Расчет пленочных конденсаторов.	25
1.6 Конструкция и расчет пленочных индуктивностей	34
1.7 Расчет пленочных проводников и контактных площадок	39
2 КОНСТРУКЦИЯ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОСХЕМ	42
2.1 Конструкция навесных элементов микросхем.	42
2.2 Конструирование и расчет диодов	45
2.3 Особенности топологии интегрированных транзисторов.	52
3 КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ДИФФУЗИОННЫХ ПАССИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОСХЕМ.	54
3.1 Конструирование и расчет диффузионных резисторов	54
3.2 Конструирование и расчет диффузионных конденсаторов.	61
ЛИТЕРАТУРА	67

ВВЕДЕНИЕ

При конструировании современной радиоэлектронной аппаратуры используются новые разработки в области микро- и нанoeлектроники. Но вопрос расчета элементов ИМС на основе тонких пленок до сих пор актуален, так как на их основе разрабатываются гибридно-пленочные и полупроводниковые интегральные микросхемы.

В настоящем учебно-методическом пособии рассматриваются вопросы проектирования и расчета пленочных и диффузионных элементов различного функционального назначения.

В первом разделе представлены общие сведения о технологии получения тонких пленок и приведены характеристики материалов подложек для изготовления гибридно-пленочных интегральных микросхем (ГПИМС). Также приведены необходимые данные для проектирования и расчета структуры ГИС. 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. Раздел содержит описание различных конструкций тонкопленочных конденсаторов, методику расчетов конденсаторов без построечных секций и конденсаторов повышенной точности. Обоснован выбор материала для диэлектрических пленок тонкопленочных конденсаторов. Представлена методика расчета различных пленочных индуктивных элементов.

Второй раздел посвящен изучению конструкций и методик расчета навесных активных элементов – диодов и биполярных транзисторов. Приводится оценка эквивалентных схем диодов, построенных на биполярных транзисторах, которые изготовлены по планарной технологии с рассмотрением частотных факторов их работы.

Третий раздел содержит принципы создания и расчета диффузионных резисторов и конденсаторов на базе кремниевой технологии в полупроводниковых интегральных микросхемах.

Издание может быть полезно в качестве материала для самостоятельной работы студентов, обучающихся по специальности 1-41 01 02 «Микроэлектронные технологии и системы» и 1-41 01 03 «Квантовые информационные системы» всех форм обучения.

1 КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПЛЕНОЧНЫХ ПАССИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОСХЕМ

1.1 Общие сведения о подложках и их свойствах

Гибридные микросхемы находят широкое применение в современной РЭА. Этот класс микросхем обладает рядом достоинств, к числу которых в первую очередь относится возможность использования самых разнообразных активных элементов, что позволяет создавать схемы с широким диапазоном выполняемых функций. Номинальные значения пассивных элементов гибридных микросхем могут изменяться в очень широких пределах, причем воспроизведение номинала может быть достигнуто с высокой точностью. Кроме того, элементы гибридных микросхем характеризуются высокой температурной и временной стабильностью.

Основными конструктивными элементами как тонкопленочных, так и толстопленочных гибридных микросхем являются:

- исходная диэлектрическая подложка;
- пленочные резисторы, конденсаторы, индуктивности, проводники и контактные площадки, а также RC- и LC-структуры;
- навесные бескорпусные полупроводниковые приборы (транзисторы, диоды, тиристоры, МДП-структуры и т. д.) и микросхемы;
- навесные миниатюрные пассивные элементы (конденсаторы больших номинальных значений, трансформаторы, дроссели и т. д.), используемые в некоторых типах схем;
- корпус, предназначенный для защиты микросхем от климатических и механических воздействий, облучения и т. д.

Важным составным элементом гибридных микросхем является подложка, которая одновременно выполняет несколько функций: представляет собой конструктивную основу, на которой формируются и монтируются элементы гибридной микросхемы, обеспечивает электрическую изоляцию элементов гибридной микросхемы, а также служит теплоотводящим элементом всей конструкции.

К материалу подложки независимо от конструкции и назначения микросхемы предъявляются следующие требования.

1. *Высокое качество обработки рабочей поверхности*, обеспечивающее четкость и прочность рисунка (топологии) схемы, а также воспроизводимость электрических параметров схемных элементов.

2. *Высокая механическая прочность при относительно небольшой толщине*. В процессе изготовления гибридных микросхем подложка подвергается многократному воздействию высокотемпературных операций, которые могут вызвать ее растрескивание и разрушение. Поэтому она должна обладать хорошими термомеханическими свойствами.

3. *Минимальная пористость*. Пористость подложки влияет на структуру и свойства пленочных элементов. Кроме того, в процессе нагрева из подложки

выделяются адсорбированные газы, которые могут оказывать существенное влияние на качество наносимых пленок. Высокая плотность материала подложки позволяет исключить интенсивное газовыделение.

4. *Высокая теплопроводность.* Выделяемое элементами гибридной микросхемы тепло при работе микросхемы отводится через подложку. Высокая теплопроводность подложки обеспечивает уменьшение температурного градиента на ее поверхности и снижение общего нагрева.

5. *Химическая стойкость.* Химически стойкие подложки можно подвергать воздействию технологических операций, связанных с применением различных химических реагентов. В состав подложки не должны входить вещества, которые могут вступать в реакции с пленками и влиять на их свойства.

6. *Высокое удельное сопротивление.* Подложка является общим основанием для всех элементов, поэтому она должна обладать хорошими диэлектрическими свойствами для обеспечения изоляции элементов схемы.

7. *Близость коэффициентов термического расширения подложки и наносимых на нее пленок.* Это требование необходимо выполнять для исключения возможности появления механических напряжений в пленках.

8. *Низкая стоимость исходного материала и технологии его обработки.*

Кроме того, в зависимости от назначения гибридных микросхем к подложкам предъявляется ряд дополнительных требований. Так, для микросхем, работающих в СВЧ-диапазоне, подложки должны обладать малыми потерями, высокими значениями диэлектрической проницаемости. На практике не удается найти материал, который одновременно удовлетворял бы всем перечисленным требованиям, поэтому в каждом конкретном случае выбор подложки основан на компромиссном решении с учетом наиболее критичных требований к ряду свойств.

Для изготовления подложек гибридных микросхем применяют следующие материалы: стекла электровакуумные С48-3 и С41-1, глазурь Г900-1, керамические вакуумно-плотные материалы 22ХС, поликор, сапфирит, ситаллы СТ-50-1, СТ-38-1 и СТ-32-1, сапфир, кварц и некоторые другие. Параметры материалов, наиболее часто используемых в качестве подложек, приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Электрофизические и механические параметры подложек

Параметр	Стекло	Ситалл	Керамика	Глазурь	Сапфир
	С48-3	СТ-50-1	22ХС	Г-900-1	
1	2	3	4	5	6
Диэлектрическая проницаемость ϵ при $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$ и $f = 1\text{ МГц}$	7,1	8,3–8,5	10,3	13–16	8,6–11
Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ при $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$ и $f = 1\text{ МГц}$	$(12\text{--}15) \times 10^{-4}$	$(12\text{--}20) \times 10^{-4}$	Менее $8 \cdot 10^{-4}$	$(17\text{--}19) \times 10^{-4}$	10^{-4}

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5	6
Температурный коэффициент линейного расширения, °С	$4,8 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-6}$	$(7,5 \pm 0,5) \times 10^{-6}$	$(7,3-7,8) \times 10^{-6}$	$(6,6-9,0) \times 10^{-6}$
Теплопроводность Вт/(м°С)	0,7–1,5	1,4–4	12–13	0,7	25–40
Удельное объемное сопротивление, Ом·см	$1 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{13}$ – $1 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{11}$
Электрическая прочность, кВ/мм	Более 40	Более 40	Более 50	Более 40	–
Класс чистоты поверхности	14	13–14	11	14	14
Температура размягчения, °С	750	1150	1400	420–460	–
Пористость, %	–	0	5–10	–	0

Стекло имеет очень гладкую поверхность и обладает хорошей адгезией ко всем материалам, применяемыми для изготовления гибридных микросхем. К недостаткам подложек из стекла относятся плохая теплопроводность и невысокая механическая прочность.

Керамика является сравнительно недорогим материалом, имеет низкие диэлектрические потери, высокую диэлектрическую проницаемость, малые температурные изменения диэлектрических параметров. Из керамических материалов наилучшим по параметрам является *поликор*, представляющий собой поликристаллический корунд с предельно высокой плотностью. Керамические подложки обладают повышенной механической прочностью и теплопроводностью, что позволяет их использовать при изготовлении мощных гибридных микросхем с большим тепловыделением. Для изготовления толсто пленочных гибридных микросхем используется керамический материал марки 22ХС. Основным недостатком керамики обусловлен сравнительно высокой шероховатостью ее поверхности. Микронеровности керамики достигают 2 мкм, поэтому при изготовлении тонкопленочных гибридных микросхем керамические подложки применяются редко. Шероховатость керамики может быть снижена последующей обработкой ее поверхности, например полировкой или глазуровкой тонким слоем стекла. Такая обработка улучшает свойства поверхности, но вместе с тем вызывает изменение свойств керамики и повышение стоимости производства подложек.

В настоящее время наибольшее применение для подложек тонкопленочных гибридных микросхем находят ситалл и фотоситалл.

Ситалл является стеклокерамическим материалом, получаемым

термообработкой стекла, и достаточно легко поддается обработке: его можно прессовать, вытягивать, прокатывать и отливать центробежным способом. По сравнению со стеклом ситалл имеет в несколько раз большую механическую прочность, а также более высокую температуру начала деформации. Ситалл имеет высокую сопротивляемость к истиранию, высокую химическую стойкость к кислотам, очень малую пористость, дает незначительную объемную усадку, он газонепроницаем и обладает малой газоотдачей при высоких температурах.

Фотоситалл получают путем кристаллизации светочувствительного стекла. Этот материал устойчив к кислотам, обладает высокой механической и термической стойкостью. Теплопроводность фотоситалла в несколько раз превышает теплопроводность ситалла.

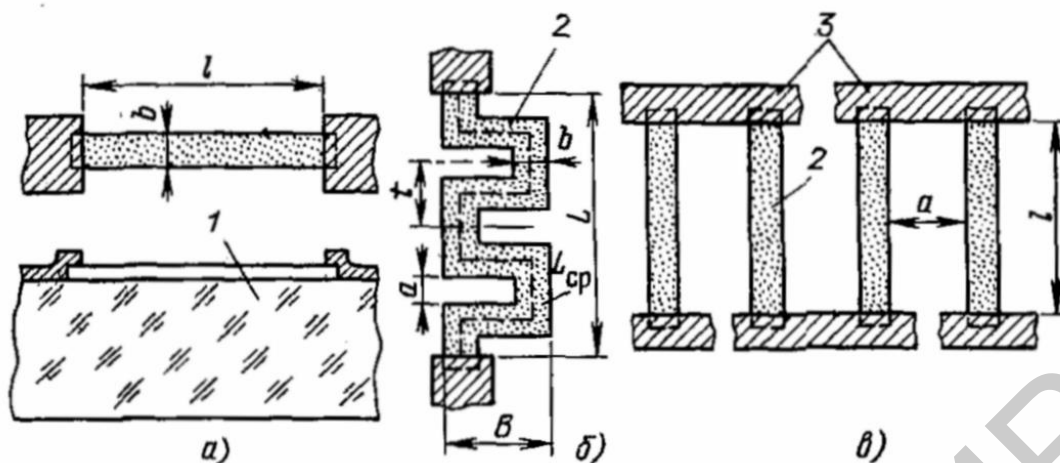
Сапфир представляет собой монокристаллическую окись алюминия. Материал характеризуется очень малыми диэлектрическими потерями в СВЧ-диапазоне, высокой теплопроводностью, механической прочностью, устойчивостью к воздействиям высокой температуры, влаги. На подложках из сапфира можно выращивать эпитаксиальные полупроводниковые пленки для получения активных элементов. Однако стоимость таких подложек является очень высокой, что ограничивает возможность их практического применения.

Подложки для гибридных микросхем имеют, как правило, квадратную или прямоугольную форму. Длина подложек l и ширина b нормированы, причем рекомендуемыми являются размеры со следующими значениями произведения $l \times b$: 60×48 , 30×48 , 30×24 , 30×16 , 20×16 , 10×16 , 10×12 , 5×6 .

Толщину подложек рекомендуется принимать равной 0,6, 1,0 или 1,6 мм с отклонениями до 0,06 мм. В отдельных случаях подложки могут быть и более тонкими (до 0,2 мм). Отклонения размеров l и b допускаются в пределах 0,2–0,3 мм. Неперпендикулярность сторон не должна превышать 0,1 мм, непараллельность плоскостей должна составлять не более 0,05 мм. Подложки больших размеров используются для изготовления за один технологический цикл нескольких одинаковых пленочных схем с последующей разрезкой их на меньшие платы.

1.2 Конструкции пленочных резисторов

Пленочный резистор конструктивно состоит из резистивной пленки, имеющей определенную конфигурацию, и контактных площадок. На рисунке 1.1 показаны наиболее распространенные конфигурации таких резисторов: прямоугольная (см. рисунок 1.1, *а*), применяемая для реализации резисторов с малым сопротивлением, типа меандр (см. рисунок 1.1, *б*) и последовательное соединение резистивных пленочных полосок (см. рисунок 1.1, *в*), используемое для реализации резисторов большого сопротивления. Во всех этих конфигурациях отсутствуют наклонные и кривые линии различных радиусов, поэтому изготовление фотошаблонов (или масок) резистивных слоев гибридных микросхем существенно упрощается.



a – прямоугольная; b – типа меандр; $в$ – последовательное соединение полосок;
 1 – подложка, 2 – резистор, 3 – проводящая пленка;
 l, b – длина и ширина резистивной пленки; L, B – длина и ширина меандра;
 a – расстояние между резистивными полосками;
 t – шаг одного звена меандра;
 L_{cp} – длина резистивной пленки по средней линии
 Рисунок 1.1 – Конфигурация пленочных резисторов

При изготовлении резисторов с высокой мощностью рассеяния используют расщепление конструкции. Метод расщепления на ряд параллельных полосок позволяет уменьшить перегрев резистора и более равномерно распределить тепловую энергию по плоскости подложки при изменении только одного размера резистора – его ширины.

К пленочным резисторам предъявляются следующие основные требования: стабильность во времени; малая занимаемая площадь на подложке; низкий температурный коэффициент сопротивления; требуемая мощность рассеяния; низкий уровень шумов; малые значения паразитных параметров.

Конструирование пленочного резистора должно начинаться с выбора материала резистивной пленки. В тонкопленочных гибридных микросхемах используемые резистивные материалы можно разделить на три группы: металлы и их сплавы (тантал, хром, титан, нихром и др.), металлосилицидные сплавы (РС3710, МЛТ-3М, РС-3001 и др.), керметы (металлокерамика). Параметры наиболее часто применяемых резистивных материалов приведены в таблице 1.2.

Для выполнения резисторов толстопленочных гибридных микросхем используют различные пасты. Резистивные пасты во многом сходны с проводящими. В качестве функционального материала в пастах применяют металлы Ag, Au, Pt, In, Os, Ro, сплавы Pt-Au, Pd-Ag, Pd-Au и комбинации металлов с окислами (например, Pd-PdO-Ag). Параметры резистивных паст приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Параметры материалов пленочных резисторов

Материал резистора	Материал контактных площадок	Удельное поверхностное сопротивление ρ_s , Ом/□	Температурный коэффициент сопротивления ТКС-10, град	Удельная мощность рассеяния, Вт/см ²	Относительное изменение сопротивления за 1000 ч работы, %	Способ нанесения пленок
1	2	3	4	5	6	7
Хром	Золото	10–50	–2,5	1	1,5–3	Термическое напыление
Нихром	Медь	300	±1	2	1,1–1,3	То же
Сплав МЛТ-3М	Медь с подслоем нихрома (ванадия)	500	±2	2	±0,5	»
Рений	–	300–7000	0–20	–	–	»
Тантал	Алюминий с подслоем нихрома (ванадия)	20–100	–2	3	1	Катодное распыление
	Тантал	10	–2	3	1	То же
Нитрид тантала	То же	200	0	3	0,2	»
Сплав РС-3001	Золото с подслоем хрома	1000–2000	–0,2	2	±0,5	Термическое напыление
Сплав РС-3710	То же	3000	–3	2		То же
Кермет К-50С	»	3000–10000	От –4 до +3	2	±1	
Паста ПР-100	Паста ПП-1	100	От –12 до +10	3	±3	Сеткаграфия
Паста ПР-500	То же	500	От –12 до +10	–	±3	То же
Паста ПР-1К	»	1000	От –12 до +10	3	±3	»
Паста ПР-3К	»	3000	От –12 до +10	3	±3	»
Паста ПР-6К	»	6000	От –12 до +10	3	±3	»
Паста ПР-20К	»	20000	От –12 до +10	3	±3	»
Паста ПР-50К	»	50000	От –12 до +10	3	±3	»
Паста ПР-100К	»	100000	От –12 до +10	3	±3	»

При выборе материала для резисторов рекомендуется стремиться к тому, чтобы все резисторы, расположенные на одной подложке, имели одинаковое удельное поверхностное сопротивление ρ_0 . Оптимальное удельное поверхностное сопротивление для изготовления группы резисторов с точки зрения минимума занимаемой площади:

$$\rho_{0\text{опт}} = \sqrt{\frac{\sum_i^n R_i}{\sum_i^n 1/R_i}}, \quad (1.1)$$

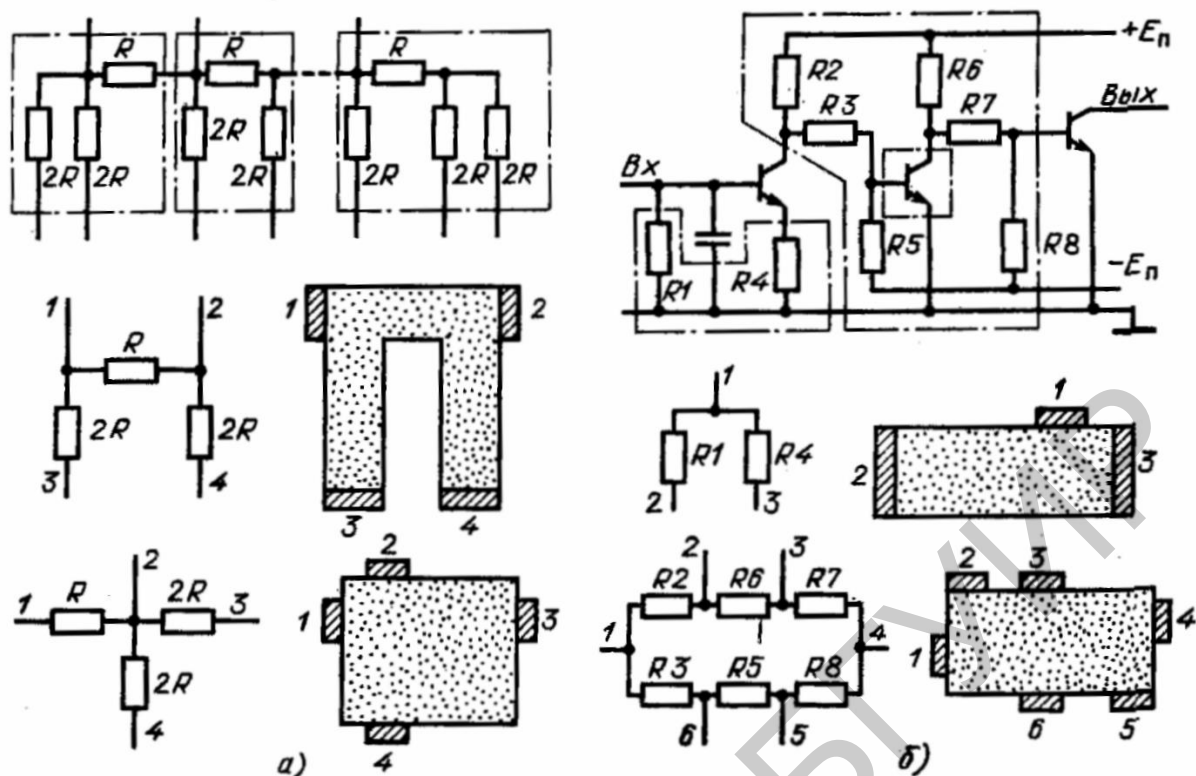
где n – число резисторов;

R_i – номинал i -го резистора.

Помимо пленочных резисторов с сосредоточенными параметрами, в гибридных микросхемах используют резисторы распределенного сопротивления, которые представляют собой резистивный слой прямоугольной либо иной конфигурации с расположенными по периметру или в зоне слоя омическими контактами. Эквивалентной схемой резисторов распределенного сопротивления является последовательно-параллельная связанная резистивная цепь. На рисунке 1.2 приведены принципиальные электрические схемы, группы соединенных между собой резисторов (выделены штриховыми линиями) выполнены в виде резисторов распределенного сопротивления.

Переход от пленочных резисторов с сосредоточенными параметрами к резисторам распределенного сопротивления имеет следующие преимущества:

- 1) уменьшение в 5–10 раз занимаемой полезной площади подложки;
- 2) снижение вероятности выхода схемы из строя из-за локальных механических дефектов – сквозных отверстий (проколов), царапин;
- 3) предотвращение старения резистивного слоя, поскольку в резисторах распределенного сопротивления наблюдаются более равномерное рассеяние тепловой энергии и относительно большая площадь слоя, что исключает локальный перегрев;
- 4) минимизация числа соединений в схеме, так как исключаются все внутренние коммутационные узлы резистивной цепи;
- 5) использование более простых технологических процессов фотолитографии и травления, что обусловлено несложной геометрией резисторов распределенного сопротивления и менее жесткими допусками.



a – принципиальная электрическая схема цифро-аналогового преобразователя, топология выделенных резисторов распределенного сопротивления; *б* – принципиальная электрическая схема низкочастотного усилителя, топология выделенных резисторов распределенного сопротивления

Рисунок 1.2 – Резисторы с распределенным сопротивлением

1.3 Расчет пленочных резисторов

Конструктивный расчет тонкопленочных резисторов заключается в определении их формы, геометрических размеров и минимальной площади, занимаемой резисторами на подложке. При этом необходимо, чтобы резисторы обеспечивали рассеивание заданной мощности при удовлетворении требуемой погрешности γ_R в условиях существующих технологических возможностей.

Исходными для расчета являются:

1) схемотехнические данные (из принципиальной электрической схемы микросхемы): номинал резистора R , Ом; допуск на номинал γ_R , %; мощность рассеяния P , мВт;

2) технологические данные и ограничения, которые зависят от выбора технологического метода создания пленочных элементов: масочного (М), фотолитографического (Ф), комбинированного – масочного совместно с фотолитографическим (МФ), электронно-ионного (ЭИ) и танталовой технологии (ТА);

3) эксплуатационные данные: диапазон рабочих температур, продолжительность работы и др.

Расчет пленочных резисторов начинают с выбора материала (см.

таблицу 1.2). Критериями выбора материала являются оптимальное значение ρ_0 , максимальное значение ρ_0 и минимальное значение ТКС (температурного коэффициента сопротивления). Далее проводят проверку правильности выбора материала с точки зрения обеспечения точности изготовления резисторов.

Полная относительная погрешность резистора определяется суммой погрешностей его изготовления и конструкции, а также погрешностей, обусловленных влиянием условий эксплуатации:

$$\gamma_R = \frac{\Delta R}{R} = \gamma_{K_\phi} + \gamma_{\rho_0} + \gamma_{R_t} + \gamma_{R_{ст}} + \gamma_{R_k}, \quad (1.2)$$

где γ_{K_ϕ} – погрешность коэффициента формы;

γ_{ρ_0} – относительная погрешность воспроизведения ρ_0 ;

γ_{R_t} – температурная погрешность;

$\gamma_{R_{ст}}$ – погрешность, обусловленная старением пленки;

γ_{R_k} – погрешность переходных сопротивлений контактов.

Погрешность коэффициента формы γ_{K_ϕ} зависит от погрешностей геометрических размеров резистора – длины l и ширины b :

$$\gamma_{K_\phi} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta b}{b}, \quad (1.3)$$

где Δl , Δb – абсолютные погрешности воспроизведения длины и ширины резистора соответственно.

Погрешность воспроизведения удельного поверхностного сопротивления $\gamma_{\rho_0} = \Delta \rho_0 / \rho_0$ зависит от материала, способа и условий нанесения резистивной пленки. В условиях серийного производства ее значение не превышает 5 %.

Температурная погрешность зависит от ТКС материала пленки и определяется по формуле

$$\gamma_R = \alpha_R (T_{\max} - T_{\min}), \quad (1.4)$$

где α_R – температурный коэффициент сопротивления материала пленки, $1/^\circ\text{C}$.

Погрешность $\gamma_{R_{ст}}$, обусловленная старением пленки, вызвана медленным изменением структуры пленки во времени, а также ее окислением. Она зависит от материала пленки и эффективности защиты, а также от условий хранения и эксплуатации. Обычно $\gamma_{R_{ст}}$ не превышает 3 %.

Погрешность переходных сопротивлений контактов γ_{R_k} зависит от технологических условий напыления пленок, удельного сопротивления резистивной пленки и геометрических размеров контактного перехода; длины

перекрытия контактирующих пленок, ширины резистора. Обычно $\gamma_{R_k} = 1-2\%$.

Допустимая погрешность коэффициента формы, исходя из формулы (1.2):

$$\gamma_{K_{\text{доп}}} = \gamma_R - \gamma_{\rho_0} - \gamma_{R_0} - \gamma_{R_t} - \gamma_{R_k}. \quad (1.5)$$

Если значение $\gamma_{K_{\phi}}$ отрицательно или равно нулю, это означает, что изготовление резистора заданной точности из выбранного материала невозможно. В этом случае необходимо выбрать другой материал с меньшими значениями α_R , $\gamma_{R_{\text{ст}}}$ и γ_{R_k} либо использовать подгонку резистора.

Конструкцию резисторов определяют по значению коэффициента формы. Номинал резистора является функцией ρ_0 и геометрических размеров:

$$R = \rho_0 \frac{l}{b} = \rho_0 K_{\phi}, \quad (1.6)$$

где $K_{\phi} = l/b$ – коэффициент формы резистора.

Если известен номинал резистора и выбран материал резистивной пленки, то коэффициент формы составляет

$$K_{\phi} = \frac{R}{\rho_0}. \quad (1.7)$$

При $1 < K_{\phi} < 10$ рекомендуется конструировать резистор прямоугольной формы, при $K_{\phi} > 10$ – резистор сложной формы (составной, меандр или типа змейки), при $0,1 < K_{\phi} < 1$ – резистор прямоугольной формы, у которого длина меньше ширины. Конструировать резисторы с $K_{\phi} < 0,1$ не рекомендуется, так как он будет иметь большие контактные площадки и занимать значительную площадь на подложке. Порядок дальнейшего расчета зависит от формы резистора.

Расчет резисторов прямоугольной формы. Для резисторов с $1 < K_{\phi} < 10$ сначала определяют ширину резистора из условия

$$b_{\text{расч}} \geq \max \{b_{\text{техн}}; b_{\text{точн}}; b_p\}, \quad (1.8)$$

где $b_{\text{техн}}$ – минимальная ширина резистора, определяемая возможностями технологического процесса (данные приводятся в подразделе 3.1 в таблице 3.1);

$b_{\text{точн}}$ – минимальная ширина резистора, обусловленная точностью воспроизведения;

b_p – минимальная ширина резистора, при которой обеспечивается рассеяние заданной мощности без нарушения структуры пленки. Определяется соотношением:

$$b_p = \left(\frac{P_{p0}}{P_0 R} \right)^{1/2}. \quad (1.9)$$

За ширину резистора b принимают ближайшее к $b_{\text{расч}}$ большее значение, кратное шагу координатной сетки, принятому для чертежа топологии с учетом масштаба. Для гибридных микросхем шаг координатной сетки обычно составляет от 0,1 до 1 мм. Например, если шаг координатной сетки составляет 0,1 мм в масштабе 10:1, то округление производят до величины, кратной 0,1 мм. Коэффициент нагрузки по мощности рассеяния, определяемый соотношением

$$K = \frac{b_p^2}{b^2}, \quad (1.10)$$

не должен превышать единицы. Если $K > 1$, то расчет необходимо скорректировать.

Далее определяют расчетную длину резистора:

$$l_{\text{расч}} = bK_{\phi}, \quad (1.11)$$

причем за длину резистора l принимают ближайшее к $l_{\text{расч}}$ значение, кратное шагу координатной сетки, принятому для чертежа топологии. При округлении значения $l_{\text{расч}}$ до ближайшего целого необходимо оценивать получающуюся погрешность и при необходимости выбирать большее значение ширины резистора b , при котором округление длины обеспечивает получение заданной точности.

Затем находят полную длину резистора с учетом перекрытия контактных площадок:

$$l_{\text{полн}} = l + 2b, \quad (1.12)$$

где b — размер перекрытия резистора и контактных площадок (см. табл. 1.3). Определяется по формуле:

$$b \geq \frac{\Delta b + \Delta l / K_{\phi}}{\gamma K_{\phi, \text{доп}}}. \quad (1.13)$$

Площадь, занимаемую резистором на подложке, вычисляют по формуле

$$S = l_{\text{полн}} b. \quad (1.14)$$

Для резисторов, имеющих $K_{\phi} < 1$, сначала определяют длину, а затем ширину резистора.

Расчетная длина резистора $l_{\text{расч}}$ должна быть не меньше наибольшего значения одной из трех величин:

$$l_{\text{расч}} \geq \max\{l_{\text{техн}}; l_{\text{точн}}; l_p\}. \quad (1.15)$$

Величины, входящие в правую часть неравенства $l_{\text{техн}}$, $l_{\text{точн}}$, l_p , определяются аналогично $b_{\text{техн}}$, $b_{\text{точн}}$ и b_p , причем

$$l_{\text{точн}} \geq \frac{\left(\Delta l + \Delta b / K_{\phi}\right)}{\gamma K_{\phi, \text{доп}}}, \quad (1.16)$$

$$l_p = \sqrt{\frac{PK_{\phi}}{P_0}}. \quad (1.17)$$

За длину резистора принимается ближайшее целое значение, кратное шагу координатной сетки, принятому для чертежа топологии.

Расчетное значение ширины резистора составляет

$$b_{\text{расч}} = l / K_{\phi}. \quad (1.18)$$

За ширину резистора принимают ближайшее к $b_{\text{расч}}$ значение, кратное шагу координатной сетки. Площадь резистора определяют по формуле (1.14).

Расчет резистора типа меандр. Резисторы типа меандр рассчитываются из условий минимальной площади, занимаемой резистором. Расчет начинают с определения b по формулам (1.8) и (1.9), затем находят длину средней линии меандра

$$l_{\text{ср}} = bK_{\phi}. \quad (1.19)$$

После этого задают расстояние a , исходя из технологических ограничений, и находят шаг одного звена меандра:

$$t = a + b. \quad (1.20)$$

Затем определяют оптимальное число звеньев меандра $n_{\text{опт}}$. Если отношение $l_{\text{ср}}/b > 10$, то оптимальное число звеньев меандра может быть вычислено по приближенной формуле

$$n_{\text{опт}} \approx \sqrt{\left(\frac{l_{\text{ср}}}{t}\right)\left(\frac{B}{L}\right)}. \quad (1.21)$$

При $L = B$ (меандр квадратной формы) и $a = b$ выражение упрощается:

$$n_{\text{опт}} = \sqrt{K_{\phi} / 2}. \quad (1.22)$$

Значение $n_{\text{опт}}$ округляют до ближайшего целого. Габаритные размеры меандра определяются соотношениями

$$L = n(a + b), \quad (1.23)$$

$$B = (l_{\text{ср}} - an)/n, \quad (1.24)$$

где n – оптимальное число звеньев меандра, округленное до ближайшего целого. Площадь, занимаемая резистором типа меандр, определяется по формуле

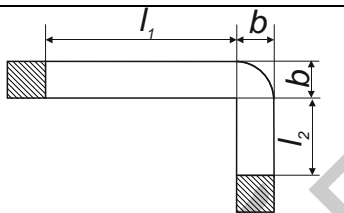
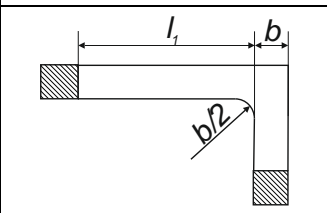

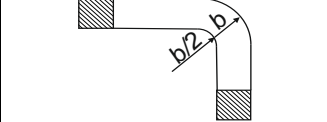
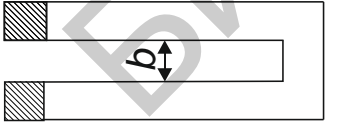
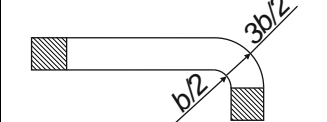
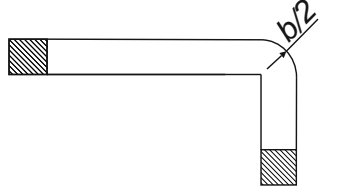
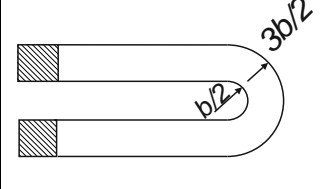
$$S_M = LB. \quad (1.25)$$

Квадратная или близкая к ней форма резистора типа меандр часто оказывается неудобной при компоновке пленочных элементов на подложке. В этом случае, зная габаритную площадь S_M , задают один из размеров меандра (L или B), определяют второй размер ($B = S_M/L$ или $L = S_M/B$) и число звеньев n меандра, используя формулы (1.22) или (1.23).

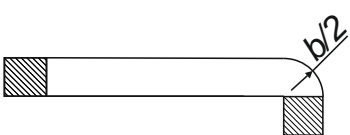
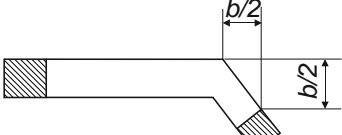
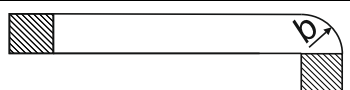
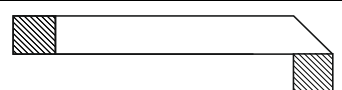
Расчет резисторов сложной конфигурации.

Коэффициенты формы для некоторых конфигураций пленочных резисторов приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Коэффициенты формы для различных конструкций пленочных резисторов

Конструкция пленочных резисторов	Коэффициент формы	Конструкция пленочных резисторов	Коэффициент формы
1	2	3	4
	$K_\phi = \frac{l_1 + l_2}{b} + 0,559$		$K_\phi = \frac{l_1 + l_2}{b}$
	$K_\phi = \frac{l_1}{b} + 0,649$		$K_\phi = \frac{l_1 + l_2}{b} + 0,341$
	$K_\phi = \frac{2l_1}{b} + 2,111 \pm 0,006$		$K_\phi = \frac{l_1}{b} + 1,48 \pm 0,05$
	$K_\phi = \frac{l_1 - l_2}{b} + 0,57 \pm 0,01$		$K_\phi = \frac{2l_1}{b} + 2,96 \pm 0,1$

Продолжение таблицы 1.3

1	2	3	4
	$K_{\phi} = \frac{l_1}{b} + 0,48 \pm 0,01$		$K_{\phi} = \frac{l_1}{b} + 0,36$
	$K_{\phi} = \frac{l_1}{b} + 0,493$		$K_{\phi} = \frac{l_1}{b} + 0,564$

Если пленочному резистору необходимо придать криволинейную форму, приведенную на рисунке 1.3, а, то сопротивление для изгиба закругленной формы (см. рисунок 1.3, б) рассчитывают по формуле

$$R' = \rho_0 \frac{1,57}{\ln(r_1/r_2)}, \quad (1.26)$$

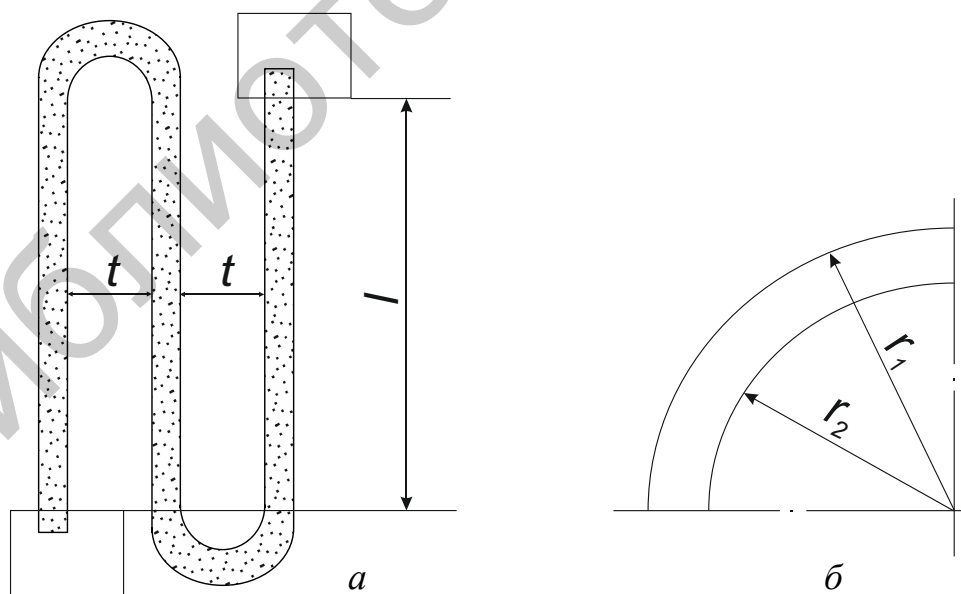
где r_1 и r_2 – внешний и внутренний радиусы изгиба соответственно.

При этом полное сопротивление резистивной пленки, имеющей форму «змейки» составляет

$$R = R'n + \rho_0 l_{\Sigma} / b, \quad (1.27)$$

где n – число изгибов конфигурации;

l – суммарная длина прямолинейных участков криволинейного резистора.



a – общий вид; b – элемент изгиба

Рисунок 1.3 – Конструкция криволинейного резистора

Расчет резисторов можно производить с помощью номограммы, представленной на рисунке 1.4.

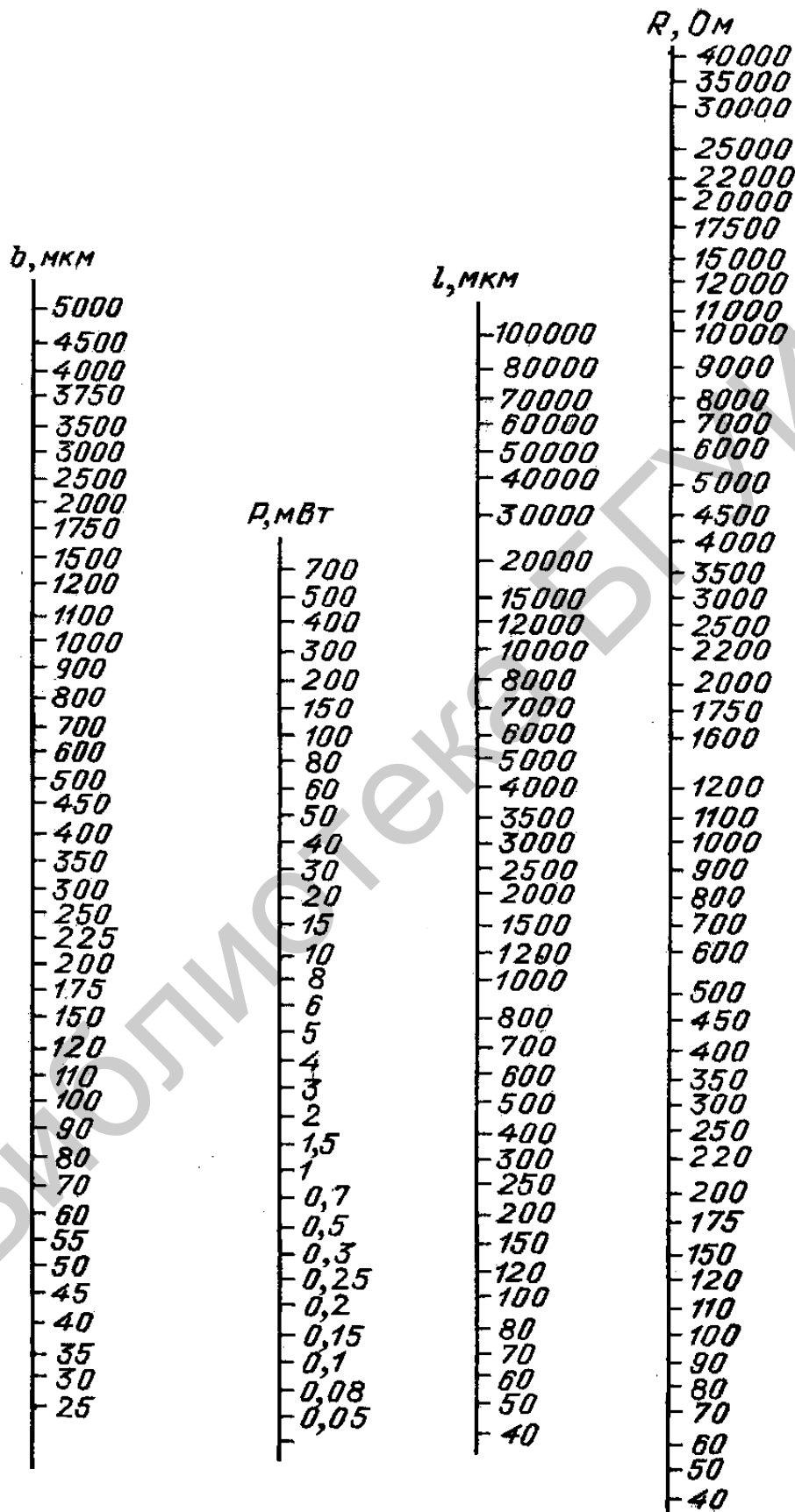


Рисунок 1.4 – Номограмма для расчета параметров пленочных резисторов

Если известны два любых значения из четырех (b , P , l , R), то по номограмме можно найти два других. Для этого необходимо отметить известные значения на соответствующих вертикальных линиях номограммы и провести прямую, пересекающую все вертикальные линии. Точки пересечения двух других вертикальных линий определяют искомые значения. Например, если задано номинальное значение резистора R и из технологических допусков определена ширина b , то можно найти допустимую мощность рассеяния и длину резистивного слоя. Если при данной ширине b допустимая мощность рассеяния на резисторе оказывается неприемлемой, то, зная значения R и P , можно найти b и l . Значения сопротивления резистора для пленки с удельным сопротивлением ρ_{0x} , отличным от приведенного значения ρ_0 , определяются как

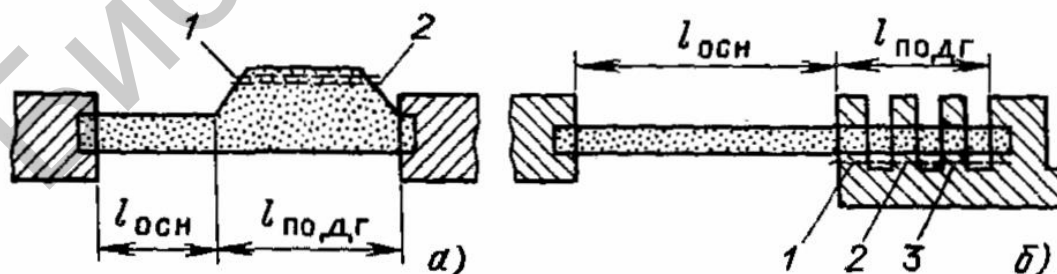
$$R_{\rho_{0x}} = R / K, \quad (1.28)$$

где $K = 500/\rho_{0x}$. Значения R в номограмме приведены для $\rho_0 = 500 \text{ Ом}/\square$.

В некоторых схемах требуется использовать резисторы, точность получения которых превышает точность, обеспечиваемую возможностями принятого технологического способа изготовления. В этих случаях при конструировании гибридной микросхемы применяют специальные пленочные резисторы, сопротивление которых перед монтажом микросхем подвергается подгонке и не выходит за пределы малых допусков.

Наиболее распространены способы подгонки сопротивления пленочных резисторов путем перерезания пленки резцом манипулятора или испарения части материала резистора с помощью луча лазера.

На рисунке 1.5 представлены некоторые конструктивные формы пленочных резисторов с повышенной точностью получения номинальных значений сопротивления. Подгонка сопротивлений таких резисторов может осуществляться механическими способами. Пленочные резисторы с повышенной точностью получения сопротивления содержат два участка: основной участок длиной $l_{\text{осн}}$ и участок подгонки длиной $l_{\text{подг}}$.



a – с расширенным участком подгонки; b – со ступенчатым способом подгонки:
1, 2, 3 – нумерация разрывов пленки, наносимых с целью подгонки сопротивления резистора

Рисунок 1.5 – Пленочные резисторы повышенной точности

Сопrotивление участка подгонки можно изменять путем удаления части резистивной пленки с расширенного участка подгонки (см. рисунок 1.5, а) или ступенчатым последовательным подключением к основному участку резистора участков резистивной пленки, закороченных при изготовлении резистора проводящими перемычками (см. рисунок 1.5, б).

На рисунке 1.5 разрывы пленки показаны штриховыми линиями, нумерация дана в последовательности их нанесения.

Расчет толстопленочных резисторов. При расчете пассивных толстопленочных элементов необходимо учитывать следующие особенности толстопленочной технологии:

1) пленочные элементы могут располагаться на обеих сторонах платы (соединения между элементами осуществляются через отверстия или внешние контактные площадки);

2) большой разброс параметров пассивных элементов (до $\pm 50\%$), который обусловлен разбросом электрофизических параметров толстых пленок.

Для обеспечения необходимой для практики точности ($\pm 2-10\%$) производят подгонку. Все резисторы должны иметь прямоугольную форму, причем не рекомендуется использовать резисторы с $K_\phi < 0,2$ и $K_\phi > 6$. Допускается использование различных паст, но не более трех видов с одной стороны платы.

Расчет резисторов на основе толстых пленок производят аналогично расчету резисторов на основе тонких пленок, исключая расчет резисторов на точность. Первоначально резисторы делят на несколько групп (по их номинальным значениям) и для каждой группы определяют оптимальное значение удельного сопротивления резистивной пасты $\rho_{0,опт}$, далее выбирают тип резистивной пасты (см. таблицу 1.2). Затем находят K_ϕ и при $K_\phi > 1$ определяют ширину резистора из условия $b_{расч} \geq \max\{b_{техн}\}$, где $b_{техн} = 0,8$ мм;

$$b_p \geq \sqrt{K_p P_i / (P_0 K_\phi)}, \quad (1.29)$$

где $K_p = 1 + \gamma_R / 50$ – коэффициент запаса мощности, учитывающий подгонку резисторов.

Расчетная длина резистора $l_{расч} = K_\phi b_{расч}$.

Полученные расчетные значения $b_{расч}$ и $l_{расч}$ корректируются в сторону уменьшения резистора R_i путем округления до значений, кратных шагу координатной сетки, с учетом масштаба чертежа топологии (значение $b_{расч}$ корректируют в большую сторону, а $l_{расч}$ – в меньшую). Полная длина резистивной полоски с учетом перекрытия с контактными площадками $l_{полн} = l + 2e$, где e – минимальный размер перекрытия; обычно e определяют

равным ширине проводника.

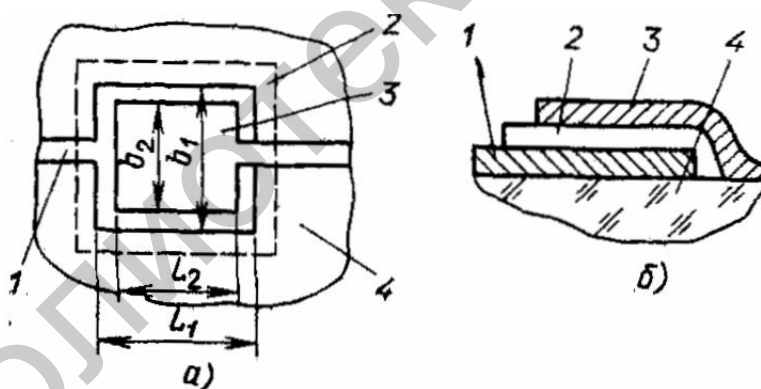
Для резисторов, имеющих $K_\phi < 1$, расчет начинается с определения длины:

$$l_{\text{расч}} \geq \max\{l_{\text{техн}}; l_p\}, l_p = \sqrt{K_p P_i K_\phi / P_0} b_{\text{расч}} = l_{\text{расч}} / K_\phi. \quad (1.30)$$

Площадь резистора $S = l_{\text{техн}} b$. Требуемое значение сопротивления достигается плавной лазерной подгонкой.

1.4 Конструкции пленочных конденсаторов

Наряду с резисторами конденсаторы относятся к числу наиболее распространенных элементов гибридных микросхем. По конструкции пленочный конденсатор в большинстве случаев представляет собой трехслойную структуру (рисунок 1.6) и состоит из нижней обкладки 1, диэлектрической пленки 2, и верхней обкладки 3. Вся конструкция наносится на подложку 4. Площадь нижней обкладки конденсатора, равная произведению $b_1 L_1$, превышает площадь верхней обкладки, равной произведению $b_2 L_2$, а площадь диэлектрической пленки больше площади нижней обкладки. Это исключает возможность замыкания обкладок и устраняет погрешность от их смещения.



a – топология; *б* – поперечное сечение:

1 – нижняя обкладка; 2 – диэлектрическая пленка; 3 – верхняя обкладка; 4 – подложка

Рисунок 1.6 – Конструкция пленочного конденсатора

К материалу обкладок пленочного конденсатора предъявляются следующие требования: высокая электропроводность, обеспечивающая малые потери энергии, хорошая адгезия, малая миграционная подвижность атомов. Последнее из этих требований не позволяет использовать в качестве материалов обкладок золото или медь, так как для них характерна высокая подвижность атомов. Вследствие их диффузии в диэлектрике могут возникать короткие замыкания. Для выполнения обкладок не пригодны также металлы с высокой температурой испарения, например никель или хром. Это связано с

тем, что атомы таких металлов, обладая высокой энергией при температуре испарения, пронизывают диэлектрический слой и вызывают короткое замыкание обкладок.

Наиболее подходящим материалом для обкладок тонкопленочного конденсатора является алюминий, который имеет сравнительно невысокую температуру испарения, и, следовательно, его атомы имеют низкую энергию в процессе напыления.

В ряду электропроводности алюминий занимает третье место после золота и серебра, т. е. электрическое сопротивление обкладок из алюминия оказывается достаточно малым, что обеспечивает высокую добротность изготовленных конденсаторов. Конденсаторы с алюминиевыми обкладками надежны, поскольку атомы алюминия имеют малую миграционную подвижность. Это объясняется образованием на поверхности алюминия оксидного слоя Al_2O_3 , который препятствует диффузии атомов алюминия в диэлектрик. Для улучшения адгезии алюминия к подложке используют подслой титана или хрома.

Диэлектрик, применяемый в тонкопленочных конденсаторах, должен обладать малыми диэлектрическими потерями, высокой электрической прочностью, хорошей адгезией к подложке и к обкладкам, малым температурным коэффициентом емкости, стабильностью физических параметров в диапазоне рабочих температур, достаточно высокой диэлектрической проницаемостью. Кроме того, температурный коэффициент линейного расширения диэлектрика (ТКЛР) должен быть согласован с соответствующими коэффициентами подложки и материала обкладки. Электрические параметры наиболее часто применяемых тонкопленочных конденсаторов приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Параметры материалов пленочных конденсаторов

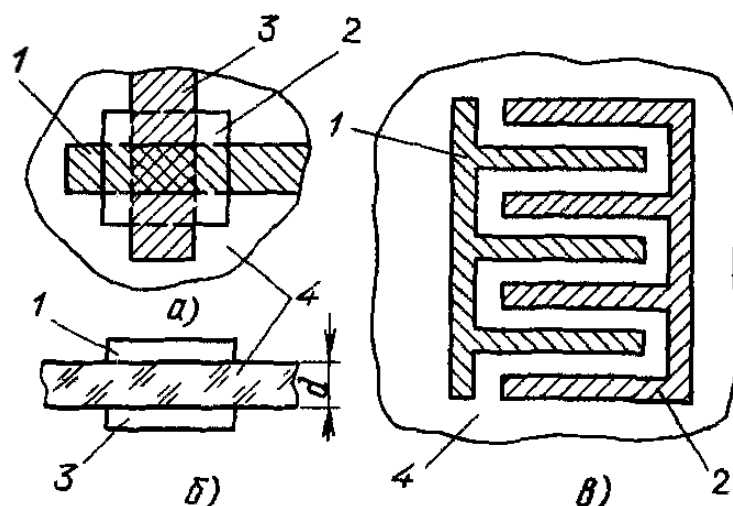
Материал диэлектрика	Материал обкладок	Диэлектрическая проницаемость ϵ на частоте 1 кГц	Удельная емкость C_0 , пФ/см ²	Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ на частоте 1 кГц	Температурный коэффициент емкости $TKE \cdot 10^4$, град ⁻¹	Электрическая прочность $E_{\text{пр}} \cdot 10^{-6}$, В/см	Стабильность за 1000 ч работы, %	Способ нанесения пленок
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Монооксид кремния	Алюминий	5–6	5000–10000	0,01–0,02	2–3,5	2–3	$\pm(1,5–6)$	Термодинамическое испарение
Монооксид германия	То же	10–12	5000–10000	0,001–0,002	3–5	1	–1	То же

Продолжение таблицы 1.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Диоксид кремния	>>	4	20000	0,5	0,3–1	5–10	±1	Реактивное распыление
Оксид алюминия	Алюминий, никель	8	30000–40000	0,3–1	3–4	5	±1	Реактивное распыление, анодное окисление
Оксид тантала	Тантал, ванадий	20–23	50000–200000	0,02	4	2	±1	То же
Боросиликатное стекло (БСС)	Алюминий, ванадий, титан	3,9–4,2	15000	0,001	0,2	3–5	±1	Термодинамическое напыление
Алюмосиликатное стекло (АСС)	То же	5,2–5,5	30000	0,003	1,5	3–5	±1	То же
Иттрийборитное стекло (ИБС)	>>	10–12	60000	0,007	5	2–3	±1	>>
Паста ПК-12	Паста ПП-1, ПП-2	–	10000	0,03–0,04	±10	150	±5	Сеткография
Паста ПК 1000-30	>>	–	3700	0,036	±10	150	±5	То же

В толсто пленочных конденсаторах в качестве материалов для изготовления верхних и нижних обкладок используется проводящая паста. Диэлектрическая паста так же, как проводящая и резистивная пасты, состоит из функционального материала, постоянного связующего (легкоплавких стекол) и органических добавок. В качестве функционального материала в диэлектрических пастах применяют керамические наполнители с высокой диэлектрической проницаемостью (титанат бария, двуокись титана и др.) Управление диэлектрической проницаемостью производится изменением доли керамического наполнителя в системе «керамический наполнитель – стекло». Выбранный диэлектрический материал определяет емкость, рабочее напряжение, температурную и временную стабильность емкости, частотные свойства, полярность и размеры пленочных конденсаторов.

Конструкция пленочного конденсатора, представленная на рисунке 1.6, применяется в том случае, когда площадь верхней обкладки S составляет не менее 10 мм^2 . При $S = 5 \dots 10 \text{ мм}^2$ рекомендуется конструировать пленочный конденсатор в виде двух перекрещивающихся под прямым углом пленочных проводников 1 и 3, разделенных диэлектрическим слоем 2, как показано на рисунке 1.7, а. При активной площади пленочного конденсатора меньше 5 мм^2 необходимо применять последовательное соединение нескольких конденсаторов (см. рисунок 1.7, а) или же двустороннюю конструкцию (см. рисунок 1.7, б), в которой диэлектрическим слоем 2 служит материал подложки. При $S = 1 \text{ мм}^2$ рекомендуется конструировать гребенчатый пленочный конденсатор (см. рисунок 1.7, в). Емкость такого конденсатора на 90 % состоит из паразитной емкости, обусловленной краевым эффектом. Точно рассчитать ее невозможно, так как трудно учесть степень проникновения электрического поля в подложку и в воздух или защитное покрытие микросхем.



a – с перекрещивающимися пленочными проводниками; *б* – с использованием подложки в качестве диэлектрического слоя; *в* – гребенчатой конструкции;
 1, 3 – пленочные проводники; 2 – диэлектрический слой; 4 – подложка
 Рисунок 1.7 – Пленочные конденсаторы малой емкости

Емкость гребенчатого пленочного конденсатора, выраженная в пикофарадах, определяется по эмпирической формуле

$$C = \beta \epsilon_r l, \quad (1.31)$$

где β – коэффициент, зависящий от ширины пленочных проводников и расстояния между ними;

l – длина совместной границы проводников, см;

ϵ_r – расчетное значение относительной диэлектрической проницаемости.

Для конденсатора, не имеющего защитного покрытия, расчетное значение относительной диэлектрической проницаемости следующее: $\epsilon_r = (1 + \epsilon_{\Pi}) / 2$; для конденсатора, покрытого защитным слоем: $\epsilon_r = (\epsilon_{\text{д}} + \epsilon_{\Pi}) / 2$. Здесь ϵ_{Π} – относительная диэлектрическая проницаемость материала подложки; $\epsilon_{\text{д}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость слоя покрытия.

Конденсаторы, конструкция которых выполнена, как показано на рисунке 1.7, *a*, характеризуются более высокой точностью получения заданного номинала емкости по сравнению с обычными конденсаторами того же самого номинала.

1.5 Расчет пленочных конденсаторов

Исходными для определения геометрических размеров конденсаторов являются:

– схемотехнические данные (из принципиальной электрической схемы) – номинал конденсатора C , пФ; допуск на номинал γ_c , %; рабочее напряжение

U_p, B ; тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ или добротность $Q(Q = \frac{1}{\operatorname{tg}\delta})$;

– технологические данные и ограничения;
– эксплуатационные данные – диапазон рабочих температур, рабочая частота f_p и др.

Расчет пленочных конденсаторов начинают с выбора материала обкладок и материала диэлектрика (См. таблицу 1.4). Чтобы конденсатор занимал как можно меньшую площадь, нужно выбирать материал диэлектрика с максимальной диэлектрической проницаемостью ϵ , с высокой электрической прочностью E , а также с малыми значениями ТКЕ и $\operatorname{tg}\delta$. Для обеспечения высокой добротности конденсатора необходимо, чтобы материал обкладок имел малое удельное поверхностное сопротивление.

Емкость конденсаторов, состоящих из двух обкладок, разделенных диэлектриком (рисунок 1.6), определяется формулой

$$C = C_0 S, \quad (1.32)$$

где C_0 – удельная емкость;

$S = S_B$ – площадь взаимного перекрытия обкладок (площадь верхней обкладки конденсатора).

Удельная емкость, исходя из условий электрической прочности, определяется из соотношения

$$C_{0u} = \epsilon_0 \epsilon / d, \quad (1.33)$$

где $\epsilon_0 = 0,0885 \text{ пФ/см}^2$ – относительная диэлектрическая проницаемость;

ϵ – диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика;

d – толщина диэлектрика.

Минимальную толщину диэлектрика выбирают таким образом, чтобы конденсатор надежно выдерживал заданное рабочее напряжение:

$$d \geq U_p K_3 / E, \quad (1.34)$$

где K_3 – коэффициент запаса по напряжению ($K_3 = 2 \dots 4$), который определяется требованиями к надежности изделия.

Если необходимо обеспечить заданную погрешность емкости, тогда удельная емкость конденсатора определяется из соотношения

$$C_{\text{точный}} = C(\gamma_s / \Delta L)^2 (K_\phi / (1 + K_\phi))^2, \quad (1.35)$$

где γ_s – относительная погрешность площади конденсатора;

$\Delta L = \Delta B$ – абсолютные погрешности размеров обкладки конденсатора;

$K_\phi = L/B$ – коэффициент формы конденсатора.

Максимально допустимая относительная погрешность площади конденсатора составляет

$$\gamma_s = \gamma_c - \gamma_{c_0} - \gamma_{ca} - \gamma_{ct}, \quad (1.36)$$

где γ_{ca} – относительная погрешность удельной емкости, характеризующая воспроизводимость удельной емкости в условиях данного производства (зависит от материала и погрешности толщины диэлектрика и составляет 3–5 %);

γ_c – относительная погрешность, обусловленная старением пленок конденсатора (зависит от материала и метода защиты и обычно не превышает 2–3 %);

γ_{ct} – относительная температурная погрешность, которая определяется выражением

$$\gamma_{ct} = \alpha_c (T_{\max} - 20^\circ\text{C}), \quad (1.37)$$

После расчета удельной емкости конденсатора по формулам (1.32) и (1.35) выбирают меньшее из двух полученных значений:

$$C_0 = \min \{C_{0v}, C_{0\text{точн}}\}. \quad (1.38)$$

Затем определяют площадь верхней обкладки:

$$S_b = C / C_0. \quad (1.39)$$

Размеры верхней обкладки рассчитывают согласно следующим соотношениям:

$$L_B = \sqrt{S_B K_\phi}, \quad (1.40)$$

$$B_B = L_B / K_\phi. \quad (1.41)$$

Размеры нижней обкладки определяют по формулам

$$L_H = L_B + 2q, \quad (1.42)$$

$$B_H = B_B + 2q, \quad (1.43)$$

где q – размер перекрытия нижней и верхней обкладки конденсатора (см. таблицу 3.1). Размеры диэлектрика составляют

$$L_d = L_H + 2f, \quad (1.44)$$

$$B_d = B_H + 2f, \quad (1.45)$$

где f – размер перекрытия нижней обкладки и диэлектрика.

Затем определяют площадь, занимаемую конденсатором:

$$S_{\text{д}} = L_{\text{д}} B_{\text{д}}. \quad (1.46)$$

При расчете конденсаторов малой площади ($S = 1 \dots 5 \text{ мм}^2$) необходимо учитывать увеличение емкости конденсатора, обусловленное влиянием краевого эффекта (увеличением напряженности электрического поля на краях обкладок); площадь конденсатора должна быть уменьшена:

$$S_{\text{в}} = C / (K C_0), \quad (1.47)$$

где K – коэффициент, учитывающий краевой эффект:

$$K = 1,3 - 0,6C / C_0. \quad (1.48)$$

Конденсатор спроектирован правильно, если рабочий тангенс угла потерь не превышает заданного:

$$\text{tg} \delta_{\text{раб}} \leq \text{tg} \delta. \quad (1.49)$$

Потери в конденсаторе складываются из потерь в диэлектрике и в обкладках:

$$\text{tg} \delta_{\text{раб}} = \text{tg} \delta_{\text{д}} + \text{tg} \delta_{\text{об}}. \quad (1.50)$$

Тангенс угла потерь в диэлектрике является справочным параметром. Потери в обкладках зависят от их сопротивления:

$$\text{tg} \delta_{\text{об}} = 2\pi f_{\text{р}} R_{\text{обк}} C, \quad (1.51)$$

где $R_{\text{об.к}}$ – сопротивление обкладок конденсатора, Ом;

C – емкость конденсатора, Ф;

$f_{\text{р}}$ – рабочая частота, Гц.

Полное сопротивление обеих обкладок рассчитывается по формуле

$$R_{\text{обк}} = (2/3) \rho_{\text{обк}} K_{\text{ф}}, \quad (1.52)$$

где $\rho_{\text{обк}}$ – удельное поверхностное сопротивление материала обкладок (определяют по таблице 1.4). Кроме того, необходимо оценить обеспечение электрического режима и точности конденсатора в заданных условиях эксплуатации, т. е.

$$E_{\text{раб}} \leq E, \quad (1.53)$$

$$R_{\text{раб}} = U_{\text{р}} / d', \quad (1.54)$$

$$d' = 0,0885\varepsilon / C_0, \text{ см}, \quad \gamma_{\text{сраб}} \leq \gamma_s, \quad (1.55)$$

$$\gamma_{\text{сраб}} = \Delta L(1 + K_\phi) / \sqrt{K_\phi S_s}. \quad (1.56)$$

Если одно из неравенств (1.49), (1.53) и уравнение (1.56) не выполняется, то необходимо либо выбрать другой материал диэлектрика или материал обкладок, либо изменить конструкцию конденсатора.

Если в схеме имеется несколько конденсаторов, то для изготовления их в едином технологическом цикле целесообразно выбирать для всех конденсаторов один и тот же диэлектрик с одинаковой толщиной и одинаковой удельной емкостью C_0 .

Для нескольких конденсаторов на одной подложке расчет начинают с конденсатора, имеющего наименьший номинал емкости. После выбора материала и вычислений по формулам (1.32)–(1.36) определяют значение удельной емкости, при котором конденсатор будет занимать минимальную площадь на подложке:

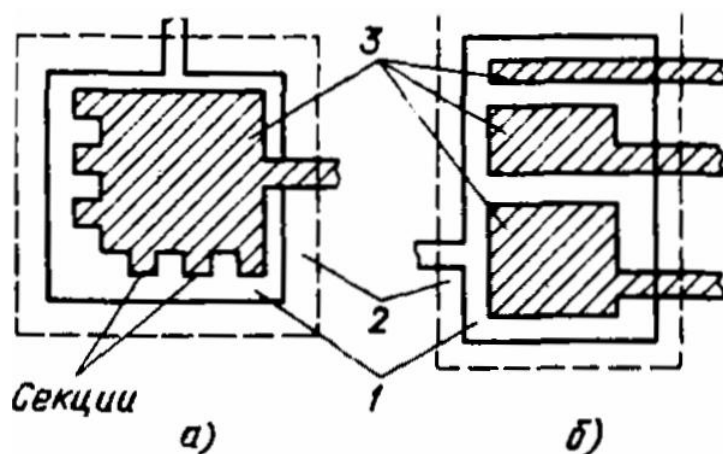
$$C_{0\text{min}} = C_{\text{min}} / S_{\text{min}}. \quad (1.57)$$

Окончательный выбор C_0 производят по формуле

$$C_0 \leq \min\{C_{0U}, C_{0\text{точн}}, C_{0\text{min}}\}. \quad (1.58)$$

Вычисляют толщину диэлектрика, соответствующую удельной емкости, по формуле (1.55). Если толщина диэлектрика не выходит за пределы возможностей тонкопленочной технологии (0,1–1 мкм), то продолжают дальнейший расчет, в противном случае – выбирают другой материал. Если вычисленные размеры конденсаторов оказываются большими, то необходимо выбрать другой диэлектрический материал с более высокой проницаемостью ε . Кроме того, можно увеличить число обкладок или использовать навесные конденсаторы с меньшими геометрическими размерами и достаточно хорошими электрическими характеристиками.

Часто возникает необходимость конструирования пленочных конденсаторов с повышенной точностью получения емкости, превышающей технологические возможности производства. В этом случае в конструкции пленочного конденсатора приходится предусматривать, кроме основной секции с неизменяемой емкостью, участок, емкость которого может изменяться. Конструктивные формы таких конденсаторов показаны на рисунке 1.8. От обычных конденсаторов они отличаются секционированными верхними обкладками.



a – с подстроечными секциями; *б* – с подстроечными обкладками:

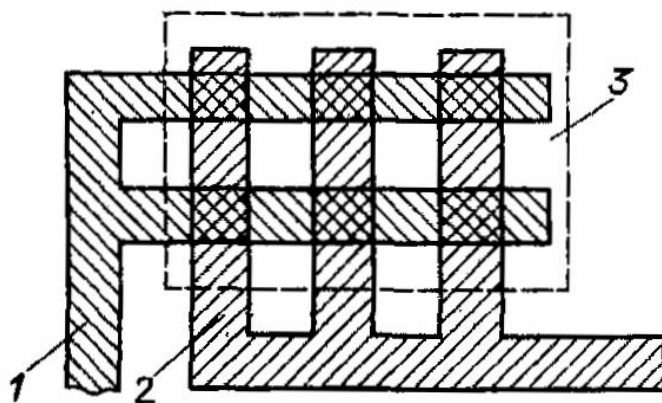
1 – диэлектрический слой; 2 – граница пленочного элемента;

3 – пленочные проводники

Рисунок 1.8 – Пленочные конденсаторы повышенной точности

Отсоединяя секции конденсатора, изображенного на рисунке 1.8, *a*, можно уменьшить его емкость, подгоняя ее значение в заданный допуск. Отсоединение секций может осуществляться с помощью резца микроманипулятора. Верхняя обкладка конденсатора, показанная на рисунке 1.8, *б*, состоит из нескольких не соединенных между собой секций. Подсоединяя или отключая некоторые секции, емкость конденсатора можно изменять в любую сторону, в отличие от первого варианта, в котором емкость при отсоединении секций может только уменьшаться.

С помощью пленочной технологии не удастся выполнить конденсаторы с плавным изменением емкости в широком диапазоне. Поэтому для реализации таких конденсаторов также приходится применять пленочные конденсаторы со ступенчатым изменением емкости. Одна из конструкций конденсатора, позволяющая в сравнительно широком диапазоне подбирать требуемое значение емкости, показана на рисунке 1.8, *б*. На рисунке 1.9 изображена другая, так называемая «матричная» конструкция пленочного конденсатора со ступенчатым изменением емкости в очень широком диапазоне.



1, 2 – проводники; 3 – диэлектрик

Рисунок 1.9 – Матричный пленочный конденсатор

Обкладки 1 и 2 этого конденсатора представляют собой гребенки, которые разделены общим диэлектрическим слоем 3. В местах перекрещивания проводниковых пленок, принадлежащих разным слоям, образуются секции конденсатора, которые можно отсоединять разрывом любого проводника.

Необходимое число секций матричного конденсатора составляет

$$n = C_{\max} / t_c, \quad (1.59)$$

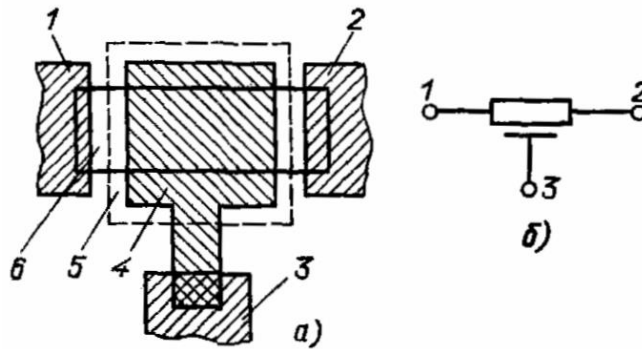
где C_{\max} – начальная максимальная емкость матричного конденсатора;
 t_c – шаг подбора емкости, представляющей собой емкость одной секции.

Определив число секций n , найдем необходимое число пленочных проводников нижней n_1 и верхней n_2 обкладок-гребенок:

$$n = n_1 n_2. \quad (1.60)$$

Исходные данные для расчета аналогичны данным для тонко-пленочных конденсаторов. Из таблицы 1.4 выбирают тип диэлектрической пасты. По известной удельной емкости определяют необходимую площадь верхней обкладки $S = C/C_0$. Форму конденсатора рассчитывают исходя из конструктивных требований. Для обкладок квадратной формы $L_B = B_B = \sqrt{S}$. Геометрические размеры нижней обкладки и пленки диэлектрика определяют в соответствии с возможностями технологии: $L_H = B_H = L_B + 2p$, где p – перекрытие между нижней и верхней обкладками (см. таблицу 3.2); $L_D = B_D = L_H + 2f$, где f – перекрытие между нижней обкладкой и диэлектриком (см. таблицу 3.2). Площадь, занимаемая конденсатором на плате, $S_D = L_D B_D$. Если пленочные конденсаторы соединены между собой, то они могут иметь общую нижнюю или верхнюю обкладку. Конденсаторы следует располагать на стороне платы, не заливаемой компаундом.

В гибридных микросхемах находят применение некоторые типы пассивных цепей, в которых резистор и конденсатор распределены по всей пленке, а не сосредоточены в пределах отдельных локальных областей. Цепи с распределенными параметрами позволяют конструировать пассивные схемы с такими электрическими характеристиками, которые не удастся получить с помощью конечного числа сосредоточенных элементов. Вследствие интеграции конденсаторов и резисторов использование RC-структур позволяет экономить площадь подложки. Пленочные RC-структуры с распределенными параметрами получили широкое распространение при разработке избирательных усилителей, фильтров, генераторов и других устройств. В простейшем случае конструкция RC-структуры с распределенными параметрами представляет собой тонкопленочный конденсатор, одна из обкладок которого заменена резистивным слоем (рисунок 1.10).



a – топология; *б* – эквивалентная схема:

1–3 – контактные площадки; 4 – верхняя обкладка; 5 – диэлектрический слой;
6 – резистивный слой

Рисунок 1.10 – RC-структура с распределенными параметрами

Таким образом, емкость будет распределена вдоль линии резистора. Практическая реализация RC-структур основана на использовании нескольких чередующихся пленок: резистивных, проводящих и диэлектрических материалов. Электрические параметры и характеристики RC-структур зависят от геометрических конфигураций и размеров пленок, их электрофизических параметров. Расчет подобного элемента выполняется следующим образом.

Располагая известными из электрического расчета значениями R и C , выбирают материалы резистора и обкладки конденсатора. Далее рассчитывают ширину резистивной полоски, принимая во внимание, что площади, занимаемые резистором и конденсатором, одинаковы, т. е.

$$S_R = b^2 (R / \rho_{\text{кв}}); S_c = (C / C_0). \quad (1.61)$$

Затем определяют ширину резистора, после чего рассчитывают длину резистора $l = b K_\phi$:

$$b \geq \sqrt{\frac{C \rho_{\text{кв}}}{C_0 R}}. \quad (1.62)$$

Полученное значение ширины резистивной полоски необходимо сопоставить с шириной, определяемой из условия допустимой мощности рассеивания для данного резистивного материала, а также с минимальной шириной полоски $b_{\text{техн}}$, обеспечиваемой технологией.

Приведенная конструкция RC-структуры (см. рисунок 1.10) относится к однородным структурам, так как для всей линии сопротивление и емкость, отнесенные к единице длины, являются постоянными. Кроме однородных RC-структур в микросхемах применяются и неоднородные структуры. В пленочных RC-структурах необходимая неоднородность параметров может

быть достигнута изменением ширины линии. Линии с уменьшающейся шириной соответствуют возрастанию сопротивления и пропорциональное уменьшение емкости, линии с увеличивающейся шириной – уменьшение сопротивления и возрастание емкости. Наиболее часто применяются полоски, ширина которых изменяется по экспоненциальному и линейному законам.

При выборе материалов для реализации RC-структур необходимо выполнять те же требования, что и при реализации сосредоточенных резисторов и конденсаторов. При этом особое внимание следует уделять совместимости материалов. Например, для RC-структуры, изображенной на рисунке 1.10, может использоваться материал Al-Al₂O₃-PC-3710 или Ta-Ta₂O₃-Au.

Многослойные RC-структуры с распределенными параметрами применяются для выполнения разнообразных схемных функций. Например, при определенном соотношении номиналов резисторов и конденсаторов в пятислойной структуре получается фильтр нижних частот.

В микросхемах распределенные RC-цепи чаще всего используют в четырехполюсном, трехполюсном или двухполюсном включении. При этом некоторые выводы *n*-полюсных структур могут оставаться свободными. В настоящее время наиболее исследованы и находят практическое применение трех- и четырехслойные RC-структуры, обозначаемые как R-C-NR и C-R-NC.

По аналогии с длинными линиями распределенные RC-цепи можно классифицировать на однородные и неоднородные цепи.

Однородной называют RC-цепь с постоянными значениями погонных сопротивления *r* и емкости *c* вдоль длины линии, т. е. в направлении протекания тока. Если *l* – длина линии в относительных единицах, то $r = R/l$, $c = C/l$.

Полное сопротивление и емкость неоднородной RC-цепи соответственно равны

$$R = \int_0^l r(x) dx; \quad C = \int_0^l c(x) dx. \quad (1.63)$$

В обоих случаях считается справедливой одномерная модель распределенной RC-цепи, иначе говоря, предполагается, что удельные параметры зависят только от координаты *x*. Это выполняется для однородных цепей прямоугольной конфигурации и для неоднородных цепей, в которых неоднородность формируется за счет изменения удельных параметров резистивных и диэлектрических пленок при сохранении прямоугольной конфигурации.

Более просто неоднородность можно получить изменением геометрической формы распределенной RC-цепи.

Расчет фильтра нижних частот на основе распределенной RC-структуры с верхней граничной частотой *f_В* выполняется следующим образом. Определяют необходимую постоянную времени распределенной цепи, пользуясь соотношением

$$RC = 2,43 / 2\pi f_B. \quad (1.64)$$

Постоянную времени можно связать и с параметрами RC-структуры: $RC = l^2 rc$. Приравнявая два приведенных соотношения, находим длину RC-структуры: $l = 0,62 / \sqrt{f_B}$. Ширина b , как и при проектировании резисторов, выбирается на основе конструктивных и технологических данных. Например, при узких полосах пропускания длина резистивной полоски оказывается большой, и ей придают конфигурацию змейки.

1.6 Конструкция и расчет пленочных индуктивностей

Изготовление катушек индуктивности для гибридных пленочных микросхем представляет большие трудности. Наибольшее распространение в мегагерцовом диапазоне частот получили плоские спиральные катушки (рисунок 1.11). Ограниченные размеры подложек пленочных микросхем и конечная ширина проводящей полоски 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.

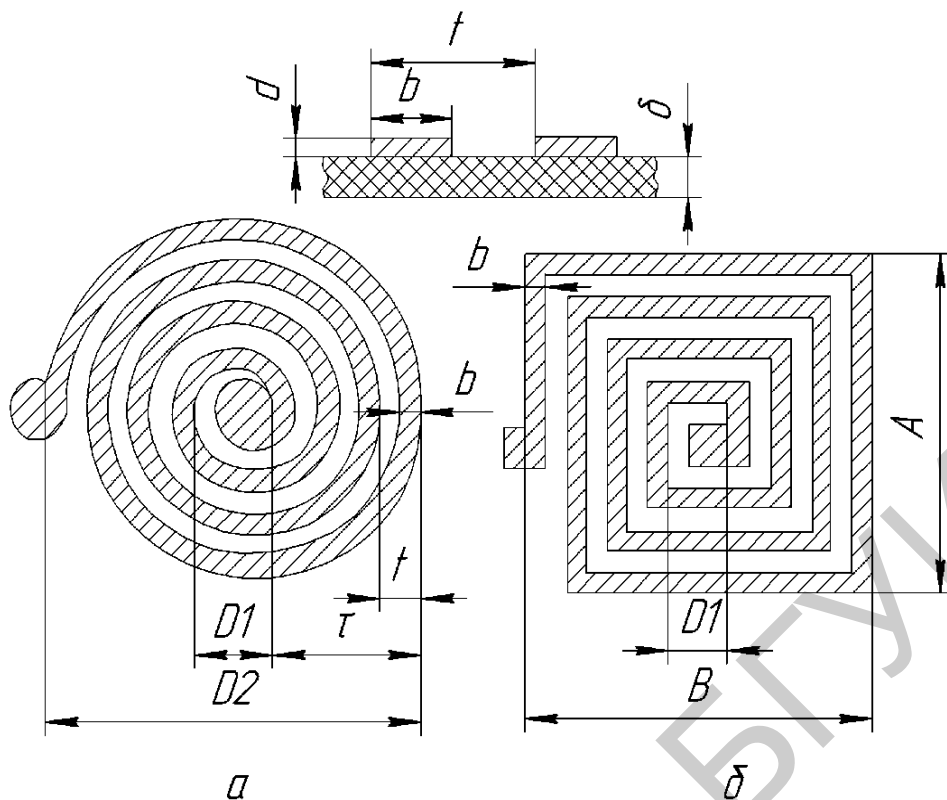
Различные схемные эквиваленты индуктивности, в которых используются активные элементы, пока не нашли широкого применения из-за зависимости их параметров от частоты и температуры.

Исходными данными для расчета являются следующие параметры:

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

По исходным данным выбираются:

- форма катушки, ее внутренний диаметр $D_{вн}$, 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 фотооригинала.



a – круглая спираль; *б* – квадратная спираль

Рисунок 1.11 – Пленочные катушки индуктивности

В результате расчетов необходимо определить:

- шаг спирали – t ;
- ширину витка – b ;
- толщину 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 одновитковой петли является площадь, заключенная в плоскости петли.

2. Для заданной площади кольцеобразная петля соответствует наименьшей длине проводника и, следовательно, наиболее высокой добротности.

3. При условии, что связь между витками достаточно 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.

Расчет пленочных катушек индуктивности производится в следующей последовательности.

1. Выбирается внутренний размер катушки $D_{\text{вн}}$. По технологическим требованиям его не следует брать меньше 2 мм.

Определяется шаг спирали по формуле

$$t = K \sqrt{\frac{D_{\text{вн}}^3}{L}}, \quad (1.65)$$

где L – индуктивность катушки, мкГн;

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

K – коэффициент, зависящий от отношения $D_{\text{вн}}/D_{\text{нар}}$, определяется по графику (рисунок 1.12).

2. 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

$$d_c = K_1 \sqrt{\lambda}, \quad (1.66)$$

где λ – длина волны, см ($\lambda = c/f$);

K_1 – коэффициент, учитывающий материал пленки:

- для серебра $K_1 = 0,37$;

- для меди $K_1 = 0,39$;

- для алюминия $K_1 = 0,51$.

3. Определяется ширина витка, при которой получается заданная добротность катушки:

$$b = \frac{\rho \cdot t \cdot \left(\frac{D_{\text{нар}}^2}{D_{\text{вн}}^2} - 1 \right) \cdot Q \cdot 10^4}{16 \cdot f \cdot D_{\text{вн}} \cdot K^2 \cdot d}, \quad (1.67)$$

где b – ширина витка, мм;

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

t – шаг спирали, мм;

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

f – частота, МГц;

K – коэффициент, определяемый из графика на рисунке 1.12;

d – толщина проводника катушки, мм.

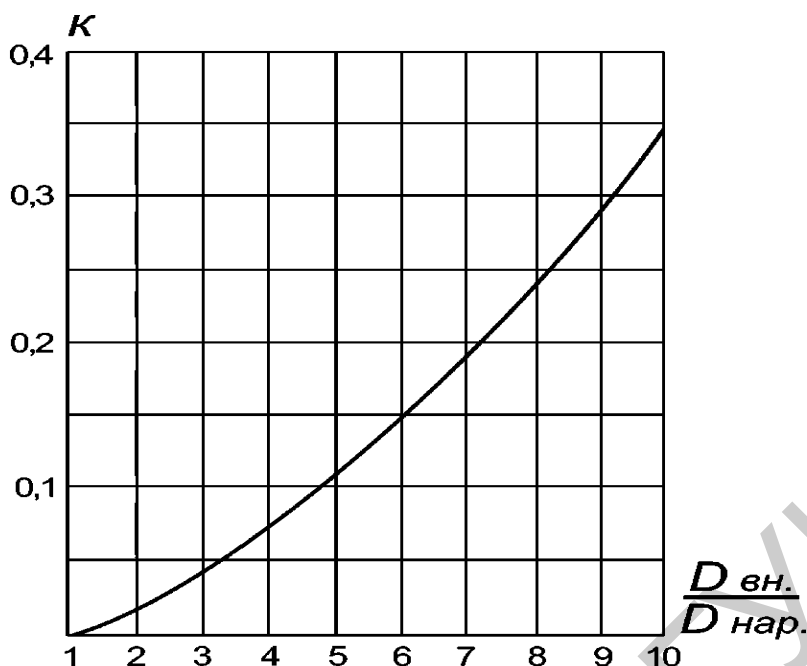


Рисунок 1.12 – Зависимость коэффициента K от размеров пленочной катушки

Так как формула (1.67) выведена без учета влияния скин-эффекта, то ширину витка, рассчитанную по этой формуле, следует увеличить и выбирать равной $(1,5 - 2)b$ для $d = (2 - 4)dC$.

Если новое значение ширины b получится больше t , следует, оставляя прежним внутренний размер спирали $D_{\text{вн}}$ и задаваясь шагом спирали $t > b'$, из формулы (1.65) определить внешний размер спирали $D_{\text{нар}}$, а затем по формуле (1.67) определить ширину витков b .

4. Определяется число витков по формуле

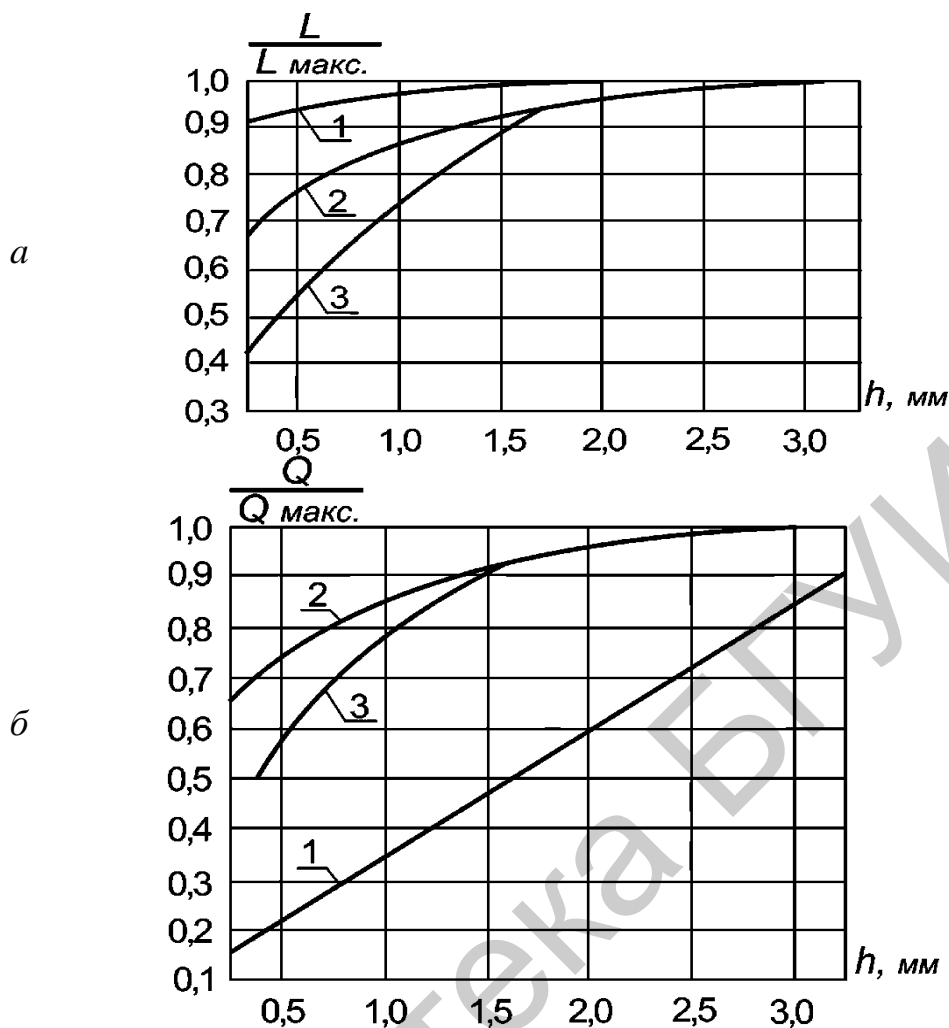
$$N = \frac{D_{\text{нар}} - D_{\text{вн}}}{2t}, \quad (1.68)$$

где t – шаг спирали.

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

$$D'_{\text{нар}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{AB}, \quad (1.69)$$

где A и B – габаритные размеры прямоугольной спиральной катушки.



1 – алюминиевая пленка на частотах 20–100 МГц;

2, 3 – латунный лист на частотах 100 и 200 МГц

Рисунок 1.13 – Влияние плоских металлических поверхностей на индуктивность (а) и добротность (б)

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 рисунке 1.13, 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 рисунке 1.13.

1.7 Расчет пленочных проводников и контактных площадок

Элементы пленочной гибридной микросхемы объединяются в единую схему с помощью системы пленочных коммутационных проводников, которые в местах соединения с другими пленочными элементами образуют контактные пары (контактные переходы). Контактные площадки в гибридной микросхеме необходимы для присоединения внешних выводов микросхемы и выводов навесных элементов. Этим обусловлено все многообразие требований, предъявляемых к пленочным проводникам и контактными площадкам. Они должны с минимальными потерями подводить напряжение питания к функциональным компонентам микросхемы, с минимальными искажениями передавать сигналы, обеспечивать надежный, чаще всего невыпрямляющий и малошумящий контакт с элементами микросхемы.

Требования, предъявляемые к пленочным проводникам и контактными площадкам, в ряде случаев являются противоречивыми. Например, увеличение ширины пленочного проводника приводит к уменьшению его индуктивности и одновременному увеличению его емкости относительно земли и расположенных в непосредственной близости элементов микросхемы. Материалы с малым значением удельного сопротивления, применяемые для проводников и контактных площадок, как правило, имеют плохую адгезию к подложке.

В пленочных гибридных микросхемах используют два типа контактных переходов. Первый представляет собой контактную пару из резистивной и низкоомной пленок, второй – контактную пару из двух низкоомных пленок.

Увеличение ширины проводящей пленки приводит к возрастанию паразитной емкости, а ее уменьшение увеличивает паразитную индуктивность.

При заданном значении удельного сопротивления минимальная ширина проводящей пленки определяется также предельно допустимой плотностью тока, проходящего через проводник, и допустимым падением напряжения. Плотность тока, в свою очередь, зависит от ряда теплофизических параметров конструкции микросхемы, причем можно считать, что она монотонно возрастает с уменьшением теплового сопротивления системы «проводник – окружающая среда». Поскольку тепловыделения в пленочных проводниках обычно невелики, тепловое сопротивление системы «проводник – подложка» мало. Поэтому с достаточной для расчетов точностью можно предполагать, что все тепло аккумулируется подложкой.

Из многочисленных технологических ограничений, налагаемых на ширину проводника, отметим лишь некоторые. Как и для тонкопленочных резисторов, при заданной суммарной длине всех проводников микросхем существует некоторое предельное число квадратов проводника n , определяемое минимально допустимым процентом выхода годных по обрывам проводников. Для большинства случаев значение n изменяется от 5 000 до 10 000.

Дополнительное ограничение на максимальную ширину пленки контактной площадки налагается в том случае, когда внешние выводы навесных компонентов необходимо приваривать к подложке с высоким тепловым сопротивлением. Оказывается, что режимы микросварки в этом случае сильно зависят от площади массивной (толщиной 3–10 мкм) контактной площадки из-за резкого возрастания теплоотвода. Это приводит к необходимости форсирования режимов сварки, в результате чего проводящая пленка может отслаиваться.

Минимальная ширина контактной площадки должна быть не меньше 50–350 мкм. При изготовлении коммутационных соединений и контактных площадок тонкопленочных гибридных микросхем применяют многослойную структуру, состоящую из подслоя, токопроводящего и защитного слоев. Подслой, выполняемый из нихрома, хрома, ванадия и, других материалов, улучшает адгезию токопроводящих слоев с подложкой. Толщина материала подслоя составляет 10–30 нм. Наиболее подходящими материалами для токопроводящих слоев являются золото, медь, алюминий, тантал. Верхний слой многослойной структуры (никель, серебро) служит для защиты от внешних воздействий. Для защиты проводников и контактных площадок иногда производят их покрытие (облуживание) припоем. Характеристики проводящих материалов приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Характеристики проводящих материалов

Материал подслоя, слоя и покрытия	Толщина слоя, мм	Удельное сопротивление, Ом·см
Подслой – нихром X20H80; слой – золото 999,9	10–30 600–800	– 0,03–0,05
Подслой – нихром X20H80; слой – медь вакуумной плавки; защитное покрытие – никель	10–30 600–800 80–120	– – 0,02–0,04
Подслой – нихром X20H80; слой – медь вакуумной плавки; защитное покрытие – серебро 999,9	10–30 400–1000 80–100	– – 0,02–0,04
Подслой – нихром X20H80; слой – медь вакуумной плавки; защитное покрытие – золото 999,9	10–30 600–800 50–60	– – 0,02–0,04
Подслой – нихром X20H80; слой – алюминий А97	10–30 300–500	– 0,06–0,10

В толстопленочных гибридных микросхемах для создания проводников и контактных площадок применяют проводящие пасты. В состав проводящих паст входят следующие компоненты: металл (функциональный материал), обеспечивающий образование проводящих дорожек; легкоплавкие стекла, удерживающие металлические частицы в контакте и обеспечивающие закрепление пасты на подложке; органические добавки, предназначенные для

придания пасте определенной текучести. Пасты классифицируют по всем видам функционального материала на однокомпонентные и многокомпонентные. В однокомпонентных системах используются серебро, золото, платина, палладий, индий и другие металлы, в многокомпонентных системах – сплавы (платина – золото, палладий – серебро, палладий – золото и др.).

При расчете пленочных проводников необходимо учитывать следующие требования, предъявляемые к характеристикам микросхемы:

1) падение напряжения на проводнике не должно превышать некоторого максимального значения U_{\max} ;

2) сопротивление проводника не должно превышать некоторого максимального значения R_{\max} ;

3) плотность тока, протекающего через проводник, не должна превышать значения, определяемого отношением I_{\max}/S_{\min} , где S_{\min} – площадь сечения проводника;

4) собственная емкость проводника не должна быть больше некоторого максимального значения C_{\max} ;

5) собственная индуктивность проводника не должна быть больше некоторого максимального значения L_{\max} .

Кроме того, должны учитываться взаимная емкость и взаимная индуктивность проводников.

Расчет проводников по значению допускаемого падения напряжения $U_{\text{пр.доп}}$ необходим при проектировании схем с малой помехозащищенностью при малых уровнях сигналов и сводится к проверке условия

$$U_{\text{пр}} = IR_{\text{пр}} \leq U_{\text{пр.доп}}, \quad (1.70)$$

где $R_{\text{пр}}$ – сопротивление проводника;

I – ток, протекающий через проводник.

При изготовлении микросхем с прецизионными низкоомными резисторами и делителями напряжения расчет производится по допустимому значению сопротивления проводника: $R_{\text{пр}} = \rho_0 l/b \leq R_{\text{пр.доп}}$.

Значение $R_{\text{пр.доп}}$ обычно определяется из условия, что погрешность сопротивления прецизионного резистора из-за сопротивления проводника не должна быть больше 0,1–0,2 допуска на номинал резистора.

Поскольку допустимые значения плотности тока в пленочных проводниках очень велики, то расчет плотности тока в проводниках обычно не производится.

2 КОНСТРУКЦИЯ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОСХЕМ

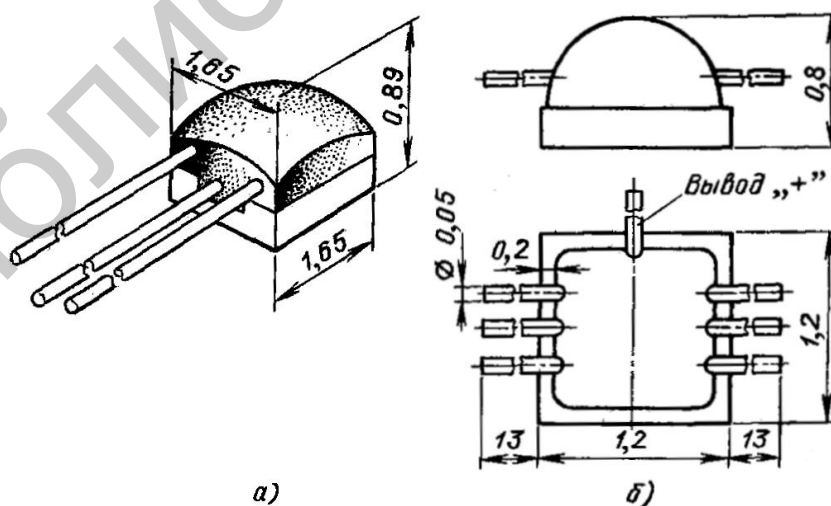
2.1 Конструкция навесных элементов микросхем

В качестве навесных активных элементов в гибридных микросхемах применяют бескорпусные диоды и диодные матрицы, транзисторы и транзисторные матрицы, тиристоры, МДП-структуры, полупроводниковые микросхемы, а также корпусные полупроводниковые приборы в миниатюрном исполнении. Бескорпусные полупроводниковые приборы имеют малые габаритные размеры и массу и поэтому более широко используются в гибридных микросхемах.

Бескорпусные приборы изготавливаются по планарной технологии. Эти приборы могут быть негерметичными и монтироваться в герметичном корпусе гибридных микросхем или модуле, состоящем из нескольких гибридных микросхем. В качестве временной защиты от воздействия влаги и загрязнений, содержащихся во внешней среде, кристаллы в этих приборах покрываются тонкими защитными пленками лака, эмали, смолы, стекла, компаунда.

Бескорпусные полупроводниковые приборы по способу их монтажа в микросхему можно разделить на две группы: 1) приборы с гибкими выводами; 2) приборы с жесткими объемными выводами. На рисунке 2.1 представлены конструкции бескорпусных приборов с гибкими выводами.

Существенным недостатком таких конструкций является низкая производительность процесса контактирования. Автоматизировать операцию присоединения проволочных выводов не удастся. Кроме того, использование активных элементов с гибкими выводами не обеспечивает высокой надежности соединения.



а – транзистор; б – диодная матрица

Рисунок 2.1 – Конструкции бескорпусных приборов с гибкими выводами

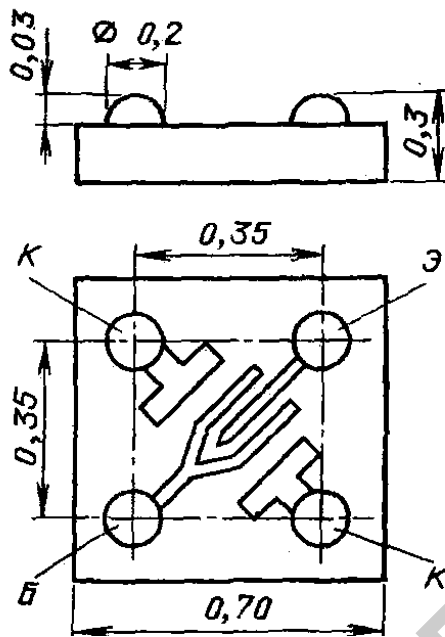
Поэтому в настоящее время широко применяют приборы с жесткими выводами, например со сферическими или балочными, а также приборы на

керамических кристаллодержателях. Для обеих этих конструкций характерно отсутствие соединительных проводников, что позволяет автоматизировать процесс сборки микросхем и повысить надежность соединений.

На рисунке 2.2 показана конструкция полупроводникового прибора с жесткими сферическими выводами, которые известны также под названием шариковых. Однако выводы могут иметь форму не только шариков, но и усеченного конуса, цилиндра и т. п. Сферические выступы на контактных площадках полупроводниковых структур создаются вакуумным напылением металла или гальваническим выращиванием. Монтаж приборов с жесткими выводами производится методом «перевернутого кристалла», обеспечивающим непосредственно электрическое и механическое соединения контактных площадок полупроводникового кристалла с соответствующими контактными площадками подложки. При этом монтаже кристалл оказывается обращенным лицевой поверхностью к подложке. Такое соединение отличается малой индуктивностью выводов, а сам метод обеспечивает наивысшую степень интеграции. Монтаж выполняется с помощью ультразвуковой, термокомпрессионной сварки или пайки. При применении бескорпусных полупроводниковых приборов с шариковыми выводами требуется очень точная оптическая и механическая системы для установки прибора на контактные площадки микросхемы, так как ни выводы прибора, ни контактные площадки микросхемы не могут непосредственно визуально контролироваться при установке прибора. Кроме того, невозможным оказывается визуальный контроль качества соединения после установки прибора.

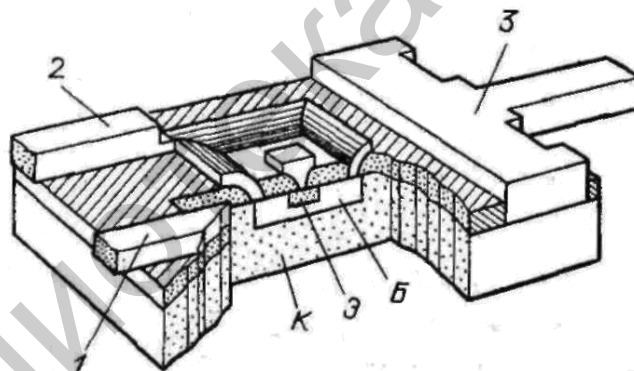
На рисунке 2.3 представлена конструкция транзистора с балочными выводами. Балочные выводы представляют собой металлические сравнительно толстые (до десятков микрометров) пленки, имеющие форму стержней (балок), которые выступают за края кристалла. Приборы с балочными выводами имеют малые паразитные емкости (0,05–0,002 пФ) и индуктивности (около 0,2 нГ) выводов, что позволяет использовать их в диапазоне очень высоких частот (до 40 ГГц). Балочные выводы удобны для сборки, так как допускают использование любых методов монтажа и облегчают автоматизацию сборки. Последнее обстоятельство связано с тем, что выводы выступают за край кристалла, следовательно, требования к точности поддержания размеров и расположению внешних соединений снижаются. Выступающие выводы уменьшают также воздействие нагрева на активные области прибора в момент применения. Недостатки балочных выводов главным образом обусловлены сложностью технологии их изготовления.

Автоматизировать технологический процесс сборки позволяет использование в гибридных микросхемах полупроводниковых приборов на керамических кристаллодержателях (рисунок 2.4). Кристалл монтируется в углубление керамического держателя. К металлизированным выступам держателя присоединяют проволочные выводы прибора. Такую конструкцию иногда называют «безвыводным перевернутым прибором».



К – коллектор; Э – эмиттер; Б – база

Рисунок 2.2 – Конструкция полупроводникового прибора с жесткими сферическими выводами



1 – вывод эмиттера; 2 – вывод базы; 3 – вывод коллектора;

К – коллектор; Э – эмиттер; Б – база

Рисунок 2.3 – Конструкция транзистора с балочными выводами

Выбор типа прибора при конструировании микромощных микросхем необходимо производить с учетом особенностей работы транзисторов в микрорежиме ($I_K = 200 \text{ мкА}$, $U_K = 1...5 \text{ В}$). Параметры и характеристики транзисторов в микрорежиме отличаются от обычных более сильной зависимостью коэффициента передачи тока от температуры и рабочего тока, более высоким входным сопротивлением, меньшим влиянием сопротивления базы и его разброса, более значительной ролью цепи эмиттера.

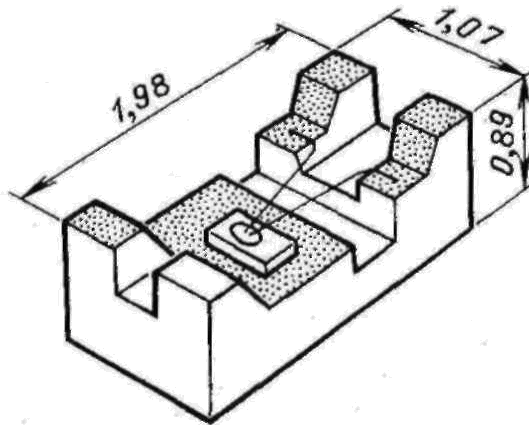


Рисунок 2.4 – Бескорпусный транзистор на керамическом кристаллодержателе

Требуемое быстродействие схемы или частичный предел усиления определяются в основном частотными свойствами полупроводникового прибора. Необходимо учитывать, что высокочастотные приборы очень чувствительны к перегрузкам, а схемы на них подвержены самовозбуждению. При температуре до 80 °С целесообразно применять германиевые полупроводниковые приборы, а при температуре 100–120 °С – кремниевые.

Таким образом, при выборе того или иного типа прибора нужно руководствоваться стремлением обеспечить наибольшую надежность работы прибора в микросхеме.

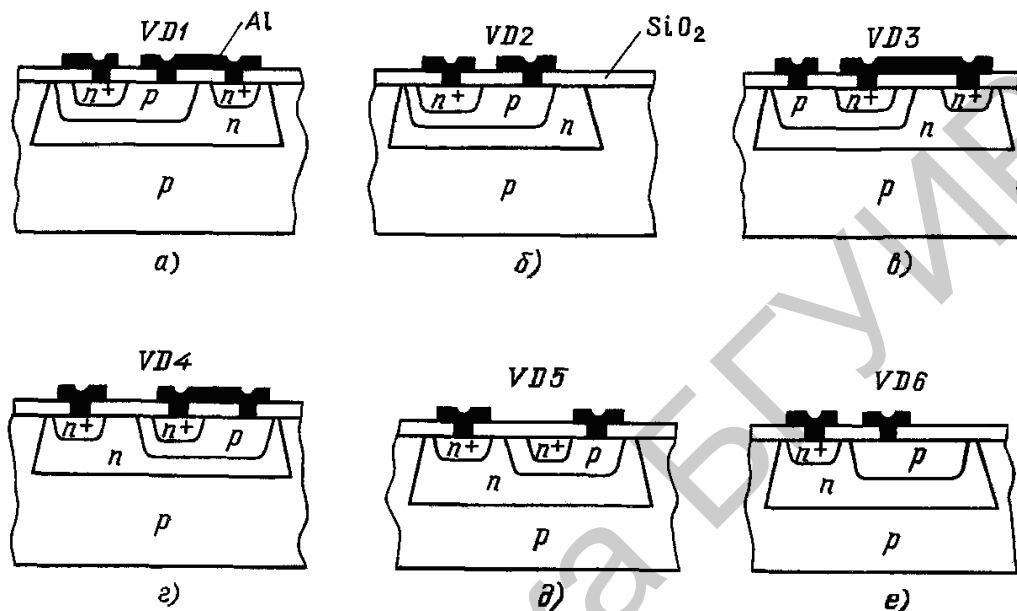
2.2 Конструирование и расчет диодов

Интегральные диоды. В полупроводниковых микросхемах в качестве диода используют один из переходов интегрального $n-p-n$ -транзистора. На рисунке 2.5 показаны структуры шести типов диодов, применяемых в микросхемах. Каждая из этих структур имеет различные параметры и характеристики диодов, что позволяет разработчикам микросхем выбирать структуру с необходимыми параметрами для конкретной схемы. Пять типов диодов получено на основе полной структуры $n-p-n$ -транзистора. В структуре шестого диода отсутствует эмиттерный n^+ -слой.

Диод $VD1$ выполнен на эмиттерном переходе $n-p-n$ -транзистора, переход «коллектор – база» является короткозамкнутым. В диоде $VD2$ используется также эмиттерный переход транзистора, причем цепь коллектора разомкнута. Диод $VD3$ реализуется параллельным включением эмиттерного и коллекторного переходов. Диод $VD4$ выполнен на коллекторном переходе $n-p-n$ -транзистора, при этом эмиттер накоротко замкнут с базой. Диод $VD5$ также выполнен на коллекторном переходе, ток через эмиттерный вывод равен нулю. Диод $VD6$ можно рассматривать как частный случай диодов $VD4$ и $VD5$, у каждого из которых площадь эмиттерного перехода равна нулю.

Диод в интегральном исполнении представляет собой многослойную структуру на базе биполярного транзистора (см. рисунок 2.5). Изготовление таких

диодов является более экономичным по сравнению с изготовлением специальных диодных структур. Интегральный диод состоит из нескольких определенным образом скоммутированных переходов, однако его характеристики незначительно отличаются от характеристик одиночного перехода. Характерное отличие интегрального диода от своего дискретного аналога заключается в наличии паразитной емкости и транзистора.



$a - U_{КБ} = 0$; $b - I_K = 0$; $c - U_{КЭ} = 0$; $d - U_{ЭБ} = 0$;
 $e - I_3 = 0$; $f -$ отсутствует эмиттерная область

Рисунок 2.5 – Структуры диодов

Интегральный диод по существу представляет собой трехполюсный прибор, третьим электродом которого служит подложка. Эквивалентные схемы диодов представлены на рисунке 2.6. Действие паразитного транзистора, состоящего из базы, коллектора и подложки $n-p-n$ -транзистора, необходимо учитывать при проектировании полупроводниковых микросхем. Так как в полупроводниковой микросхеме, изолированной с помощью $p-n$ -перехода, подложка соединяется с наиболее отрицательной точкой схемы, то коллекторный переход паразитного транзистора смещен в обратном направлении.

Если интегральный диод смещается в прямом направлении, то эмиттерный переход паразитного транзистора также будет смещен в прямом направлении (исключая диод $VD1$).

Паразитный транзистор работает в режиме усиления, поэтому часть тока, протекающего через диод, ответвляется в подложку, т. е. ток, вытекающий из диода, не равен току, вытекающему из него. Значение ответвляющегося тока зависит от коэффициента передачи тока паразитного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером. Коэффициент инжекции эмиттера паразитного транзистора обычно достаточно мал, поэтому значение коэффициента усиления

по току $h_{21э}$ не превышает 1–3. Устранение активных свойств паразитного транзистора осуществляется путем легирования золотом коллекторной области $n-p-n$ -транзистора или базовой области $p-n-p$ -транзистора. Это приводит к резкому уменьшению коэффициента переноса носителей через базу паразитного транзистора, который становится практически равным нулю. Для легированных золотом структур коэффициент усиления по току $h_{21э}$ имеет порядок 0,01.

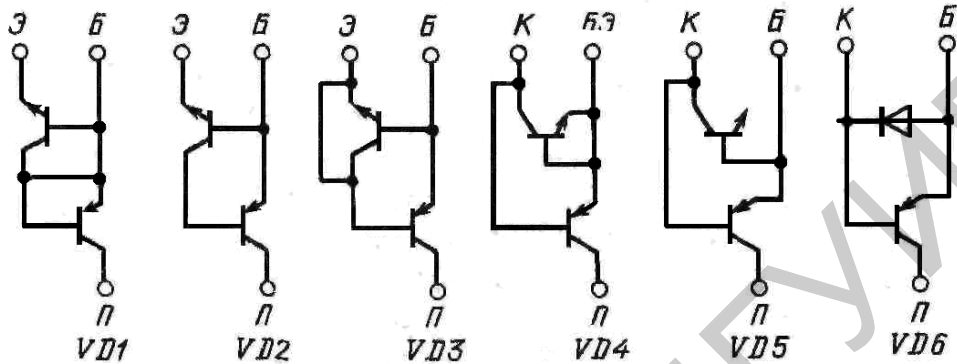


Рисунок 2.6 – Эквивалентные схемы диодов

Паразитный $p-n-p$ -транзистор не оказывает никакого влияния на диод $VD1$, так как переход «коллектор – база» $n-p-n$ -транзистора короткозамкнутый.

При конструировании полупроводниковых микросхем необходимо учитывать параметры, определяющие вольт-амперные характеристики, а также паразитную емкость диода и время восстановления обратного сопротивления.

Вольт-амперная характеристика диода определяется соотношением

$$I_{\text{д}} \approx I_{\text{обр}} [\exp(qU_{\text{д}} / kt) - 1], \quad (2.1)$$

где $I_{\text{д}}$ – ток, протекающий через диод;

$U_{\text{д}}$ – напряжение, приложенное к переходу;

$I_{\text{обр}}$ – обратный ток перехода, пропорциональный его площади.

При большой плотности тока уравнение диодной характеристики можно записать в упрощенном виде:

$$I_{\text{д}} \approx I_{\text{обр}} \exp(qU_{\text{д}} / kt). \quad (2.2)$$

К числу параметров диода, характеризующих вольтамперную характеристику, относится падение прямого напряжения при заданном постоянном прямом токе, т. е.

$$U_{\text{пр}} = (kt/q) \ln(I_{\text{пр}} / I_{\text{обр}}). \quad (2.3)$$

При малых токах падение напряжения на диодах определяется идеализированными характеристиками переходов, при больших токах важную

роль играют также последовательные объемные сопротивления. Наименьшее падение напряжения в прямом направлении при одних и тех же значениях тока наблюдается для диода $VD1$. Это объясняется тем, что $VD1$ работает как транзистор с замкнутым коллекторным переходом. Инжектируемые эмиттером электроны перемещаются через базу, достигают коллекторного перехода и свободно попадают в коллектор. Следовательно, основная часть входного тока протекает через коллектор (рисунок 2.7), и падение напряжения на сопротивлении базы будет значительно меньше, чем в других диодных структурах. В диоде $VD4$ транзисторная структура находится в инверсном включении. Поскольку инверсный коэффициент передачи тока мал, то базовый ток, протекающий в такой структуре, будет большим, что вызывает значительное падение напряжения на диоде. Если интегральные диоды расположить в порядке убывания падения напряжения при протекании через них большого тока, то получим следующую последовательность: $VD2, VD3, VD5, VD4, VD6, VD1$.

Напряжения обратных смещений диода и изолирующего p - n -перехода не должны превышать пробивных напряжений соответствующих переходов. Так, максимально допустимое обратное напряжение диодов $VD1$ – $VD3$ ограничено напряжением пробоя перехода «эмиттер – база», а диодов $VD4$ – $VD6$ – напряжением пробоя перехода «коллектор – база».

К параметрам диода, характеризующим обратную ветвь вольт-амперной характеристики, относится постоянный обратный ток, протекающий через диод при приложении к нему обратного смещения. В кремниевых p - n -переходах главной составляющей обратного тока является составляющая тока термогенерации, зависящая от площади p - n -перехода и от количества центров рекомбинации в области объемного заряда перехода.

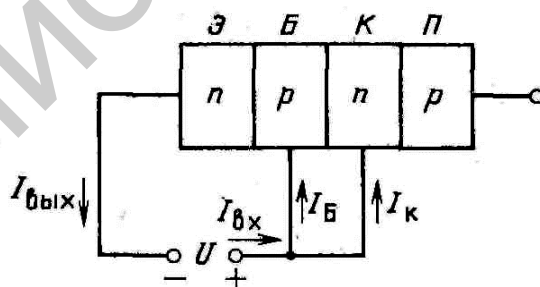


Рисунок 2.7 – Упрощенная структура диода $VD1$

Для диодов $VD1$ и $VD2$ наблюдаются меньшие значения обратного тока, так как они формируются на переходе «эмиттер – база», который имеет наименьшую площадь и самую узкую область объемного заряда. Диоды $VD4$ – $VD6$, формируемые на основе перехода «коллектор – база», имеют большие обратные токи. Диод $VD3$ обладает наибольшим значением обратного тока, поскольку при этом варианте включения транзисторной структуры оба перехода «коллектор – база» и «эмиттер – база» оказываются включенными

параллельно. У всех рассматриваемых диодов обратные токи изменяются в пределах 0,1–100 мА.

Быстродействие полупроводниковых ИМ в значительной степени определяется паразитной емкостью элементов. Поэтому для каждой из диодных структур необходимо знать значение паразитной емкости. На рисунке 2.8 показаны емкости, действующие в шести диодных схемах включения транзистора. Любая емкость, соединяющая какую-либо точку схемы с землей, снижает быстродействие схемы и, следовательно, является паразитной. Поскольку подложка обычно соединена с точкой наиболее низкого потенциала, то вывод емкости перехода коллектор – подложка оказывается заземленным по высокой частоте.

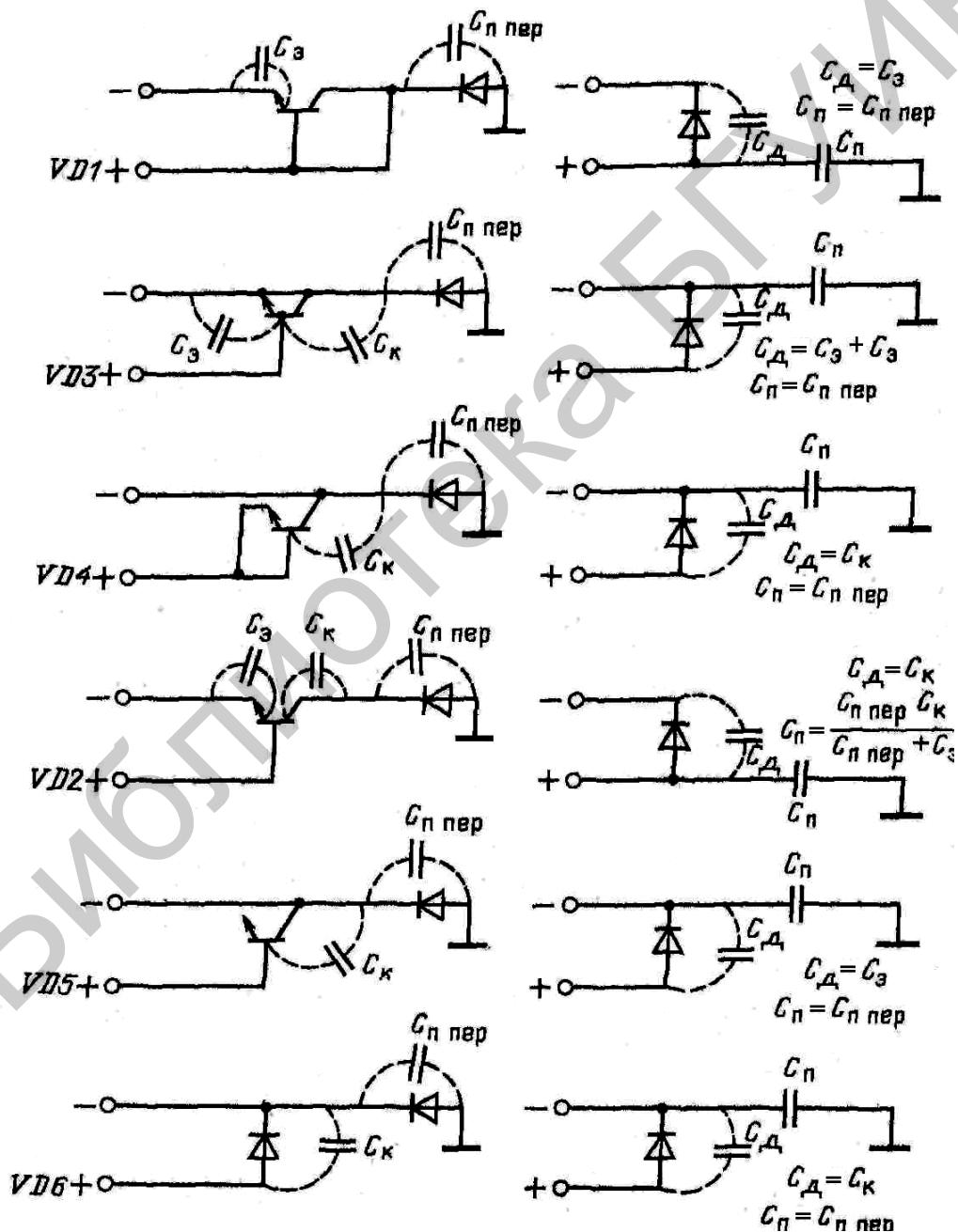


Рисунок 2.8 – Эквивалентные схемы с емкостями, действующими в шести диодных схемах включения транзистора

Наибольшую паразитную емкость имеет диод $VD3$, а наименьшую – диод $VD2$. Необходимо отметить, что площадь перехода «коллектор – база» в диоде $VD6$ может иметь гораздо меньшие размеры по сравнению с диодами других типов, так как при формировании такого диода не используется операция эмиттерной диффузии. В результате этого уменьшается как емкость коллекторного перехода ($C_d = C_k$), так и паразитная связь.

Быстродействие диодов характеризуется временем восстановления обратного сопротивления. Основная причина инерционности диодов при работе в импульсном режиме обусловлена процессом накопления неравновесных носителей заряда в областях транзисторной структуры. Время восстановления обратного сопротивления зависит от размеров областей транзисторной структуры, времени жизни неравновесных носителей заряда и от величины прямого тока, протекающего через диод. При одном и том же значении прямого тока накопление заряда в различных диодных структурах будет различным (рисунок 2.9). В диоде $VD1$ время восстановления обратного сопротивления будет наименьшим, так как в коллекторной области не происходит накопления дополнительного заряда (переход «коллектор – база» является короткозамкнутым). В диоде $VD1$ цепь коллектора разомкнута, поэтому инжекция неосновных носителей в область базы смещает коллекторный переход в прямом направлении. Это вызывает появление дополнительного заряда в базовой и коллекторной областях. Время восстановления обратного сопротивления диода $VD2$ оказывается значительно большим, чем диода $VD1$.

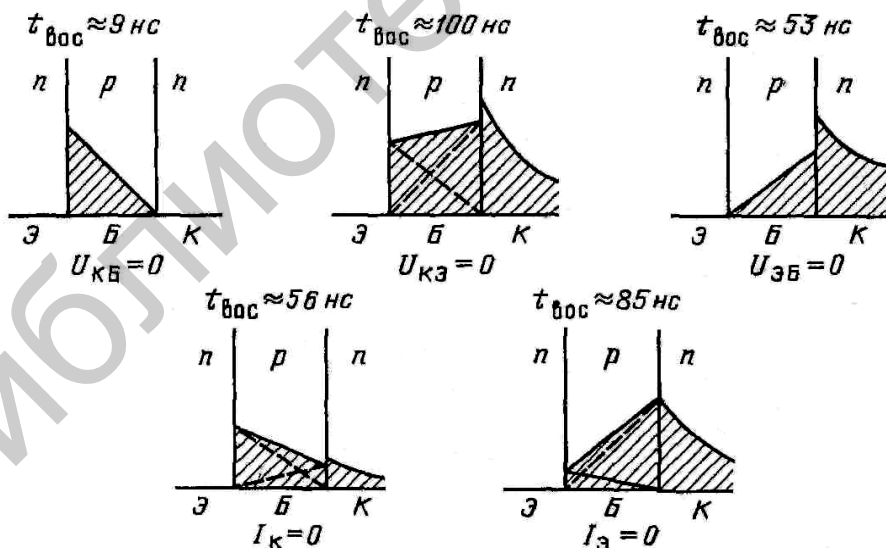


Рисунок 2.9 – Графики распределения неосновных носителей для диодных схем включения транзистора

Из диаграммы распределения неосновных носителей для диода $VD4$ видно, что накопленный заряд в нем также больше, чем в диоде $VD1$. В этом случае коллекторный переход смещается в прямом направлении и происходит

инжекция носителей как в базовую, так и в коллекторную область. Для диода $VD6$ диаграмма распределения неосновных носителей аналогична соответствующей диаграмме для диода $VD4$.

В диоде $VD5$ эмиттерный переход, работающий в режиме холостого хода, приобретает небольшой потенциал, смещающий его в прямом направлении. Это приводит к дополнительному накоплению заряда в структуре.

Диод $VD3$ обладает наибольшим временем восстановления обратного сопротивления, так как оба перехода «коллектор – база» и «эмиттер – база» смещены в прямом направлении, и в структуре происходит накопление наибольшего заряда. Эффект накопления неравновесных носителей заряда ослабевает, если уменьшить их время жизни, что может быть достигнуто путем легирования транзисторной структуры золотом.

В таблице 2.1 обобщены характеристики диодов при различных схемах соединения. Эти диоды выполнены на транзисторных структурах со следующими значениями параметров: $\rho_k = 0,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$; $R_{S6} = 200 \text{ Ом}/\square$; $R_{S3} = 2,2 \text{ Ом}/\square$; $S_6 = 0,063 \text{ мм}^2$; $S_3 = 0,025 \dots 0,038 \text{ мм}^2$.

Анализ параметров диодов позволяет сделать следующее заключение. Диод $VD1$ с замкнутым переходом «коллектор – база» предпочтительнее использовать в логических микросхемах, так как он может обеспечивать получение наибольшего быстродействия. Диод $VD2$ может применяться в логических микросхемах в качестве накопительного диода. Диоды $VD4$ и $VD5$, имеющие наибольшее значение напряжения пробоя, могут использоваться в качестве диодов общего назначения.

Диоды, изготовленные совместно с другими элементами на подложке типа КНС (кремний на сапфире), имеют более высокое быстродействие по сравнению с вышерассмотренными. Диоды с торцевыми p - n -переходами имеют малую площадь, а следовательно, и малую емкость (примерно в 100 раз меньше емкости обычных интегральных диодов). Время восстановления обратного сопротивления составляет около 1 нс.

Таблица 2.1 – Типичные параметры интегральных диодов

Параметр	Эмиттерный переход		Коллекторный переход		Параллельное соединение переходов $VD3$ ($U_{кэ} = 0$)
	$VD1$ ($U_{кб} = 0$)	$VD2$ ($I_k = 0$)	$VD4$ ($U_{эб} = 0$)	$VD5$ ($I_э = 0$)	
1	2	3	4	5	6
Напряжение пробоя $U_{проб}$, В	7	7	7	55	7
Прямое напряжение $U_{пр}$, В	0,85	0,96	0,92	0,95	0,92
Обратный ток $I_{обр}$, нА	5	5	25	20	25
Время восстановления обратного сопротивления $t_{вос}$, нс	9	56	100	85	100
Емкость диода C_d , пФ (при $U_{обр} = 5 \text{ В}$)	0,5	0,5	1,2	0,7	1,2

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6
Паразитная емкость $C_{п}$, пФ (при $U_{кп} = 5$ В)	2,9	1,2	2,9	2,9	2,9
Коэффициент передачи паразитного транзистора	0	3	3	3	3

2.3 Особенности топологии интегрированных транзисторов

При выборе геометрии транзистора необходимо учитывать как электрические характеристики разрабатываемой микросхемы, так и характеристики технологического процесса и допуски на геометрические размеры. Геометрические размеры эмиттера рассчитывают исходя из заданных рабочих токов интегрального транзистора. Можно приблизительно считать, что каждым 25 мкм периметра эмиттера соответствует ток, равный 4 мА. Отсюда следует, например, что периметр эмиттера маломощного транзистора для тока $I_{э} = 8$ мА должен составлять $\Pi_{э} = 8/4 \cdot 25 = 50$ мкм. Обычно эмиттер имеет прямоугольную форму, поэтому если одну из сторон прямоугольника выбрать равной 15 мкм, то другая сторона составит 10 мкм.

Более точно площадь эмиттера можно определить, исходя из допустимой плотности тока эмиттера $J_{экр}$, при которой коллекторный переход находится при нулевом смещении, когда транзистор еще не вошел в режим насыщения:

$$S_{э} = I_{э} / J_{экр}, \quad (2.4)$$

$$I_{экр} \approx \frac{U_{кэ\min} - \varphi_{э}}{\rho_{эс} d}, \quad (2.5)$$

где $\varphi_{э}$ – контактная разность потенциалов на эмиттерном переходе (определяется аналогично $\varphi_{к}$);

$\rho_{эс}$ – удельное сопротивление эпитаксиального слоя;

d – толщина коллекторного слоя: $d = d_{э} - d_{с}/2$;

$d_{с}$ – толщина скрытого слоя;

$d_{э}$ – толщина эпитаксиального слоя.

Минимальное напряжение на участке эмиттер-коллектор транзистора рассчитывают по максимальной мощности на p - n -переходе $P_{к\max}$ и максимальному току коллектора $I_{к\max}$:

$$U_{кэ} = P_{к\max} / I_{к\max}. \quad (2.6)$$

Если плотность тока эмиттера $J_{экр} \geq 10^3$ А/см², то целесообразно использовать узкие эмиттеры с большим периметром. Площадь коллекторного перехода и общую площадь интегрального транзистора можно рассчитать исходя из известных площадей эмиттера, минимально допустимого размера

окна, а также глубины эпитаксиального слоя. Площадь коллекторного перехода $S_K = (l_{\text{Э}} + 2d)(b_{\text{Э}} + 4d)$. Площадь коллекторного p - n -перехода можно найти исходя из заданной емкости коллектора при заданном обратном смещении.

Исходя из вышесказанного можно записать следующие выражения:

$$C_K = S_K C_{0j} = S_K \sqrt[3]{\frac{q\varepsilon^2 \varepsilon_0^2 a}{12(\varphi_K - U_{\text{кб}})}}, \quad (2.7)$$

$$S'_K = \frac{C_K \sqrt[3]{12(\varphi_K - U_{\text{кб}})}}{\sqrt[3]{q\varepsilon^2 \varepsilon_0^2 a}}, \quad (2.8)$$

причем значение S_K должно быть меньше или равно S'_K .

Исходя из рассмотренного, можно сделать заключение о том, что площадь транзистора может быть значительно сокращена за счет уменьшения глубины эпитаксиального слоя или использования других методов изоляции.

3 КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ДИФФУЗИОННЫХ ПАССИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОСХЕМ

3.1 Конструирование и расчет диффузионных резисторов

Как уже отмечалось, один из способов реализации резистивных элементов в полупроводниковых микросхемах заключается в использовании диффузионных слоев, полученных при формировании базовых или эмиттерных областей транзисторов. Кроме того, применяются эпитаксиальные и ионно-легированные резисторы.

Исходными данными для определения геометрических размеров интегральных полупроводниковых резисторов являются:

- а) заданные в принципиальной электрической схеме номинальное значение R и допуск на него $\gamma_R = \Delta R/R$;
- б) поверхностное сопротивление легированного слоя R_S , на основе которого формируется резистор;
- в) средняя мощность, рассеиваемая резистором P , и максимально допустимая удельная мощность P_0 ;
- г) основные технологические и конструктивные ограничения.

Сопротивление резистора $R = R_S l / b$, где l и b – длина и ширина резистора.

Проектирование резистора с заданным номиналом сводится к определению конфигурации резистивного слоя, так как при известном поверхностном сопротивлении слоя R_S номинальное значение сопротивления резистора зависит от отношения его длины к ширине (коэффициента формы $K_\phi = l/b$). Контактные площадки, расположенные на концах полупроводникового резистора, вносят дополнительные сопротивления. Поэтому в расчетную формулу вводится поправочный коэффициент, зависящий от конфигурации контактных областей. На рисунке 3.1 приведены несколько типовых топологий полупроводниковых резисторов. Конфигурации, приведенные на рисунке 3.1, а, б, пригодны для реализации низкоомных резисторов с номинальными значениями от нескольких Ом до одного кОм. При этом оказывается, что для очень низкоомных резисторов ширина превышает его длину. Сопротивления резисторов, показанных на рисунке 3.1, а, б, равны соответственно

$$R = R_S (l/b + 2k_1), \quad (3.1)$$

$$R = R_S [(l_1 + l_2)/b + 3k_1], \quad (3.2)$$

где $k_1 = 0,07$ – поправочный коэффициент.

Для резисторов с номинальными значениями, превышающими 400 Ом, можно использовать топологию, приведенную на рис. 3.1, в.

Расчетное соотношение для определения сопротивления резистора в этом случае:

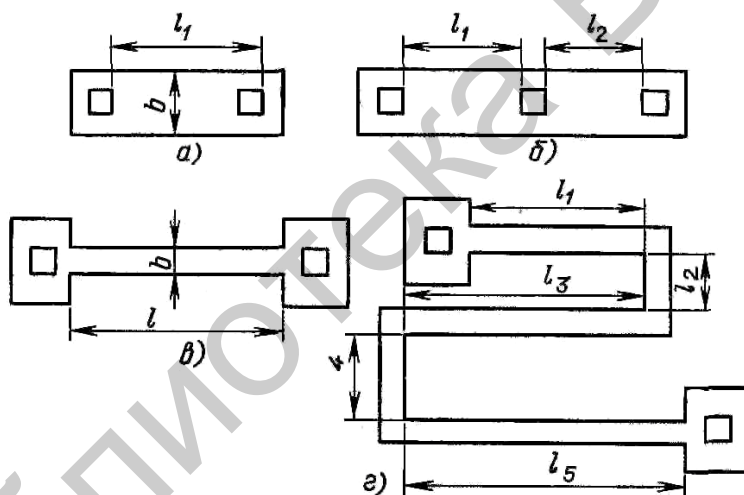
$$R = R_S(l/b + 2k_2), \quad (3.3)$$

где $k_2 = 0,65$ – поправочный коэффициент.

Резисторам с номинальными значениями более 1 кОм целесообразно придавать форму змейки (см. рисунок 3.1, *з*), что позволяет значительно уменьшить площадь, занимаемую резистором. Изгибы резистора оказывают влияние на его значение, что учитывается используемым для этого случая расчетным соотношением

$$R = R_S(l_\Sigma / b + 2 \cdot 0,65 + n0,55), \quad (3.4)$$

где l_Σ – суммарная длина прямоугольных участков;
 n – число изгибов резистора на угол 90° .



а, б – низкоомные до 1 кОм; *в, з* – свыше 400 Ом
 Рисунок 3.1 – Топологии диффузионных резисторов:

На рисунке 3.2 представлена топология пинч-резистора, в котором используется слаболегированная базовая область, находящаяся под эмиттерным диффузионным слоем.

Соотношение для расчета такого резистора имеет вид

$$R = R'_S(l_2/b) + R_S[(l_1 + l_3)/b + 2k_1], \quad (3.5)$$

где R'_S – поверхностное сопротивление базового слоя под эмиттером;
 R_S – поверхностное сопротивление базового слоя.

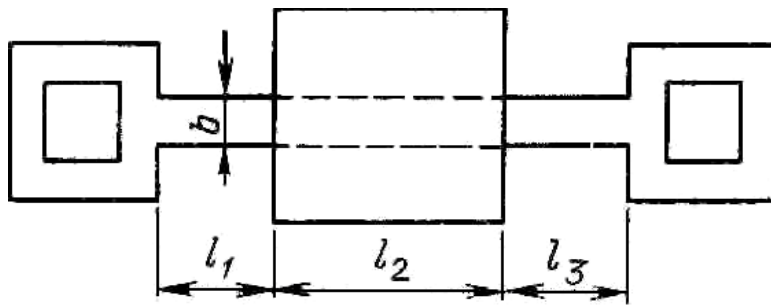
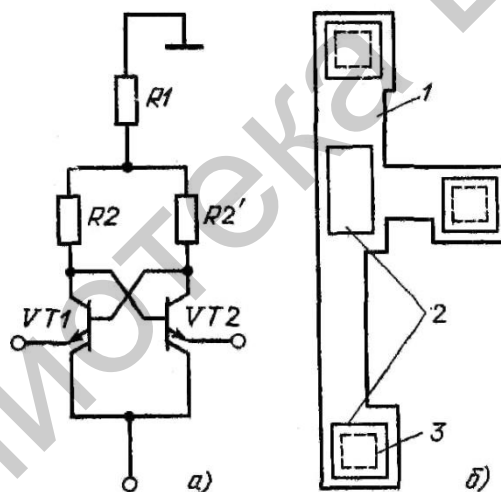


Рисунок 3.2 – Топология пинч-резистора

В некоторых случаях резисторы в полупроводниковых микросхемах целесообразно объединять в многополюсный диффузионный слой. Такое объединение позволяет сократить площадь полупроводникового кристалла, так как исключаются контактные окна к областям, имеющим равные потенциалы, и расстояния, которые необходимо выдерживать между элементами и окнами. Кроме того, устраняется коммутация между отдельными резисторами. В качестве примера резистивного многополюсника рассмотрим электрическую ячейку с резистивной нагрузкой в виде звезды (рисунок 3.3).



a – принципиальная электрическая схема с резистивным многополюсником;

б – топология многополюсника:

1 – базовая область; 2 – область *p*-типа; 3 – контактное окно

Рисунок 3.3 – Резистивный многополюсник

Резисторы выполнены в базовой области. Резисторы R_2 и R_2' низкоомные, причем они имеют различные конфигурации и расположены несимметрично относительно резистора R_1 . Для обеспечения заданной помехоустойчивости и быстродействия ячейки необходимо, во-первых, получить определенную абсолютную точность номиналов резисторов и, во-вторых, обеспечить выполнение с заданной точностью равенств $R_2 = R_2'$ и $R_1/R_2 = R_1/R_2'$. В качестве вспомогательной меры, выравнивающей условия

взаимного расположения, в рассматриваемом случае приведен сильнолегированный диффузионный слой p^+ -типа в перекрестье звезды. Этот же слой использован и в областях контактирования с металлизацией. Необходимо отметить, что резистивные многополюсники в полупроводниковых микросхемах чаще всего рассчитываются машинными методами. Для этого разрабатывают физическую и математическую модели резистивных цепей и алгоритм расчета.

Расчет геометрических размеров интегральных полупроводниковых резисторов начинают с определения их ширины. За ширину резистора принимают значение, которое не меньше наибольшего значения одной из следующих величин:

- минимальной ширины резистора $b_{\text{тех}}$, определяемой разрешающей способностью технологических процессов ($b_{\text{тех}} = 3,5\text{--}4$ мкм);
- минимальной ширины резистора $b_{\text{точн}}$, при которой точность его изготовления равна заданной;
- минимальной ширины резистора b_p , определяемой исходя из максимально допустимой рассеиваемой мощности:

$$b_{\text{рас}} \geq \max \{ b_{\text{тех}}, b_{\text{точн}}, b_p \}. \quad (3.6)$$

Ширина резистора определяется по формуле

$$b_{\text{точн}} = \frac{\Delta b + \Delta l / K_{\Phi}}{\gamma_{K_{\Phi}}}, \quad (3.7)$$

где Δb , Δl – абсолютные погрешности ширины и длины резистивной полоски (для типовых технологических процессов $\Delta b = \Delta l = 0,05 \dots 0,1$ мкм);

K_{Φ} – коэффициент формы, определяется из соотношения $K_{\Phi} = R/R_s$,

$\gamma_{K_{\Phi}}$ – относительная погрешность коэффициента формы резистора:

$$\gamma_{K_{\Phi}} = \gamma_R - \gamma_{R_s} - \gamma_T. \quad (3.8)$$

Здесь $\gamma_{R_s} = \Delta R_s / R_s$ – относительная погрешность удельного поверхностного сопротивления легированного слоя (для типовых технологических процессов $\gamma_{R_s} = 0,05 \dots 0,1$); $\gamma_T = a_R (T_{\text{max}} = 20 \text{ } ^\circ\text{C})$ – температурная погрешность сопротивления.

Минимальное значение ширины b_p определяется как

$$b_p = \sqrt{\frac{PR_s}{P_0 R}} = \sqrt{\frac{P}{P_0 K_{\Phi}}}, \quad (3.9)$$

где P_0 – максимально допустимая удельная мощность рассеяния, выбираемая в зависимости от типа корпуса микросхемы и условий ее эксплуатации в

пределах 0,5–4,5 Вт/мм. Расчетную длину резистора определяют исходя из формул (3.1)–(3.3).

Для составления топологического чертежа определяют вначале промежуточные значения ширины и длины резистора, учитывающие технологические отклонения размеров:

$$b_{\text{пром}} = b_{\text{расч}} - 2\Delta_{\text{трав}} - \alpha x_j, \quad (3.10)$$

$$l_{\text{пром}} = l_{\text{расч}} - 2\Delta_{\text{трав}} - \alpha x_j, \quad (3.11)$$

где $\Delta_{\text{трав}}$ – погрешность, вносимая за счет систематического растравления контактных окон в окисле (для типовых технологических процессов $\Delta_{\text{трав}} = 0,1\text{--}0,5$ мкм);

αx_j – погрешность, вносимая за счет ухода базовой (эмиттерной) диффузии под окисел в боковую сторону. Через α обозначен коэффициент, учитывающий распределение примесей вблизи границы резистора, причем обычно $0 \leq \alpha \leq 2$. Для резисторов шириной более 10 мкм боковой диффузией можно пренебречь ($\alpha = 0$). В более узких резисторах боковая диффузия оказывает значительное влияние, поэтому в расчеты необходимо вводить соответствующую поправку.

Затем выбирают шаг координатной сетки d ($d = 0,1; 0,2; 0,5; 1$ мм) и, задаваясь масштабом 100:1, 200:1 и т. д., определяют топологические значения ширины и длины резистора:

$$b_{\text{топ}} = K_b d \geq b_{\text{пром}}, \quad (3.12)$$

$$l_{\text{топ}} = K_l d \geq l_{\text{пром}}, \quad (3.13)$$

где K_b, K_l – целые положительные числа.

После этого оценивают получающуюся погрешность:

$$\gamma_R = [R(l_{\text{топ}}, b_{\text{топ}}) - R]/R, \quad (3.14)$$

где $R(l_{\text{топ}}, b_{\text{топ}})$ – сопротивление, рассчитанное по формулам (3.1)–(3.3) при $l = l_{\text{топ}}, b = b_{\text{топ}}$.

Если $|\gamma_R| > \gamma_{R\text{зад}}$, то ширину резистора увеличивают на величину d и все вычисления повторяют.

При проектировании интегральных полупроводниковых резисторов следует учитывать влияние паразитных элементов – распределенных емкостей и распределенного транзистора. На рисунке 3.4 представлена упрощенная эквивалентная схема резистора, сформированного на основе базовой диффузии, в которой, для упрощения, распределение легирующей примеси принято как в дискретном элементе. Эквивалентная схема содержит следующие элементы: R_n – сопротивление омических контактов резистора; R_1 и R_2 – сопротивления, соответственно характеризующие распределенные сопротивления

эпитаксиального слоя и подложки; C_1 и C_2 – распределенные емкости p - n -переходов; R – резистор, выполненный на основе базовой диффузии; VT – паразитный транзистор p - n - p -типа.

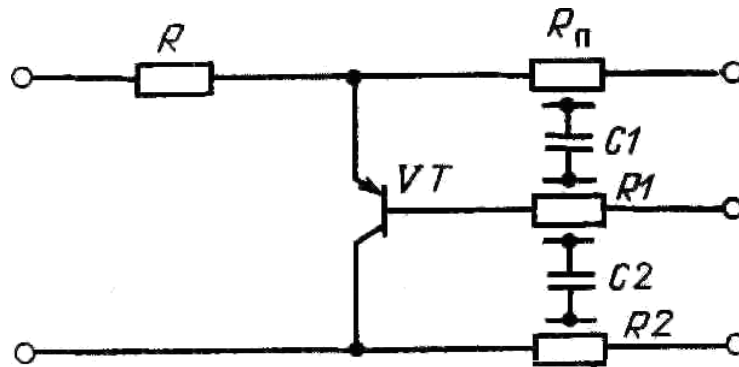


Рисунок 3.4 – Эквивалентная схема резистора на основе базовой диффузии

Благодаря наличию распределенных емкостей диффузионный резистор имеет емкостную проводимость. Поэтому полное сопротивление его с повышением частоты уменьшается. Необходимо отметить, что влияние распределенных емкостей становится существенным на частотах, превышающих 10 МГц.

Паразитный транзистор p - n - p -типа вызывает появление тока утечки в подложку. Как уже отмечалось, свести этот ток к минимуму можно уменьшением коэффициента передачи тока паразитного транзистора технологическим способом, например путем легирования золотом. Полное исключение паразитного транзистора достигается смещением диффузионного перехода резистора, т. е. эмиттерного перехода паразитного транзистора, в обратном направлении. Для этого в n -области (эпитаксиальный слой) создается омический контакт, присоединяемый к точке схемы с наиболее положительным потенциалом.

Выбор для реализации резистора на той или иной области транзисторной структуры определяется в зависимости от необходимого сопротивления резистора, занимаемой им площади и температурного коэффициента сопротивления, являющегося одним из важнейших параметров.

Сопротивление полупроводникового резистора изменяется вследствие температурной зависимости удельного сопротивления. Соотношение, используемое для определения сопротивления, можно преобразовать следующим образом:

$$R = \frac{1}{q\mu N} \frac{l}{xb}, \quad (3.15)$$

где μ – подвижность носителей заряда;
 N – концентрация примесей;
 x – глубина залегания p - n -перехода.

Если уровень легирования примесями велик, то концентрация носителей заряда практически не зависит от температуры. Температурно-зависимой величиной является подвижность носителей, которая в диапазоне рабочих температур уменьшается с увеличением температуры. Таким образом, диффузионные резисторы обладают положительным ТКС, значения которого в сильной степени определяются поверхностным сопротивлением (рисунок 3.5). Это объясняется тем, что подвижность носителей зависит также от концентрации носителей, уменьшаясь при увеличении концентрации. Для получения резистора с малым ТКС необходимо использовать высоколегированные области.

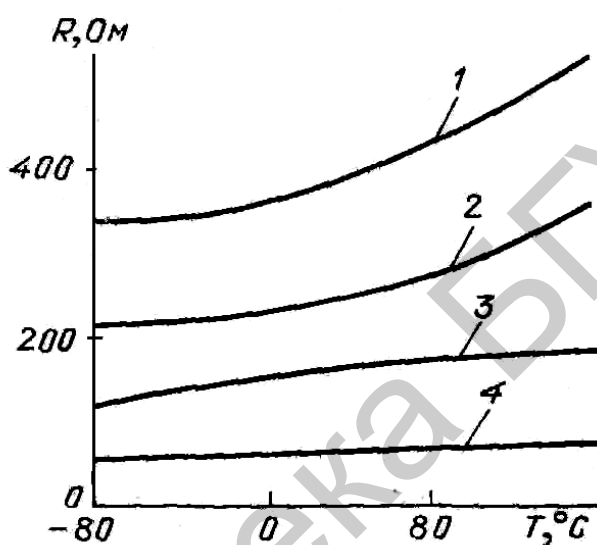


Рисунок 3.5 – Температурная зависимость номиналов диффузионных резисторов, изготовленных с различным удельным поверхностным сопротивлением

Полупроводниковые интегральные резисторы имеют ограниченную мощность рассеяния, так как чрезмерный нагрев может привести к нелинейным вольтамперным характеристикам. Мощность, рассеиваемая резистором, зависит от качества теплоотвода, т. е. от конструкции корпуса микросхемы. Максимальное напряжение на резисторе ограничено напряжением пробоя изоляции и зависит от метода изоляции. Допуски на сопротивления резисторов определяются технологическими факторами, приведенными в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Погрешности при изготовлении диффузионных резисторов

Операции	Относительная погрешность, %	Разброс сопротивлений, %
Изготовление фотошаблонов и фотолитографическая обработка	±1	±1
Травление при изготовлении защитной маски	±2	±1
Диффузия примесей	±7	±1
Весь технологический процесс (наихудший случай)	±10	±3

Обеспечение нужных допусков на сопротивление резисторов сводится к точному контролю процессов изготовления фотошаблонов, диффузии и фотолитографии. Из таблицы 3.1 видно, что сравнительно легко получить пределы допусков на отношения сопротивлений. Это достоинство полупроводниковых интегральных транзисторов используется при проектировании микросхем: они строятся так, чтобы основное влияние на характеристики оказывали не абсолютные значения допусков резисторов, а их отношения. Конструирование и расчет тонкопленочных резисторов, используемых в совмещенных микросхемах, производится в полном соответствии с гибридными микросхемами. Однако необходимо учитывать, что частотная характеристика тонкопленочного резистора в совмещенных микросхемах ограничивается паразитной распределенной емкостью, удельное значение которой зависит толщины слоя SiO_2 , на поверхности которого формируется резистор.

3.2 Конструирование и расчет диффузионных конденсаторов

В полупроводниковых микросхемах конденсаторы с постоянной или управляемой напряжением емкостью формируются на основе $p-n$ -перехода. Как отмечалось выше, $p-n$ -переход обладает барьерной и диффузионной емкостями. Физическая природа диффузионной емкости $p-n$ -перехода обусловлена инжекцией неосновных носителей в области p - и n -типа при смещении $p-n$ -перехода в прямом направлении.

Диффузионная емкость шунтирована малым сопротивлением открытого $p-n$ -перехода, поэтому ее добротность мала. Для выполнения функции конденсатора в полупроводниковых микросхемах используется главным образом барьерная емкость, проявляющаяся при обратном смещении $p-n$ -перехода. Такая емкость имеет гораздо более высокую добротность. Для оценки добротности конденсаторов, реализуемых на основе $p-n$ -перехода, рассмотрим упрощенную эквивалентную схему, приведенную на рисунке 3.6, где R_{p-n} – сопротивление $p-n$ -перехода, R_{Π} – последовательное объемное сопротивление материала полупроводника, включая сопротивление контактов.

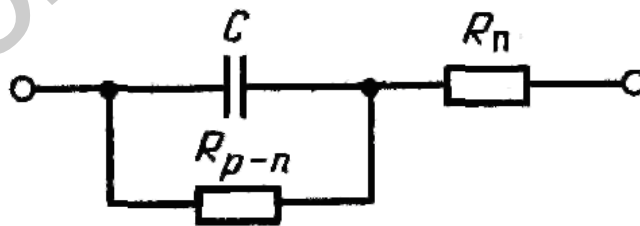


Рисунок 3.6 – Упрощенная эквивалентная схема конденсатора на основе $p-n$ -перехода

Поскольку на высоких частотах можно пренебречь влиянием сопротивления $p-n$ -перехода R_{p-n} , то добротность составляет

$$Q = 1 / 2\pi f C R_{\Pi}, \quad (3.16)$$

где f – рабочая частота.

Из этого выражения видно, что добротность уменьшается с увеличением сопротивления, включенного последовательно с конденсатором. Объемное сопротивление $R_{\text{п}}$ в основном зависит от удельного сопротивления высокоомной области p - n -перехода. Поэтому добротность конденсатора на основе перехода «эмиттер – база» будет выше добротности конденсатора на основе перехода «коллектор – база».

Емкость конденсатора рассчитывается по формуле

$$C = C_{0j}S, \quad (3.17)$$

где S – площадь p - n -перехода.

Удельная емкость C_{0j} зависит от типа перехода. Следует отметить, что поверхностное сопротивление слоев нельзя задавать произвольно, поскольку конденсаторы создаются одновременно с переходами транзистора. Поэтому удельное сопротивление слоев оптимизируют исходя из требований, предъявляемых к транзистору. Емкость конденсатора обратно пропорциональна напряжению, приложенному к переходу. Максимальная емкость соответствует нулевому смещению. С увеличением обратного напряжения, прикладываемого к p - n -переходу, емкость конденсатора будет уменьшаться по закону

$$C \sim 1/U^n, \quad (3.18)$$

где U – напряжение, приложенное к p - n -переходу;

$n = 1/2$ для ступенчатого перехода;

$n = 1/3$ для плавного перехода.

В таблице 3.2 даны значения удельной емкости для различных типов p - n -переходов.

Таблица 3.2 – Удельная емкость переходов интегрального транзистора

Переход	$U, \text{В}$	$C_0, \text{пФ/мм}^2$	Примечание
Коллектор – подложка	0	256	$\rho_{\text{п}} = 5 \text{ Ом} \cdot \text{см},$ $N_{\text{а}} = 2,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$
	5	90	
	10	56	
Коллектор – база	0	320	$\rho_{\text{к}} = 0,5 \text{ Ом} \cdot \text{см},$ $N_{\text{дк}} = 1,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$
	5	144	
	10	96	
Эмиттер – база	0	1400	$R_{\text{сб}} = 100 \text{ Ом/}\square$
	2	1000	
	5	640	

Из анализа этих значений можно заключить, что номинальные значения емкостей конденсаторов, выполняемых на основе *p-n*-переходов, не могут превышать 100–200 пФ. Это ограничение налагается, в частности, размерами конденсатора, которые становятся слишком большими и не соизмеримыми с другими элементами полупроводниковых микросхем.

Максимальное смещение *p-n*-перехода в обратном направлении не должно превышать напряжения пробоя перехода. Поэтому в зависимости от необходимого рабочего напряжения проектируемого конденсатора выбирается тот или иной *p-n*-переход. Исходя из выбранного типа перехода, определяют необходимую площадь для получения заданной емкости. Например, при проектировании конденсатора с рабочим напряжением менее 5 В целесообразно использовать переход «эмиттер – база», так как для него характерны большая удельная емкость и более высокая добротность по сравнению с другими *p-n*-переходами.

Из анализа соотношений, определяющих емкость *p-n*-перехода, следует, что температурная зависимость емкости диффузионного конденсатора обусловлена температурной зависимостью диэлектрической проницаемости и контактного потенциала. Для резкого *p-n*-перехода

$$\text{TKE} = 0,5 \left[\text{TKE} - \frac{\varphi_K}{-U + \varphi_K} \text{TK}\varphi_K \right], \quad (3.19)$$

где $\text{TKE} = (1/C)(\partial C/\partial T)$ – температурный коэффициент емкости;

$\text{TKE} = (1/\varepsilon)(\partial \varepsilon/\partial T)$ – температурный коэффициент диэлектрической проницаемости ε ;

$\text{TK}\varphi_K = (1/\varphi_K)(\partial \varphi_K/\partial T)$ – температурный коэффициент контактного потенциала φ_K .

Для перехода с линейным распределением концентрации примеси

$$\text{TKE} = \frac{2}{3} \text{TKE} - \frac{\varphi_K}{3(-U + \varphi_K)} \text{TK}\varphi_K. \quad (3.20)$$

С увеличением температуры диэлектрическая проницаемость возрастает, а контактный потенциал уменьшается. Диэлектрическая проницаемость кремния ε слабо зависит от температуры ($\text{TKE} = 2 \cdot 10^{-1} 1/^\circ\text{C}$). Температурная зависимость контактного потенциала является сложной функцией от концентрации примесей в областях *p*- и *n*-типа: $\text{TK}\varphi = (3 \dots 6) \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$. Влияние контактного потенциала на барьерную емкость уменьшается при увеличении обратного напряжения, приложенного к *p-n*-переходу. Поэтому температурная зависимость диффузионного конденсатора при больших напряжениях определяется в основном температурной зависимостью диэлектрической проницаемости, а при малых обратных напряжениях – температурной зависимостью контактного потенциала.

Конденсатор на основе $p-n$ -перехода, как и другие элементы микросхем, подвержен влиянию ряда паразитных элементов, так как в нем кроме $p-n$ -перехода, образующего полезную емкость, существует в зависимости от типа диффузионного конденсатора один или два $p-n$ -перехода, играющих паразитную роль. Так, в упрощенной эквивалентной схеме конденсатора на основе перехода «коллектор – база» (рисунок 3.7) кроме полезной емкости C имеются паразитный транзистор VT , паразитная емкость C_1 изолирующего перехода «коллектор – подложка» и паразитное последовательное сопротивление R_n . Эти паразитные элементы могут существенно ухудшить характеристики конденсатора. Необходимо отметить, что влияние паразитного транзистора практически устранено, поскольку на n -область всегда подается положительный потенциал. Для уменьшения паразитной емкостной связи конденсатора с подложкой, т. е. для получения максимального коэффициента передачи сигнала от точки А к точке Б, необходимо, чтобы соотношение C/C_1 было как можно большим.

Варьировать соотношение C/C_1 можно изменением напряжения смещения, приложенного между точкой Б и подложкой, так как емкость перехода зависит от напряжения смещения.

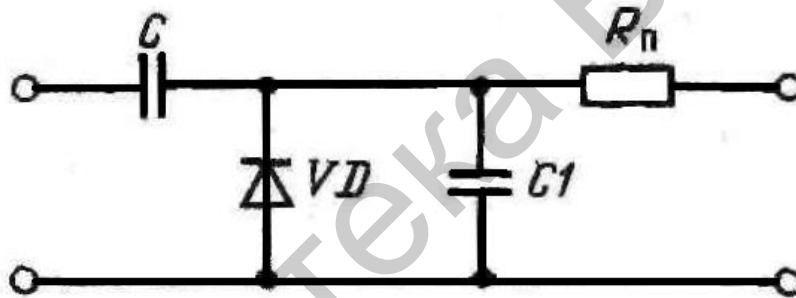


Рисунок 3.7 – Эквивалентная схема конденсатора основе перехода «коллектор – база»

Вторым типом конденсатора, широко используемого в полупроводниковых микросхемах, является конденсатор с диэлектриком. Для изготовления таких конденсаторов не требуется проведения дополнительных технологических операций. Они создаются в едином технологическом цикле с другими элементами микросхем. На рисунке 3.8 представлена эквивалентная схема конденсатора с диэлектриком.

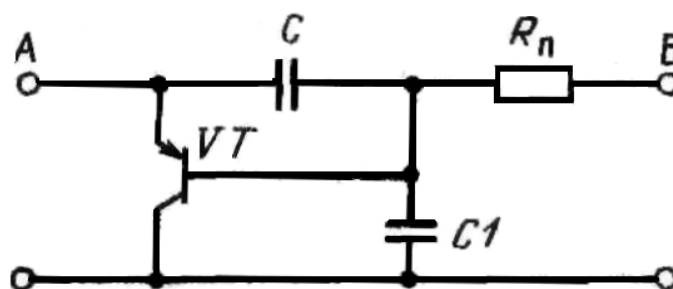


Рисунок 3.8 – Эквивалентная схема конденсатора с диэлектриком

Элементы VD и Cl , являющиеся паразитными, вносятся p - n -переходом, предназначенным для изоляции конденсатора от других элементов микросхем. Последовательное сопротивление R_n в конденсаторах с диэлектриком (не более 5–10 Ом) значительно меньше, чем в диффузионных конденсаторах. Это объясняется тем, что нижней обкладкой конденсатора служит высоколегированный слой n^+ -типа. Следовательно, добротность конденсатора с диэлектриком также выше добротности диффузионного конденсатора.

Емкость конденсатора с диэлектриком, выраженная в пикофарадах:

$$C = 0,0885S/d = C_0S, \quad (3.21)$$

где S – площадь обкладки конденсатора, см^2 ;

ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость;

d – толщина диэлектрика, см ;

C_0 – удельная емкость.

Диэлектрическая проницаемость диоксида кремния $\epsilon = 4$. Толщина слоя диоксида кремния не может быть менее 50 нм, так как при дальнейшем уменьшении толщины очень трудно получить однородный оксидный слой. Типичные значения удельной емкости составляют 320–800 пФ/ мм^2 при толщине диэлектрического слоя SiO_2 50–100 нм.

Рабочее напряжение конденсатора с диэлектриком ограничено напряжением пробоя диэлектрика и определяется как

$$U_{\text{пр}} = E_{\text{пр}}d, \quad (3.22)$$

где $E_{\text{пр}}$ – электрическая прочность диэлектрика (для SiO_2 $E_{\text{пр}} = 10^7$ В/ см).

В отличие от пробоя p - n -переходов пробой диэлектрика имеет необратимый характер, т. е. после пробоя конденсатор выходит из строя.

Структура комбинированного конденсатора (рисунок 3.9) представляет собой параллельное включение конденсатора с диэлектриком и четырех конденсаторов на основе p - n -переходов («эмиттер – база», «база – коллектор», «разделительная область – коллектор», «разделительная область – скрытый слой»). Параметры интегральных конденсаторов приведены в таблице 3.3.

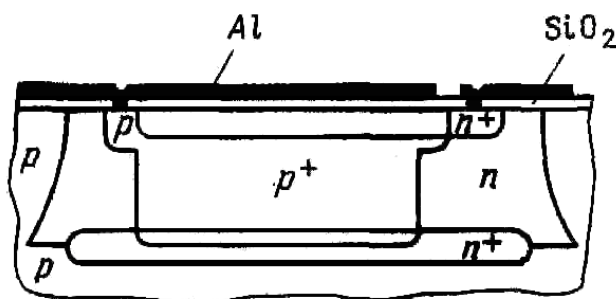


Рисунок 3.9 – Структура комбинированного конденсатора

Таблица 3.3 – Параметры интегральных конденсаторов

Тип конденсатора	Удельная емкость C_0 , пФ/мм	Допуск, %	$TKE \cdot 10^{-3}$, $1/^\circ C$	Пробивное напряжение $U_{пр}$, В	Добротность (при $f = 10$ МГц)
<i>Диффузионные конденсаторы на переходах</i>					
Эмиттер – база	600 (1000)	± 20	-1,0	5–9	15–20
Коллектор – база	150 (350)	$\pm 15-20$	-1,0	30–70	5–10
Коллектор – подложка	100 (250)	$\pm 15-20$	-1,0	35–100	1–5
<i>Конденсатор с диэлектриком</i>					
SiO_2	320–800	± 20	0,015	30–50	25–80
Si_3N_4	800–1600	± 20	0,01	50	20–100

Примечание – В скобках указаны значения C_0 для вертикальных (боковых) стенок $p-n$ -перехода.

ЛИТЕРАТУРА

1 Маллер, Р. Элементы интегральных схем / Р. Малер, Т. Кейминс. – М. : Мир, 1989.

2 Колосницын, Б. С. Полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы / Б. С. Колосницын, П. П. Стешенко, В. В. Шульгов. – Минск : Амалфея, 2005.

3 Колосницын, Б. С. Элементы интегральных схем. Физические основы : учеб. пособие / Б. С. Колосницын. – Минск : БГУИР, 2004.

4 Пономарев, М. Ф. Конструкции и расчет микросхем и микроэлементов ЭВА / М. Ф. Пономарев. – М. : Радио и связь, 1982.

Библиотека БГУИР

Учебное издание

Колосницын Борис Сергеевич
Котов Дмитрий Анатольевич

***РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ***

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редактор *А. К. Петрашкевич*

Компьютерная правка, оригинал-макет *В. М. Задоля*

Подписано в печать 12.05.2017. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 4,07. Уч.-изд. л. 4,0. Тираж 100 экз. Заказ 56.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространения печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,

№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.

ЛП №02330/264 от 14.04.2014.

220013, Минск, П. Бровки, 6