МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА
(национальный исследовательский университет)»

А. И. Меркулов, В. А. Меркулов

# Конструирование интегральных микросхем

Электронное учебное пособие

САМАРА 2010

УДК 621.3.049.77

**Авторы:** ***Меркулов Анатолий Игнатьевич***
***Меркулов Владимир Анатольевич***

Рецензенты: *Нестеров В.Н.*
*Медников В.А.*

Рассмотрены основные аспекты возникновения и развития микроэлектроники. Даётся представление об уровне современной микроэлектроники, её методах, средствах, проблемах и перспективах. Обосновывается выбор материалов и конструкций тонкоплёночных, толстоплёночных, гибридных и полупроводниковых интегральных микросхем. Рассмотрены методы проектирования и расчёта конструктивных параметров элементов с учётом их электрических, технологических и эксплуатационных характеристик; основное внимание уделено вероятностному методу расчёта. Материал курса представлен в виде модулей, заканчивающихся контрольными вопросами.

Рекомендуется студентам радиотехнического факультета по направлению 211000 – «Проектирование и технология электронных средств» для подготовки бакалавров и магистров на дневном и заочном отделении по курсу «Конструирование интегральных микросхем».

Разработано на кафедре КиПРЭС.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2010

Оглавление

Введение ..... 4

Глава 1. Эволюция в проектировании РЭС ..... 5

1.1 Основные этапы микроминиатюризации РЭС ..... 5
1.2 Основные задачи микроэлектроники ..... 9
1.3 Основные трудности микроминиатюризации ..... 14
Контрольные вопросы ..... 16

Глава 2. Гибридные интегральные микросхемы ..... 17

2.1 Общие сведения о гибридных интегральных микросхемах .... 17
2.2 Конструктивно-технологические особенности техпроцессов, используемых при изготовлении ГИМС ..... 19
2.3 Возможности дальнейшей микроминиатюризации РЭС ..... 22
Контрольные вопросы ..... 24

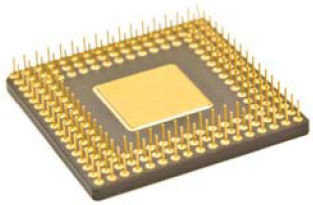
Глава 3. Конструирование гибридных интегральных микросхем ..... 26

3.1 Подложки для ИМС ..... 26
3.2 Материалы для получения тонких пленок ..... 28
3.3 Конструирование и расчет тонкопленочных резисторов (ТПР) ..... 34
3.4 Конструирование и расчет тонкопленочных конденсаторов (ТПК) ... 65
3.5 Конструирование и расчет пленочных катушек индуктивности ..... 82
Контрольные вопросы ..... 91

Глава 4 Разработка ГИС и оформление конструкторской и технологической документации ..... 93

4.1 Проектирование топологии и конструкции ГИМС ..... 93
4.2 Разработка конструкторской документации на ГИМС ..... 119
4.3 Разработка технологической документации на ГИМС ..... 127
4.4. Классификация микросхем ..... 129
Контрольные вопросы ..... 133

Глава 5 RC-цепи распределенными параметрами ..... 135
Контрольные вопросы ..... 157
Глава 6 Конструирование и расчет полупроводниковых ИМС..... 159
Контрольные вопросы ..... 187
Глава 7. Особенности конструкций ГИС СВЧ ..... 189
Контрольные вопросы ..... 198
Глава 8. Тепловые режимы ГИС ..... 199
Контрольные вопросы ..... 204
Глава 9. Надёжность микроэлектронной аппаратуры ..... 205
Контрольные вопросы ..... 209
Перспективы развития микроэлектроники ..... 211
Заключение ..... 216
Список рекомендуемой литературы ..... 217
Приложения ..... 218



## Введение

Задачи создания материально-технической базы, обеспечения обороноспособности страны неразрывно связаны с внедрением новейших достижений науки и техники во все отрасли промышленности, с всемирным повышением темпов технического прогресса. Одной из важных стадий этого процесса является широкое использование в народном хозяйстве последних достижений радиоэлектроники.

В последние годы радиоэлектроника переживает период особо бурного развития. Этот период называют даже научно-технической революцией в радиоэлектронике. Нет такой отрасли промышленности, где бы ни применялись те или иные радиоэлектронные приборы, устройства или системы. Всё большее применение они находят в вычислительной технике, приборостроении, автоматизированном управлении производственными процессами. Использование современных вычислительных и управляющих машин ведёт к революции не только в технике, технологии производства, но и в экономике, учёте, проектно-конструкторских разработках и научных исследованиях. Широкое применение нашли радиоэлектронные средства (РЭС) в быту.

Особое значение приобретает радиоэлектроника в авиации, освоении космического пространства. Сложность современных РЭС с каждым годом возрастает. Достаточно сказать, что для подъёма килограмма веса аппаратуры спутника или космического корабля необходимо увеличить стартовый вес ракеты на несколько сот килограммов, и можно предполагать, что объём и масса оборудования будут возрастать быстрее, чем экономичность ракетных двигателей. Одна из авиационных систем типа Е-1-В (США) 1959 года выпуска содержала 150000 электронных элементов (транзисторов и дискретных элементов) и 20000 механических деталей. Потребляемая мощность – 10 кВт. Система типа Е-2-А образца 1964 года содержала уже 260000 электронных элементов и 53000 механических деталей. Потребляемая мощность 35 кВт. Этот пример показывает динамику развития РЭС. Современная аппаратура содержит миллионы электронных и механических элементов. В связи с этим основными требованиями, стоящими перед наукой и промышленностью, являются: снижение габаритов и массы РЭС, повышение надёжности, снижение стоимости. Решению комплекса этих и других задач совершенствования конструкций и технологических процессов изготовления РЭС способствует комплексная микроминиатюризация их элементов и узлов, важнейшей частью которой является разработка и совершенствование интегральных микросхем (ИМС).

# Глава 1. Эволюция в проектировании РЭС

## 1.1. Основные этапы микроминиатюризации РЭС

Совершенствование РЭС началось вместе с их возникновением. Совершенствовались материалы, конструкции элементов и всего изделия, внешний вид, органы управления, технологические процессы изготовления. Изучение истории развития РЭС, эволюции в проектировании конструкций и технологических процессов позволяет проследить динамику творческой мысли, подсказать новые возможности, подходы к проектированию, развить инновационное мышление. Можно проследить закономерности технического развития, познания и использования законов природы, открытия новых сторон и свойств предметов и материалов, установления взаимосвязей между наукой, техникой и другими областями человеческой деятельности. Установление закономерностей развития той или иной отрасли техники, оценка различных идей и изобретений на разных этапах этого развития позволяют вырабатывать критическое отношение к новым техническим решениям, их правильному осмыслению и пониманию, дает возможность выделить из них наиболее ценные и перспективные. Важной задачей любого технического специалиста является овладение огромным запасом опыта и знаний, накопленных предыдущими поколениями, и их использование применительно к задачам современного проектирования и производства. Историко-культурологический подход к осуществлению технических решений позволяет формировать личность современного профессионально мобильного специалиста, его позитивное отношение к истории своей страны, её ученым и специалистам.

Первым этапом создания средств передачи информации (электрических сигналов), в разработке которых активное участие принял талантливый российский ученый и изобретатель Александр Степанович Попов, была разработка беспроволочного телеграфа – радио. Этот этап можно назвать эрой пассивных элементов: проводов, катушек индуктивности, резисторов, конденсаторов, магнитов, электромеханических приборов (переключателей, реле и др.). Ни о какой микроэлектронике разговор ещё не шел, хотя задачи уменьшения размеров и массы элементов уже ставились.

Весьма важным с точки зрения развития и совершенствования средств передачи и приёма информации является этап развития электроники, связанный с изобретением электронной лампы – первого активного электронного прибора, способного детектировать электрические сигналы, и, что особенно важно, управлять ими. Двадцатые годы XX – века ознаменовались триумфом радио, в сороковых – появилась эффективная военная электроника, в конце сороковых – начале пятидесятых годов началось массовое использование телевидения. Начинается не прекращающаяся до настоящих дней эра микроминиатюризации: появились миниатюрные конструкции электронных ламп, малогабаритные керамические конденсаторы, резисторы, катушки индуктивности на ферритовых кольцах и сердечниках, электролитические танталовые конденсаторы, малогабаритные источники питания.

Электронные лампы устанавливались на основание (шасси) с помощью ламповых панелек, радиоэлементы припаивались непосредственно в лепесткам ламповых панелек и лепесткам установочных панелей. Необходимые соединения осуществлялись с помощью навесного монтажа проводами типа МГШВ и другими. Изделие, как правило, помещалось в металлический корпус. К достоинствам электронных ламп следует отнести линейность их вольт-амперных характеристик, устойчивость к перегрузкам, возможность оперативной замены. Разработанные в 30-е годы электровакуумные лампы с тремя сетками (пентоды) решили задачу повышения рабочих частот радиовещания, позволили освоить диапазон ультракоротких волн (УКВ) – метровые, дециметровые, сантиметровые и миллиметровые волны. С этой целью разработаны электровакуумные приборы с новыми принципами управления электронными потоками: магнетроны, клистроны, лампы обратной волны, позволившие активизировать такие отрасли радиоэлектроники, как радиолокация, радионавигация, импульсная многоканальная связь. Появились газоразрядные приборы, неоновые лампы, тиратроны с холодным катодом, передающие трубки – суперортиконы, кинескопы.

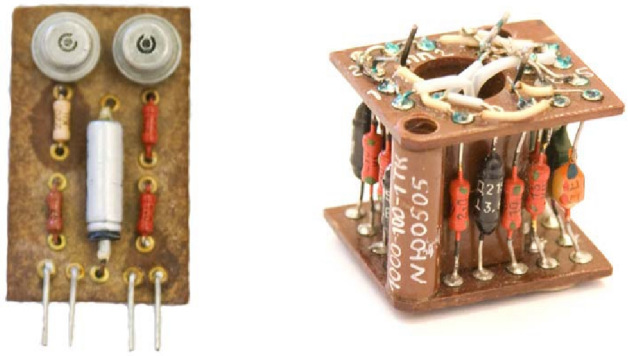
В то же время лампы потребляют как по цепям питания, так и по анодному току значительную энергию, имеют большие размеры и массу, неустойчивы к ударам и вибрациям, имеют ограниченный срок службы из-за износа катода, контакт между ножками ламп и ламповыми панельками нередко нарушается из-за окисления.

Рисунок 1.1 – Аппаратура на электронных лампах.

Радиоэлектронная аппаратура на электронных лампах (рис. 1.1) способствовала развитию самых разных отраслей промышленности, связи, космоса, обороны. И в настоящее время функционирует ряд радиоэлектронных изделий, особенно работающих в диапазоне высоких и сверхвысоких частот, где электронные лампы используются достаточно широко.

Бурное внедрение РЭС обострило проблему снижения их габаритов и массы. Как у нас, так и за рубежом четко обозначились направления миниатюризации РЭС. Вначале это было проектирование плоских и объемных мо-

дулей (рис. 1.2) с использованием проводного или печатного монтажа. Модули имели унифицированные размеры, из них можно было компоновать достаточно компактные узлы и блоки, что позволяло уменьшать размеры проектируемых устройств. И в настоящее время разработка «регулярных», имеющих одинаковые или кратные размеры узлов, является актуальной. Однако применение модулей практически не снижало массу разрабатываемого устройства. В некоторой мере уменьшению массы модулей и аппаратуры в целом способствовало применение «печатного» монтажа. Получаемые методами печати или травления фольгированного диэлектрика проводники не имеют изоляционной оплетки, их толщина достаточно мала (десятки-сотни микрон).



а) б)

Рисунок 1.2 – Плоский (а) и объемный (б) модули.

Стремление уменьшить габариты РЭС за счет унификации размеров отдельных элементов привело зарубежных, а затем и советских ученых, к созданию так называемых «этажерочных» микромодулей, собираемых из тонких керамических плат стандартных размеров (7,9 х 7,9 мм) с размещенными на их поверхностях радиоэлементами – резисторами, конденсаторами, малогабаритными катушками индуктивности и даже малогабаритными корпусными транзисторами (рис. 1.3). Каждая плата имела «ключ» и 12 покрытых припоем пазов, что позволяло её определенным образом ориентировать и соединять с другими платами с помощью тонких проводников, проходящих по пазам и припаянных к каждой плате. Схема электрических соединений осуществлялась путем оставления нужных и удаления (перекусывания) ненужных проводников между платами. При создании элементов этажерочных микромодулей использовалась технология получения не только печатных проводников, но и печатных резисторов и конденсаторов, то есть так называемая «толстопленочная» технология. Собранные в «этажерку» платы после удаления ненужных перемычек и контроля электрических параметров заливали компаундом и маркировали. Этажерочные микромодули устанавливали затем на печатные платы. Один из размеров собираемого узла определялся, таким образом, высотой самого высокого микромодуля.

Этажерочные микромодули оставили свой след среди способов микроминиатюризации РЭС. Ряд электронных узлов для космической и специаль-

ной аппаратуры, сконструированных на основе этажерочных микромодулей, имел малые размеры, а плотность монтажа достигала нескольких деталей на

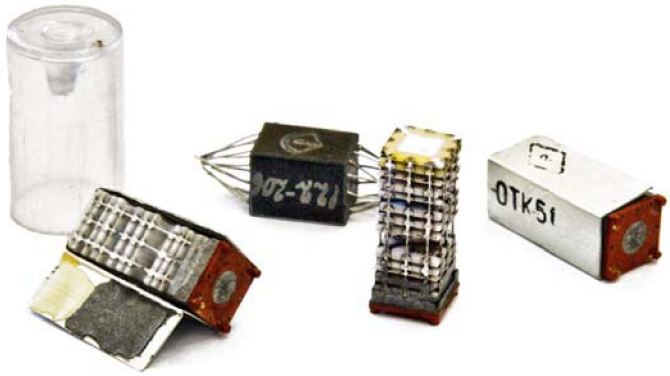



Рисунок 1.3 – Этажерочные микромодули.

один кубический сантиметр. Но и этого было недостаточно. Попытки перенести «этажерочную» технологию на конструирование активных элементов: диодов, триодов, тетродов, пентодов и т.д. также не принесла больших успехов. Лампы, собираемые в виде этажерочной конструкции из плоских круглых элементов (анод – круглая пластинка, сетка – круглая пластинка с отверстиями, катод – круглая пластинка, покрытая веществом, эмиттирующим электроны), разделенных диэлектрическими колечками, имели невысокие электрические характеристики, высокое энергопотребление и большую массу. Этажерочные конструкции перестали выпускать. Однако идея унификации и использования регулярных конструкций, использованная в этажерочных микромодулях, имеет положительное значение и в настоящее время.

Изобретение в 1948 году транзистора и широкое внедрение полупроводниковых приборов в 60-е годы стало новым шагом на пути уменьшения объёма и веса радиоаппаратуры, повышения её надёжности и снижения себестоимости. Однако попытки полностью разрешить указанные выше противоречия между функциями и сложностью радиоаппаратуры традиционными конструкторско-технологическими методами не увенчались успехом, поскольку показатели сложных радиоустройств оказались неудовлетворительными. Несмотря на замену электронных ламп полупроводниковыми приборами, габариты и масса пассивных элементов (резисторов, конденсаторов, индуктивностей, трансформаторов, элементов управления и т.д.) остались прежними.

Только коренной пересмотр системотехнических, схемотехнических и конструкторско-технологических методов мог разрешить указанные противоречия и определить дальнейший прогресс в области радиоэлектроники и вычислительной техники. Главным направлением развития радиоэлектроники стало коренное перевооружение технических средств радиоэлектроники. Как будет показано далее, такие установившиеся понятия, как элемент элек-

трической схемы и радиодеталь, разработка схемы и конструирование устройства подверглись пересмотру и приобрели новое содержание.

В качестве общего названия различных методов значительного уменьшения габаритов и веса радиоаппаратуры стал широко применяться термин «микроминиатюризация». Этот термин охватывает значительно более широкий круг задач, в который входят значительное повышение надежности, снижение стоимости, уменьшение потребляемой мощности, упрощение конструкции, сокращение объёма и трудоёмкости монтажных работ и простота эксплуатации.

Часто новое направление развития радиоэлектроники, характеризующееся значительным уменьшением габаритов и веса радиоэлементов, объединяют под общим название «микроэлектроника». Микроэлектроника – отрасль науки и техники, возникшая на стыке физики и химии, электроники и кибернетики.

### 1.2. Основные задачи микроэлектроники

Основными задачами микроэлектроники являются уменьшение габаритов и массы аппаратуры, значительное повышение надёжности и снижение себестоимости. Рассмотрим возможности решения этих задач несколько подробнее.

Уменьшение габаритов и веса радиоаппаратуры. Одним из наиболее удобных показателей (критериев), характеризующих степень миниатюризации, достигнутую в радиоэлектронном устройстве, является количество элементов электрической схемы, размещённых в 1 $см^3$ объёма устройства. Эту величину называют плотностью монтажа.

В 50-е годы лучшие конструкции некоторых видов самолётной аппаратуры, в которой применялись малогабаритные ЭРЭ, имели плотность монтажа, равную примерно 0,01 … 0,3 детали на 1 $см^3$. При этом в различных по назначению блоках плотность монтажа сильно различалась. Применение полупроводниковых приборов, редкое снижение питающих напряжений и соответственно уменьшение размеров ряда обычных радиодеталей широкого применения (R, C) позволили значительно увеличить плотность монтажа, что дало существенное уменьшение габаритов и веса аппаратуры по сравнению с ламповыми устройствами. Однако в устройствах в целом плотность монтажа редко превышала 0,5 деталей/$см^3$, т.к. в конструкции устройства всегда имеется значительный неиспользованный объём, приходящийся на промежутки между деталями, элементы крепления конструкции, разъёмы, соединительные колодки, монтажные планки и т.д.

Конечно, при дальнейшем уменьшении размеров некоторых обычных навесных элементов, в частности, полупроводниковых приборов, R, C, L – элементов больших номиналов, элементов СВЧ и т.д., можно несколько повысить плотность монтажа, однако значительного снижения габаритов и веса аппаратуры (на порядок и более) при таких методах конструирования ожидать нельзя. Дальнейшая миниатюризация возможна лишь при коренном изменении принципов конструирования и сборки аппаратуры.

В чем же заключаются эти принципы, что лежит в их основе, почему их не использовали раньше? Рассмотрим конструкции наиболее распространенных в радиоэлектронике радиоэлементов: резисторов, конденсаторов, индуктивностей (рис. 1.4).

Рисунок 1.4 – Конструкции некоторых дискретных радиоэлементов.

Конструкция резистора содержит керамическую трубку с нанесённым на её наружную поверхность тонким резистивным слоем, два напрессованных на трубку металлических колпачка, два вывода из достаточно толстого провода и защитное покрытие. Конструкция конденсатора содержит керамические пластинки или слои, тонкие проводящие пленки, металлические выводы и защитное покрытие. Конструкция катушки индуктивности содержит керамическую трубку или сердечник из магнитопровода и витки из медного или серебряного (посеребренного) провода. Нетрудно заметить, что роль активной, работающей части всех этих элементов выполняют тонкие пленки: у резисторов – резистивная (сплав МЛТ, хром и др.) толщиной в несколько сот ангстрем, у конденсаторов – проводящие (алюминий) и тонкие диэлектрические слои (единицы-десятки микрон), у катушки индуктивности – провод или проводящая пленка. Все остальное – трубки, колпачки, выводы – это элементы несущих конструкций, обеспечивающие прочность конструкции и соединение активных частей с другими элементами электрической схемы. Масса и размеры элементов несущих конструкций значительно (в сотни и более раз) превышают массу и размеры работающих частей элементов. Напрашивается мысль, не объединить ли работающие части радиоэлементов на одном достаточно легком и тонком основании? Действительно, в таком случае можно выиграть и в объеме и в массе устройства, и как будет показано ниже, в повышении надежности и снижении себестоимости изделий. Идея объединения и одновременного изготовления работающих частей нескольких элементов положена в основу разработки **интегральных пленочных и полупроводниковых микросхем** (ИМС). В этом и заключается главный современный принцип микроминиатюризации РЭС. Микросхемы называют интегральными не потому, что в них содержится большое количество радиоэлементов, а потому, что отдельные составляющие элементов: резистивные пленки, обкладки конденсаторов, контактные площадки, диффузионные слои получают

для всех элементов одновременно, т.е. сначала все резистивные пленки, затем все нижние обкладки и т.д.

Пленочная интегральная микросхема (рис. 1.5) представляет собой конструкцию, состоящую из керамического основания (подложки) толщиной 0,5 … 0,6 мм, на одну из поверхностей которой (полированную) нанесены резистивные, проводящие и диэлектрические пленки, реализующие пассивные (R, C, L) элементы и межэлементные соединения. Применяют тонкопленочные и толстопленочные микросхемы.

*а*) *б*)

Рисунок 1.5 – Пленочные ИМС: а) тонкопленочная, б) толстопленочная.

***Тонкопленочные*** ИМС получают нанесением тонких пленок путем термического напыления или ионного распыления различных материалов в вакууме; ***толстоплёночные*** ИМС получают экструзией – продавливанием различных паст (резистивных, проводящих, диэлектрических) через сетчатые трафареты с последующей их сушкой и вжиганием. Плотность монтажа пленочных ИМС может достигать десятков элементов в 1 $см^3$. Следует отметить, что реализация интегральных технологий потребовала значительных затрат на разработку оборудования для изготовления ИМС. Интегральные технологии направлены, прежде всего, на уменьшение размеров и массы сложных радиоэлектронных устройств. В тех случаях, когда эти показатели не являются критичными, РЭС можно реализовать и на основе обычных радиоэлементов, серийно выпускаемых промышленностью; это может оказаться дешевле. Большинство миниатюрных аналоговых устройств, например, электронные блоки датчиков первичной информации, высокоразрядные АЦП и ЦАП, усилители и генераторы СВЧ выполняется в виде микросборок (МСБ) на основе тонкопленочной технологии.

***Полупроводниковая ИМС*** – интегральная микросхема, все элементы и межэлементные соединения которой выполнены в объёме или на поверхности полупроводникового кристалла (рис. 1.6).

На основе полупроводниковой технологии получают активные элементы схем: диоды, биполярные и униполярные (полевые) транзисторы и более

сложные полупроводниковые структуры. Размеры отдельных полупроводниковых элементов (диодов, транзисторов) составляют десятки микрон.

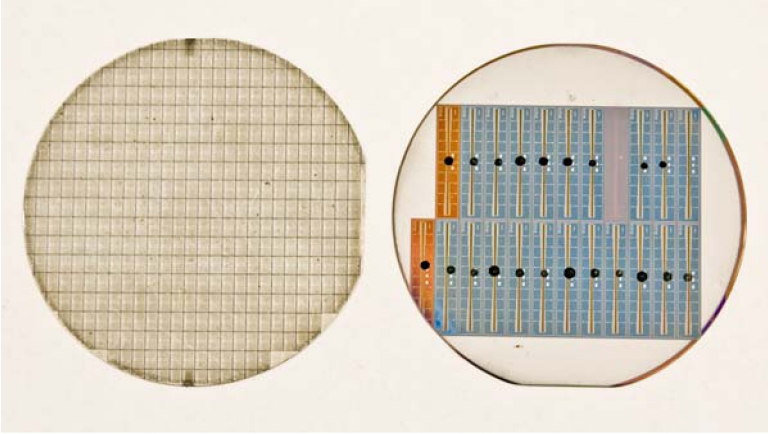


Рисунок 1.6 – Полупроводниковые ИМС: а) биполярная, б) униполярная.

Для получения полупроводниковых ИМС используются технологические процессы получения полупроводниковых пластин, окисления кремния, фотолитографии, травления, диффузии, эпитаксии и другие. Плотность монтажа полупроводниковых ИМС может достигать нескольких миллионов элементов в 1 $см^3$. Именно интегральные технологии позволили создать современные компьютеры, мобильные телефоны, малогабаритные РЭС для авиации и космонавтики.

Одной из основных особенностей этих технологий является то, что элемент как отдельная деталь практически перестаёт существовать. Наименьшей неделимой конструктивной единицей становится микросхема. Если при микромодульном методе конструирования элемент ещё существует как отдельная деталь до момента сборки микромодуля, то метод микросхем предполагает изготовление большинства элементов непосредственно в процесс изготовления микросхемы, а в устройствах полупроводниковой электроники вообще трудно выделить отдельные элементы, аналогичные обычным радиодеталям.

Повышение надёжности микроэлектронной аппаратуры. Под надёжностью аппаратуры подразумевают вероятность того, что аппаратура будет исправно работать и удовлетворять всем предъявляемым к ней требованиям в течение определённого времени. Основными количественными характеристиками надежности являются: среднее время между отказами Тср, выраженное в часах, или его обратная величина – средняя частота отказов $\lambda$.

За последние годы качество радиоаппаратуры заметно улучшилось. Отмечается быстрый рост надёжности как отдельных элементов, так и радиоаппаратуры в целом.

Пример: несмотря на усложнение аппаратуры в одном из блоков, устанавливаемых на самолет В-52 (США), (число элементов возросло с 2100 до 25000), среднее время безотказной работы увеличилось в 5 раз.

Рассмотрим, с чем это связано.

Во-первых, повышение надежности связано с тем, что новые методы рассчитаны на механизацию и автоматизацию производства узлов и даже блоков, а

автоматизация производства при наличии тщательного контроля на основных этапах изготовления приводит к значительному повышению надёжности.

Во-вторых, при пленочной и полупроводниковой технологии изготовления ИМС значительно сокращается число паяных соединений, которые часто являются причиной отказов радиоаппаратуры. Возвратимся к рисунку 1.5. Мы видим, что у обычного навесного резистора четыре контактных соединения: проводник-колпачок – 2, колпачок-резистивная пленка – 2; кроме того, выводы резистора будут впаяны в печатную плату – это еще два соединения. Итого, шесть ненадежных соединений (пайка считается соединением низкого качества, так как в нем участвуют материалы с различными коэффициентами линейного расширения: проводники, припой, флюс). А при тонкопленочной технологии резистор получается нанесением в вакууме на резистивную пленку двух проводящих пленок в отсутствии флюса, припоя и какой-либо агрессивной среды. Таким образом, число контактов меньше, а качество их выше. В полупроводниковых структурах отказы, связанные с различными коэффициентами линейных расширений составных частей конструкции практически отсутствуют, т.к. все элементы конструкции выполняются из одного материала.

В-третьих, увеличение надежности микроэлектронных устройств возможно за счет того, что уменьшение габаритов элементов и узлов позволяет применять сплошную герметизацию, которая улучшает защиту от воздействий внешней среды, а также значительно увеличивает механическую прочность изделий. Габариты и вес изделий в таких случаях несколько увеличиваются.

В-четвертых, уменьшение габаритов радиоаппаратуры позволяет широко применять отдельное и общее резервирование узлов, блоков и устройств в целом, что значительно повышает показатели надежности изделий.

Снижение стоимости радиоаппаратуры. Значительное снижение стоимости РЭС может быть достигнуто путём автоматизации производства. С созданием автоматических линий, совершенствованием технологических процессов, накоплением опыта у рабочих и инженерно-технических работников, снижением стоимости новых материалов снижается и стоимость микроэлектронной аппаратуры.

Кроме того, можно отметить следующие пути уменьшения себестоимости ИМС при неизменной площади подложки.

1. Себестоимость ИМС уменьшается, если уменьшается ее площадь, так как при этом увеличивается число ИМС, размещаемых на одной подложке. Последнее обеспечивается масштабным уменьшением геометрических размеров элементов, так как при росте плотности упаковки себестоимость изготовления платы изменяется незначительно или вообще не изменяется. На практике выгодно не только добиться увеличения плотности размещения элементов, но и увеличить интеграцию изделия микроэлектроники. Это достигается как увеличением плотности упаковки, так и площади, занимаемой ИМС.

2. Себестоимость ИМС уменьшается при увеличении процента выхода годных ИМС, изготавливаемых на одной подложке, т.е. при улучшении технологии их изготовления.

3. Себестоимость ИМС уменьшается при снижении затрат на проведение технологического процесса получения ИМС.

В настоящее время почти 100% всей радиоэлектронной аппаратуры и вычислительной техники выпускается в микроэлектронном исполнении. Относительно низкая себестоимость современных РЭС объясняется использованием интегральных технологий. Несмотря на значительные затраты на оборудование и реализацию техпроцесса, затраты на единицу продукции оказываются приемлемыми.

## 1.3. Основные трудности микроминиатюризации

Всем методам микроминиатюризации свойственен ряд принципиальных трудностей, связанных с уменьшением габаритов отдельных узлов и аппаратуры в целом. В первую очередь, это относится к вопросу рассеяния тепла и увязанным с ним вопросом о допустимых уровнях мощности.

Пример: Если допустить, что температура внутри блока превышает окружающую температуру на 20 $^{\circ}$C и тепловой обмен при этом происходит только за счёт конвекции и излучения (естественное охлаждение), то на каждые 0,04 Вт мощности, рассеиваемой в блоке, необходимо иметь 1см поверхности рассеяния тепла. При таких условиях работы блок кубической формы с ребром 25 см и пятью теплоотводящими гранями общей площадью 225 см$^2$ может рассеивать около 125 Вт мощности. А между тем в отдельно стоящей микросхеме при тех же перепадах температуры можно рассеять около 200 мВт.

Таким образом, одним из основных и наиболее серьёзных требований, выдвигаемых задачей микроминиатюризации, является разработка схем, имеющих значительно меньшую мощность рассеивания, чем современные схемы, а также создание материалов и элементов, способных выдерживать более высокие температуры. Значительное снижение мощности рассеяния служит не только интересам уменьшения габаритов и массы изделия, но и интересам повышения надежности и снижения стоимости.

Другой трудностью микроминиатюризации является соединение микросхем в модули (узлы, микросборки) и микросборок в блоки и устройства. При высокой плотности монтажа объём, приходящийся на соединения между узлами и блоками, становится соизмеримым с объёмом самих блоков. Поэтому выбор способов соединения в микросборках и устройствах имеет большое значение. Широко распространенный способ соединения пайкой оказывается ненадёжным и слишком нетехнологичным. В настоящее время широко применяются способы сварки и термокомпрессии.

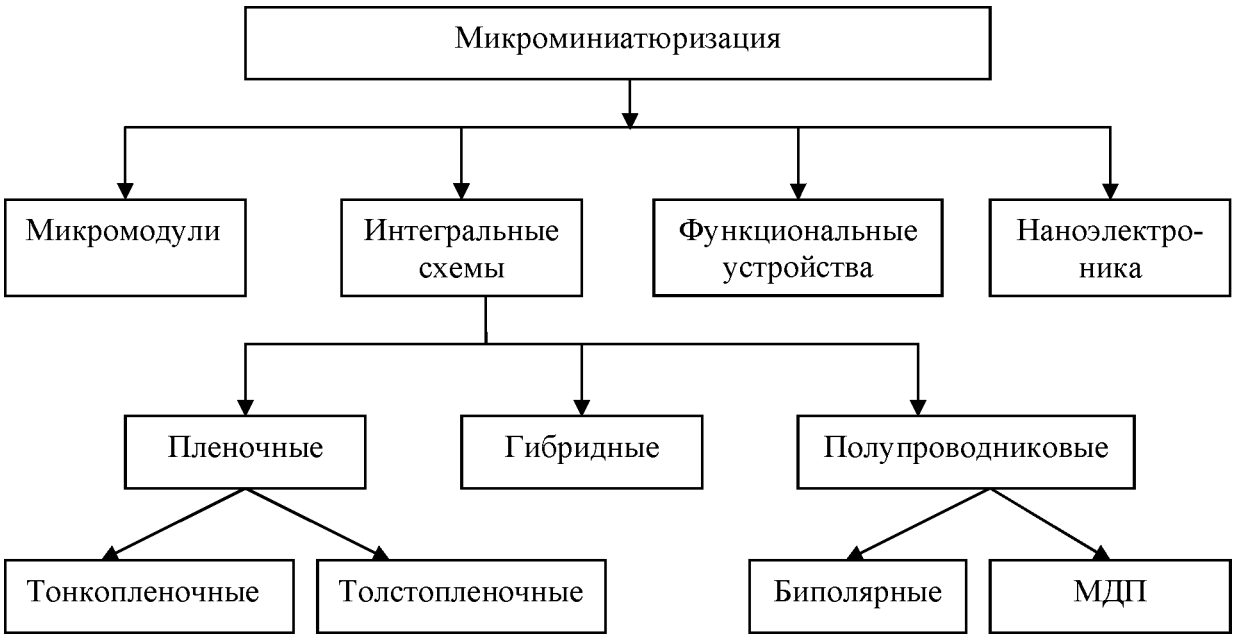
Важным также является вопрос о делении РЭС на функциональные узлы. При использовании современных алгоритмов декомпозиции (деления) электрической схемы, созданных на основе теории графов, можно уменьшить число межсоединений.

Существенной трудностью всех методов микроминиатюризации является миниатюрное исполнение емкостей и индуктивностей больших номиналов. В связи с этим разработаны схемные эквиваленты «L» и «C», а также

варианты схем, в которых такие элементы отсутствуют. Но схемные эквиваленты «L» и «C» трудно настраивать, кроме того, они нередко обладают низкой добротностью и стабильностью.

Таким образом, невозможность разрешения противоречивых требований: уменьшения габаритов и веса, повышения надёжности, снижения стоимости, потребляемой мощности при проектировании РЭС на дискретных элементах, и в то же время необходимость достижения прогресса в этой области способствовали возникновению и развитию микроэлектроники. Микроэлектроника охватывает проблемы исследования, конструирования, изготовления и применения микроэлектронных изделий. Применение микроэлектронных изделий в РЭС позволяет значительно расширить её функциональные возможности, повысить быстродействие и надёжность, уменьшить массу, габариты, потребляемую мощность и стоимость, способствует типизации узлов аппаратуры, открывает возможность создания качественно новых узлов, блоков и устройств.

Схема 1 – Классификация методов микроминиатюризации РЭС




Кроме пленочной и полупроводниковой технологии в создании ИМС перспективными направлениями являются методы микроминиатюризации, основанные на использовании: оптоэлектроники, хемотроники, криогенных устройств, пневмоники, магнетоники, наноэлектроники и др. Изучение этих направлений микроминиатюризации РЭС не входит в программу курса «Конструирование интегральных микросхем», их изучают в курсе «Функциональные устройства».

Приведенная классификация методов микроэлектроники является общепринятой, однако резкой границы между ними нет. Предложены и ис-

пользуются способы микроминиатюризации, в которых сочетаются конструктивные признаки, присущие разным методам, да и сами методы заимствуют технологические приёмы друг у друга. На схеме 1 приведена укрупненная классификация методов (направлений) микроминиатюризации РЭС.

## Контрольные вопросы

1. Назовите основные этапы микроминиатюризации РЭС.
2. Каковы достоинства и недостатки РЭС на электронных лампах?
3. Что такое модули и микромодули?
4. Дайте характеристику понятиям микроминиатюризация и микроэлектроника.
5. В чем заключаются основные задачи микроэлектроники?
6. Что такое интегральная микросхема?
7. Почему микросхемы называют интегральными?
8. Что такое «пленочная интегральная микросхема»?
9. Что такое «полупроводниковая интегральная микросхема»?
10. Что такое «толстопленочная интегральная микросхема»?
11. Что такое «гибридная интегральная микросхема»?
12. Дайте определение понятия «биполярная ИМС».
13. Дайте определение понятия МДП ИМС.
14. За счет чего достигается снижение габаритов и веса микроэлектронной радиоаппаратуры?
15. Каким образом в ИМС достигается высокая надежность?
16. За счет чего достигается снижение стоимости микроэлектронной радиоаппаратуры?
17. Каковы основные трудности микроминиатюризации?
18. Приведите классификацию методов микроминиатюризации.

# Глава 2. Гибридные интегральные микросхемы

## 2.1 Общие сведения о гибридных интегральных микросхемах

Наиболее освоенными промышленностью микроэлектронными технологиями являются тонкопленочная, толстопленочная и полупроводниковая. Несмотря на ряд несомненных достоинств: возможность получения широкого диапазона номинальных значений сопротивлений резисторов, емкостей конденсаторов, хорошую воспроизводимость параметров, стабильность характеристик, по тонкопленочной технологии не удается создать активные элементы: диоды, транзисторы, транзисторные структуры, элементы логики и т.д. Толстопленочная технология характеризуется высокой производительностью, так как не требует специальных вакуумных установок, все процессы осуществляются при нормальном атмосферном давлении; по этой технологии можно получать элементы с достаточно большой рассеиваемой мощностью. Однако по толстопленочной технологии тоже нельзя изготавливать активные элементы. Напротив, по полупроводниковой технологии в настоящее время довольно легко получать активные элементы, но трудно получить высокоомные стабильные резисторы, стабильные конденсаторы большой емкости, резисторы большой мощности и т.д.

Нетрудно сделать вывод: в реальных конструкциях нужно использовать достоинства различных технологий. В результате комбинирования достоинств пленочной и полупроводниковой технологии были созданы гибридные интегральные микросхемы (ГИМС), в которых резисторы, конденсаторы и проводники выполнены по пленочной технологии, а активные элементы, или целые кристаллы, состоящие из активных элементов, устанавливаются в виде навесных компонентов на изготовленную пленочную микросхему (рис. 2.1). ГИМС часто называют микросхемами частного применения.

Рисунок 2.1 – Гибридные интегральные микросхемы.

Составными частями ГИМС являются элементы и компоненты.

Элементом ИМС называют локальную область поверхности или объёма тела (диэлектрической или полупроводниковой подложки), реализующую функцию какого-либо электрорадиоэлемента (резистора, конденсатора, дио-

да, транзистора и т.д.), которая выполнена нераздельно от подложки или кристалла и не может быть воспринята как самостоятельное изделие.

Компонент интегральной микросхемы – часть интегральной микросхемы, реализующая функцию какого-либо электрорадиоэлемента, которая может быть выделена как самостоятельное изделие.

## Типы микросхем

Интегральные микросхемы являются основной элементной базой современных РЭС. Рассмотрим некоторые определения.

Интегральная микросхема – микроэлектронное изделие, выполняющее функцию преобразования, обработки сигнала и (или) накопления информации, имеющее высокую плотность упаковки (плотность монтажа) электрически соединенных элементов, которое, с точки зрения требований к испытаниям, приёмке, поставке и эксплуатации, рассматривается как единое целое. Плотность монтажа может достигать $10^6$ элементов/см$^2$.

Согласно ГОСТ 18682-73 интегральные микросхемы по технологическому исполнению делят на полупроводниковые, гибридные и прочие (пленочные, вакуумные, керамические и др.).

Пленочная интегральная микросхема – интегральная микросхема, все элементы и межэлементные соединения которой выполнены в виде пленок. По пленочной технологии можно изготовить только «пассивные» элементы, т.е. резисторы, конденсаторы, индуктивности, а также проводники. Пленочные интегральные микросхемы могут быть тонкопленочными и толстопленочными.

Тонкопленочная интегральная микросхема – пленочная интегральная микросхема с толщиной пленок до $1 \cdot 10^{-6}$ м (1 … 2 мкм).

Толстопленочная интегральная микросхема – пленочная интегральная микросхема с толщиной пленок более 2 мкм.

Полупроводниковые ИМС получают путем формирования в объёме полупроводниковой пластины участков с различными типами проводимости. По такой технологии можно получать ***p-n*** переходы, их используют в качестве диодов; ***n-p-n*** структуры используют в качестве транзисторов и т.д. Диоды, транзисторы и более сложные полупроводниковые структуры называют «активными» элементами.

В зависимости от вида обрабатываемого сигнала ИМС делят на аналоговые и цифровые.

Аналоговая ИМС – интегральная микросхема, предназначенная для преобразования и обработки сигналов по закону непрерывной функции. Частным случаем аналоговой интегральной микросхемы является микросхема с линейной характеристикой (линейная микросхема).

Цифровая ИМС – интегральная микросхема, предназначенная для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по закону дискретной функции. Частным случаем цифровой микросхемы является логическая микросхема.

## 2.2. Конструктивно-технологические особенности техпроцессов, используемых при изготовлении ГИМС

Тонкоплёночные ИМС. Тонкоплёночные ИМС получают путем послойного нанесения (термическим напылением или ионным распылением в вакууме) пленок резистивных, проводящих, диэлектрических и других материалов на поверхность диэлектрического основания (подложки) с одновременным формированием рисунка элементов и проводников с помощью затеняющих (съёмных) масок. Другим, более точным способом формирования рисунка, является метод фотолитографии, при котором рисунок формируется путем последовательного травления нанесенных друг на друга тонких пленок через контактные маски из фоторезиста – светочувствительного материала, который в жидком состоянии наносят на пленки, сушат, экспонируют (засвечивают), проявляют и задубливают.

Как правило, толщина резистивных пленок составляет несколько сот (100 … 300) ангстрем (Å), толщина соединительных проводников и обкладок конденсаторов – 2000 … 6000 Å (0,2 … 0,6 мкм), толщина диэлектрика зависит от требуемой ёмкости конденсаторов, однако она обычно находится в пределах 0,2 … 2 мкм: нижнее значение определяется величиной рабочего напряжения, верхнее – внутренними напряжениям в пленках диэлектрика, – при больших толщинах пленки диэлектрика склонны к разрушению.

Общая толщина пленочной ИМС определяется в основном толщиной подложки и высотой навесных компонентов. Широко распространенные подложки из ситалла СТ 50-1 имеют толщину 0,6 и 1,6 мм.

Схему какого-либо радиоэлектронного устройства можно изготовить на одной плате, свести к отдельным элементам на отдельных платах, свести к узлам, т.е. выполнить отдельные части схемы на отдельных платах.

В первом случае увеличивается плотность монтажа ИМС, однако уменьшается процент выхода годных микросхем при изготовлении, велик процент брака. Второй вариант аналогичен конструкциям на дискретных элементах, габариты и масса таких конструкций велики. Наиболее часто используют третий вариант, причем деление схемы на части осуществляют, как правило, по функциональному принципу.

Пленочные ИМС бывают однослойными и многослойными. Однослойными считают такие ИМС, в которых использован один слой диэлектрика; например, тонкопленочный конденсатор, состоящий из нижней обкладки, диэлектрика и верхней обкладки, представляет собой однослойную ИМС. Многослойные ИМС имеют большее число диэлектрических слоев.

Достоинствами однослойных ИМС являются простота технологического процесса, высокая надежность, высокая точность, возможность контроля и подгонки, частичная ремонтоспособность, низкая вероятность брака при изготовлении. Достоинства многослойных ИМС – высокая плотность компоновки, широкий диапазон номиналов резисторов и конденсаторов, возможность изготовления R–C–NR и C–R–NC– структур.

Толстопленочные ИМС. Пассивные элементы толстопленочных ГИС получаются локальным нанесением на подложку полужидких *паст-стеклоэмалей* с последующей их сушкой и вжиганием в подложку. Последовательность технологических операций при нанесении толстых пленок следующая:

а) нанесение слоя пасты на подложку через маску – накладной трафарет (отсюда название – *метод трафаретной печати*);

б) выжигание (испарение) растворителя при температуре 300…400 °С и тем самым превращение пасты из полужидкого состояния в твердое;

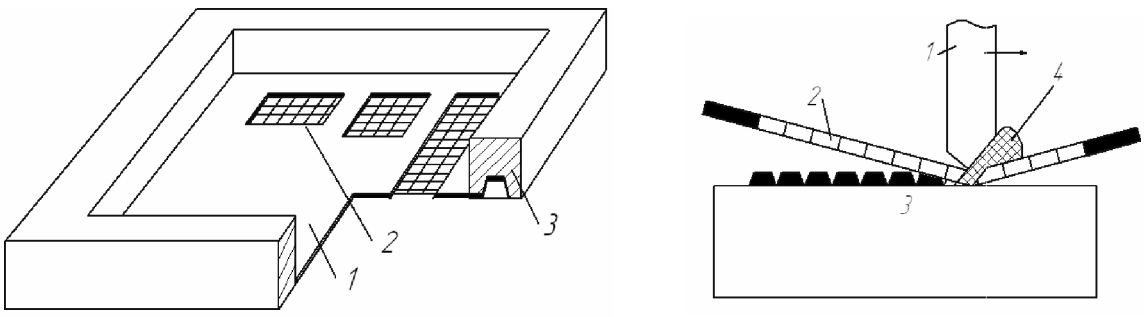
в) вжигание затвердевшего вещества пасты в подложку – *спекание* при температуре 500 … 700 °С (в зависимости от состава пасты).

Операция вжигания – самая ответственная в технологическом цикле; она требует стабилизации температуры с точностью ±1 °С.

В основе всех паст-стеклоэмалей лежит так называемая *фритта* – тончайший порошок стекла, к которому, в зависимости от назначения пасты, примешивается порошок резистивного, проводящего или диэлектрического материала. Дисперсная (т.е. совершенно однородная) смесь фритты и примесного материала приобретает вязкость при добавлении специальных органических веществ и растворителей. На этапе выжигания (см. выше) растворитель испаряется, а органические вещества связывают частицы порошка в единую компактную массу.

Для проводящих паст примесью обычно служит серебро или золото, для резистивных – смесь серебра и палладия (1:1), а для диэлектрических – титанат бария с высокой диэлектрической проницаемостью. Варьируя материал и процентное содержание примесей, можно изменять электрические параметры пленок в широких пределах.

Масками для нанесения паст на подложку служат сетчатые трафареты (рис. 2.2, *а*). Они представляют собой тонкую сетку из капрона или нержавеющей стали, натянутую на дно рамки (вначале исходным материалом для сеток был шелк, поэтому методику нанесения паст через сетчатые трафареты часто называют *шелкографией*).




***а)*** ***б)***

Рисунок 2.2 – Метод локального нанесения пасты: ***а*** – сетчатый трафарет: 1 – сетка; 2 – окно; 3 – металлическая рамка; ***б*** – продавливание пасты через трафарет: 1 – ракель; 2 – сетка; 3 – подложка; 4 – паста.

Размер ячеек сетки – около 100 мкм, диаметр нитей – около 50 мкм. Большая часть сетки покрыта пленкой задубленного фоторезиста, в тех местах, где нужно продавить пасту, в пленке имеются окна. Рисунок окон получают методом фотолитографии. Учитывая ячеистую структуру сетки, размеры окон трудно сделать менее 10…200 мкм. Это предопределяет минимальные размеры элементов толстопленочных ИМС и ширину линий.

Рамка с трафаретом заполняется пастой и размещается над подложкой на расстоянии 0,5 – 1 мм. После этого на сетку опускается специальный нож – *ракель,* который, перемещаясь вдоль рамки, продавливает пасту через отверстия в сетке (рис. 2.2, *б).* Несмотря на простоту идеи продавливания, эта операция прецизионная; на качество будущей пленки и повторяемость результатов оказывают влияние угол заточки ракеля, его наклон относительно подложки, скорость перемещения и другие факторы.

Вообще говоря, сетка на трафарете не обязательна: можно продавливать пасту и через сплошные отверстия. Однако при этом трудно получать длинные проводники сложной формы, так как трафарет становится нежестким и провисает. Обычно толщина получаемых пленок составляет 20…40 мкм.

Подложки для толстопленочных ГИС должны обладать повышенной теплопроводностью, так как толстопленочные ИМС чаще используют для изготовления мощных схем. Поэтому в качестве подложек используют высокоглиноземистые (96% $A1_2O_3$) и бериллиевые керамики (99,5% BeO); последние в 7…10 раз превышают глиноземистые по теплопроводности, но уступают им по прочности. Важной отличительной особенностью подложек для толстопленочных ИМС является то, что их поверхность должна быть достаточно шероховатой, чтобы обеспечить необходимую адгезию с веществом пасты. Степень шероховатости характеризуется неровностями до 1 … 2 мкм.

Методы монтажа навесных компонентов на платы с толстыми пленками те же, что и у тонкопленочных ГИМС, но размеры контактных площадок делают больше: 400х400 мкм.

В целом толстопленочная технология характерна простотой и низкой стоимостью ИМС. Однако по сравнению с тонкопленочной технологией плотность компоновки оказывается меньше (из-за больших размеров проводников и элементов), а разброс параметров – больше (из-за неконтролируемой толщины пленок).

Полупроводниковые ИМС. При конструировании гибридных интегральных микросхем полупроводниковые ИМС, а также диоды и транзисторы используются в качестве навесных компонентов. Особенности технологии и конструирования полупроводниковых ИМС рассмотрены в главе 6.

Целесообразность использования гибридного конструктивно-технологического варианта определяется следующими соображениями:

1. Аналоговые устройства предпочтительнее изготавливать по гибридной технологии, так как площадь пассивных компонентов превосходит площадь активных компонентов.

2. Затраты на оборудование для производства тонкопленочных гибридных интегральных микросхем значительно меньше, чем для производства полупроводниковых схем того же типа.

3. Параметры тонкопленочных элементов имеют более широкий диапазон номиналов, меньшие пределы допусков, более высокие добротность, температурную и временную стабильность и другие преимущества по отношению к элементам полупроводниковых ИМС.

4. ГИМС способны рассеивать значительно большую мощность, чем полупроводниковые ИМС.

5. В связи с возможностью использования навесных компонентов стандартной формы и размеров облегчается автоматизация процесса установки и монтажа навесных компонентов на подложке. Современные сборочные автоматы позволяют проводить монтаж компонентов на плате со скоростью несколько тысяч кристаллов в час. Однако по плотности упаковки и надежности работы ГИМС уступают полупроводниковым ИМС.

## 2.3. Возможности дальнейшей микроминиатюризации РЭС

### Тонкопленочные микросборки

С конца 1980-х годов стали появляться сообщения об интенсивном развитии во многих странах технологии многокристальных микросхем (МКМ) – микросборок. МКМ представляет собой совокупность бескорпусных микросхем, смонтированных на общей коммутационной плате. В качестве элементов или компонентов в микросборке могут присутствовать резисторы и конденсаторы. Вследствие высокой насыщенности связей коммутационная плата выполняется многоуровневой и, таким образом, является миниатюрным аналогом многослойной печатной платы.

В общем случае МКМ представляет собой две или более (до 400) монолитных полупроводниковых ИМС любой степени интеграции, помещенных на подложке в общий корпус и соединенных между собой с помощью одно- или многоуровневой разводки проводников повышенной плотности (до 50 линий/мм).

Технология МКМ объединяет в себе широкий спектр методов сборки монолитных ИМС, начиная от традиционной, в виде гибридных ИМС, и заканчивая модулями, почти полностью изготавливаемыми из кремния. В результате достигается покрытие площади платы кристаллами до 50-70% и минимальная задержка сигналов. Кроме того, разработчики МКМ стремятся увеличить площадь платы.

Для изготовления МКМ используются следующие типы подложек: печатная плата (МКМ-L), многослойная керамика (МКМ-C), керамика или эмалированный металл с тонкопленочной структурой (МКМ-D), кремний с тонкопленочной структурой (МКМ-Si). Есть реальная возможность проектировать тонкопленочные элементы на ситалловых и поликоровых подложках со значи-

тельно меньшими нормами топологических размеров: 10…50 мкм. Дальнейшее уменьшение размеров проводников уменьшает выход годных плат.

Максимальную плотность проводников способна обеспечить только тонкопленочная технология при использовании подложек из кристаллов сапфира или кремния. Сапфир и кремний являются монокристаллами, поэтому не обладают пористостью, свойственной ситаллу и поликору. Кроме того, подложки из этих материалов имеют круглую форму, что обеспечивает равномерное нанесение фоторезиста. Шероховатость рабочей поверхности сапфира и кремния соответствует 14…15 классам. Последнее обстоятельство, а также отсутствие пор и валика по краям подложки при нанесении фоторезиста на круглые кремниевые подложки, позволяет получать малую ширину проводников на этих монокристаллах. Получение сапфира сопряжено с большими затратами энергии (температура плавления сапфира составляет 2300 °К), он является полудрагоценным камнем, кроме того, сапфир при механической обработке имеет высокие отходы, что обуславливает его высокую стоимость и ограниченное применение.

Кремний оказался почти идеальным и пока единственным материалом для изготовления СБИС и микропроцессоров, широкое применение которых открыло путь для невиданного прогресса техники переработки информации. Кремний по своим техническим характеристикам в несколько раз, иногда на порядок, превосходит аналогичные параметры всех остальных материалов, а по стоимости уступает только стеклотекстолиту.

Достоинствами поверхностного монтажа компонентов является уменьшение размеров плат и уменьшение длины проводников, что увеличивает быстродействие и помехозащищенность, применение автоматизированных технологий, повышение надежности и снижение стоимости. Вместе с тем, внедрение поверхностного монтажа сдерживается рядом факторов, таких как большая стоимость автоматизированного оборудования, трудности совмещения компонентов с посадочными местами и контроля после пайки из-за весьма малых размеров выводов компонентов. Однако созданы серийные кристаллы с минимальными размерами элементов в 1 мкм и МКМ с шириной линий 5…10 мкм.

Повышение плотности упаковки микросборок (МСБ) может быть достигнуто:

1) уменьшением размеров элементов МСБ;
2) применением прогрессивных методов компоновки и размещения;
3) созданием надежной многоуровневой коммутации.

Если повышение плотности упаковки полупроводниковых ИМС требует колоссальных материальных затрат на покупку технологий, оборудования, строительство новых заводов, заработную плату высококвалифицированных кадров, то повышение плотности упаковки МСБ не требует столь больших средств. Главным направлением повышения плотности упаковки микросборок является уменьшение размеров элементов, для формирования которых широко используется в настоящее время методы фотолитографии и

жидкостного травления. Эти методы потенциально допускают формирование проводников шириной до 1 мкм.

Еще одним аргументом в пользу тонкопленочной технологии является то, что она обеспечивает высокое ресурсосбережение и экологическую безопасность. Достаточно сказать, что при травлении печатных плат в отходы уходит до 800 г меди с 1 $м^2$ поверхности, в то время как при травлении тонкопленочных плат этот показатель не превышает 6 г/м. К тому же при травлении меди образуются вредные вещества. Большая часть растворов для травления меди, являющихся опасными для окружающей среды, сбрасывается вместе со сточными водами.

Дальнейшая миниатюризация тонкопленочных микросборок предполагает уменьшение размеров элементов до размеров проводников полупроводниковых ИМС средней степени интеграции. Для формирования конфигурации тонкопленочных элементов применяют маски в сочетании с процессом фотолитографии или процессы селективного травления многослойных проводящих и резистивных структур с применением двойной или тройной фотолитографии. Наибольшее применение в настоящее время получила двойная и даже тройная фотолитография. Перспективно использование ионной и электронной литографии.

Таким образом, главной технической проблемой повышения плотности упаковки тонкопленочных микросборок являются не только устаревшие технологии и оборудование, но и устаревшие методы проектирования элементов и топологии МСБ.

Области применения тонкопленочных микросборок распространяются на широкий спектр изделий:

1. Авиационная, военная и космическая техника: большие ЭВМ и параллельные процессоры; системы радиоэлектронного противодействия; системы наведения и управления оружием; командные и управляющие центры.
2. Телефония: телефонные центры; распределительные станции; кольцевые коммутаторы.
3. Приборостроение: системы навигации; системы управления; датчики первичной информации; вторичные источники питания.
4. Автомобильный транспорт: спутниковая навигация; бортовые ЭВМ.
5. Радиолокация (СВЧ – устройства).
6. Телеметрия.
7. Телевидение.
8. Медицина.

## Контрольные вопросы

1. Какие достоинства пленочных и полупроводниковых ИМС учтены при проектировании ГИМС?
2. Что такое элементы и компоненты ГИМС?
3. Дайте характеристику различным типам интегральных микросхем.
4. Дайте определение аналоговой ИМС.
5. Дайте определение цифровой ИМС.
6. Сформулируйте конструктивно-технологические особенности техпроцессов, используемых при изготовлении тонкопленочных ГИМС.
7. Какова и чем определяется толщина резистивных, диэлектрических и проводящих пленок?
8. Каковы конструктивные и технологические особенности толстопленочных ГИМС?
9. В чем заключаются особенности полупроводниковой технологии?
10. Каковы возможности дальнейшей микроминиатюризации РЭС?

# Глава 3. Конструирование гибридных интегральных микросхем

## 3.1. Подложки для ИМС

Подложки в пленочных и гибридных интегральных микросхемах играют важную роль. Во первых, подложки являются конструктивной основой пленочной микросхемы, во вторых, от материала подложки и качества обработки его поверхности существенно зависят параметры осаждаемых слоев и надежность всей микросхемы.

Наиболее часто для изготовления тонкопленочных ИМС используют подложки размером 60х48 мм. Обычно на подложке одновременно изготовляют нескольких пленочных микросхем; после нанесения слоев подложку разрезают.

Рекомендуемые размеры подложек ИМС приведены в разделе 4.1. Для них разработаны стандартные корпуса. Однако возможно использование подложек и с другим соотношением сторон; главное, чтобы размеры получались кратным делением размеров 60 и 48 мм. Не рекомендуется использовать длинные узкие подложки, так как материал подложек достаточно хрупкий.

Толщину подложки рекомендуется выбирать равной 0,6 или 1,6 мм, а иногда 0,2 мм. Класс шероховатости поверхности подложек – 14 , высота неровностей < 250 Å. Перед напылением подложки тщательно очищают.

К материалу подложки предъявляют следующие требования:

- высокое удельное сопротивление ($\rho$) и малые диэлектрические потери ($tg\,\delta$) – для уменьшения потерь в пленочных схемах;
- высокая механическая прочность при малых толщинах (0,2 … 1,6 мм);
- химическая инертность к осаждаемым веществом; материал подложки не должен вступать в реакцию с материалами пленок при высоких температурах;
- хорошая адгезия с напыляемыми материалами;
- низкое значение ТКЛР, по величине близкое к ТКЛР осажденных пленок;
- высокая термостойкость, свойства материала подложки не должны меняться при высоких температурах;
- высокая теплопроводность; в противном случае в пленочной микросхеме в процессе работы могут возникать местные перегревы, вызывающие изменение характеристик или разрушение пленок; в то же время необходимо, чтобы материал подложки обеспечивал хорошую теплоизоляцию одного элемента схемы от других;
- хорошая полируемость поверхности; подложка должна иметь абсолютно плоскую поверхность, обработанную с высокой точностью, различные выступы, выемки, царапины и другие неровности затрудняют нанесение пленок и ухудшают качество пленочных элементов;
- низкая стоимость;

- малое значение диэлектрической проницаемости материала подложки ($\varepsilon$). В некоторых случаях (для получения больших значений ёмкости) материал подложки специально выбирают с большим значением $\varepsilon$.

Материала, который удовлетворял бы в равной мере всем перечисленным требованиям, нет. Наиболее распространенными материалами для подложек микросхем являются: стекло, стеклокристаллические материалы – ситаллы, поликор, керамика.

Стекло. Обычное (оконное) стекло при нагреве размягчается, выделяет ионы соды, у него большие диэлектрические потери. Лучшими свойствами обладают бесщелочные (боросиликатные) стёкла, они не содержат окислов кальция и натрия. Однако сейчас стёкла для подложек ИМС почти не применяются. Для микросхем, работающих при высоких температурах в качестве подложек используют кварцевое стекло и стекло типа «Пирекс» (калиевый и натровокалиевый). Эти материалы обладают высокими электроизоляционными свойствами. Однако они довольно дорогие и трудно поддаются обработке.

Стеклокристаллические материалы. Их получают путем обработки специальных составов стекол. Они отличаются от аморфного силикатного стекла тем, что имеют кристаллическую структуру, а от кристаллических материалов – более тонкой микрокристаллической структурой. Стеклокристаллические материалы обладают высокой прочностью, хорошими электроизоляционными свойствами, высокой термостойкостью, а также влаго- и газонепроницаемостью; кроме того, они обладают хорошей гибкостью при формовке.

Наибольшее применение находят ситалл и фотоситалл. Ситалл имеет высокое удельное сопротивление, низкие диэлектрические потери, которые незначительно изменяются с повышением температуры до 400 ˚С, устойчив к кислотам, в 2…3 раза прочнее стекла. Ситалл газонепроницаем, имеет малую газоотдачу при высоких температурах, что особенно важно при изготовлении микросхем. Наиболее распространенные марки ситалла СТ-50-1, СТ-50-2. Диэлектрическая проницаемость ситалла $\varepsilon = 5…6$.

Фотоситалл устойчив к кислотам, обладает высокой механической прочностью и термостойкостью, его теплопроводность в несколько раз превышает теплопроводность ситалла. При воздействии света (фотоситалл наиболее чувствителен к ультрафиолетовой части спектра, $\lambda = 300$ мкм) присутствующее в материале связанное серебро восстанавливается до металлического. При ультрафиолетовом облучении фотоситалла через позитив засвечиваются те участки подложки, которые необходимо удалить. Полученное скрытое изображение проявляют с помощью термообработки. В результате получают заготовку с видимыми изображениями подложек с необходимыми отверстиями и вырезами, которые затем вытравливают. Засвеченные участки в 10…15 раз легче растворимы в растворе плавиковой кислоты, чем защищенные от облучения места подложки. Такая фотохимическая штамповка позволяет получать отверстия и риски на подложке с высокой точностью, их ширина может со-

ставлять десятки мкм. Фотоситалл представляет интерес тогда, когда подложка должна иметь сложную геометрическую форму.

Керамические материалы. В зависимости от состава эти материалы могут иметь различные свойства: низкую или очень высокую диэлектрическую проницаемость, малые значения тангенса угла диэлектрических потерь $tg\ \delta$, повышенную термостойкость и механическую прочность. В качестве подложек применятся керамика, отличающаяся наряду с такими свойствами как термостойкость, химическая инертность, влагостойкость, механическая прочность, малыми потерями на высоких и сверхвысоких частотах и высокой теплопроводностью. Чаще всего это керамика на основе окиси алюминия, окиси бериллия, титанита бария. Основные преимущества – повышенная прочность и высокая теплопроводность. Например, керамика на основе окиси бериллия имеет в 200 … 250 раз большую теплопроводность, чем стекло. Титанит бария имеет большие значения $\varepsilon$ – до нескольких тысяч.

Основной недостаток керамики – шероховатость поверхности, микронеровности необработанной керамики достигают нескольких тысяч ангстрем, а полировка может загрязнить поверхность и изменить свойства керамики. Значительное снижение шероховатости достигается путем глазурования поверхности керамики тонким слоем бесщелочного стекла. В глазурованной керамике высокая теплопроводность керамической основы сочетается с гладкой поверхностью стеклянной глазури. На основе керамики выпускается подложки толщиной 0,1 … 1,6 мм с размерами 10Х16 и 20х20 мм.

Характеристики материалов подложек ИМС представлены в таблице 4.1.

### 3.2. Материалы для получения тонких плёнок

Материалы для резистивных плёнок.

К материалам для резистивных плёнок предъявляются следующие требования.

1. Высокое удельное сопротивление – для получения малых размеров резисторов.
2. Возможность получения широкого диапазона номинальных значений сопротивлений.
3. Стабильность параметров, т.е. устойчивость к воздействию температуры, влажности, протеканию тока и т.д.
4. Низкий температурный коэффициент сопротивления (ТКС).
5. Высокая воспроизводимость параметров при напылении различных образцов.
6. Низкий уровень шумов.
7. Хорошие высокочастотные свойства.
8. Высокая адгезия к материалу подложки.

Свойства тонких плёнок в значительной степени отличаются от свойств исходных материалов, используемых для их напыления, и сильно зависят от толщины плёнки и условий её получения. Это объясняется особенностями структуры плёнок при малых толщинах. Например, металлическая

плёнка толщиной около 0,001мкм (10Å) состоит из отдельных гранул, не имеющих контакта друг с другом, проводимость в ней наблюдается за счет туннельного эффекта, ТКС – отрицателен, удельное сопротивление такой плёнки очень велико, независимо от природы материала, и неустойчиво.

При толщине пленки примерно 0,01мкм (100Å) начинает наблюдаться непрерывность структуры, гранулы сливаются в сплошной слой. Структура и толщина пленки в сильной степени зависит от состояния поверхности подложки, материала и температуры подложки, скорости испарения материала, степени вакуума и т.д.

Удельное сопротивление металлических пленок значительно отличается от его величины в массивном материале. Тонкие металлические пленки имеют очень высокое удельное сопротивление, которое уменьшается по мере утолщения пленки.

Высокое удельное сопротивление тонких пленок объясняется как нарушением непрерывности структуры, так и тем, что длина свободного пробега электронов становится соизмеримой с толщиной пленки и уменьшается вследствие столкновения электронов с границами поверхности пленки.

Для изготовления пленочных резисторов применяют три группы материалов:

1. Металлы.
2. Сплавы.
3. Смеси металлов с диэлектриками (керметы).

Из металлов наибольшее применение находят хром (Cr) и тантал (Ta), реже применяют титан (Ti), рений (Re), молибден (Mb) и другие.

Хром позволяет получать качественные резистивные пленки, прочно сцепленные с подложкой, но имеет низкое удельное сопротивление и сравнительно высокое значение ТКС. Сопротивление квадрата хромовой пленки составляет от 100 до 500 Ом (при толщине до 100 Å).

Тантал позволяет получать высокостабильные пленки с большим поверхностным сопротивлением. Можно получить сопротивление квадрата пленки 5000 Ом. Важным достоинством тантала является то, что в процессе производства можно управлять электрическими свойствами пленок. Высокая стабильность танталовых пленок объясняется следующим образом: тантал легко образует плотный поверхностный слой окисла, прочно связанный с металлом. Слой окисла обладает высоким сопротивлением износу и коррозии в различных условиях эксплуатации, стойкостью к воздействию кислот; реакция окисления тантала легко управляется и может быть использована для регулирования толщины пленки и её сопротивления. Основной недостаток: тантал испаряется при температуре около 3500°С, что возможно только при нагреве электронным лучом.

В последнее время для изготовления пленочных резисторов все шире применятся рений. Основными преимуществами рения являются: устойчивость при высоких температурах, что позволяет изготовлять высокотемпературные резисторы с большой мощностью рассеяния; высокая стабильность

пленок, низкий ТКС; из рения можно изготовить высокоомные резисторы с малым разбросом сопротивления. Рекомендуемое значение сопротивления квадрата пленки рения приблизительно 10 000 Ом.

Применение сплавов позволяет получать высокое удельное поверхностное сопротивление резисторов, но воспроизводимость параметров и стабильность пленок из сплавов невысокие. Так как отдельные компоненты сплава имеют разную температуру испарения, а поэтому испаряются с разной скоростью, получение качественных тонких пленок из сплавов связано со значительными трудностями.

Широко применяются следующие сплавы:

Нихром – (80% Ni, 20% Cr) имеет сопротивление квадрата пленки при толщине 50 Å – 300 Ом, низкий ТКС, достаточно высокую коррозийную стойкость, хорошую адгезию к подложке. Для стабилизации параметров осажденная пленка нихрома подвергается термообработке при t =350 $^{\circ}$C в течение нескольких минут. Основным преимуществом нихрома является приблизительно одинаковая скорость испарения его компонентов и стабильность свойств пленок. Недостаток – сравнительно невысокое сопротивление квадрата резистивной пленки и, следовательно, невозможность изготовления высокоомных резисторов. Нихром часто используют в качестве подслоя под контактные площадки с целью получения хорошей адгезии к подложке.

Сплав МЛТ – (Si, Fe, Cr, Ni – взятые в определенных соотношениях) имеет сопротивление квадрата пленки 500 Ом/квадрат, дает хорошую стабильность параметров пленки.

Кармовые пленки (США), состав: 73 % Ni, 20%Cr, 7%Al, позволяет получить сопротивление квадрата пленки от 500 до 2 000 Ом/квадрат, пленки из этого сплава отличаются очень высокой стабильностью и имеют незначительный ТКС.

Применяются и другие сплавы: РС-3710, палладиево-золото-родиевый сплав (42-40-18 %) с $R_{\square}$= 100…500 Ом, палладиево-родиево-марганцево-германиевый сплав (65-28-6-15 %) с $R_{\square}$= 500…1000 Ом.

Керметы. Наибольшее поверхностное сопротивление ($R_{\square}$– до 50 000 Ом) имеют пленки из так называемых «керметов», представляющих собой смеси металлов с диэлектриками, причем сопротивление пленок тем больше, чем выше процентное содержание диэлектрика. Применение таких композиций позволяет увеличить диапазон номиналов пленочных резисторов, однако резисторы на основе керметов имеют большие собственные шумы и сравнительно низкую стабильность параметров вследствие рыхлой структуры пленки.

Лучшие характеристики имеют металлокерамические пленки на основе смеси хрома с моноокисью кремния (SiO), они обладают хорошими адгезионными свойствами, однородностью, стабильностью, термостойкостью и механической прочностью. Сопротивление таких пленок может изменяться в широких пределах в зависимости от состава смеси. Наилучшие свойства получены при 70% хрома и 30% SiO.

Материалы для проводников и обкладок ТПК

К материалам проводников и обкладок ТПК предъявляются следующие требования:

1. Высокая электропроводность.
2. Хорошая адгезия к материалу подложки.
3. Получение надежных контактных соединений.
4. Низкая температура плавления.
5. Возможность получения омических (невыпрямляющих) контактов с минимальным электрическим сопротивлением.
6. Возможность многократного напыления из одного испарителя.
7. Отсутствие взаимодействия с другими напыляемыми материалами.
8. Невысокая энергия испаряемых частиц.

В качестве проводящих материалов применяют алюминий, медь, серебро, золото, никель и др. Пленки из серебра, золота, меди отличаются высокой электропроводностью и хорошо поддаются пайке и сварке, но имеют плохую адгезию к материалу подложки, а медь, кроме того, быстро окисляется.

Хорошим материалом для проводящих пленок является алюминий, он имеет достаточно высокую проводимость и прочно сцепляется с подложкой, но алюминиевые проводники трудно поддаются пайке бескислотными флюсами, кроме того, при пайке ухудшается адгезия алюминия к подложке.

Для получения высокой проводимости пленок при хорошем сцеплении их с подложкой проводники и контактные площадки делают трехслойными: вначале наносится подслой хрома или его сплавов для получения хорошего сцепления с подложкой, затем наносят алюминий или медь для увеличения проводимости, затем тонкий слой никеля для защиты от окисления и хорошей пайки или сварки. Если в качестве проводников используется золото, слой никеля не нужен.

Толщина пленочных проводников и обкладок конденсаторов составляет 0,1…0,5 мкм. Лучшими материалами для обкладок конденсаторов являются алюминий и золото. Серебро может использоваться в качестве обкладок только с определенными диэлектриками (SiO, $SiO_2$), так как для него характерна миграция атомов, которые могут проникать в диэлектрик и вызывать замыкание обкладок. Из всех исследованных материалов (металлов) в сочетании с различными диэлектриками наименьшее число замыканий обеспечивает алюминий. Советскими учеными разработан сплав – «заменитель золота». При его нагревании сначала испаряется марганец, обеспечивая хорошую адгезию к подложке, затем медь – для создания хорошей проводимости, потом никель – для хорошей паяемости и, наконец, титан – для защиты от коррозии.

Диэлектрические материалы

Диэлектрические пленки в микросхемах необходимы для изготовления конденсаторов и защиты микросхем от воздействия внешней среды. Тонкопленочный конденсатор состоит из трех слоев: нижнего проводящего слоя, называемого нижней обкладкой, диэлектрического слоя и верхнего проводяще-

го слоя, называемого верхней обкладкой. Такие конденсаторы принято называть однослойными (по числу диэлектрических слоев). Одновременно с обкладками наносят и проводники. Ёмкость однослойного конденсатора определяется по формуле

$$C = 0,0885\frac{\varepsilon \cdot S}{d} = C_0 \cdot S. \qquad (3.1)$$

где $\varepsilon$ – диэлектрическая проницаемость материала диэлектрической пленки,

$S$ – площадь перекрытия обкладок,

$d$ – толщина диэлектрической пленки,

$C_0$ – удельная емкость.

Поскольку площадь, занимаемая конденсатором на подложке, ограничена небольшими размерами, для получения достаточно больших емкостей необходимо использовать тонкие диэлектрические пленки с высокой диэлектрической проницаемостью.

К материалам, используемым в качестве диэлектрика ТПК, предъявляются следующие требования:

1. Высокая диэлектрическая проницаемость.
2. Малые диэлектрические потери.
3. Высокая электрическая прочность.
4. Хорошая адгезия с материалом подложки и материалами других тонких пленок.
5. Стабильность свойств в диапазоне рабочих температур.
6. Материал диэлектрической пленки должен быть плотным (не иметь пор), негигроскопичным, равномерным по толщине и иметь однородную структуру.
7. Материал не должен разлагаться на составные части в процессе испарения и осаждения.

Наиболее полно перечисленным требованиям удовлетворяют следующие диэлектрики: моноокись кремния SiO – чаще всего применяется в качестве диэлектрика пленочных конденсаторов, её диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 6$ и свойства сильно зависят от условий осаждения. Поэтому значение емкости может быть воспроизведено с точностью ±10%. Пленки SiO имеют высокую электрическую прочность. Емкости с диэлектриком из SiO не рекомендуется применять в схемах, работающих во влажной атмосфере, так как они гигроскопичны.

Двуокись кремния $SiO_2$, $\varepsilon = 5 \ldots 6$, основной недостаток – высокая температура испарения (примерно 1 300 °С).

Сульфид цинка $Sb_2S_3$, $\varepsilon = 8,2$, обеспечивает хорошую воспроизводимость параметров пленки, малые потери на низких частотах.

Фтористый магний $MgF_2$, $\varepsilon = 6,5$; на основе фтористого магния можно получать плотные и долговечные пленки с хорошими диэлектрическими свойствами. Однако при осаждении $MgF_2$ предъявляются очень высокие требования к контролю процесса охлаждения и чистоте рабочего объема.

Важный класс диэлектриков составляют окислы металлов. При этом ценно то, что нижнюю обкладку конденсатора можно изготовить из таких металлов, окись которых обладает свойствами диэлектриков (Al, Ta, Ti). Затем анодированием, заключающимся в окислении поверхности металла, можно получить диэлектрическую пленку. Затем наносят верхнюю обкладку.

Окись тантала $Ta_2O_5$ обладает высокой диэлектрической проницаемостью ($\varepsilon$ = 25), позволяет получать удельную емкость $C_0$ до 0,1 мкФ/см$^2$. Пленки $Ta_2O_5$ имеют высокую электрическую прочность ($U_{пр} = 6 \cdot 10^6$ В/см). Однако на частотах свыше 50 кГц сильно возрастают диэлектрические потери. Конденсаторы на основе окиси тантала применяют на частотах до 1 мГц.

Двуокись титана $TiO_2$. Пленки на основе двуокиси титана отличаются высоким значением $\varepsilon$ = 100 ($C_0$ = 0,3 мкФ/см$^2$), высокой стабильностью свойств, имеют хорошие рабочие характеристики при высоких температурах и малые потери.

Поиски высококачественных материалов для диэлектриков привели к исследованию ферроэлектрических пленок, например, титана бария ($BaTiO_2$). Значения $\varepsilon$ для ферроэлектрических пленок могут достигать 1 000, но при этом трудно получить однородные и воспроизводимые пленки, кроме того, титанат бария сильно изменяет свои свойства при изменении температуры окружающей среды (конденсаторы на его основе нестабильны).

Материалы для защитных покрытий

Назначение защитных пленок – предохранять элементы микросхемы от климатических и механических воздействий. Материалы защитных покрытий должны:

1. Иметь высокие электроизоляционные и влагозащитные свойства.
2. Обладать высокой устойчивостью к воздействию высоких температур.
3. Быть химически инертными.
4. Не оказывать влияния на параметры защищаемых элементов.
5. Иметь хорошую адгезию с покрываемой поверхностью.
6. Иметь низкий коэффициент линейного расширения.
7. Иметь достаточную механическую прочность и эластичность.

Нередко для защиты пленочных элементов ИМС используют те же диэлектрики, что и для получения тонкопленочных конденсаторов (SiO, GeO, Si $O_2$, $Al_2O_3$ и др.), их наносят в одном технологическом цикле с напылением других пленок. Толщину диэлектрической пленки выбирают в пределах 0,2… 2 мкм, так как пленки тоньше 0,1 мкм ещё не сплошные. При толщинах более 2 мкм в диэлектрических пленках возникают внутренние напряжения, приводящие к образованию трещин.

После напыления тонких пленок их можно защитить тонким слоем фоторезиста, наносимого на поверхность пленок, кроме тех мест, где в дальнейшем будет осуществляться подгонка элементов, пайка или сварка.

В качестве защитных материалов для окончательной герметизации микросхем используют бакелитовый лак, лак В1-20, УР-231 (смолы с добав-

лением уретана), кремнийорганические лаки К-40, К-47, К-57, эпоксидные эмали ЭП-91, ЭП-92, полиизобутилен и т. п.

Для защиты полупроводниковых приборов применяют компаунды типа МБК (на основе бутилового эфира метакриловой кислоты).

Для устранения чрезмерно больших напряжений, вызываемых усадкой материалов с различными температурными коэффициентами, необходимо учитывать эти факторы при выборе основных материалов и наполнителей защитных композиций.

### 3.3. Конструирование и расчет тонкопленочных резисторов (ТПР)

Конструктивно-технологические особенности ТПР

Резисторы являются наиболее распространенными элементами пленочных микросхем. Резистивные элементы гибридных микросхем получают напылением на диэлектрические основания (подложки) узких резистивных пленочных полосок 1 (рис. 3.1) различной конфигурации и контактных площадок 2, имеющих с ними некоторую зону перекрытия 3.

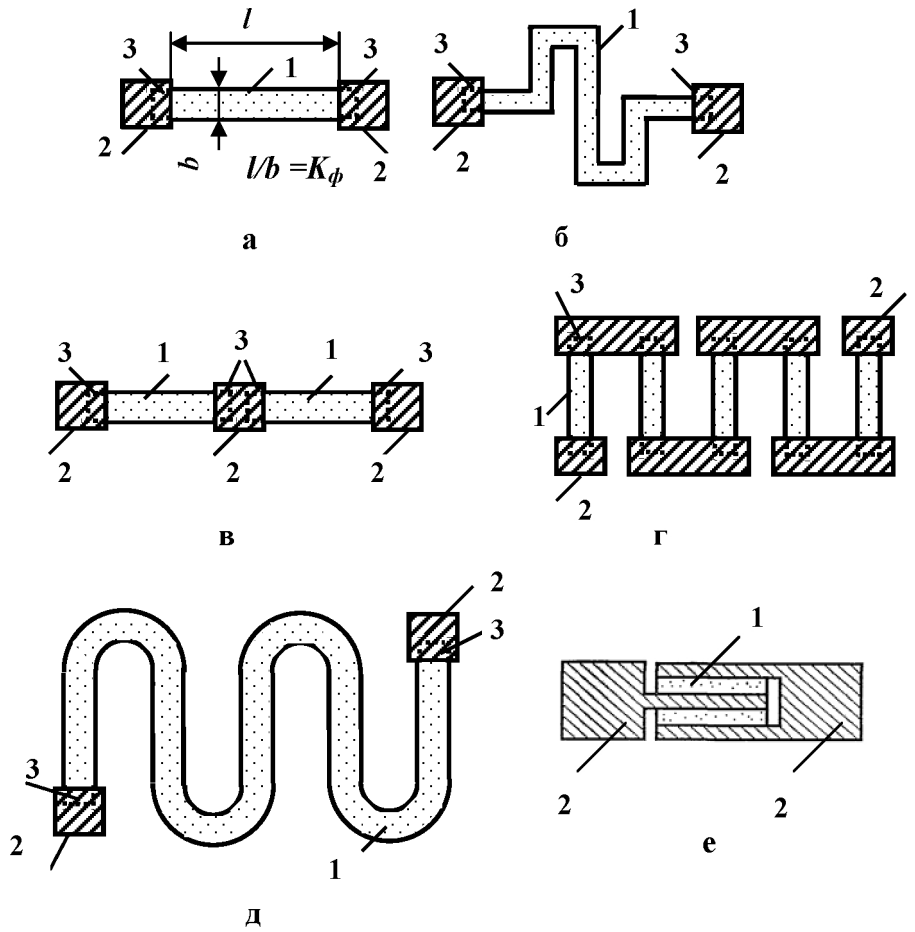



Рисунок 3.1 – Конструктивные формы пленочных резисторов: а – прямоугольная; б – типа «меандр»; в, г – последовательное соединение резистивных плёночных полосок; д – типа «змейка», е – гребенчатая.

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

Наилучшей конфигурацией пленочного резистора является прямоугольная (рис. 3.1, а). Если длина резистора $l > 8$ мм, его рекомендуется выполнять изогнутым в виде «меандра» (рис. 3.1, 6) или «змейки» (рис. 3.1, д). Для низкоомных резисторов предпочтительна гребенчатая форма конструкции (рис. 3.1, е). В тех случаях, когда необходимо изготовлять высокоомные резисторы, предпочтительной является конструкция из нескольких последовательно соединенных резистивных полосок прямоугольной формы (рис. 3.1, в, г). Такая конфигурация обеспечивает высокую механическую жесткость масок и плотное прилегание их к подложкам [2]. Отношение длины резистора к его ширине называют коэффициентом формы резистора:

$$K_{\Phi} = l / b. \qquad (3.2)$$

Нецелесообразно принимать величину коэффициента формы резистора $K_{\Phi} < 0{,}5$, так как при этом понижается точность изготовления резистора, увеличивается площадь контактных перекрытий.

Для характеристики материалов тонкопленочных резисторов удобно пользоваться величиной сопротивления квадрата пленки $R_{\square}$. Эта величина, если принять резистивный слой однородным по толщине, что в большинстве случаев обеспечивается, зависит только от физических свойств материала и толщины резистивной пленки и не зависит от её длины и ширины. Покажем это:

пусть $d$ – толщина резистивной пленки, $l$ – длина пленки, $b$ – ширина пленки, тогда сопротивление резистора

$$R = \rho \frac{l}{bd}, \qquad (3.3)$$

где $\rho$ – удельное сопротивление материала резистивной пленки.

Если резистор имеет форму квадрата, т.е. $l = b$, получим сопротивление квадратного резистора:

$$R_{\square} = \frac{\rho}{d}. \qquad (3.4)$$

Как видно из этой формулы, сопротивление квадрата однородной пленки зависит для данного материала только от $\rho$ и толщины пленки $d$.

Заменив отношение $\frac{\rho}{d}$ на $R_{\square}$, получим

$$R = R_{\square} \frac{l}{b} = R_{\square} K_{\phi}. \qquad (3.5)$$

Зависимость удельного поверхностного сопротивления тонких пленок ($R_{\square}$) и их температурного сопротивления (ТКС) от толщины $d$ показаны на рисунке 3.2.

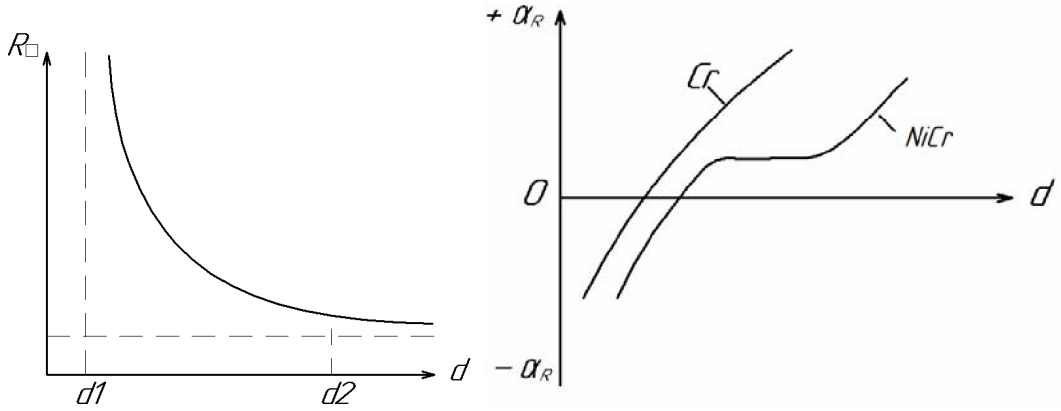



Рисунок 3.2 – Зависимость удельного поверхностного сопротивления тонких пленок ($R_{\square}$) и их температурного сопротивления (ТКС) от толщины.

С точки зрения конструктора для получения высокого удельного сопротивления и малых размеров резисторов целесообразно использовать области левее точки $d_1$, однако при этом сопротивление пленки нестабильно, т.к. на его величину оказывает влияние характер микронеровностей поверхности подложки и, кроме того, незначительные изменения толщины пленки приводят к значительному разбросу сопротивлений резисторов. Кроме того, за счет окисления тонкой пленки изменяется её эффективная толщина и резко изменяется удельное сопротивление.

С точки зрения технолога желательно выбирать толщины пленок около точки $d_2$, поскольку пленка толще, выше стабильность её сопротивления, выше воспроизводимость параметров резисторов. Однако размеры тонкопленочных резисторов при этом получаются большими.

Очевидно, компромисс между желаниями конструктора и технолога состоит в выборе толщины резистивных пленок в середине диапазона толщин между точками $d_1 - d_2$. С целью повышения сопротивления резисторов и уменьшения их размеров следует использовать для получения тонких пленок материалы, которые имеют высокое удельное сопротивление.

Основным недостатком тонких резистивных пленок является трудность получения высокого значения $R_{\square}$. Как видно из формулы (3.4), увеличения $R_{\square}$ можно достичь двумя путями: увеличивать $\rho$ или уменьшать $d$; обычно используют и то и другое: применяют высокоомные сплавы и одновременно уменьшают (в меру) толщину пленки. Но при этом в процессе изготовления резисторов нужно весьма строго выдерживать режимы напыления, иначе ухудшается стабильность характеристик резистора.

Можно повысить сопротивление резистора за счет увеличения длины и уменьшения ширины пленки. Но при этом накладываются конструктивные и технологические ограничения. При слишком большой длине резистор за-

нимает на подложке большую площадь, при слишком малой ширине есть возможность обрыва резистора и значительно усложняется технология изготовления трафаретов для напыления, кроме того, при напылении узких резисторов получается большой разброс номиналов за счет неплотного прилегания трафаретов и подпыления под них напыляемого материала.

Электрические характеристики ТПР зависят от конструкции резистора, материала подложки, резистивной пленки и контактных площадок, а также в большой степени от технологии изготовления и условий эксплуатации. Наиболее распространенным в настоящее время является метод термического нанесения тонких резистивных пленок в вакууме. Применяют также катодное и ионно-плазменное распыление, осаждение из газовой и паровой фазы.

Каждый тонкопленочный резистор проектируется и рассчитывается специально для конкретной схемы, так что его номинальная величина диктуется схемными соображениями, а не ближайшим стандартным номиналом.

Обычно в схеме имеется несколько резисторов, причем разных номиналов, которые нужно расположить на одной подложке. В этом случае рекомендуется использовать для получения резисторов разного номинала один и тот же материал и резистивные пленки одной толщины, что удобно с технологичной точки зрения, но это возможно лишь за счет изменения отношения $l/b$. Следовательно, каждый резистор на подложке имеет определенные геометрические размеры и соответствующую форму.

Конфигурация и размеры пленочных резисторов зависят от:

1) номинального значения сопротивления;
2) мощности рассеивания;
3) технологических ограничений (погрешности размеров плёнок);
4) диапазона частот;
5) требуемой точности изготовления (величины допуска).

Форма резисторов определяется также их размещением на плате, размерами и формой платы, диапазоном номиналов, общим числом элементов на подложке. В зависимости от указанных факторов пленочные резисторы могут иметь различную конфигурацию.

В настоящее время резистивные пленки выполняют шириной не менее 100 мкм (0,1мм). Минимальная длина вывода резистора, перекрываемая контактной площадкой, равна 200 мкм. Минимальные допустимые размеры контактных площадок для контроля номиналов резисторов в напыленной схеме 300х300 мкм.

Требуемая конфигурация резистивных пленок создается с помощью трафаретов. Применяют трафареты двух видов:

1) затеняющие трафареты (съемные маски);
2) нанесенные трафареты (контактные маски).

Затеняющие трафареты представляют собой тонкий (десятые доли мм. и меньше) металлический лист с соответствующими прорезями. Наименьшая ширина щели в таких трафаретах составляет 0,05…0,1 мм. При меньшей ши-

рине щели трафарета в процессе его изготовления получаются неровные края. Материалом для получения трафаретов служит металлическая фольга из бериллиевой бронзы с нанесенным на нее (электрохимически) тонким слоем никеля.

Нанесенный трафарет представляет собой светочувствительное покрытие (слой фоторезиста), предварительно нанесенное на подложку с напыленными на неё резистивными и проводящими слоями. После соответствующей фотохимической обработки в фоторезисте получаются просветы необходимой конфигурации. Четкость кромок нанесенного трафарета ввиду его плотного прилегания к подложке значительно лучше, чем у затеняющего, а ширина зазоров между полосками из фоторезиста может быть намного меньше. Получена ширина резистивных полосок – 0,01 мм и меньше.

Однако такой способ образования рисунка микросхемы имеет и существенные недостатки:

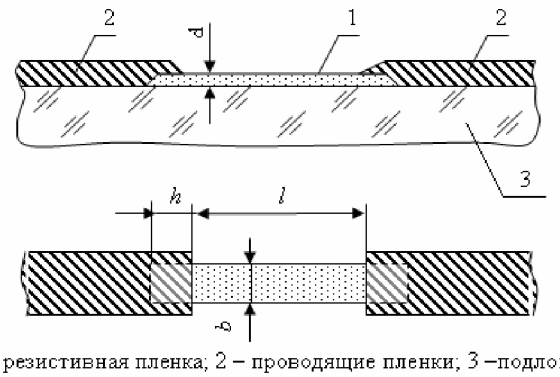
1) включение химических операций в процесс создания ИМС,
2) невозможность многократного использования контактных масок,
3) невозможность создания тонкопленочных конденсаторов.

Поэтому, несмотря на возможность получения сложных конфигураций элементов схемы и высокую точность изготовления резисторов методом фотолитографии, если только есть такая возможность, применяют затеняющие трафареты. Таким образом, трафареты, применяющиеся для напыления тонких резистивных пленок, оказывают определенное влияние на конструктивные формы резисторов.

Необходимо учитывать, что в тех случаях, когда на подложке размещаются резисторы, к которым предъявляются различные требования по стабильности (ТКС) или широк диапазон номиналов ТПР, процесс нанесения резистивных пленок должен быть разделен на несколько операций напыления, при которых наносятся различные материалы или обеспечивается различная толщина пленок.

Расчёт тонкоплёночных резисторов прямоугольной формы

Тонкоплёночный резистор прямоугольной формы изображён на рис.3.3.




1 – резистивная пленка; 2 – проводящие пленки; 3 –подложка

Рисунок 3.3 – Тонкопленочный резистор прямоугольной формы.

**Расчет ТПР** начинают с выбора материалов резистивных плёнок и определения значения $R_{\square}$ для группы ТПР.

С технологической точки зрения желательно, чтобы все ТПР были выполнены на основе одного резистивного слоя, т.е. из одного материала с одним значением $R_{\square}$. Однако, если диапазон номиналов резисторов в схеме широк (отношение сопротивления наиболее высокоомного резистора к сопротивлению наиболее низкоомного превышает число 50), выполнять все резисторы с одним значением $R_{\square}$ не рекомендуется: при малом значении $R_{\square}$ высокоомные резисторы будут слишком длинными, при большом значении $R_{\square}$ – низкоомные резисторы будут слишком короткими, погрешность при их изготовлении велика. В таких случаях целесообразно разделить резисторы на две группы: низкоомные и высокоомные и для каждой группы выбрать материал с соответствующим значением $R_{\square}$. Разбивать резисторы на большее число групп и выбирать более двух значений $R_{\square}$ не рекомендуется, так как это усложняет технологический процесс изготовления ТПР.

Таблица 3.1

Погрешности воспроизведения технологических характеристик тонкоплёночных резисторов

| Виды технологии изготовления | $\sigma_l$, мм | $\sigma_b$, мм | $\overline{\sigma}_{R\square}$ | $b'$, $l'$, мм |
|---|---|---|---|---|
| Метод свободной маски | 0,01…0,03 | 0,007….0,01 | 0,02….0,05 | 0,2 |
| Фотолитография | 0,003…0,007 | 0,002....0,005 | 0,02….0,05 | 0,1 |
| Танталовая технология | 0,003....0,007 | 0,002...0,005 | 0,02….0,05 | 0,1 |

Для каждой из групп резисторов желательно определить оптимальное, обеспечивающее минимизацию площади, занимаемой резисторами, значение $R_{\square}$ [2;7]:

$$R_{\square опт.} = \frac{\sigma_b}{\sigma_l}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} R_i}{\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{R_i}}}\ , \qquad (3.6)$$

где $\sigma_b$ и $\sigma_i$ - абсолютные среднеквадратические отклонения ширины и длины резисторов (табл. 3.1), $n$ – количество резисторов в группе.

Основные электрофизические характеристики наиболее распространенных резистивных материалов приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Электрофизические характеристики материалов для плёночных резисторов и проводников

| Материал | $R_□$, Ом / □ | $P_0$, Вт/см$^2$ | $\alpha_R \cdot 10^{-4}$, 1/град | | Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}$,1/ч | Старение $\overline{\gamma_{R_{cm}}}(\overline{\delta_{R_{cm}}})$, % за 5000 ч в норм. усл. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | – 60…+25° С | +25…+125° С | | |
| Хром ХО, ГОСТ 5905-67 | 200…500 | 2,0 | 1,8 | 0,6 | 2,6…3,1 | 2,0 |
| Нихром Х20Н80 ГОСТ12766-67 | 100…300 | 1,0 | – 0,4…+0,1 | – 0,9…+0,2 | – | 0,1…0,4 |
| Сплав МЛТ-3М | 300-500 | 2,0 | ± (1,2…1,8) | ± (1,9…2,4) | 1,8 | ± 0,1 |
| Кермет ЕТО.021.033. ТУ | $(0,5…3)10^3$ | 2,0 | 3…7 | 0,5…2,0 | 0,9 | ± 0,3 |
| Тантал, СУО.021.041 ТУ | 300…500 | 2,0 | – 1,5 | – 2,6 | – | 2,6 – 3,2 |
| Сплавы:<br>РС-4800<br>РС-3710<br>РС-3001<br>РС-1004, ЕТО.021.048ТУ | <br>$(0,3…1)10^3$<br>$(0,5…3)10^3$<br>$(0,8…1,5)10^3$<br>$(1…4)10^4$ | 2,0 | 2,0<br>0,5…2<br>1,0<br>10,0 | | –<br>–<br>–<br>– | 2,0<br>2,0<br>1,0<br>2,0 |

Выбор $R_{\square}$ производится с учетом заданного диапазона номиналов сопротивлений для данной схемы, требований к стабильности (ТКС) резистора и с учетом выбранной технологии изготовления трафарета. Иногда на выбор $R_{\square}$ оказывает влияние требование высокой точности изготовления ТПР.

При выборе значения $R_{\square}$ следует помнить, что сопротивление и температурный коэффициент сопротивления тонких (100...300Å) пленок сильно зависят от толщины (рис. 3.2). Полученное из формулы (3.6) значение $R_{\square\,опт.}$ является ориентировочным. Основным при выборе $R_{\square}$ является условие: $Кф \geq 0{,}5$. Для группы резисторов это условие выполняется в том случае, если выбрать $R_{\square} \leq 2R_{мин.}$, где $R_{мин.}$ – минимальный номинал сопротивления в группе резисторов.

По этому значению $R_{\square}$ из табл. 3.2 выбирается материал резистивной плёнки и определяются его эксплуатационные характеристики:

$P_o$ – максимально допустимая удельная мощность рассеяния резистивной плёнки, Вт/см$^2$;

$\alpha_R$ – температурный коэффициент сопротивления материала резистивной плёнки;

$\gamma_{Rcm}$ ($\overline{\delta}_{R_{cm}}$) – относительное изменение сопротивления резистивной плёнки в результате старения, %.

## Расчет ТПР вероятностным методом

Существует два метода определения размеров тонкопленочных резисторов: метод максимум-минимум и вероятностный. При расчетах ТПР методом максимум-минимум в качестве технологических отклонений ширины резистора $b$, длины $l$ и удельного поверхностного сопротивления квадрата резистивной пленки $R\square$ выбирают их максимальные значения $\Delta b$, $\Delta l$, $\Delta R\square$. Это обеспечивает попадание сопротивления изготовленного резистора в допуск. Но при этом размеры резистора будут относительно большими. В то же время при изготовлении элементов ИМС максимальные отклонения параметров элементов встречаются не часто. Напрашивается желание использовать для расчетов не максимальные значения отклонений, а их средние значения, которые в математической статистике называют «среднеквадратическими отклонениями» и обозначают символом сигма (σ). Закладывая в расчеты среднеквадратические отклонения, мы тем самым обеспечиваем меньшие размеры рассчитываемых элементов. Однако при этом поле рассеяния параметра элемента при изготовлении может оказаться больше поля допуска на этот параметр. Таким образом, мы заведомо планируем брак. У части элементов (резисторов) величина сопротивления может оказаться за пределами допуска. Хорошо это или плохо? На первый взгляд, плохо, так как часть резисторов, а с ними и всю ИМС, придется выбросить.

С другой стороны, закладывая в расчеты среднеквадратические отклонения размеров, мы получаем меньшие размеры каждого элемента, а так как в микросхеме таких элементов много, размеры всей ИМС будут значительно меньше, чем при расчетах методом максимум-минимум. Обычно на подлож-

ке размещают одновременно несколько ИМС. Следовательно, микросхем, размеры которых рассчитаны вероятностным методом, можно разместить на подложке значительно больше, чем микросхем, рассчитанных методом максимум-минимум. Более того, эти микросхемы будут иметь меньшую массу и меньшие размеры. Выигрыш очевиден, тем более что речь идет об изделиях, предназначаемых, как правило, для использования на летательных аппаратах, где необходимо максимально уменьшать массу и размеры изделий.

Однако у части элементов (в данном случае резисторов) сопротивление окажется за пределами допуска и ИМС, их содержащие, необходимо отправить в брак. Так как на одном и том же количестве стандартных подложек, микросхем, рассчитанных вероятностным методом, больше, чем рассчитанных методом максимум-минимум, вполне вероятно, что после отбраковки, годных ИМС, рассчитанных вероятностным методом останется не меньше, а возможно и больше, чем их число на том же количестве подложек при расчете размеров элементов методом максимум-минимум. Их может оказаться и меньше, однако следует помнить, что тонкопленочные резисторы достаточно легко подогнать и тогда практически все ИМС окажутся годными. Получаем выигрыш и в количестве ИМС, и в массе и в габаритах.

Для определения размеров ТПР в качестве отклонений основных конструктивных параметров: длины $l$ и ширины $b$ резистивной пленки берутся их среднеквадратические отклонения $\sigma_l$ и $\sigma_b$ , полученные в результате многократных напылений тонкопленочных резисторов на предприятии-изготовителе. В связи с тем, что вместо толщины резистивной пленки более удобно использовать понятие поверхностного сопротивления квадрата пленки, учитывающее ещё и дисперсию величины удельного сопротивления материала пленки ($R_{\square} = \frac{\rho}{d}$), в качестве отклонения $R_{\square}$ берется относительная величина $\overline{\sigma}_{R\square} = \sigma_{R\square} / R_{\square}$. Величины $\sigma_l$, $\sigma_b$ и $\overline{\sigma}_{R\square}$ отражают уровень технологии, достигнутый данным предприятием.

***Исходными данными*** для расчета прямоугольных резисторов являются:

***Выбранное значение $R_{\square}$ и характеристики материала резистивной пленки:*** $P_o$ , $\alpha_R$ , $\overline{\delta}_{R_{cm}}$ .

***Электрические характеристики:***

$R$ – сопротивление ТПР, Ом;

$P$ – мощность, рассеиваемая ТПР, Вт;

$\overline{\delta}_{R\text{доп}}$ – допуск на сопротивление ТПР, %.

***Технологические характеристики:***

$\Phi_R$ – вероятность изготовления годного ТПР;

$\sigma_b$ – среднеквадратическое отклонение ширины ТПР, мм;

$\sigma_l$ – среднеквадратическое отклонение длины ТПР, мм;

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

$\overline{\sigma}_{R\square}$ – относительное среднеквадратическое отклонение величины $R_\square$ в процессе изготовления;

$\overline{\delta}_{Rk}$ – относительная погрешность сопротивления ТПР, обусловленная образованием переходных сопротивлений контактов.

***Эксплуатационные характеристики:***

$t_{max}$ – максимальная температура окружающей среды, °С;

$T$ – предполагаемая длительность работы микросхемы, час.;

$f$ – рабочая частота, Гц.

В результате расчётов необходимо определить размеры ТПР ($b$, $l$, $h$) и уточнить значение граничной частоты $f_{гр}$.

Определение технологического допуска

Так как все материалы, в том числе и резистивные, изменяют свои свойства в процессе старения и под воздействием температуры окружающей среды, заданное в электрической схеме значение допуска на номинал резистора $\overline{\delta}_{R_{доп}}$ необходимо скорректировать. В результате получим значение технологического допуска (допуска на изготовление) $\overline{\delta}_R$:

$$\overline{\delta}_R = \overline{\delta}_{R_{доп}} - \overline{\delta}_{R_t} - \overline{\delta}_{R_{ст}} - \overline{\delta}_{R_K}, \qquad (3.7)$$

где: $\overline{\delta}_{R_t}$ – относительная погрешность, обусловленная воздействием температуры окружающей среды в процессе эксплуатации;

$$\overline{\delta}_{R_t} = \alpha_R \left(t_{\max} - 20^\circ C\right), \qquad (3.8)$$

$\overline{\delta}_{R_K}$ – относительная погрешность, обусловленная наличием переходного сопротивления контактов ТПР; обычно она составляет 1...2% (величину $\overline{\delta}_{R_K}$ необходимо выбрать, а после определения ширины ТПР – уточнить).

Погрешность $\overline{\delta}_{R_{ст}}$ вызвана медленным изменением (старением) структуры плёнки во времени и её окислением. Она зависит от материала плёнки, эффективности зашиты, а также от условий хранения и эксплуатации ИМС.

Определение геометрических размеров ТПР

Коэффициент формы ТПР определяется из соотношения

$$K_ф = R/R\square. \qquad (3.9)$$

При определении размеров резистора необходимо учитывать ограничения выбранного вида технологии, рассеиваемую резистором мощность и допуск на номинал.

При $K_ф > \sigma_l/\sigma_b$ сначала определяется ширина ТПР из соотношения

$$b = max\ \{b', b'', b'''\}; \qquad (3.10)$$

здесь $b'$ – минимальная допустимая ширина резистивной полоски (технологическое ограничение), выбирается из табл. 3.1;

$b''$ – минимальная допустимая ширина резистора, обеспечивающая его нормальную работу при заданной рассеиваемой мощности $P$,

$$b'' > \sqrt{\frac{P}{P_0 K_\phi}} \ . \qquad (3.11)$$

Определение $b'''$. Величина $b'''$ определяется из условия обеспечения заданной точности ТПР. Размеры резистора должны быть такими, чтобы его сопротивление при заданных технологических погрешностях $\sigma_l$, $\sigma_b$ и $\overline{\sigma}_{R\square}$ попало в заданный допуск $\pm \overline{\delta}_R$ с заданной вероятностью $\Phi_R$.

При изготовлении пленочных резисторов возникают погрешности воспроизведения размеров резисторов, а также расчетного значения сопротивления квадрата $R\square$. Их можно разделить на систематические и случайные. Систематические погрешности, в свою очередь, можно разделить на постоянные и переменные.

Постоянные – разброс размеров маски, отклонения величины $\rho$ материала резистивной пленки и др.

Переменные – постепенное изменение некоторых величин (зарастают окна масок, меняется масса навески).

Систематические ошибки можно учитывать и компенсировать по результатам пробных испытаний.

Случайные погрешности появляются на различных операциях изготовления ТПР. Это может быть смещение трафарета, неплотное его прижатие, неоднородность материала и т.д.

При расчетах ТПР учитывают только случайные ошибки. Так как погрешности $\sigma_b$, $\sigma_l$ и $\overline{\sigma}_{R\square}$ технологически не связаны, на основе теории вероятностей можно определить математическое ожидание сопротивления резистора:

$$M_R = \frac{M_{R\square} M_l}{M_b}, \qquad (3.12)$$

где $M_{R\square}, M_l, M_b$ математические ожидания $R\square$, $l$ и $b$.

Как правило, все отклонения носят случайный характер и распределяются по нормальному (гауссову) закону [7]. Следовательно, на основании выражения (3.12) дисперсию номинала резистора можно выразить через дисперсии $R\square$, $l$ и $b$:

$$\overline{\sigma}_R{}^2 = \overline{\sigma}^2{}_{R\square} + \left(\frac{\sigma_l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_b}{b}\right)^2, \qquad (3.13)$$

где $\overline{\sigma}_{R\square}$ - относительное среднеквадратическое отклонение $R\square$, определяемое технологическим процессом (см. табл. 3.1);

$\frac{\sigma_l}{l} = \overline{\sigma}_l$ – относительное среднеквадратическое отклонение длины ТПР;

$\frac{\sigma_b}{b} = \bar{\sigma}_b$ – относительное среднеквадратическое отклонение ширины ТПР.

Значение $\bar{\sigma}_R^2$ (реальная дисперсия), определяемое выражением (3.13), не должно быть больше допустимого значения дисперсии номинала резистора при заданном значении допуска $\bar{\delta}_R$ и заданном значении вероятности выхода годного резистора $\Phi_R$ [7], т.е. должно выполняться соотношение

$$\bar{\sigma}_R \le \bar{\sigma}_{R_{доп}} . \qquad (3.14)$$

Величину $\bar{\sigma}_{R_{доп}}$, исходя из закона нормального распределения погрешности сопротивления резистора, можно определить [2] из соотношения

$$\bar{\sigma}_{R_{доп}} = \frac{\bar{\delta}_R}{Z\sqrt{2}}, \qquad (3.15)$$

где $\bar{\delta}_R$ технологический (суженный) допуск на номинал резистора (3.7); $Z$-аргумент интеграла вероятностей $\Phi_R$,

$$\Phi_R = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^Z e^{-x^2} dx, \qquad (3.16)$$

или $$\Phi(z) = P\left( \left( \frac{R - R_0}{R_0} \right) \le \bar{\delta}_R \right),$$

что следует читать так: $\Phi_R$ – это вероятность попадания сопротивления резистора в заданный допуск.

С помощью интеграла вероятностей устанавливается связь между допуском $\bar{\delta}_R$, вероятностью изготовления годного резистора Ф(z) и допустимым отклонением $\frac{\sigma_R}{R} = \bar{\sigma}_R$.

Величина Z определяется по заданному значению $\Phi_R$ из таблицы 3.3.

Зная значение $\bar{\sigma}_{R_{доп}}$, заданные значения $\bar{\sigma}_{R\square}$, $\sigma_l$, $\sigma_b$ и заменяя величину $l$ на $l = bK_ф$, из выражения (3.13) с учетом неравенства (3.14) получим

$$b''' = \sqrt{\frac{\left( \frac{\sigma_l}{K_ф} \right)^2 + \sigma_b^2}{\bar{\sigma}_{R_{доп}}^2 - \bar{\sigma}_{R_\square}^2}} . \qquad (3.17)$$

Подставив значение $b'''$ в выражение (3.10), определим ширину резистора $b$, а из выражения $l = bK_ф$ – его длину.

При $K_ф < \sigma_l / \sigma_b$ сначала определяют длину резистора из соотношения $l = \max\{l', l'', l'''\}$, где $l'$ выбирают из табл. 3.1, $l'' = \sqrt{\frac{P}{P_0}} K_ф$,

$$l''' = \sqrt{\frac{\sigma_I^2 + \left(\sigma_b K_\phi\right)^2}{\bar{\sigma}_{R_{доп}}{}^2 - \bar{\sigma}_{R\square}{}^2}} \quad .$$

Ширина резистора определяется по формуле $b = l / K_\phi$.

Таблица 3.3

Значение интеграла вероятностей $\Phi(Z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^Z e^{-x^2} dx$

| x | Ф(x) | x | Ф(x) | x | Ф(x) | x | Ф(x) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,00 | 0,0000 | 0,60 | 0,6039 | 1,20 | 0,9103 | 1,80 | 0,9891 |
| 02 | 0226 | 62 | 6194 | 22 | 9155 | 82 | 9899 |
| 04 | 0451 | 64 | 6346 | 24 | 9205 | 84 | 9907 |
| 06 | 0676 | 66 | 6494 | 26 | 9252 | 86 | 9915 |
| 08 | 0901 | 68 | 6638 | 28 | 9297 | 88 | 9922 |
| 0,10 | 1125 | 0,70 | 6778 | 1,30 | 9340 | 1,90 | 9928 |
| 12 | 1348 | 72 | 6914 | 32 | 9381 | 92 | 9934 |
| 14 | 1569 | 74 | 7047 | 34 | 9419 | 94 | 9939 |
| 16 | 1790 | 76 | 7175 | 36 | 9456 | 96 | 9944 |
| 18 | 2009 | 78 | 7300 | 38 | 9490 | 98 | 9949 |
| 0,20 | 2227 | 0,80 | 7421 | 1,40 | 9523 | 2,00 | 9953 |
| 22 | 2443 | 82 | 7538 | 42 | 9554 | 05 | 9963 |
| 24 | 2657 | 84 | 7651 | 44 | 9583 | 10 | 9970 |
| 26 | 2869 | 86 | 7761 | 46 | 9610 | 15 | 9976 |
| 28 | 3079 | 88 | 7867 | 48 | 9636 | 20 | 9981 |
| 0,30 | 3286 | 0,90 | 7969 | 1,50 | 9661 | 2,25 | 9985 |
| 32 | 3491 | 92 | 8068 | 52 | 9684 | 30 | 9988 |
| 34 | 3694 | 94 | 8163 | 54 | 9706 | 35 | 9991 |
| 36 | 3893 | 96 | 8254 | 56 | 9726 | 40 | 9993 |
| 38 | 4090 | 98 | 8342 | 58 | 9745 | 45 | 9995 |
| 0,40 | 4284 | 1,00 | 8427 | 1,60 | 9763 | 2,50 | 9996 |
| 42 | 4475 | 02 | 8508 | 62 | 9780 | 60 | 9998 |
| 44 | 4662 | 04 | 8586 | 64 | 9796 | 70 | 9999 |
| 46 | 4847 | 06 | 8661 | 66 | 9811 | 80 | 9999 |
| 48 | 5027 | 08 | 8733 | 68 | 9825 | 2,90 | 0,9999 |
| 0,50 | 5205 | 1,10 | 8802 | 1,70 | 9838 | 3,00 | 1,0000 |
| 52 | 5379 | 12 | 8868 | 72 | 9850 | 20 | 1,0000 |
| 54 | 5549 | 14 | 8931 | 74 | 9861 | 40 | 1,0000 |
| 56 | 5716 | 16 | 8991 | 76 | 9872 | 60 | 1,0000 |
| 58 | 0,5879 | 18 | 0,9048 | 73 | 0,9882 | 3,80 | 1,0000 |

Если в знаменателе выражения (3.17) получится "ноль" или отрицательное число, то необходима подгонка.

Если ширина ТПР $b > 5$ мм, необходимо подумать о возможности его замены навесным резистором.

Длина перекрытия резистивной и проводящей пленок $h$ должна быть не менее 200 мкм. Более точное определение величины $h$ приведено ниже в разделе «Учет сопротивления контактных переходов».

Суммарная длина резистивной пленки определяется из соотношения

$$L_{\Sigma} = l + 2h.$$

Расчет ТПР методом максимум-минимум

Название метода связано с тем, что для определения размеров ТПР в качестве отклонений основных конструктивных параметров: длины, ширины и толщины резистивной пленки берутся их максимальные значения $\Delta l$, $\Delta b$, полученные в результате многократных напылений тонкопленочных резисторов на предприятии-изготовителе. В качестве отклонения $R_{\square}$ берется относительная величина $\gamma_{R\square} = \Delta R_{\square} / R_{\square}$. Эти три величины отражают уровень технологии, достигнутый данным предприятием.

***Исходными данными*** для расчета прямоугольных резисторов являются:

***Выбранное значение*** $R_{\square}$ ***и характеристики материала резистивной пленки:*** $P_o$, $\alpha_R$, $\gamma_{Rcm}$ ($\overline{\delta}_{R_{cm}}$).

***Электрические характеристики:***

$R$ – номинальная величина сопротивления резистора, Ом;

$\gamma_{Rдоп}$ – допуск на сопротивление резистора, %;

$P$ – мощность, рассеиваемая резистором, Вт.

***Технологические характеристики:***

$b'_{мин}$ – минимальная допустимая ширина пленочного резистора, определяемая производственными возможностями изготовителя; при использовании съемных масок $b'_{мин} = 200$ мкм; при фотолитографии $b'_{мин} = 100$ мкм;

$\Delta l$ и $\Delta b$ – абсолютные производственные погрешности геометрических размеров резистора: $\Delta l \approx 3\sigma_l$, $\Delta b \approx 3\sigma_b$;

$\gamma_{R\square}$, % – относительная погрешность удельного поверхностного сопротивления резистивной пленки.

***Эксплуатационные характеристики:***

$t_{макс}$ – максимальная температура окружающей среды, °С;

$T$ – предполагаемая длительность работы микросхемы, час.

$f$ – рабочая частота, Гц.

## Определение геометрических размеров ТПР

Коэффициент формы ТПР определяется из соотношения

$$K_ф = R/R□. \qquad (3.18)$$

При определении размеров резистора необходимо учитывать ограничения выбранного вида технологии, рассеиваемую резистором мощность и допуск на номинал.

Сначала определяется ширина резистора из соотношения

$$b = max\ \{b', b'', b'''\}. \qquad (3.19)$$

Здесь $b'$ - минимальная допустимая ширина резистивной полоски (технологическое ограничение), выбирается из табл. 3.1;

$b''$ - минимальная допустимая ширина резистора, обеспечивающая его нормальную работу при заданной рассеиваемой мощности,

$$b'' \geq \sqrt{\frac{P}{P_0 K_ф}}\ . \qquad (3.20)$$

Величина $b'''$ определяется из условия обеспечения заданной точности ТПР. Размеры резистора должны быть такими, чтобы его сопротивление при заданных технологических погрешностях $\gamma_{R□} = \frac{\Delta R_□}{R_□}$, $\gamma_l = \frac{\Delta l}{l}$ и $\gamma_b = \frac{\Delta b}{b}$ попало в заданный допуск $\pm \gamma_{Rдоп}$.

Для определения величины $b'''$ рассмотрим следующие соображения. Точность номинала пленочного резистора зависит от большого количества факторов. Можно показать, что относительная погрешность сопротивления пленочного резистора выражается следующей зависимостью:

$$\gamma_R = \gamma_{R□} + \gamma_{Kф} + \gamma_{Rt} + \gamma_{Rст} + \gamma_{Rк}, \qquad (3.21)$$

где $\gamma_{R□}$ – погрешность удельного поверхностного сопротивления резистивной пленки;

$\gamma_{K_ф} = \frac{\Delta K_ф}{K_ф}$ – относительная погрешность коэффициента формы:

$$\gamma_{Kф} = \gamma_l + \gamma_b, \text{ где, } \gamma_l = \frac{\Delta l}{l}, \quad \gamma_b = \frac{\Delta b}{b}; \qquad (3.22)$$

$\gamma_{Rt}$ – относительная температурная погрешность сопротивления:

$$\gamma_{Rt} = \alpha_R\ (t_{макс} - 20°C); \qquad (3.23)$$

$\gamma_{Rст}$ – относительное изменение сопротивление в результате старения;

$\gamma_{Rк} = \frac{2R_к}{R}$ – относительная погрешность сопротивления, обусловленная образованием переходных сопротивлений между резистивными и проводя-

щими пленками, обычно $R_K$ = 1 … 3%. Значение $\gamma_{RK}$ необходимо выбрать, а после определения ширины ТПР – уточнить).

Для того чтобы сопротивление резистора после изготовления находилось в пределах допуска, должно выполняться условие:

$$\gamma_R \le \gamma_{Rдоп} . \qquad (3.24)$$

Анализ выражения (3.23) показывает, что при заданной относительной погрешности сопротивления проще всего обеспечить необходимую точность, варьируя величиной $\gamma_{K_ф}$. Варьирование любого другого слагаемого правой части равенства (3.23) ведет к необходимости изменения техпроцесса изготовления резисторов (который уже установился) или к необходимости применения другого материала. При этом происходит трудно контролируемое изменение всех, кроме $\gamma_{K_ф}$, слагаемых.

Допустимая относительная погрешность коэффициента формы резистора $K_ф$, удовлетворяющая неравенству (3.26), получается из выражения (3.23) и оценивается по формуле:

$$\gamma_{Kфдоп} = \gamma_{Rдоп} - \gamma_{R\square} - \gamma_{Rt} - \gamma_{Rст} - \gamma_{RK} . \qquad (3.25)$$

Примечание: если полученное значение $\gamma_{Kфдоп} \le 0$, следует перейти к расчету ТПР с подгонкой.

Учитывая, что $\gamma_{K_ф} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta b}{b}$, получим выражение для расчета минимальной ширины резистора:

$$b'''_{\min} = \frac{\Delta b + \frac{\Delta l}{K_ф}}{\gamma_{K_ф доп}} . \qquad (3.26)$$

На основании выражения (3.21) ширина резистора выбирается из 3-х величин: $b = max\ \{b', b'', b'''\}$.

Длина резистора находится по формуле

$$l = b \cdot K_Ф . \qquad (3.27)$$

Если длина резистора $l$ > (5…8) мм, его целесообразно выполнить изогнутым в виде «меандра», или использовать другую конструкцию (см. рис. 3.1).

Для коротких резисторов ($K_Ф < \sigma_l / \sigma_b$) сначала определяют длину резистора из соотношения

$$l = \max\{l', l'', l'''\}, \qquad (3.28)$$

где $l'$ выбирают из табл. 3.1,

$$l'' = \sqrt{\frac{P \cdot K_ф}{P_0}} , \qquad (3.29)$$

$$l''' = \frac{\Delta l + \Delta b K_ф}{\gamma_{Kфдоп}} . \qquad (3.30)$$

Ширина резистора определяется по формуле

$$b = l / K_{ф}. \qquad (3.31)$$

Если ширина ТПР $b > 5$ мм, необходимо подумать о возможности его замены навесным резистором.

Длина перекрытия резистивной и проводящей пленок $h$ должна быть не менее 200 мкм. Более точное определение величины $h$ приведено ниже.

Суммарная длина резистивной пленки определяется из соотношения

$$L_{\Sigma} = l + 2h. \qquad (3.32)$$

Учет сопротивления контактных переходов

Каждый пленочный резистор кроме резистивной зоны имеет зону контактных переходов $h$ (см. рис. 3.1, 3.3). Конструкция и техпроцесс изготовления ТПР должны обеспечивать минимальное переходное сопротивление между резистивной и проводящими плёнками, хорошую адгезию к подложке, равномерное распределение линий тока в зоне контактов. Контактный слой между резистивной и проводящей плёнками представляет собой сложную структуру, содержащую окислы и газовые включения, количество и состав которых зависят от степени вакуума, при котором изготовлена микросхема, и от времени между операциями нанесения резистивных и проводящих пленок. Переходное сопротивление, следовательно, зависит от геометрических размеров $b$ и $h$ контактной зоны, удельного поверхностного сопротивления $R_{\square}$ резистивной плёнки и удельного сопротивления $R^*$ переходного слоя току, перетекающему из резистивной плёнки в проводящую.

На рис. 3.4 показана модель контактного перехода между резистивной пленкой переменной толщины и проводящей областью. В реальных конструкциях тонкопленочных резисторов в зоне перекрытия резистивной и проводящей пленок изменяется толщина обеих пленок. Однако изменение толщины проводящей пленки значительно меньше сказывается на изменении ее сопротивления, чем изменение толщины резистивной пленки по той причине, что резистивная пленка имеет толщину 0,01…0,03 мкм, а проводящая 0, 2…0,5 мкм.

На границе между контактирующими поверхностями предполагается наличие некоторого переходного сопротивления. Удельное значение этого сопротивления току (сопротивление единицы площади), протекающему перпендикулярно к плоскости контакта (рис. 3.5), обозначим через $R^*$ .

Так как сопротивление резистивной пленки на всей площади контакта

$$\boldsymbol{R = \rho\Delta / S}, \qquad (3.33)$$

где $S$ – площадь контакта, величина $R^*$ определится по формуле

$$R^* = \boldsymbol{\rho}\Delta. \qquad (3.34)$$

Удельное сопротивление резистивной пленки $\boldsymbol{\rho}$ считаем независимым от ее толщины, что накладывает некоторую неточность для очень тонких пленок.

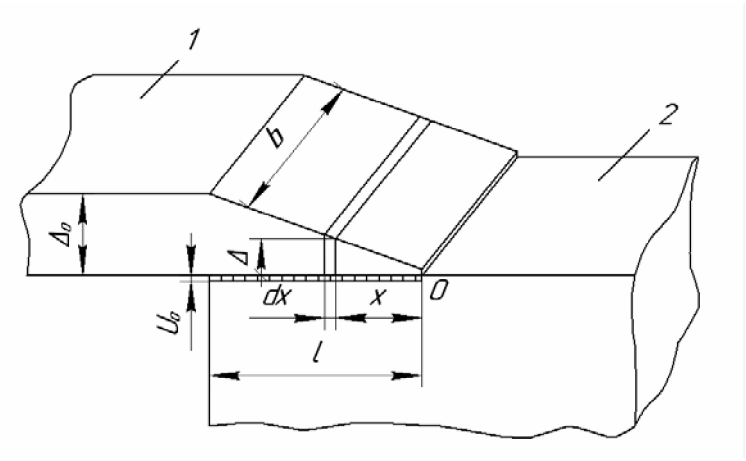



Рисунок 3.4 – Модель контактного перехода между резистивной пленкой переменной толщины и проводящей областью: 1 – резистивная пленка, 2 – проводящая пленка.

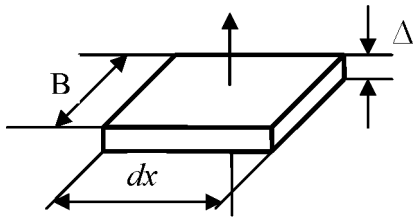



Рисунок 3.5 – Определение удельного сопротивления $R^*$.

Пусть $\Delta_0$ – начальная толщина резистивной пленки, $\Delta(x) = \Delta_0 f(x)$ – толщина пленки в произвольном сечении, $l$ – длина перекрытия пленок, $U_0$ – наибольшая разность потенциалов на границе контакта у кромки проводящей области при $x = l$.

Дифференциальное уравнение, связывающее геометрию контакта с его электрическими данными, имеет вид [2]

$$\frac{d\left[\Delta(x)\dfrac{du}{dx}\right]}{dx} = \frac{u \cdot R_{\square} \cdot \Delta_0}{R^*} . \qquad (3.35)$$

Конкретные решения этого уравнения могут быть получены лишь для частных случаев изменения толщины резистивной пленки. Для линейного закона изменения толщины (что достаточно близко к реальному изменению) имеем

$$\Delta(x) = \Delta_0 \frac{x}{l}, \qquad (3.36)$$

тогда уравнение (3.35) примет вид

$$\frac{\Delta_0}{\ell}\cdot\frac{d\left[x\frac{du}{dx}\right]}{dx}=\frac{u\cdot R_{\square}\cdot\Delta_0}{R^*}$$

или, после преобразований

$$\frac{d^2u}{dx^2}+\frac{1}{x}\frac{du}{dx}-\frac{R_{\square}\ell}{R^*}\cdot\frac{u}{x}=0. \qquad (3.37)$$

Это модифицированное дифференциальное уравнение Бесселя 2-го порядка, решение которого для граничных условий

$$U|_{x=l}=U_0,$$
$$\left.\frac{dU}{dx}\right|_{x=0}=0 \qquad (3.38)$$

имеет вид

$$u=u_0\frac{I_0\cdot\left(2\sqrt{mx}\right)}{I_0\cdot\left(2\sqrt{m\ell}\right)}, \qquad (3.39)$$

где $I_0$ – функция Бесселя нулевого порядка,

$m = R_{\square}\cdot l / R^*.$

Ток через контакт $I_0$ имеет максимальное значение при $x = l$, следовательно

$$I_0=\frac{1}{\rho}B\Delta_0\left(\frac{dU}{dx}\right)\Big|_{x=l}. \qquad (3.40)$$

Так как полное сопротивление переходного контакта $R_{\text{пер}}$ определяется отношением напряжения на контакте $U_0$ к полному току $I_0$, после подстановки $\left(\frac{dU}{dx}\right)\Big|_{x=l}$ и преобразований, получим

$$R_{пер}=\frac{\sqrt{R_{\square}R^*}}{b}\cdot\frac{I_0\cdot\left(2\ell\sqrt{\frac{R_{\square}}{R^*}}\right)}{I_1\cdot\left(2\ell\sqrt{\frac{R_{\square}}{R^*}}\right)}, \qquad (3.41)$$

где $I_1(x)=\frac{dI_0(x)}{dx}$.

$R_{\text{пер}}$ – переходное сопротивление контакта при переменной толщине резистивной пленки. При увеличении ширины и длины контактного перехода величина $R_{\text{пер}}$ стремится к предельному (наименьшему) значению $R_{\text{пер мин}}$, которое обозначим как $R_к$

$$R_к = \frac{\sqrt{R_□ R^*}}{b} \qquad (3.42)$$

Анализируя выражение (3.41), можно показать, что наличие линейного скоса резистивной пленки на контактном участке приводит к увеличению переходного сопротивления контакта по сравнению с его значением при неизменной толщине пленок примерно на 12,8 %.

Величина $R^*$ для различных режимов технологического процесса изготовления резисторов может составлять 0,01...2,0 Ом × мм$^2$. Наименьшие значения соответствуют высокому уровню технологии, наибольшие – низкому (низкий вакуум, раздельное нанесение слоёв).

Относительная погрешность сопротивления ТПР из-за наличия контактного сопротивления определяется как

$$\overline{\delta}_{R_K} = \frac{2R_K}{R} . \qquad (3.43)$$

Если величина $\overline{\delta}_{R_K}$, полученная из формулы (3.43), больше ориентировочно выбранной при определении технологического допуска по формуле (3.7), расчет ТПР необходимо повторить, подставив в формулу (3.7) значение, полученное из формулы (3.43). При расчётах ТПР методом максимум-минимум значение $\overline{\delta}_{R_K}$ ($\gamma_{RK}$) необходимо подставить в формулу (3.23).

Длина перекрытия $h$ резистивной и проводящей плёнок определяется по формуле

$$h \geq 1{,}53\sqrt{\frac{R^*}{R_□}} \qquad (3.44)$$

однако эта формула выведена без учета изменения толщины резистивной пленки в зоне контакта; более точным является коэффициент 2,9.

Учитывая возможность смещения трафаретов в процессе напыления резистивных и проводящих плёнок (при методе свободной маски), величину $h$ необходимо брать не менее 0,2 мм.

Суммарная длина резистивной пленки с учетом длины контактных переходов определяется выражением

$$l_\Sigma = l + 2h . \qquad (3.45)$$

Помимо контактных переходов пленочных резисторов в ГИС имеются контактные площадки для подсоединения выводов навесных компонентов, а также выводов ГИС к выводам корпуса. Они должны обеспечивать не только хорошую адгезию к подложке и малое сопротивление, но и хороший контакт с присоединяемыми проводниками при пайке или термокомпрессии.

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

нихрома или марганца. Нередко в качестве подслоя используют те же материалы, из которых изготовлены резисторы.

Основной слой контактной площадки напыляется из материала с высокой проводимостью (алюминий, медь, золото) на подслой и имеет толщину 0,2 … 0,5 мкм. Для предотвращения окисления поверхности основного слоя на него наносят третий слой из материала, обладающего устойчивостью к окислению и хорошей паяемостью и свариваемостью. Часто в качестве верхнего слоя используют никель. Если проводящий слой выполнен из золота, третий слой не нужен.

Оценка частотных свойств тонкоплёночных резисторов

В процессе эксплуатации интегральной микросхемы резисторы работают в цепях как постоянного, так и переменного токов, поэтому необходимо знать, каково комплексное сопротивление пленочного резистора токам высокой частоты. Резистор, имея конечные геометрические размеры, кроме активного сопротивления обладает собственными индуктивностью и емкостью. Полная эквивалентная схема пленочного резистора показана на рис. 3.6, а. Анализ такой схемы громоздок. Достаточно точно изменение сопротивления пленочного резистора можно описать по приближенной эквивалентной схеме (рис. 3.6, б), где $R$ – сопротивление резистора постоянному току; $C_П$ – собственная (паразитная) ёмкость с учетом ёмкости контактных площадок; $L_П$ - собственная индуктивность резистора.

Реальные конструкции плёночных резисторов имеют паразитную индуктивность до десятков наногенри и паразитную ёмкость до нескольких пикофарад. Следовательно, есть смысл индуктивную составляющую учитывать для резисторов малых номиналов, когда шунтирующим действием паразитной ёмкости можно пренебречь (рис. 3.6, в). Для высокоомных резисторов можно пренебречь индуктивной составляющей сопротивления, но учитывать шунтирующее действие паразитной ёмкости (рис. 3.6, г). Следует отметить, что для большинства резисторов (особенно типа «меандр») комплексное сопротивление носит емкостной характер (рис. 3.7).

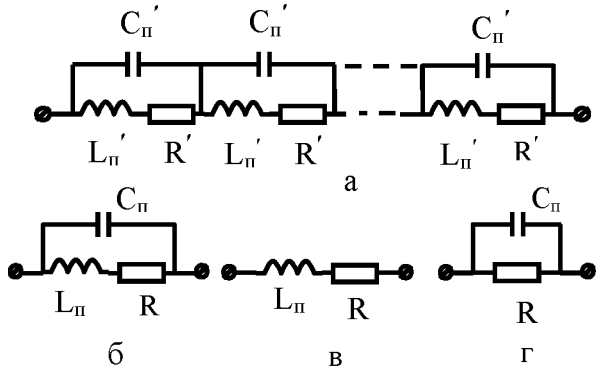



Рисунок 3.6 – Эквивалентная схема пленочного резистора: а) полная, б) упрощенная, в) для низкоомных резисторов, г) для высокоомных резисторов.

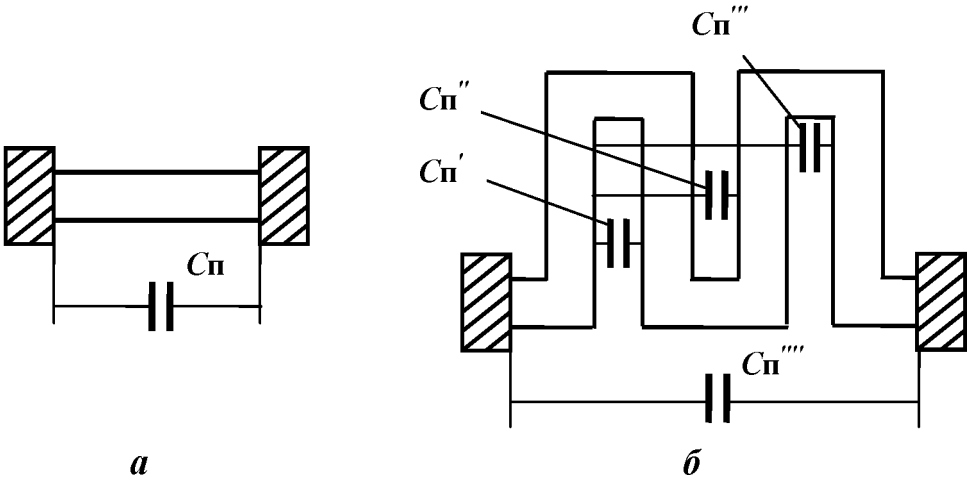



Рисунок 3.7 – Составляющие собственной емкости у тонкопленочных резисторов различной конструкции.

ТПР считают частотно независимым, если модуль его комплексного сопротивления на рабочей частоте отличается от сопротивления резистора постоянному току не более чем на 0,5 %. Определим верхнюю граничную частоту $f$ гр. для низкоомных тонкопленочных резисторов (рис 3.6, в).

Полное сопротивление такого резистора определяется по формуле

$$Z = R + j\,\omega\, L_{П}\,, \qquad (3.46)$$

где $R$ – сопротивление резистора постоянному току,

$\omega\, L_{П}$ – реактивное (индуктивное) сопротивление ТПР.

Условие частотной независимости низкоомного резистора можно записать так:

$$| Z | \le 1{,}005\ R.$$

Так как модуль полного сопротивления $| Z | = \sqrt{R^2 + (\omega Ln)^2}$, получим:

$$\sqrt{R^2 + (\omega Ln)^2} \le 1{,}005\ R.$$

После преобразований: $\omega L\text{п} \le 0{,}1\ R$, или $2\pi f L\text{п} \le 0{,}1\ R$.

Если длина прямоугольного резистора равна $l$, а величина индуктивности на единицу длины (погонная индуктивность) [7]

$$L\text{пог} = 2\ l\left(1{,}35 + 2{,}3\ lg2K\text{ф} + \frac{0{,}2235}{K\text{ф}}\right)10^{-4}\ \text{мкГн.}, \qquad (3.47)$$

получим $L\text{п} = l\ L\text{пог.}$,

Таким образом, для низкоомных резисторов верхнюю частоту, до которой можно не учитывать паразитную индуктивность, можно определить по формуле

$$f\,\text{гр.} \le \frac{0{,}016}{L\text{п}}\ . \qquad (3.48)$$

Существует и другая формула, учитывающая допуск на сопротивление резистора

$$f_{гр} = \sqrt{\frac{\overline{\delta}_R}{2}} \frac{R}{\pi L_П}. \qquad (3.49)$$

Для высокоомных ТПР (рис. 3.6, г):

$$|Z| = \frac{R^2\sqrt{1+(\omega R C_n)^2}}{1-(\omega R C_n)^2},$$

А граничная частота определяется по формуле

$$f_{гр} = \frac{0{,}316}{RC_П}, \qquad (3.50)$$

или

$$f_{гр} \le \sqrt{\frac{\overline{\delta}_R}{2}} \cdot \frac{1}{\pi R C_П}. \qquad (3.51)$$

Размерности: $C_П$ – пФ, $R$ – Ом, $f$ – Гц.

Величины собственных значений паразитной ёмкости резистора $C_П$ и паразитной индуктивности $L_П$ зависят от конструкции резистора и контактных площадок и точно могут быть определены после выбора конструкции. Обычно $C_П$ = 0,01…0,05 пФ.

Проектирование резисторов сложной формы

Установлено, что электрическое поле в резисторах сложной формы («меандр», «змейка» и т.д.) неравномерно. Наибольшего значения градиент плотности тока достигает в местах изгиба резистивной пленки. Неравномерность электрического поля приводит к изменению сопротивления плёночного резистора.

В связи с этим расчет сопротивления резисторов сложной формы по длине геометрической средней линии является неточным.

Для расчета размеров резисторов сложной формы (например, изображенных на рис. 3.1; 3.7) резистивная полоска условно разбивается на прямоугольные участки и элементы сопряжения (рис. 3.8), сопротивление которых рассчитывается по формулам

$$R = 2{,}55\ R_\square \quad \text{(тип А)} \qquad (3.52)$$

$$R = 4\ R_\square \quad \text{(тип Б)} \qquad (3.53)$$

$$R = \frac{1{,}57}{\ln \frac{r_1}{r_2}} R_\square \quad \text{(тип В)} \qquad (3.54)$$

$$R = 3{,}86\ R_\square \quad \text{(тип Г)} \qquad (3.55)$$

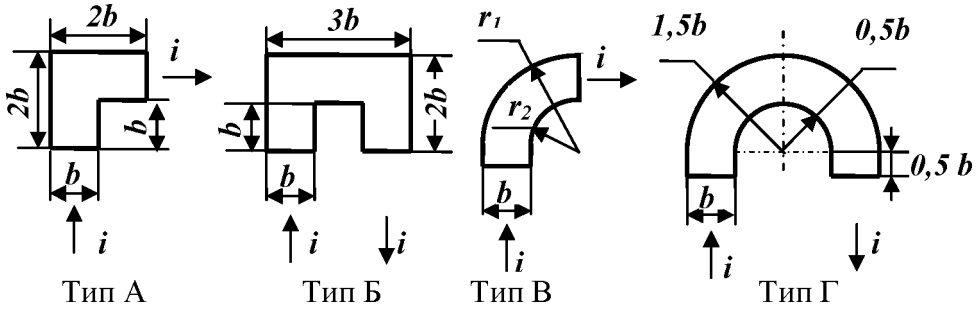



Рисунок 3.8 – Элементы сопряжения.

Общее сопротивление резистора определяется как сумма сопротивлений всех элементов сопряжений и сопротивлений участков прямоугольной формы $l_{пр}$ (рис. 3.9).

Конструкция изогнутого пленочного резистора с прямоугольными (рис. 3.8, Б) и криволинейными (рис. 3.8, Г) перегибами имеет конструктивно-технологические ограничения на размеры $a$ и $B$ (рис. 3.9, а). Например, при нанесении резистивного слоя через биметаллическую маску (трафарет) размер $a$ определяется как минимально возможное расстояние между двумя щелями в маске, равное примерно $2h_м$ , где $h_м$ – толщина маски. Размер $B$ ограничен необходимой жесткостью маски. Обычно придерживаются соотношения $B/a$ = 10. Большое соотношение $B/a$ не допускается также потому, что при нагревании маски в процессе напыления резисторов наблюдаются изгибы «язычков» и соответственно изменяются геометрические размеры резистивной плёнки за счет подпыления наносимого материала под маску.

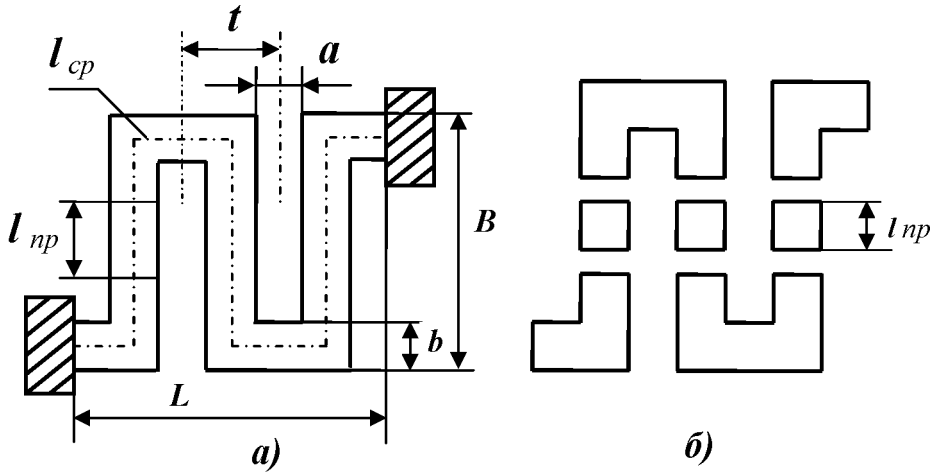



Рисунок 3.9 – Пленочный резистор сложной формы: а) реальная конструкция; б) условное представление в виде элементов сопряжения.

В конструкции резистора с металлическими перемычками (рис. 3.1, г) допускается соотношение $B/a$ = 50, так как резистивные слои и перемычки формируются отдельно.

Оптимальное число звеньев «меандра» (число перегибов) вычисляется приближенно по формуле

$$n_{опт} = \sqrt{\left(\frac{a}{2t}\right)^2 + \frac{l_{ср}}{t}} - \frac{a}{2t}\ , \qquad (3.56)$$

в которой все обозначения соответствуют рис. 3.9, а. При $L = B$ (проектируется «меандр» квадратной формы) и $a = b$ можно использовать упрощенную формулу

$$n_{опт} = \sqrt{\frac{K_ф}{2}}\ . \qquad (3.57)$$

Значение $n_{опт}$ округляют до ближайшего целого.

Длина прямоугольных участков определяется по формуле

$$l_{пр} = \frac{\left(R - \sum R_{э.с}\right)\ b}{R_{\square}\, n_{опт}}\ , \qquad (3.58)$$

где $\sum R_{э.с}$ – сумма сопротивлений элементов сопряжения (см. рис. 3.9, б). Габаритные размеры резистивной пленки вычисляют по формулам

$$L = n_{опт} a + \left(n_{опт} + 1\right)\ b\ . \qquad (3.59)$$

$$B = l_{пр} + 4b\ . \qquad (3.60)$$

Конструирование и расчёт точных плёночных резисторов

Точность тонкопленочных резисторов зависит от ряда факторов. Большую роль играет точность воспроизведения толщины и свойств резистивной пленки, которые, в свою очередь, являются следствием воздействия множества технологических факторов: температуры подложки и испарителя, режимов напыления, степени вакуума и т.д.

Вторым существенным фактором является точность воспроизведения контуров резистивных и проводящих элементов.

В силу неоднородности поверхности подложки могут быть разрывы в пленке, что также изменяет величину сопротивления. Особенно заметно дефекты подложки сказываются на величине сопротивления узких пленок.

Удельное сопротивление пленки $\rho$ сильно зависит от её структуры. Величина $\rho$ всегда больше теоретической за счет рыхлой структуры пленки. Поэтому после окончания процесса напыления необходимо производить термообработку. В результате термообработки величина $\rho$ уменьшается, уменьшается и сопротивление резистора $R$, причем уход величины $R$ после термообработки зависит от скорости осаждения пленки.

Если под колпак вакуумной установки напустить воздух сразу после напыления пленки, то еще неостывшая пленка легко окисляется на воздухе, на её

поверхности появляется окисный слой, то есть уменьшается действующая толщина резистивной пленки, в результате чего возрастает сопротивление резистора. Таким образом, технология нанесения пленок в сильной степени влияет на свойства резистивных пленок и точность пленочных резисторов.

На точность воспроизведения размеров резистивных пленок влияют:

1. Точность выполнения размеров окон трафаретов ($l \pm \Delta l$; $b \pm \Delta b$).
2. Точность совмещения трафаретов (при напылении резисторов применяют 2 трафарета, один – для напыления резистивных пленок, другой – для напыления проводящих пленок (выводов, контактных площадок)); при совмещение трафаретов всегда существует погрешность совмещения (погрешность базировки); точность воспроизведения длины зависит в основном от точности напыления проводящих пленок и длины резистора, а точность выполнения ширины определяется только точностью напыления резистивных пленок.
3. Плотность прижима трафаретов: за счет неплотного прилегания трафаретов к подложке происходит подпыление резистивного материала под маску; атомы и молекулы не остаются там, где они упали, а некоторое время находятся в движении (мигрируют по подложке). Существует подпыление чисто геометрическое, если трафарет неплотно прижат к подложке. Возможно также реиспарение горячих частиц металла с подложки на кромки трафарета и обратно. Отражение частиц от кромок трафарета также изменяет направление движения атомов и молекул. В результате подпыления изменяются размеры и контуры резистивных пленок. Следует учитывать, что при прочих равных условиях точность их изготовления повышается с увеличением габаритных размеров резистивной пленки.

При конструировании и изготовлении точных пленочных резисторов рассмотренные выше погрешности стремятся свести к минимуму. Однако обеспечить заданную точность резистора в процессе изготовления не всегда удается. Кроме того, в некоторых схемах с целью настройки электрических параметров требуется регулировка величины сопротивления резисторов. В этих случаях возникает необходимость проектировать в тонкопленочных схемах подгоняемые резисторы. Подгонка сопротивления осуществляется удалением части резистивной пленки или уплотнением резистивного слоя (плавная подгонка). Используют также шунтирование части резистивной пленки проводящими перемычками или удаление замыкающих перемычек (ступенчатая подгонка).

Для удаления резистивных и проводящих пленок используют луч лазера, факельный разряд, электрическую искру, механическое уплотнение резистивной пленки, химическое травление и другие методы.

### Конструирование и расчёт подгоняемых плёночных резисторов

Если необходимо изготовить резисторы, допуск на номинал которых составляет единицы или доли процента, обеспечить точность за счет увели-

чения их размеров не всегда удаётся. При вычислении $b'''$ в знаменателе формулы (3.17) появляется "ноль" или отрицательное число. В таких случаях применяют резисторы, номинал которых можно изменять после изготовления (рис. 3.10). Подгонять резистор можно в сторону увеличения номинала изменением коэффициента формы (разрывом замыкающих перемычек или удалением части резистивной плёнки). Следовательно, расчетная величина сопротивления подгоняемого пленочного резистора должна быть меньше номинального значения. При нормальном законе распределения погрешностей подавляющее число резисторов имеет поле рассеяния номинала в пределах $\pm 3\overline{\sigma}_R$, следовательно, расчетное значение сопротивления нерегулируемой части резистора можно определить по формуле

$$R_{расч} = \frac{R}{1+3\overline{\sigma}_R}, \qquad (3.61)$$

где $\overline{\sigma}_R$ – относительное среднеквадратическое отклонение номинала резистора для выбранного технологического процесса.

Ширина резистора $b$ при подгонке выбирается из соотношения

$$b = \max\{b', b''\}; \qquad (3.62)$$

длина определяется как

$$l = bK_ф, \quad \text{где } K_ф = R/R_□.$$

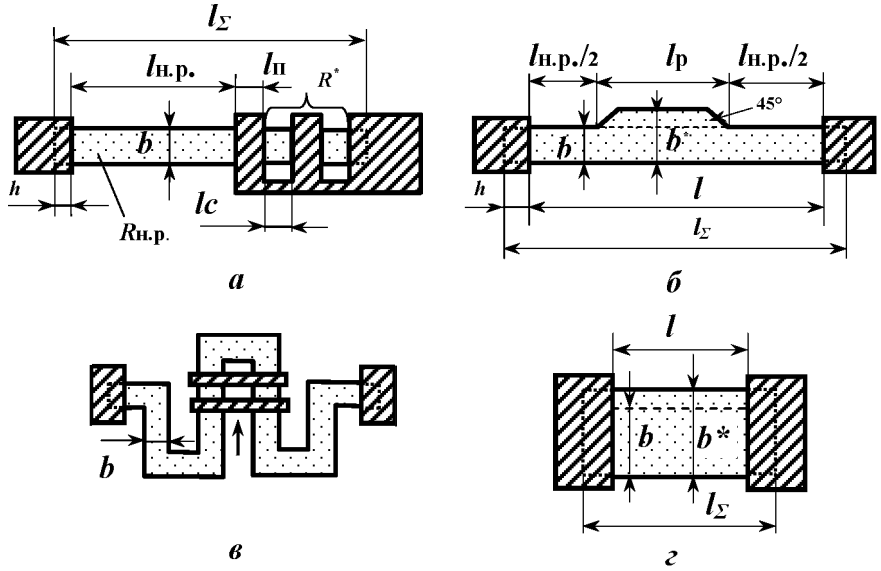



Рисунок 3.10 – Конструкции подгоняемых тонкопленочных резисторов.

Ступенчатая подгонка. В резисторах со ступенчатой подгонкой изменение величины сопротивления производится скачками (ступеньками) через определенное значение ΔR путем удаления заранее предусмотренных шунтирующих перемычек.

При конструировании резистора, подстраиваемого разрывом замыкающих перемычек, кроме $R_{расч}$ (нерегулируемая часть), рассчитанного по формуле (3.61), необходимо иметь дополнительно замкнутый перемычками

резистор (регулируемая часть) $R^*$ (рис. 3.10, а, в). Расчетное значение $R^*$ определяется из условия

$$R = \left(R_{н.р} + R^*\right)\left(1 - 3\overline{\sigma}_R\right). \tag{3.63}$$

Используя выражения (3.61) и (3.63), получим

$$R^* = R\frac{6\overline{\sigma}_R}{1 - 9\overline{\sigma}_R^2}\ . \tag{3.64}$$

Количество секций $n$, из которых состоит $R^*$, выбирается таким, чтобы сопротивление каждой секции было не больше абсолютного значения допуска на сопротивление резистора:

$$n = \frac{R^*\left(1 + 3\overline{\sigma}_R\right)}{\delta_R} = \frac{6\overline{\sigma}_R}{\overline{\delta}_R\left(1 - 3\overline{\sigma}_R\right)}, \tag{3.65}$$

где $\delta_R$ – абсолютная допустимая погрешность сопротивления резистора, Ом; $\delta_R = \overline{\delta}_R R$, $\overline{\delta}_R$ - технологический допуск. Значения $l_{н\,р}$ и $l_c$ определяются по формулам

$$l_{н.р.} = \frac{R_{н.р.} \cdot b}{R_□}, \quad l_c = \frac{R^* \cdot b}{R_□ \cdot n}. \tag{3.66}$$

При большом значении $l_{н.р}$ нерегулируемую часть резистора необходимо выполнить изогнутой.

Если длина подгоночной секции $l_c$ окажется меньше 0,2 мм, число подгоночных секций $n$ можно уменьшить, но не более, чем в 2 раза, однако точность подгонки при этом снизится. Если и при этом $l_c$ < 0,2 мм, её можно увеличить до 0,2 мм, пропорционально увеличив ширину резистора $b$, однако размеры подгоняемого участка резистора в этом случае могут значительно увеличиться. В том случае, когда указанные приёмы все же не позволяют сделать $l_c$ ≥ 0,2 мм, необходимо проектировать резистор с плавной подгонкой. При узком допуске на сопротивление резистора и плохой технологии расчетное число подгоночных секций может достигать десятков, что делает конструкцию громоздкой. В этом случае также необходимо проектировать ТПР с плавной подгонкой.

Ширина перемычек $l_п$ выбирается равной 0,2...0,5 мм. Суммарная длина резистивной пленки

$$l_{\sum} = l_{н.р} + 2h + n\left(l_п + l_c\right).$$

Плавная подгонка. Плавная подгонка применяется в тех случаях, когда требуется обеспечить узкий допуск на сопротивление резистора. Точность плавной подгонки составляет доли процента. Наиболее приемлемая конструкция резистора с плавной подгонкой изображена на рис. 3.10, б.

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

Исходными данными для расчета точных подгоняемых резисторов являются:

- номинальное значение сопротивления $R$, Ом и допуск $\bar{\delta}_R$, %;
- сопротивление квадрата плёнки $R_\square$, Ом;
- среднеквадратическое отклонение сопротивления квадрата плёнки $\bar{\sigma}_{R\square}$;
- ширина резистора $b$, мм, определяемая из соотношения (3.62);
- среднеквадратическое отклонение ширины резистора $\sigma_b$, мм.

По формуле (3.67) определяется минимальная длина резистора

$$l_{\min} = \frac{R\left(1-\bar{\delta}_R\right)\left(b+3\sigma_b\right)}{R_\square\left(1-3\bar{\sigma}_{R_\square}\right)} \quad . \tag{3.67}$$

Полная длина резистивной пленки $l = l_{min} + 3\sigma_l$.

Если в процессе изготовления резистора величина $b$ примет минимальное, а $R_\square$ - максимальное значение, сопротивление резистора станет равным

$$R_{\max возм} = \frac{R\left(1+3\bar{\sigma}_R\right)l}{b-3\sigma_b}. \tag{3.68}$$

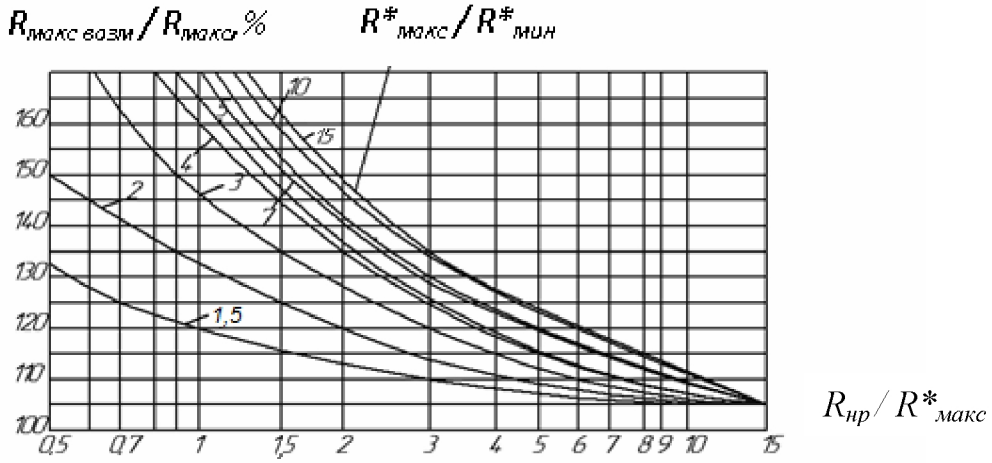
Если окажется, что $R_{max.возм} > R_{max}$, где $R_{\max} = R\left(1+\bar{\delta}_R\right)$, необходимо предусмотреть регулируемую секцию, наличие которой позволило бы уменьшить величину $R_{max.возм}$ до $R_{max}$.

Следует отметить, что при изготовлении точных резисторов необходимо выбирать материал и режимы техпроцессов изготовления такими, чтобы выполнялось неравенство $\bar{\delta}_{R_t} + \bar{\delta}_{R_{cm}} \le \bar{\delta}_R$, в противном случае никакая подгонка не поможет. Номинал резистора будет уходить за пределы допуска под действием температуры окружающей среды и старения.

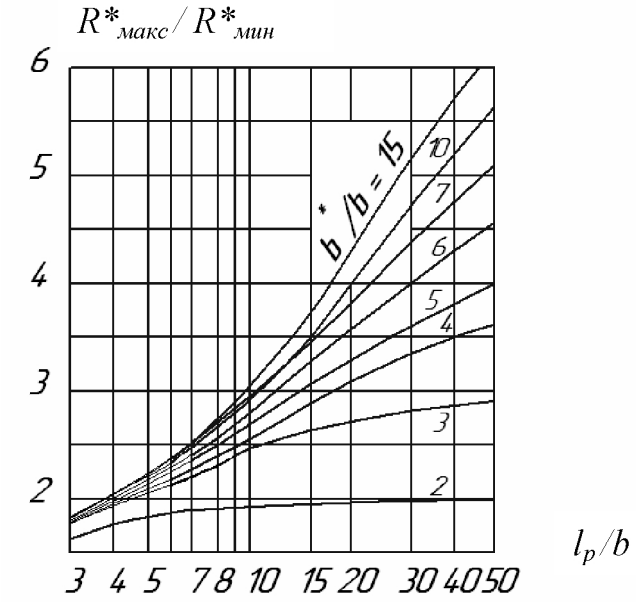
Расчет размеров регулируемой секции производится следующим образом:

1. Вычисляется отношение $\frac{R_{\max возм}}{R_{\max}}$. По графикам (рис. 3,11,а) из конструктивно-технологических соображений выбирается отношение $\frac{R^*_{\max}}{R^*_{\min}}$ (кривая) и с учетом отношения $\frac{R_{\max возм}}{R_{\max}}$ определяется отношение $\frac{R_{н.р}}{R^*_{\max}}$, здесь $R_{н.р}$ – сопротивление нерегулируемого участка резистора, $R^*_{\max}$ и $R^*_{\min}$ – максимальное и минимальное сопротивления участка резистора, на котором есть подстраиваемая секция. Сопротивление $R^*_{\max}$ соответствует сопротивле-

нию этого участка при полностью удаленной подстроечной секции. Необходимая степень подгонки может быть обеспечена при различных отношениях $\frac{R^*_{\max}}{R^*_{\min}}$ и $\frac{R_{н.р}}{R^*_{\max}}$.




*а*)




*б*)

Рисунок 3.11 – Графики для расчета ТПР с плавной подгонкой.

Нетрудно заметить, что $\frac{R_{н.р}}{R^*_{\max}} = \frac{l_{н.р}}{l_p} = \frac{l - l_p}{l_p}$, откуда получаем

$$l_p = \frac{1}{1 + R_{н.р} \Big/ R^*_{\max}} \ . \qquad (3.69)$$

2. В зависимости от выбранного отношения $\frac{R^*_{\max}}{R^*_{\min}}$ и отношения $l_p/b$ которое можно получить, определив из выражения (3.69) величину $l_p$, по графикам рис. 3.11,б находится отношение $b^*/b$ и вычисляется $b^*$ – ширина резистора на подстраиваемом участке.

Если $K_\phi < 10$, использование графиков (рис. 3.11) затруднительно. В таких случаях целесообразно применить конструкцию резистора с плавной подгонкой, изображенную на рис. 3.10, г. Ширина $b$ и длина $l$ находятся из соотношений (3.62) и (3.67) соответственно, а величина $b^*$ определяется по формуле

$$b^* = \frac{lR_\square(1+3\bar{\sigma}_{R_\square})}{R(1+\bar{\sigma}_R)} + 3\sigma_b . \qquad (3.70)$$

В технологической документации на подгонку таких резисторов необходимо указывать, что уменьшение ширины ТПР возможно только до величины $b$. Следует помнить, что $l_\sum = l + 2h$.

## 3.4. Конструирование и расчет тонкопленочных конденсаторов (ТПК)

Конструктивно-технологические особенности

Конденсаторы являются широко распространенными элементами пленочных микросхем. По конструктивному признаку тонкопленочные конденсаторы (ТПК) можно разделить на три группы: однослойные, многослойные и компланарные [3]. Однослойными принято считать такие конденсаторы, которые состоят из двух обкладок и одного слоя диэлектрика (рис. 3.12, а, б, в). Многослойные конденсаторы имеют большее число слоев диэлектрика (рис. 3.12, г). Конструктивной особенностью компланарных (гребенчатых) конденсаторов является одностороннее расположение обкладок (рис. 3.12, д). Большинство характеристик ТПК зависит от выбранных материалов и технологии изготовления. Материал, применяемый для изготовления диэлектрических слоев, должен иметь хорошую адгезию к материалам подложки и обкладок, не вступать с ними в химические реакции; диэлектрическая пленка должна быть достаточно плотной, иметь высокую электрическую прочность, малые диэлектрические потери.

Лучше других этим требованиям удовлетворяют характеристики диэлектриков, приведенных в табл. 3.4. Для обкладок ТПК наилучшим материалом является алюминий. Удельное поверхностное сопротивление алюминиевой пленки достаточно мало и при ее толщине 2500...5000 Å находится в интервале 0,2...0,06 Ом/квадрат. Это обеспечивает высокую добротность ТПК. Рекомендуется одновременно с изготовлением обкладок ТПК наносить и тонкопленочные проводники.

Многослойные ТПК применяют редко в связи с тем, что с ростом числа слоев увеличивается сложность технологического процесса изготовления конденсаторов, увеличивается процент брака и снижается их надежность.

Если площадь конденсатора $S$ больше 1 мм$^2$, то ТПК проектируют в виде однослойной конструкции, изображенной на рис. 3.12, а. Если же полезная площадь конденсатора получается меньше 1 мм$^2$, необходимо выбрать меньшее значение удельной ёмкости $C_0$. Конденсаторы с малой величиной ёмкости рекомендуется проектировать в виде двух пересекающихся проводящих пленок, разделенных слоем диэлектрика, или в виде «гребёнки». В некоторых случаях для уменьшения ёмкости ТПК можно выполнить в виде последовательно соединенных ТПК (рис. 3.12, е). Желательно, чтобы все конденсаторы, расположенные на одной подложке, были изготовлены на основе одной диэлектрической пленки. Нижняя обкладка ТПК должна выступать за край верхней не менее чем на 200 мкм, а диэлектрик – не менее чем на 200 мкм за край нижней обкладки. Для повышения точности и надёжности ТПК необходимо выбирать наиболее простую форму обкладок.

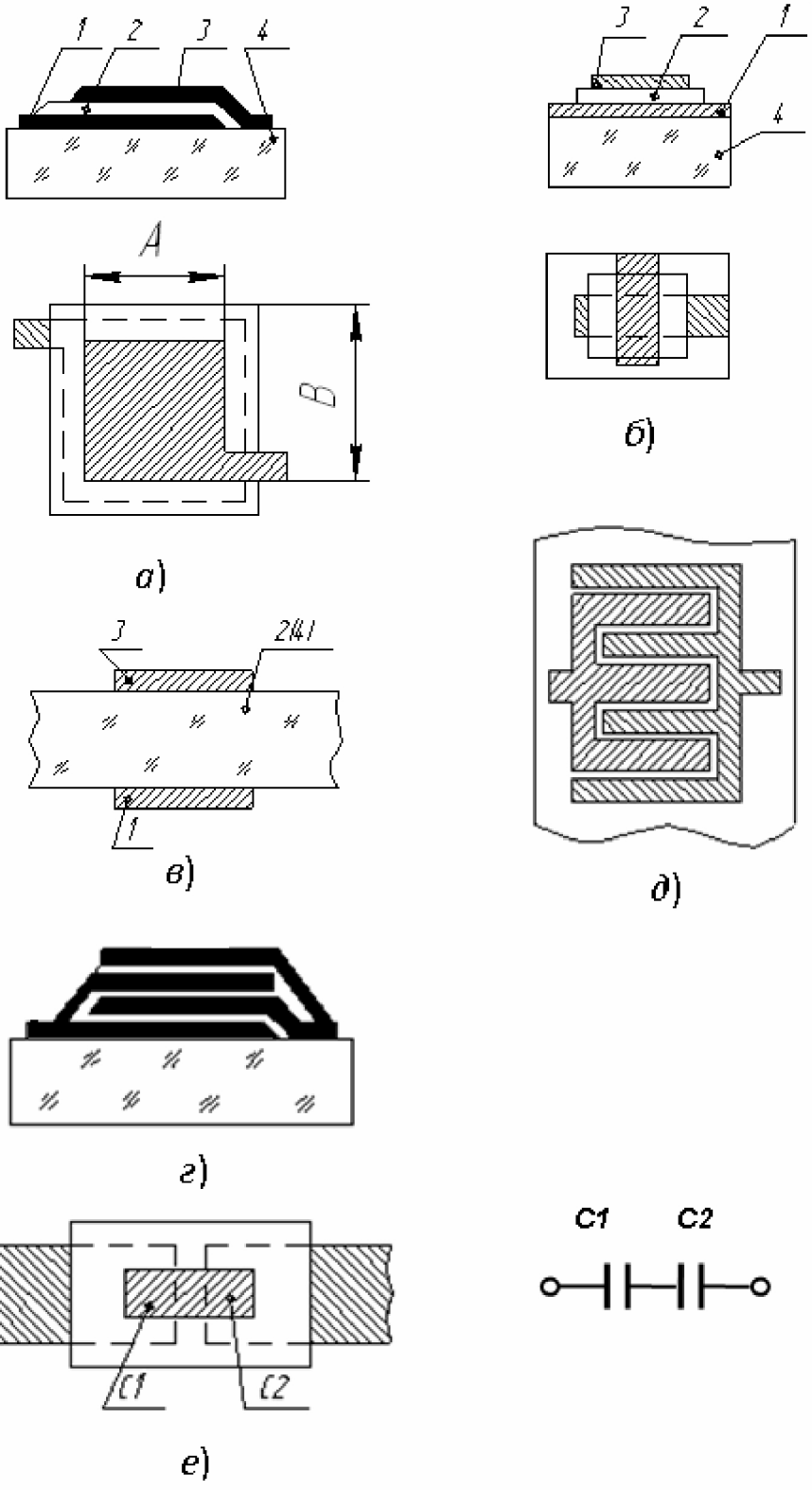



Рисунок 3.12 – Конструкции ТПК: *а* – однослойный; *б* – малой емкости; *в* – двухсторонняя конструкция; *г* – многослойный; *д* – гребенчатый; *е* – последовательное соединение двух ТПК; 1 – нижняя обкладка; 2 – диэлектрик; 3 – верхняя обкладка; 4 – подложка.

Таблица 3.4

Основные характеристики диэлектрических материалов ТПК

| Материал диэлектрика | Материал обкладок | $R_{□\ обкл.}$, Ом/□ | $C_0$, пФ/см$^2$ | $U_{раб}$, В | ε при f=1 кГц | tg$\delta$ при f=1кГц | $E_{пр}$, В/см | $\alpha_\varepsilon$, 1/°С (-60…+125°С) | $\overline{\delta}_{C_{ст}}$, % за 1000 ч |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Моноокись кремния ЕТО.028.004 ТУ | Алюминий А-99,ГОСТ 11069-64 | 0,2 | 5000<br>10000 | 60<br>30 | 5,0…6,0 | 0,01…0,02 | (2…3)$10^6$ | 2·$10^{-4}$ | ±(1,5…6) |
| Моноокись германия ЕТО.021.014 ТУ | Алюминий А-99,ГОСТ 11069-64 | 0,2 | 5000<br>10000<br>15000 | 10<br>7<br>5 | 11…12 | 0,005…0,007 | $10^6$ | 3·$10^{-4}$ | -1,0 |
| Боросиликатное стекло ЕТО.035 ТУ | Алюминий А-99,ГОСТ 11069-64 | 0,2 | 2500<br>5000<br>10000<br>15000 | 24<br>15<br>10<br>8 | 4 | 0,001…0,0015 | (3…4)$10^6$ | 0,35·$10^{-4}$ при +25…+125 °С | ±1,0 |
| Стекло электровакуумное, С41-1, НПО.027.600 | Алюминий А-99,ГОСТ 11069-64 | 0,2 | 15000<br>20000<br><br><br>30000<br>40000 | 12,6<br>10…12,6<br><br><br>6,3…10<br>6,3 | 5,2 | 0,002…0,003 | (3…4)$10^6$ | (0,5…1,0)$10^{-4}$ при -60…+25°С;<br><br>(1,5…1,8)$10^{-4}$ при +25…+125°С; | ±1,0 |

Ёмкость ТПК зависит от площади перекрытия обкладок, свойств применяемого диэлектрика и его толщины. Площадь однослойного ТПК рассчитывается по формуле:

$$S = \frac{C}{C_0}, \qquad (3.71)$$

где $C$ – емкость конденсатора,

$C_0 = 0{,}0885\frac{\varepsilon}{d}$ – удельная емкость конденсатора.

Здесь $\varepsilon$ – диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика,

$d$ – толщина диэлектрика.

Если размеры обкладки и толщину диэлектрика выразить в сантиметрах, емкость – в пикофарадах, то $C_0$ получится в $пФ/см^2$.

Для многослойного конденсатора:

$$C = 0{,}0885\frac{\varepsilon \cdot S(N-1)}{d}, \text{ где } N \text{ – число обкладок.}$$

Ёмкость ТПК складывается из двух составляющих: ёмкости, образуемой за счёт перекрытия обкладок, и ёмкости, образующейся за счёт краевого эффекта, возникающей по контуру обкладок. Величина этой дополнительной ёмкости в плёночных конденсаторах составляет доли процента от основной ёмкости, т.к. толщина обкладок очень мала. Ёмкость, образующаяся за счёт краевого эффекта, сказывается лишь при очень малых площадях обкладок и при очень высоком значении ε материала диэлектрической плёнки.

Минимально возможная толщина диэлектрика определяется из требуемой электрической прочности

$$d \geq \frac{U_{раб}}{E_{раб}},$$

где $U_{раб.}$ – рабочее напряжение ТПК,

$E_{раб.}$ – рабочая напряженность материала диэлектрика;

$E_{раб} = (0{,}25...0{,}3)E_{пр}$;

здесь $E_{пр}$ – пробивная напряженность материала диэлектрика; выбирается из таблицы 3.4.

## Температурная зависимость емкости ТПК

Температурная зависимость ёмкости ТПК характеризуется температурным коэффициентом ёмкости $\alpha_c$, который показывает относительное изменение ёмкости при изменении температуры на $1^\circ$С. Величина $\alpha_c$ определяется по формуле

$$\alpha_c = \frac{1}{c} \cdot \frac{dc}{dt}. \qquad (3.72)$$

Для получения средней величины $\alpha_c$ в интервале температур $\Delta t$ эта формула примет вид:

$$\alpha_C = \frac{C - C_0}{C_0(t_2 - t_1)} = \frac{\Delta C}{C_0 \cdot \Delta t}.$$

Продифференцировав выражение (3.72) по $t$, получим

$$\alpha_C = \alpha_\varepsilon + 2\alpha_M - \alpha_\partial,$$

где: $\alpha_\varepsilon$ – температурный коэффициент диэлектрической проницаемости,

$\alpha_M$ – температурный коэффициент линейного расширения материала обкладок,

$\alpha_\partial$ – температурный коэффициент линейного расширения диэлектрика.

Вследствие хорошей адгезии материала проводящих плёнок с подложкой линейное расширение обкладок будет определяться линейным расширением материала подложки, поэтому в приведенной выше формуле вместо $\alpha_M$ можно взять $\alpha_П$ – температурный коэффициент линейного расширения подложки, тогда

$$\alpha_C = \alpha_\varepsilon + 2\alpha_П - \alpha_\partial. \qquad (3.73)$$

Анализ этого выражения показывает, что для получения высокостабильных конденсаторов необходимо, чтобы $\alpha_C$ было равно нулю. Это может быть осуществлено при условии:

$$\alpha_\varepsilon + 2\alpha_п = \alpha_\partial. \qquad (3.74)$$

Следовательно, материалы подложки и диэлектрика нужно подобрать так, чтобы $\alpha_C \to 0$. Так как $\alpha_П$ обычно уже определено выбором материала подложки, внимание следует обратить на получение необходимых $\alpha_\partial$ и $\alpha_\varepsilon$. Следует отметить, что эти величины в большой степени зависят от условий нанесения тонких плёнок: степени вакуума, скорости испарения диэлектрика, температуры подложки, скорости испарения верхней обкладки, температуры и времени термообработки.

Выбор материала диэлектрика

Проектирование однослойных ТПК следует начинать с выбора типа конструкции и материала диэлектрической пленки (см. табл. 3.4). При этом необходимо учитывать номинальное значение ёмкости, требования к стабильности, условия эксплуатации и технологичность изготовления ТПК. Для выбранного материала определяются технологические и эксплуатационные характеристики:

$\varepsilon$ – диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика;

$E_{пр}$ – электрическая прочность материала диэлектрика, В/см;

$\alpha_C$ – температурный коэффициент ёмкости конденсатора $1/^\circ C$;

$\overline{\delta}_{C_{ст}}$ – относительное изменение ёмкости во времени, %.

## Расчет ТПК вероятностным методом

Исходными данными для расчета прямоугольных пленочных конденсаторов (рис. 3.12, а) являются:

***Выбранное ориентировочное значение*** $C_0$ ***и характеристики материала диэлектрической пленки:*** $\alpha_C$, $\overline{\delta}_{Cст}$.

***Электрические характеристики:***

$C$ – номинал емкости ТПК, пФ;
$Up$ – рабочее напряжение ТПК, В;
$\overline{\delta}_{Ci\,доп}$ – допустимое относительное отклонение номинала ТПК, %;

***Технологические характеристики:***

$\overline{\sigma}_{C_0}$ – относительное среднеквадратическое отклонение удельной емкости;
$\sigma_A$, $\sigma_B$ – абсолютные среднеквадратические отклонения размеров верхней обкладки, мм;
$r$ – коэффициент корреляции между отклонениями размеров верхней обкладки ТПК;
$\Phi_c$ – вероятность выхода годного конденсатора ($\Phi_c$ = 0,7... 1);
$d'$ – минимальная допустимая толщина диэлектрической пленки ТПК, мкм.

***Эксплуатационные характеристики:***

$t_{max}$ – максимальная температура окружающей среды, $^{P'}$C;
$T$ – время эксплуатации, ч;

Среднестатистические значения отклонений технологических параметров пленочных конденсаторов для различных видов технологии приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5

Погрешности воспроизведения технологических параметров плёночных конденсаторов

| Вид технологии изготовления | $\sigma_A$, $\sigma_B$, мм | $\overline{\sigma}_{C_0}$ | $r$ | $d'$, мкм |
|---|---|---|---|---|
| Метод свободной маски | 0,01….0,07 | 0,03….0,07 | 0,8…1 | 0,3…0,5 |
| Танталовая технология | 0,003…0,007 | 0,03…0,07 | 0,8…1 | 0,1…0,3 |

В результате расчетов необходимо определить величину $C_0$ и размеры А и В.

Определение технологического допуска

Точность изготовления ТПК определяется воспроизводимостью удельной емкости $C_0$ и размеров обкладок. На точность ёмкости также влияет погрешность установки масок и совмещения их с подложками. Эту погрешность можно исключить, увеличив размеры нижней обкладки. Кроме того, в условиях эксплуатации на ТПК будет воздействовать температура окружающей среды, он будет со временем «стареть». Для того чтобы в течение времени эксплуатации в реальных условиях ёмкость ТПК не выходила за пределы допуска $\overline{\delta}_{C_{доп}}$, расчетное значение допуска $\overline{\delta}_C$ (технологический допуск) должно быть меньше, т.е.

$$\overline{\delta}_C = \overline{\delta}_{C_{доп}} - \overline{\delta}_{C_t} - \overline{\delta}_{C_{ст}}, \qquad (3.75)$$

где $\overline{\delta}_{C_t}$ – относительное изменение ёмкости ТПК при воздействии окружающей среды

$$\overline{\delta}_{C_t} = \alpha_C \left(t_{\max} - 20^\circ C\right). \qquad (3.76)$$

Определение удельной ёмкости ТПК

В общем случае ёмкость ТПК можно вычислить по формуле

$$C = 0,0885 \frac{\varepsilon \cdot S(n-1)}{d} = C_0 S, \qquad (3.77)$$

где $S$ - активная площадь конденсатора, равная площади перекрытия обкладок, см$^2$; $d$ – толщина диэлектрического слоя, см; $n$ - число обкладок.

Формула (3.77) не учитывает дополнительной ёмкости, образующейся по контуру обкладок из-за краевого эффекта. Однако на точность расчетов это почти не влияет, так как краевая ёмкость очень мала (составляет доли пикофарады).

Конструктивные формы ТПК могут быть различными, однако с точки зрения простоты расчётов и удобства размещения ТПК на подложке наиболее приемлемой является прямоугольная конструкция с размерами верхней обкладки $A$ и $B$. В этом случае коэффициент формы ТПК можно выразить отношением

$$K_ф = A/B.$$

Известно, что погрешность ёмкости ТПК при одних и тех же абсолютных погрешностях выполнения размеров верхней обкладки будет минимальной при $A = B$, т.е. при $K_ф = 1$.

Величина удельной ёмкости $C_0$ определяется из соотношения

$$C_0 = \min \{C_0', C_0'', C_0'''\}. \qquad (3.78)$$

Величины $C'_0$ и $C''_0$ вычисляются по формуле

$$C_0 = 0,0885 \frac{\varepsilon}{d}. \qquad (3.79)$$

При определении $C_0'$ в знаменатель выражения (3.79) необходимо подставить значение $d'$ – минимальную допустимую толщину диэлектрической пленки (см. табл. 3.5),

При определении $C_0''$ в знаменатель выражения (3.79) подставляется величина

$$d'' = \frac{K_з U_p}{E_{пр}}, \qquad (3.80)$$

где $K_з = 2 \ldots 4$ – коэффициент запаса электрической прочности ТПК. Величина $C_0'''$ определяется из условия обеспечения заданной точности ТПК.

Величина $C_0$ ''' и соответственно размеры ТПК должны быть такими, чтобы его ёмкость при заданных технологических погрешностях $\overline{\sigma}_{C_0}$, $\sigma_A$, $\sigma_B$ с заданной вероятностью $Ф_c$ попала в заданный допуск $\pm\overline{\delta}_C$.

При точностных расчётах ТПК, если задана вероятность выхода (изготовления) $Ф_c$ годного ТПК, допустимое значение среднеквадратичного отклонения ёмкости при нормальном законе распределения погрешностей определяется по формуле

$$\overline{\sigma}_{C_{доп}} = \frac{\overline{\delta}_C}{Z\sqrt{2}}, \qquad (3.81)$$

где $Z$ – значение аргумента интеграла вероятностей (см. табл. 3.3);

$\overline{\delta}_C$ – технологический допуск, определяемый из выражения (3.75).

Учитывая, что $C = C_0 S$, значение $\overline{\sigma}_C$, получаемое в результате изготовления ТПК, можно определить по формуле

$$\overline{\sigma}_C^2 = \overline{\sigma}_{C_0}^2 + \overline{\sigma}_S^2, \qquad (3.82)$$

где $\overline{\sigma}_C$ – дисперсия значений удельной ёмкости ТПК, определяемая экспериментально при отладке техпроцесса изготовления ТПК, она зависит от точности воспроизведения толщины и свойств диэлектрической плёнки ТПК; $\overline{\sigma}_S^2$ – дисперсия значения площади ТПК, зависящая от точности выполнения размеров ТПК.

Так как площадь ТПК $S = AB$, а размеры $A$ и $B$ верхней обкладки ТПК получаются в едином технологическом процессе, в расчетах $\overline{\sigma}_S$ на основе теории вероятностей необходимо учитывать коэффициент корреляции между отклонениями размеров $A$ и $B$. Поэтому [7]

$$\overline{\sigma}_S^2 = \left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_B}{B}\right)^2 + 2r_{AB}\left(\frac{\sigma_A}{A}\right)\left(\frac{\sigma_B}{B}\right), \qquad (3.83)$$

где $r_{AB}$ - коэффициент корреляции между отклонениями размеров $A$ и B; $\sigma_A$, $\sigma_B$ – абсолютные среднеквадратические отклонения размеров верхней обкладки.

Так как эти отклонения получаются в процессе одной технологической операции, можно считать $\sigma_A = \sigma_B = \sigma_l$.

Получаемая в процессе изготовления величина $\overline{\sigma}_C$ не должна превышать величину $\overline{\sigma}_{C_{доп}}$, определяемую по формуле (3.81), т.е. должно выполняться неравенство $\overline{\sigma}_C \le \overline{\sigma}_{C_{доп}}$. Следовательно, с учетом соотношения (3.82), получим

$$\overline{\sigma}_S^2 = \overline{\sigma}_{C_{доп}}^2 - \overline{\sigma}_{C_0}^2 \ . \qquad (3.84)$$

Подставляя полученное из (3.84) значение $\overline{\sigma}_S^2$ в (3.83) и заменяя величину $B$ на $B = A/K_ф$, получим уравнение с одним неизвестным $A$. Значения $\overline{\sigma}_{C_0}$, $\sigma_A$, $\sigma_B$ заданы или выбираются из табл. 3.5. Решение уравнения (3.83) относительно $A$ позволяет найти один из размеров верхней обкладки ТПК

$$A = \frac{\sigma_l \sqrt{1 + K_ф\left(K_ф + 2r_{AB}\right)}}{\sqrt{\overline{\sigma}_{C_{доп}}^2 - \sigma_{C_0}^2}} \ ; \qquad (3.85)$$

при $K_ф = 1$ (квадратная форма верхней обкладки) получим

$$A = \frac{\sigma_l \sqrt{2\left(1 + r_{AB}\right)}}{\sqrt{\overline{\sigma}_{C_{доп}}^2 - \overline{\sigma}_{C_0}^2}} . \qquad (3.86)$$

Второй размер верхней обкладки определяем как $B = A/K_ф$.

Площадь ТПК, при которой обеспечивается заданная точность:

$$S = AB, \qquad (3.87)$$

а величина удельной емкости $C_0''' = C / S$.

Подставив величину $C_0'''$ в (3.78), получим значение $C_0$, а из соотношения $S = \dfrac{C}{C_0}$ – площадь ТПК. Задаваясь одним из размеров верхней обкладки ($A$ или $B$) из (3.87) найдем второй размер.

Если в схеме несколько ТПК, то $C_0$ определяется для каждого из них отдельно, затем выбирается наименьшее значение. Оно и принимается за значение $C_0$ для всех ТПК.

Размеры нижней обкладки ТПК со всех сторон больше размеров верхней обкладки на 0,2 мм. Размеры диэлектрика со всех сторон больше размеров нижней обкладки на 0,2 мм.

## Расчет ТПК методом максимум-минимум

***Исходными данными*** для расчета прямоугольных пленочных конденсаторов (рис. 3.12, а) являются:

***Выбранное ориентировочное значение*** $C_0$ ***и характеристики материала диэлектрической пленки:*** $\alpha_C$, $\gamma_{Cст}$ $(\overline{\delta}_{Cст})$.

***Электрические характеристики:***

$C$ – номинал емкости ТПК, пФ;

$Up$ – рабочее напряжение ТПК, В;

$\gamma_{C\,доп}$ – допустимое относительное отклонение номинала ТПК, %.

***Технологические характеристики:***

$\gamma_{C\,0}$ – относительное отклонение удельной емкости, %;

$\Delta_A$, $\Delta_B$ – абсолютные отклонения размеров верхней обкладки ТПК, мм;

$\Delta_A = 3\,\sigma_A$, $\Delta_B = 3\,\sigma_B$ (см. табл. 3.5); как правило принимают $\Delta_A = \Delta_B$;
$d'$ – минимальная допустимая толщина диэлектрической пленки ТПК, мкм.

***Эксплуатационные характеристики:***

$t_{max}$ – максимальная температура окружающей среды, °С;
$T$ – время эксплуатации, ч;

Среднестатистические значения отклонений технологических параметров пленочных конденсаторов для различных видов технологии приведены в табл. 3.5.

В результате расчетов необходимо определить величину $C_0$ и размеры ТПК $A$ и $B$.

Определение удельной ёмкости ТПК

Величина удельной ёмкости $C_0$ определяется из соотношения

$$C_0 = \min \{ C_0', C_0'', C_0''' \} . \qquad (3.88)$$

Величины $C_0'$ и $C_0''$ вычисляются по формуле

$$C_0 = 0,0885\frac{\varepsilon}{d} . \qquad (3.89)$$

При определении $C_0'$ в знаменатель выражения (3.89) необходимо подставить значение $d'$ – минимальную допустимую толщину диэлектрической пленки (см. табл. 3.5),

При определении $C_0''$ в знаменатель выражения (3.89) подставляется величина

$$d'' = \frac{K_з U_p}{E_{пр}}, \qquad (3.90)$$

где $K_з = 2 \ldots 4$ – коэффициент запаса электрической прочности ТПК.

Величина $C_0'''$ определяется из условия обеспечения заданной точности ТПК. Величина $C_0'''$ и, соответственно, размеры ТПК должны быть такими, чтобы его ёмкость при заданных технологических погрешностях $\gamma_{C\,0}$, $\Delta_A$, $\Delta_B$ попала в заданный допуск $\pm \gamma_{Cдоп}$.

Относительная погрешность ёмкости конденсатора, обусловленная технологическими факторами, а также воздействием температуры окружающей среды, за время эксплуатации микросхемы определяется выражением

$$\gamma_C = \gamma_{C\,0} + \gamma_S + \gamma_{C\,t} + \gamma_{Cст}, \qquad (3.91)$$

где $\gamma_{C\,0}$ – относительная погрешность удельной ёмкости (зависит от воспроизводимости свойств и толщины диэлектрической пленки); обычно определяется экспериментально или задается в пределах ± (5…10) %;

$\gamma_S$ – относительная погрешность активной площади ТПК (площади верхней обкладки), определяется по формуле

$$\gamma_S = \frac{\Delta A(1+Кф)}{\sqrt{Кф S_2}}. \qquad (3.92)$$

Здесь: Кф = А/В – коэффициент формы ТПК, $S_2$ – площадь верхней обкладки.

$\gamma_{C\,t}$ – относительное изменение ёмкости под действием температуры окружающей среды

$$\gamma_{C\,t} = \alpha_C (\,t_{max} - 20\ °C), \qquad (3.93)$$

где $\alpha_C$ – температурный коэффициент ёмкости ТПК, определяемый из табл. 3.4.

$\gamma_{Ccm}$ – относительное изменение ёмкости во времени, определяется из табл. 3.4.

Для обеспечения заданной точности ёмкости необходимо, чтобы выполнялось условие

$$\gamma_C \le \gamma_{C\,доп},$$

т.е. должно выполняться неравенство

$$\gamma_{C\,доп} \ge \gamma_{C\,0} + \gamma_S + \gamma_{C\,t} + \gamma_{Ccm}. \qquad (3.94)$$

Так как все величины неравенства (3.94), кроме $\gamma_S$, известны (заданы или определены), значение $\gamma_S$ можно вычислить по формуле

$$\gamma_S \ge \gamma_{C\,доп} - \gamma_{C\,0} - \gamma_{C\,t} - \gamma_{Ccm}. \qquad (3.95)$$

Из формулы (3.95) видно, что требуемое значение $\gamma_S$ можно обеспечить, задаваясь различными значениями $\Delta_A$, $Кф$ и $S_2$. Так как величина $\Delta_A$, определяемая уровнем технологии, известна, а значение $Кф$ выбирается из соображений размещения ТПК, величина $S_2$ определится по формуле

$$S_2 \ge \left(\frac{\Delta A}{\gamma_S}\right)^2 \frac{(1+Кф)^2}{Кф}. \qquad (3.96)$$

Если в этом выражении выполняется равенство, получаем выражение для определения максимального значения $C_0'''$

$$C_0''' = C\left(\frac{\gamma_S}{\Delta A}\right)^2 \frac{Кф}{(1+Кф)^2}. \qquad (3.97)$$

Анализ выражения (3.95) показывает, что существует оптимальное значение $Кф$, при котором величина $\gamma_S$ минимальна. Это значение равно единице. При $Кф = 1$ выражения (3.96) и (3.97) принимают вид

$$S_2 = \left(\frac{2\Delta A}{\mathrm{Y}_S}\right)^2, \qquad (3.98)$$

$$C_0''' = C\left(\frac{\mathrm{Y}_S}{2\Delta A}\right)^2. \qquad (3.99)$$

Далее следует вернуться к формуле (3.78) $C_0 = \min \{ C_0', C_0'', C_0''' \}$ и найти наименьшее значение $C_0$, которое и принимается за расчетное значение удельной ёмкости. Если в схеме несколько конденсаторов, минимальное значение удельной ёмкости определяется для каждого из них, а уже из этих значений выбирается наименьшее значение $C_0$.

Площадь верхней обкладки ТПК и её размеры определяется по следующим формулам

$$S = \frac{C}{C_0}; \tag{3.100}$$

$$A = \sqrt{K\phi S}; \tag{3.101}$$

$$B = \sqrt{\frac{S}{K\phi}}, \tag{3.102}$$

где $K\phi = A/B$.

Размеры нижней обкладки ТПК со всех сторон больше размеров верхней обкладки на 0,2 мм. Размеры диэлектрика со всех сторон больше размеров нижней обкладки на 0,2 мм.

## Расчет и конструирование ТПК с подгонкой

Точность изготовления плёночных конденсаторов зависит от воспроизводимости свойств и точности выполнения размеров диэлектрических и проводящих плёнок. Разброс толщины диэлектрика $d$ и диэлектрической проницаемости $\varepsilon$ влияет на величину удельной ёмкости $C_0$. В большинстве случаев погрешность $C_0$ составляет $\pm(5\ldots15)\%$.

Часто бывает необходимо изготовить конденсатор с ёмкостью, точность которой превосходит точность, которую может гарантировать современная технология. В таком случае верхнюю обкладку ТПК следует делать с подгоняемыми секциями, удаление каждой из которых даёт возможность уменьшить ёмкость на величину, равную или меньшую указанной точности (рис. 3.13). Отсоединение секции производится механически (например, иглой микроманипулятора), лучом лазера, электронной искрой, факельным разрядом и другими способами. Изменять величину ёмкости ТПК можно только в сторону её уменьшения.

Переходить к расчету ТПК с подгонкой необходимо в том случае, когда при определении размеров обкладки по формулам (3.85) или (3.86) в знаменателе этих выражений получается «ноль» или отрицательное число.

Если конструируется ТПК с плавной подгонкой, то конструкция его может быть такой, как на рис, 3.13, а. Расчетное значение ёмкости такого ТПК определяется по формуле

$$C_{расч} = \frac{C}{1 - 3\overline{\sigma}_C}, \tag{3.103}$$

где $C$ - номинальное значение емкости ТПК; $\bar{\sigma}_C$ - относительное среднеквадратическое отклонение ёмкости ТПК после изготовления.

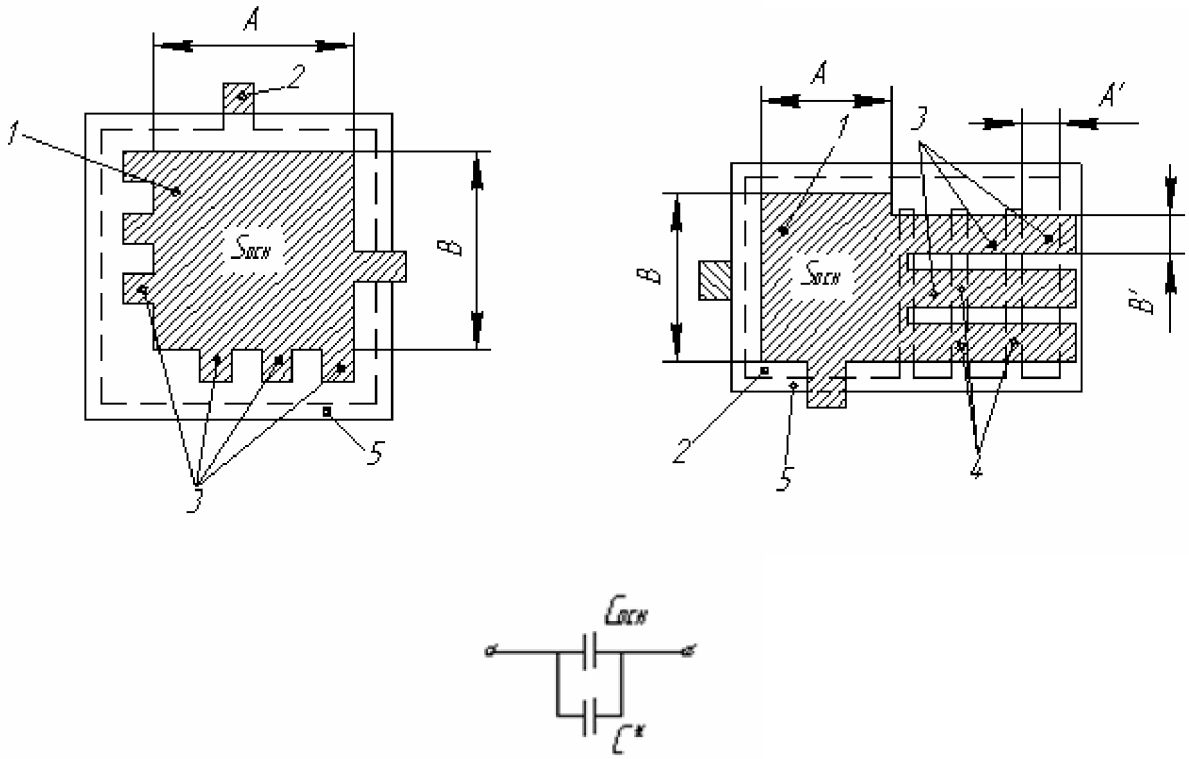



Рисунок 3.13 – Конструкции ТПК: *а* – с плавной подгонкой; *б* – со ступенчатой подгонкой; *в* – эквивалентная схема; 1 – верхние обкладки ТПК; 2 – нижние обкладки ТПК; 3 – подстроечные секции; 4 – места разрыва перемычек; 5 – диэлектрик.

Для выбранного техпроцесса $\bar{\sigma}_C$ находится из соотношений (3.82) и (3.83); при этом предварительно необходимо определить

$$C_0 = \min\{C_0', C_0''\},$$
$$S = C/C_0,$$
$$B = \sqrt{S/K_ф},$$
$$A = BK_ф.$$

Величины $\sigma_A$, $\sigma_B$, $r_{AB}$ и $K_ф$ заданы или выбраны ранее.

При конструировании ТПК со ступенчатой подгонкой (рис. 3.13, б) неподстраиваемую часть ёмкости $C_{осн}$ определяют по формуле

$$C_{осн} = \frac{C}{1-\bar{\sigma}_C}, \qquad (3.104)$$

откуда

$$S_{осн} = \frac{C_{осн}}{C_o}, \quad B = \sqrt{S_{осн}/K_ф}, \quad A = BK_ф.$$

Величина ёмкости подстраиваемой части ТПК, состоящей из секций, определяется из выражения

$$C^* = C\frac{6\overline{\sigma}_C}{1-9\overline{\sigma}_C^2}, \qquad (3.105)$$

а необходимое число подстроечных секций из выражения

$$n = \frac{6\overline{\sigma}_C}{\overline{\delta}_C(1-3\overline{\sigma}_C)}. \qquad (3.106)$$

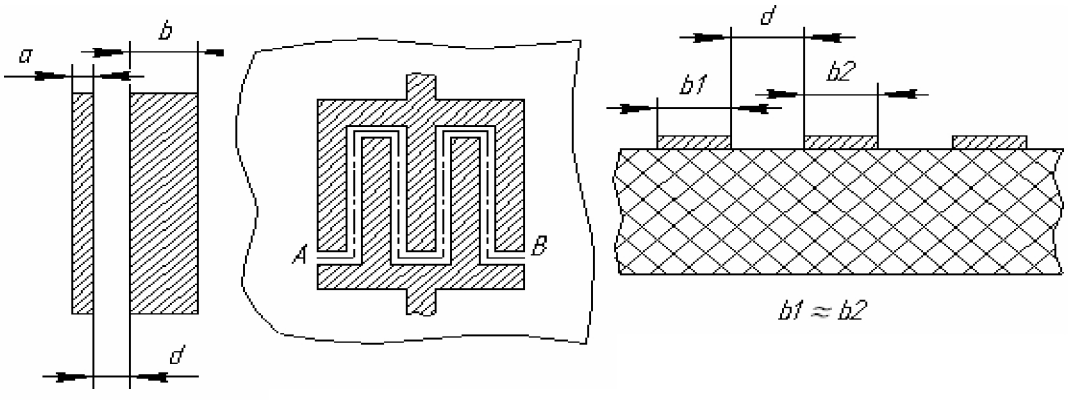
Площадь одной подстроечной секции вычисляется по формуле

$$S_c = \frac{C^*}{nC_o}. \qquad (3.107)$$

Размеры $A'$ и $B'$ определяются конструктором ( $A'B' = S_c$). Размеры $A'$ и $B'$ не рекомендуется брать меньше 0,2 мм. Если это условие не удается выполнить, следует использовать ТПК с плавной подгонкой (рис. 3.13, а).

Расчёт компланарного конденсатора

Компланарные (гребенчатые) конденсаторы (рис. 3.14) имеют малую величину ёмкости. Диэлектриком для них служат подложка и воздух (или защитное покрытие). Обкладки этих конденсаторов расположены на подложке в одной плоскости и разделены небольшим зазором. Гребенчатые ТПК очень стабильны, позволяют получать малые значения ёмкости с высокой точностью, имеют высокую добротность, выдерживают напряжения в несколько десятков вольт, имеют малые потери, технология их изготовления очень проста: обе обкладки получают за одно напыление, а диэлектрик вообще распылять не нужно. Величину ёмкости компланарных ТПК легко подгонять.




*а*) *б*)

Рисунок 3.14 – Конструкции компланарных конденсаторов: *а* – в виде параллельных полосок; *б* – в виде гребенки.

К недостаткам компланарных конденсаторов можно отнести малые значения ёмкости, большую площадь, влияние на величину ёмкости близлежащих металлических поверхностей.

Компланарные конденсаторы используются в колебательных $LC$ - контурах на основе плоских спиральных катушек индуктивности для частот более 50 МГц и в интегральных микросхемах СВЧ - диапазона. Часть электрического поля конденсатора проходит по подложке, часть по воздуху или защитному слою.

Ёмкость компланарного конденсатора рассчитывается [2] по формуле

$$C=\beta\cdot\varepsilon_p\cdot l, \qquad (3.108)$$

где $\varepsilon_p$ – расчетное значение диэлектрической проницаемости:

$\varepsilon_P=\dfrac{1+\varepsilon_П}{2}$ – для незащищенных ТПК, (3.109)

$\varepsilon_P=\dfrac{\varepsilon_д+\varepsilon_П}{2}$ – для защищенных ТПК; (3.109, а)

$\varepsilon_П$ – $\varepsilon$ подложки;

$\varepsilon_з$ – $\varepsilon$ диэлектрического защитного слоя;

$l$ – длина совместной границы обкладок;

$\beta$ – коэффициент, зависящий от соотношения размеров $a$, $b$ и $d$.

Коэффициент $\beta$ при $d<<a$ и $d<<b$ определяется из выражения

$$\beta=1{,}3\cdot10^{-2}\lg\left[16\frac{\left(1+\dfrac{a}{d}\right)\left(1+\dfrac{b}{d}\right)}{1+\dfrac{a}{d}+\dfrac{b}{d}}\right]. \qquad (3.110)$$

Произведение коэффициентов $\beta$ и $\varepsilon_p$ составляет погонную емкость конденсатора, показанного на рис. 3.14, а: $C_l=\beta\,\varepsilon_p$.

Полная емкость $C=C_l l$.

При расчете конструкции компланарных конденсаторов размеры $a$ и $b$ следует брать в 3…5 раз больше зазора $d$, который, в свою очередь, определяется разрешающей способностью технологического процесса изготовления. Разработка конструкции конденсатора начинается с выбора $d$, $a$ и $b$; затем определяются значения $\beta$, $\varepsilon_p$, $C_l$ и длина совместной границы обкладок $l$. Удельная емкость компланарных конденсаторов составляет 1…3 пФ/см$^2$. Если длина $l$ окажется значительной, компланарный конденсатор выполняется в виде конструкции, показанной на рис, 3.14, б. Размер $B_c$ определяется из конструктивных соображений, размер $A_c$ – по формуле

$$A_c=\frac{l-B_c}{n-1},$$

где $n$ (число «пальцев» ТПК) определяется из выражения

$$n = \frac{B_c + d}{2a + d}.$$

Определить размеры компланарного ТПК можно также, используя графики (рис. 3.15).

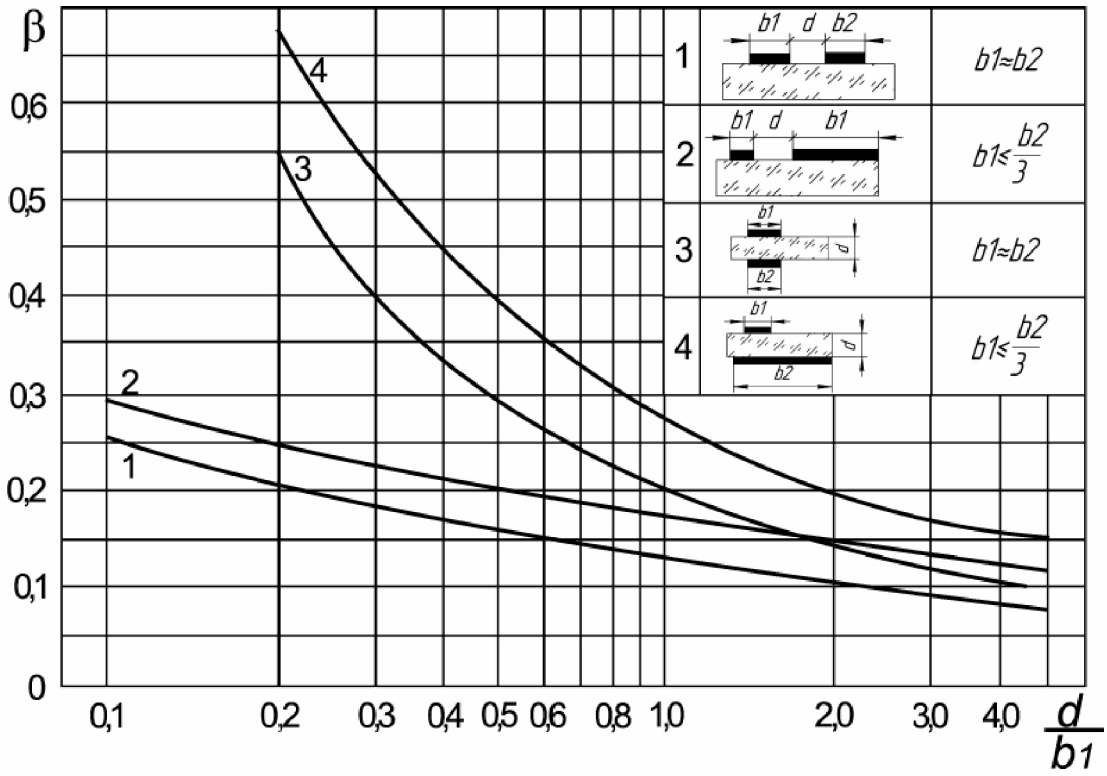



Рисунок 3.15 – Зависимость коэффициента $\beta$ от расположения элементов гребенчатого конденсатора.

По графику, в зависимости от выбранных размеров $b_1$, $b_2$ и $d$, определяется величина $\beta$, затем по формуле (3.109) величина $\varepsilon_p$, и по формуле (3.108) длина совместной линии $l$. Длину «пальцев» определяет конструктор в зависимости от имеющегося на подложке места для расположения ТПК.

## Добротность ТПК

О качестве работы ТПК на рабочей частоте можно судить по величине угла диэлектрических потерь $tg\delta$ или обратной величине, называемой добротностью $Q$:

$$Q = \frac{1}{tg\delta}. \qquad (3.111)$$

Потери энергии в ТПК складываются из следующих составляющих:

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

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

В связи с этим эквивалентную схему ТПК можно представить в виде последовательного соединения ёмкости без потерь $C$, эквивалентного сопротивления диэлектрических потерь $r_{эд}$ и эквивалентного сопротивления потерь в металлических элементах конденсатора $r_{эм}$ (рис.3.16).

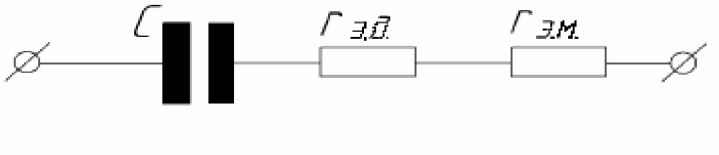



Рисунок 3.16 – Эквивалентная схема ТПК.

Тангенс угла потерь можно представить в виде суммы:

$$tg\delta = tg\delta_д + tg\delta_м, \qquad (3.112)$$

где $tg\delta_Д$ – тангенс угла потерь в диэлектрических материалах; $tg\delta_м$ – тангенс угла потерь в металлических элементах ТПК.

Значения $tg\delta_д$ для некоторых диэлектрических материалов приведены в табл. 3.4. Величина $tg\delta_м$ может быть вычислена по формуле

$$tg\delta_м = \omega C r_{э.м},$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота;

$f$ – рабочая частота, Гц;

$C$ – ёмкость конденсатора, Ф;

$r_{э.м}$ – эквивалентное сопротивление потерь переменному току в обкладках и выводах

$$r_{э.м} = r_{э.обкл} + r_{э.выв}.$$

Сопротивление выводов ТПК определяется выражением

$$r_{э.выв.} = R_{□выв} K_{ф.выв},$$

а эквивалентное сопротивление обкладок ТПК переменному току можно определить как

$$r_{э.обкл} = \frac{2}{3} R,$$

где $R$ - сопротивление одной обкладки конденсатора постоянному току, Ом, вычисляемое по формуле

$$R = R_{обкл.} K_{ф.\,обкл}.$$

Формула (3.112) справедлива, если выполняется условие

$$\omega RC \le 0{,}04,$$

при котором распределение тока в обкладках подчинено линейному закону.

После преобразований формула (3.111) может быть представлена в виде

$$Q = 1 / (tg\delta_Д + \omega C R_{\square\ обкл} \left( \frac{2}{3} K_{ф.обкл} + K_{ф.выв} \right)). \qquad (3.113)$$

При выводе формулы предполагалось, что обкладки и выводы ТПК изготовлены из одного материала, по одной технологии и имеют одинаковую толщину, т.е. выполняется условие

$$R_{\square\ обкл} = R_{\square\ выв}.$$

В диапазоне частот 10 … 150 МГц для С = 50 … 1000 пФ с диэлектрическим слоем из SiO существует эмпирическая формула:

$$Q = \frac{1{,}2 \cdot 10^5}{f \cdot C}; \qquad (3.114)$$

где $f$ – рабочая частота, Гц; $C$ – ёмкость, пФ.

Формула годна для $C_0$ = 50…100 пФ/мм$^2$ и для $R_{\square\ обкл} \leq 0{,}1$ Ом/квадрат, что соответствует обкладкам из алюминия толщиной 0,3 … 0,5 мкм.

## 3.5. Конструирование и расчет пленочных катушек индуктивности (ТПИ)

### Конструктивно-технологические особенности

Изготовление катушек индуктивности для гибридных пленочных микросхем представляет большие трудности. При изготовлении плёночных индуктивностей трудно удовлетворить одновременно нескольким противоречивым требованиям: получить малые размеры, высокую добротность и большое значение индуктивности. Наибольшее распространение в мегагерцовом диапазоне частот получили плоские спиральные катушки (рис. 3.17). Ограниченные размеры подложек пленочных микросхем и конечная ширина проводящей полоски не позволяют изготовить 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 техпроцесс их изготовления.

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

Плёночные индуктивности выполняют в виде одновитковой или многовитковой однослойной или многослойной спирали.

Плёночные катушки должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Обеспечивать получение заданного значения L.
2. Обладать высокой добротностью.
3. Иметь высокую стабильность параметров.

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.
3. Поперечные размеры проводника катушки слабо влияют на её индуктивность, но существенно сказываются на добротности.
4. При одинаковых габаритных размерах индуктивность квадратной катушки примерно на 12% больше, чем круглой, а добротность на 10% ниже.
5. При условии, что связь между витками достаточно сильная, индуктивность катушки возрастает пропорционально квадрату числа витков.

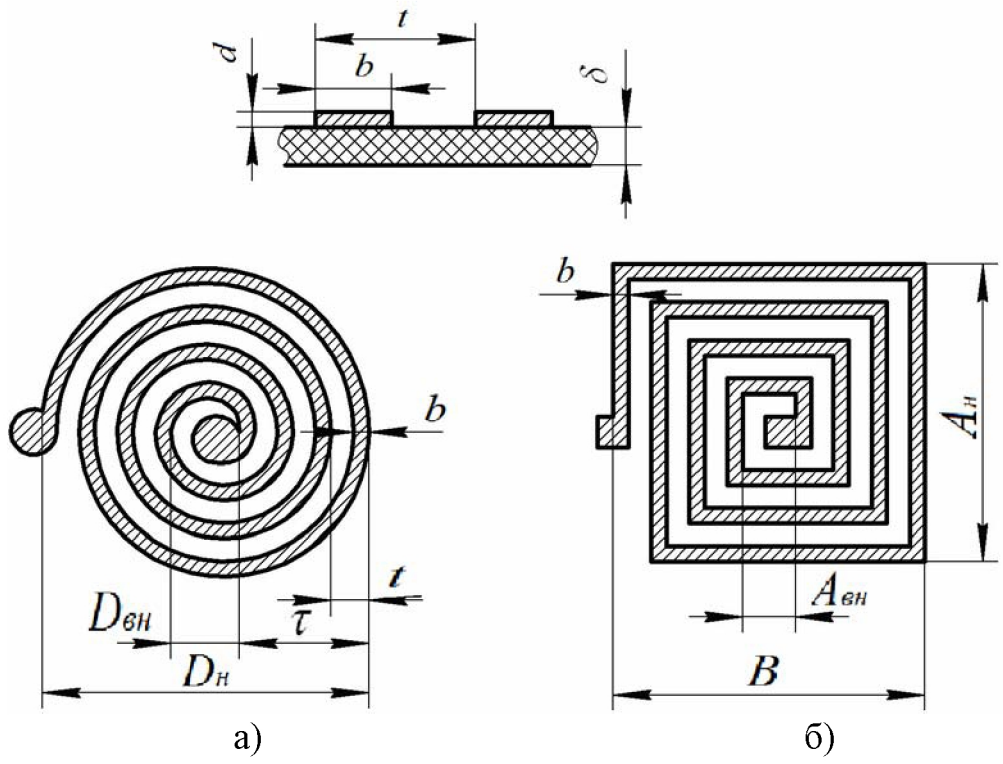



Рисунок 3.17 – Пленочные катушки индуктивности: а) круглая спираль; б) квадратная спираль.

Рассмотрим основные параметры, характеризующие свойства катушек индуктивности:

a) **Индуктивность.** Требуемая величина индуктивности определяется назначением катушки. Плёночные катушки индуктивности изготавливают с номиналами от сотых долей до десятков микрогенри (мкГн).

b) **Добротность. О**пределяет резонансные свойства ТПИ и КПД контура, в котором она применяется. В зависимости от диапазона рабочих частот и конструктивных факторов (формы, размеров) добротность плёночных катушек составляет 20 … 120.

c) **Собственная ёмкость.** Плёночные индуктивности обладают собственной ёмкостью между витками и ёмкостью этих витков на корпус схемы. Наличие собственной ёмкости изменяет эквивалентное сопротивление катушки, снижает добротность и стабильность. Особенно велика собственная ёмкость у многослойных спиральных катушек и у катушек, напылённых на основание (подложку) с высоким значением ε.

d) **Стабильность.** Характеризуется изменением параметров катушки под воздействием внешней среды. Изменение индуктивности при воздействии температуры характеризуется величиной температурного коэффициента индуктивности (ТКИ) – $\alpha_L$:

$$\alpha_L = \frac{\Delta L}{L \cdot \Delta t} \qquad (3.115)$$

и коэффициентом температурной нестабильности (ТКНИ) – $\beta_L$:

$$\beta_L = \frac{L_2 - L_1}{L_1},$$

где $L_1$ – первоначальное значение индуктивности,

$L_2$ – значение индуктивности после циклического изменения температуры.

Величина ТКИ определяется конструкцией катушки и материалом подложки. ТКНИ зависит от адгезии витков плоской катушки к подложке и от старения (искусственного) материала подложки и проводящей плёнки.

С целью увеличения индуктивности плоских катушек в некоторых случаях на подложку предварительно наносят ферритовый слой, а затем витки катушки. Иногда подложки полностью изготавливаются из феррита. Это значительно лучше, так как тонкие ферритовые плёнки могут быть в режиме насыщения.

Пример:

1. Индуктивность спирали без феррита……0,67 мкГн
2. Индуктивность спирали на феррите……1,40 мкГн
3. С верхним слоем феррита толщиной 200мкм ……...2,80 мкГн
4. С толстой (1мм) ферритовой пластинкой сверху ....34,00 мкГн.

Рассмотрим влияние различных конструктивных факторов на параметры плёночной катушки индуктивности:

**Шаг спирали $\tau$.** Чем меньше $\tau$, тем больше индуктивность. Однако существуют технологические ограничения: не следует применять слишком мелкий шаг, может быть замыкание витков.

**Ширина витков $b$.** При уменьшении $b$ снижается величина добротности $Q$ вследствие уменьшения сечения витков катушки.

**Толщина пленки $d$.** На величине индуктивности толщина пленки сказывается мало; в основном она влияет на величину потерь, а следовательно, на добротность катушки $Q$. При уменьшении толщины пленки величина $Q$ уменьшается. Обычно $d$ = 1 … 50 мкм.

**Число витков $N$.** При увеличении $N$ индуктивность резко возрастает (так как каждый последующий виток охватывает большую площадь, чем предыдущий).

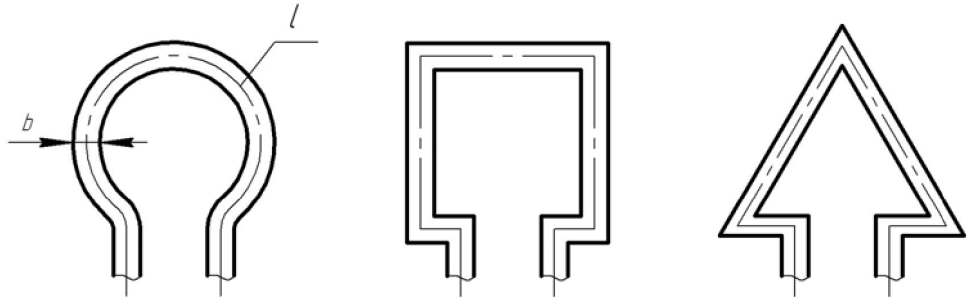
**Наружный диаметр $Dн$ .** При одном и том же числе витков индуктивность катушки тем больше, чем больше её наружный диаметр.

**Форма витков.** При одинаковых габаритах и ширине витка длина витков у прямоугольной катушки на 12% больше, следовательно, больше и индуктивность. Добротность у прямоугольной катушки примерно на 10% меньше, чем у круглой (так как увеличивается длина витка, а следовательно, и потери; кроме того, сопротивление витков увеличивается из-за концентрации тока во внутренних изгибах витков).

**Материал подложки.** Величина индуктивности определяется магнитной проницаемостью подложки $\mu$, а добротность – величиной тангенса угла диэлектрических потерь – $tg\,\delta$. Межвитковая ёмкость будет зависеть от величины диэлектрической проницаемости $\varepsilon$.

## Расчет плёночных катушек индуктивности

Одновитковые катушки




*а)* *б)* *в)*

Рисунок – 3.18 – Одновитковые катушки индуктивности.

Индуктивность одновитковой петли (рис. 3.18,а) рассчитывается по формуле:

$$L = 2l(\ln A - B)\cdot 10^{-3}\ \text{[мкГн]}, \qquad (3.116)$$

где $$A = \frac{2l}{b+d};$$

$b$ – ширина проводника;
$d$ – толщина проводника;
$l$ – средний периметр петли;
$p$ – периметр поперечного сечения проводника.

B – коэффициент, зависящий от формы петли:

B = 2,451 – для круга;
B = 2,853 – для квадрата;
B = 3,197 – для равностороннего треугольника.

Формула справедлива при l >> p.

Индуктивность плоской спиральной катушки с круглыми витками может быть определена по формуле:

$$L = 21{,}5 \cdot R_{CP} \cdot N^{5/3} \cdot \ln\frac{8R_{CP}}{\tau} \cdot 10^{-3} \text{ [мкГн]}, \qquad (3.117)$$

где N число витков, $R_{CP} = \frac{D_H + D_{BH}}{4}$ – средний радиус спирали,

$D_H$ и $D_{BH}$ – наружный и внутренний диаметры катушки соответственно,

$\tau = \frac{Dн - Dвв}{2}$ – ширина намотки.

Индуктивность плоской спирали с квадратными витками определяется по формуле:

$$L = 24{,}2 \cdot A_{CP} \cdot N^{5/3} \cdot \ln\frac{8A_{CP}}{\tau} \cdot 10^{-3} \text{ [мкГн]}, \qquad (3.118)$$

где $A_{CP} = \frac{A_H + A_{BH}}{2}$; $\tau = \frac{A_H - A_{BH}}{2}$,

$A_H$ и $A_{BH}$ – наружный и внутренний размеры квадратной катушки соответственно. Все размеры – в сантиметрах.

Добротность плёночной катушки индуктивности без учёта влияния скин–эффекта определяется по формуле:

$$Q = \frac{16 \cdot f \cdot D_{BH} \cdot b \cdot K^2 \cdot d}{\rho \cdot t \cdot [(\frac{D_H}{D_{BH}})^2 - 1]} \cdot 10^{-4}, \qquad (3.119)$$

где $f$ – рабочая частота (мГц),
$b$ – ширина витка (мм),
$D_H$, $D_{BH}$ – внутренний и наружный диаметры (мм),
$d$ – толщина витков (мкм),
$\rho$ – удельное сопротивление материала витков ($Ом \cdot см$).
Значение $\rho$ для некоторых материалов:

(Ag – $1{,}7 \cdot 10^{-6}$ $Ом \cdot см$ ; Cu – $2{,}1 \cdot 10^{-6}$ $Ом \cdot см$; Al – $3{,}2 \cdot 10^{-6}$ $Ом \cdot см$).

$K$ – коэффициент, зависящий от отношения $\frac{D_H}{D_{BH}}$, определяется по графику рис. 3.20.

Исходными данными для расчета конструктивных параметров плоской спиральной катушки с круглыми витками являются:

величина индуктивности $L$;

величина добротности $Q$;

рабочая частота $f$,

ориентировочные размеры подложки.

По ним выбираются:

форма катушки, ее наружный размер $D_H$;

материал проводника катушки;

материал подложки;

способ изготовления катушки;

способ получения фотооригинала.

В результате расчетов необходимо определить:

шаг спирали $\tau$;

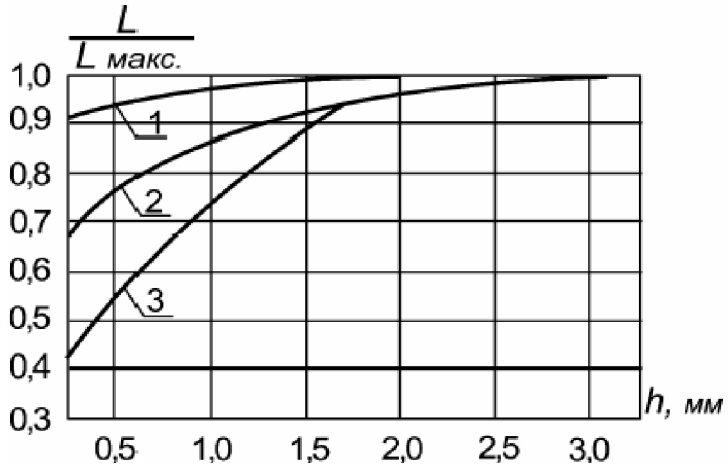
ширину витка $b$;

толщину витка $d$;

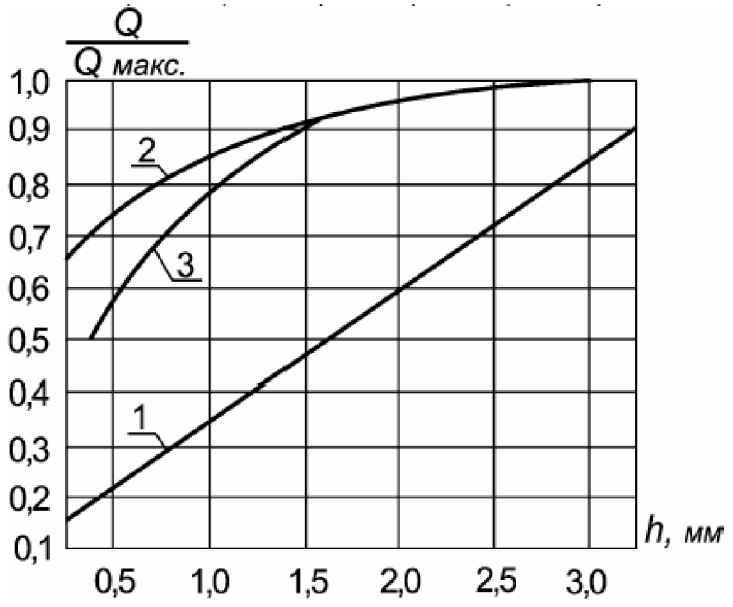
внутренний диаметр катушки $D_{BH}$;

число витков $N$.

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




а)




б)

Рисунок 3.19 – Влияние плоских металлических поверхностей на индуктивность (а) и добротность (б): 1 – алюминиевая пленка на частотах 20... 100 МГц; 2, 3 – латунный лист на частотах 20 и 100 МГц.

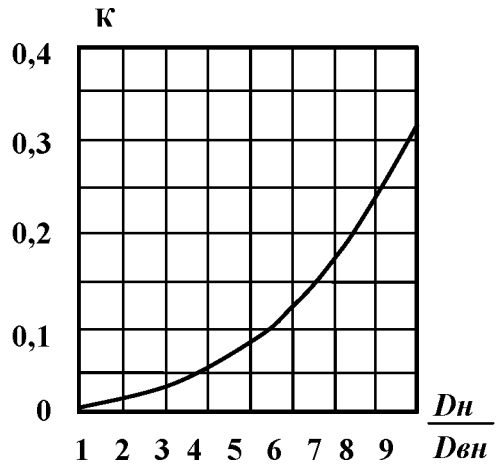



Рисунок 3.20 – Зависимость коэффициента $K$ от размеров катушки индуктивности.

Зависимость индуктивности и добротности плоских круглых катушек, расположенных на расстоянии $h$ от металлической поверхности, приведена на рис. 3.19, где $L_{max}$ и $Q_{max}$ величины индуктивности и добротности при $h \to \infty$, $L$ и $Q$ – величины индуктивности и добротности при конечном значении $h$.

Расчёт ведётся в следующей последовательности:

1. Учитывается влияние близлежащих металлических поверхностей (крышки или основания корпуса ИМС). Исходя из расстояния $h$ от катушки до металлической поверхности, по графикам рис. 3.19 определяют отношения $a_1 = L/L_{\text{макс}}$ и $a_2 = Q/Q_{\text{макс.}}$. Расчетные значения индуктивности и добротно-

сти будут равны: $L_{расч} = L/a_1$, $Q_{расч} = Q/a_2$, где $L$ и $Q$ – требуемые (заданные) значения этих параметров.

2. Исходя из допустимых габаритных размеров катушки индуктивности выбираются внутренний и внешний диаметры спирали. Из технологических соображений $D_{ВН}$ не следует брать меньше 1 мм.

3. Определяется шаг спирали по формуле

$$t = K \cdot \frac{D_{ВН} \cdot \sqrt{D_{ВН}}}{\sqrt{L}_{расч}}, \text{ (мм)} \qquad (3.120)$$

где $D$ измеряется в мм, $L$ – в мкГн; $K$ – коэффициент, зависящий от отношения $\frac{D_H}{D_{ВН}}$, определяется по графику рис. 3.20.

4. Из условия $d > (2\ldots4)\, d_c$ определяется толщина проводника катушки $d$, здесь $d_c$ – толщина слоя скин-эффекта (мкм), рассчитываемая по формуле

$$d_c = k_1\sqrt{\lambda},$$

где $k_1$ – коэффициент, учитывающий материал пленки: для серебра $k_1 = 0{,}37$, для меди $k_1 = 0{,}39$, для алюминия $k_1 = 0{,}51$; $\lambda$ – длина волны, см.

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

$$b = \frac{\rho \cdot t[(\frac{D_H}{D_{ВН}})^2 - 1] \cdot 10^4 \cdot Q}{16 \cdot f \cdot D_{ВН} \cdot K^2 \cdot d}, \qquad (3.121)$$

где $b$ – ширина витка, мм; $\rho$ – удельное объёмное электрическое сопротивление материала проводника, $Ом \cdot см$; $t$ – шаг спирали, мм; $D_1$, $D_2$ – внутренний и внешний размеры катушки, мм; $f$ – частота, МГц; $k$ – коэффициент, определяемый из графика рис. 3.20; $d$ – толщина проводника катушки, мкм.

Так как формула (3.121) выведена без учета влияния скин-эффекта, ширину витка, рассчитанную по этой формуле, следует увеличить и выбрать равной (1,5...2) $b$ для $d = (2\ldots4)\, d_c$. Если новое значение ширины витка $b'$ получится больше значения $t$, следует, оставляя прежним внутренний размер спирали $D_{ВН}$ и задаваясь шагом спирали $t > b'$, из формулы (3.120) определить внешний размер спирали $D_2$, при котором можно получить заданную индуктивность, а затем по формуле (3.121) снова определить ширину витков $b$.

6. Определяется число витков по формуле

$$N = \frac{D_H - D_{ВН}}{2t},$$

где $t$ – шаг спирали.

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

$$D_2^{`} = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\sqrt{AB},$$

здесь $A$ и $B$ – габаритные размеры прямоугольной спиральной катушки.

***Уменьшение магнитной связи между колебательными контурами на плоских катушках индуктивности.*** При конструировании РЭС катушки индуктивности используются в качестве частотно-избирательных фильтров, линий задержки различного рода сигналов, а также в цепях коррекции. В РЭС на дискретных элементах катушки индуктивности, как правило, экранируются от влияния полей других элементов и катушек индуктивности.

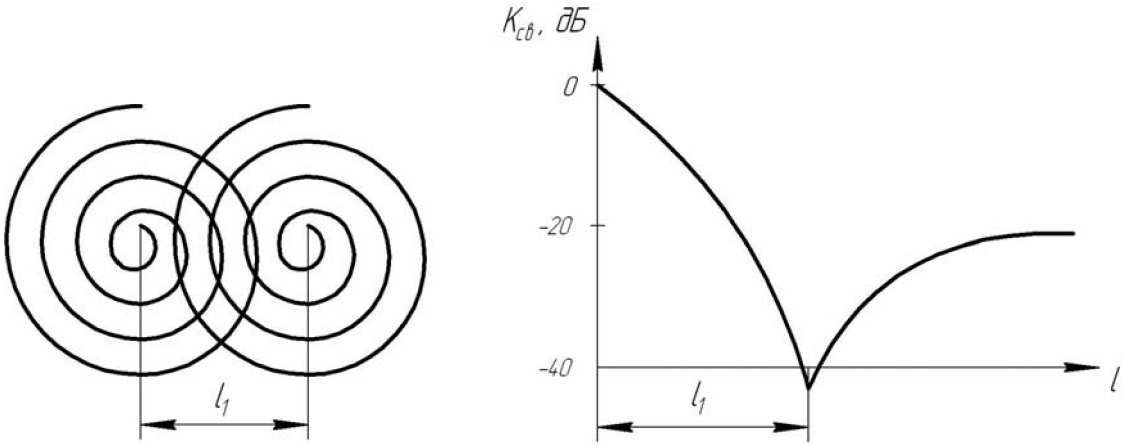



Рисунок 3.21 – Связанные катушки индуктивности.

Применение экранов для уменьшения связи между катушками индуктивности, используемыми в гибридных интегральных микросхемах, приводит к значительному увеличению габаритов и веса интегральных микросхем, что практически неприемлемо.

Исследования показали, что возможно построение системы плоских катушек индуктивности с минимальной связью между ними без применения экранов. Рассмотрим две плоские катушки индуктивности, расположенные так, как показано на рис. 3.21. Если катушки индуктивности расположены параллельно на малом расстоянии между их плоскостями, их магнитные силовые линии взаимодействуют таким образом, что суммарный магнитный поток равен нулю. Иными словами, при определенном расстоянии между центрами катушек индуктивности $l_1$ коэффициент взаимоиндукции (взаимосвязи) между катушками индуктивности равен нулю.

Эффект «нулевой» связи между катушками находит широкое применение при конструировании избирательных устройств на пленочных LC - элементах,

позволяя исключить экраны и обусловленные ими потери добротности и индуктивности.

## Контрольные вопросы

1. Какие функции выполняют подложки ГИМС?
2. Назовите материалы и основные характеристики материалов подложек. Сформулируйте требования к материалам подложек.
3. Назовите наиболее распространенные материалы для изготовления резистивных пленок.
4. Сформулируйте требования к резистивным материалам.
5. Что такое «керметы»?
6. Сформулируйте требования к материалам проводящих пленок.
7. Назовите наиболее распространенные материалы для изготовления диэлектрических пленок.
8. Сформулируйте требования к материалам диэлектрических пленок.
9. Назовите материалы для защитных покрытий в ИМС?
10. Нарисуйте наиболее распространенные конструкции тонкопленочных резисторов и объясните целесообразность их применения в конкретных ситуациях.
11. Что такое «сопротивление квадрата» резистивной пленки?
12. Почему рекомендуется для всех номиналов резисторов, располагаемых на подложке, применять плёнки с одинаковым удельным поверхностным сопротивлением?
13. Какова точность воспроизведения размеров, $R_{\square}$, и $C_0$ тонких пленок?
14. Что такое «коэффициент формы» резистора?
15. Какова зависимость $R_{\square}$ и ТКС резистивной пленки от толщины?
16. Из каких соображений выбирается величина $R_{\square}$?
17. Какие факторы влияют на конфигурацию и размеры ТПР?
18. Что такое съемные и контактные маски, в каких случаях их используют?
19. Чем отличается вероятностный метод расчета ТПР от метода «максимум-минимум»?
20. Какова последовательность расчета тонкопленочных резисторов.
21. Какие исходные данные необходимы для расчета ТПР?
22. Из каких соображений выбирается ширина ТПР?
23. Что такое «суженный» (технологический) допуск?
24. При каком условии необходимо рассчитывать ТПР с подгонкой?
25. Как при расчете ТПР учитывается сопротивление контактных переходов?
26. Чем определяются частотные свойства ТПР?
27. Нарисуйте конструктивные формы подгоняемых ТПР и объясните области их применения.
28. Нарисуйте конструктивные формы тонкопленочных конденсаторов и определите области их применения.
29. Какие исходные данные необходимы для расчета ТПК?

30. Из каких соображений выбирается удельная емкость ТПК?
31. Нарисуйте конструктивные формы подгоняемых ТПК и объясните области их применения.
32. От каких параметров зависит добротность ТПК?
33. Поясните, в каком частотном диапазоне используются плоские пленочные спиральные катушки индуктивности.
34. Изобразите конструктивные формы тонкопленочных индуктивностей.
35. Какие факторы влияют на индуктивность, добротность, собственную ёмкость и стабильность ТПИ?
36. Перечислите исходные данные, необходимые для расчета ТПИ.

# Глава 4. Разработка ГИС и оформление конструкторской и технологической документации

## 4.1. Проектирование топологии и конструкции ГИМС

Разработку интегральных микросхем выполняются в несколько этапов:

1. Составление технологических требований на микросхему на основе технического задания (ТЗ) заказчика и общих технических требований (ОТТ) на микросхемы.
2. Анализ принципиальной электрической схемы устройства, её элементов, выбор принципа компоновки (функциональный или интегрально-групповой), выбор структуры технологического процесса.
3. Проектирование элементов ГИС, разработка топологии ГИС и БГИС, выбор типоразмеров корпусов.
4. Разработка частных технических условий (ЧТУ) на микросхемы, разработка конструкторской и технологической документации.
5. Изготовление экспериментальных образцов.
6. Проведение полного цикла испытаний ИМС на основе частных технических условий на микросхемы.
7. Отбраковка и коррекция: частных технических условий, конструкторской и технологической документации по результатам испытаний.

Анализ технического задания

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

Техническое задание на разработку микросхемы содержит основные сведения о характеристиках проектируемой микросхемы, такие как схема электрическая принципиальная, номиналы пассивных элементов и допуски на них, признаки воздействующего сигнала: частота, амплитуда, длительность, форма сигнала, уровень помех и т.д.; характеристики навесных компонентов, напряжения источников питания, рабочие напряжения конденсаторов, мощности, рассеиваемые резисторами.

В некоторых случаях в техническом задании указывают тип рекомендуемых корпусов для разрабатываемой микросхемы, условия эксплуатации и другие данные.

Схема электрическая принципиальная позволяет судить о сложности коммутации между отдельными элементами, числе контактных площадок для внешних соединений и навесных компонентов, возможном размещении контактных площадок. Функциональные узлы с большим числом входов и выходов (например, устройства дискретной вычислительной техники) обычно размещают на подложках с двухсторонним расположением контактных площадок по широкой стороне подложки. Аналоговые функциональные узлы (например,

многокаскадные усилители) часто имеют малое число входов и выходов. Склонность таких устройств к самовозбуждению заставляет располагать входные и выходные контактные площадки с разных сторон подложки.

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

Наличие в схеме резисторов и конденсаторов с большим диапазоном номиналов усложняет технологический процесс изготовления микросхем и ухудшает их характеристики. Для раздельного изготовления пассивных элементов с малыми и большими номиналами приходится применять материалы с различными свойствами, что позволяет получать хорошие конструктивные характеристики микросхем, но в то же время усложняет технологический процесс. Заданная величина допусков на номиналы пассивных элементов влияет на их конструктивные параметры и налагает дополнительные ограничения на характеристики техпроцесса. Увеличение геометрических размеров плёночных элементов в ряде случаев позволяет снизить погрешности воспроизведения номиналов, но размеры микросхемы при этом возрастают.

Особое внимание следует обращать на рабочие напряжения конденсаторов и мощности, рассеиваемые резисторами, так как от их величины зависит выбор материалов резистивных и емкостных элементов, материала и размеров подложки, условий изготовления микросхемы. Иногда изготовление тонкопленочных конденсаторов с большим рабочим напряжением и резисторов с большими рассеиваемыми мощностями оказывается нецелесообразным из-за сложности технологического процесса изготовления и усложнения конструкции микросхемы; в таких случаях следует применять навесные компоненты.

При выборе материала подложки, материалов для изготовления пассивных элементов, выборе конструкции и взаимного расположения элементов необходимо учитывать характеристики воздействующего сигнала. Например, длительность фронта импульса позволяет судить о ширине спектра импульсного сигнала. Материал диэлектрической пленки тонкопленочного конденсатора должен обеспечивать малые потери на верхних частотах спектра. При выполнении этого условия возможно прохождение сигнала по цепям микросхемы без искажения фронтов. Следует помнить, что частотные характеристики резистивных и емкостных элементов зависят от их конструкции.

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

В процессе анализа технического задания намечаются возможные конструктивно-технологические мероприятия, направленные на обеспечение требуемой надежности и снижение стоимости микросхемы. Для обеспечения надежности по постепенным отказам необходимо оценить допуски на отдельные технологические операции изготовления пассивных элементов. Вероятность

возникновения внезапных отказов уменьшается при рациональном выборе материалов (с учетом условий эксплуатации) и применении конструктивных мер повышения надежности.

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

**Конструктивный расчет** элементов микросхемы заключается в определении формы и размеров тонкопленочных элементов. Исходными данными являются: перечень элементов по схеме электрической принципиальной с указанием номинальных значений и допустимых отклонений основных параметров, значений мощностей рассеяния, рабочих напряжений, дополнительные конструктивно-технологические данные и требования. В результате расчетов должны быть определены размеры и форма резисторов, конденсаторов, тонкопленочных катушек индуктивности, RC – структур с распределёнными параметрами, размеры контактных площадок, проводников.

Геометрические размеры элементов определяют с учетом обеспечения необходимой точности номинальных значений их параметров [1]. Исходя из условий эксплуатации микросхемы, заданных ограничений, диапазона номиналов, выбранного при анализе технического задания и т.д., выбирают материалы резистивных пленок, диэлектрика, проводников, контактных площадок и защитного слоя. Исходя из допусков на номинальные значения элементов, номиналов элементов, характеристик воспроизводимости свойств и размеров пленок, требуемой стабильности, интервала рабочих температур, определяют геометрические размеры элементов. Результаты расчёта сводятся в таблицы.

**Разработка топологии и конструкции микросхемы** осуществляется в несколько этапов. Вначале проводят *эскизное* проектирование, затем – *техническое* проектирование.

На этапе *эскизного* проектирования (при необходимости) определяют оптимальное число элементов на подложке, рассчитывают площадь подложки и выбирают подходящий типоразмер корпуса из числа нормализованных.

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

$$S = K(\sum_{i=1}^{n} S_{Ri} + \sum_{i=1}^{m} S_{Ci} + \sum_{i=1}^{к} S_{Li} + \sum_{i=1}^{l} S_{Ai} + NS_K), \qquad (4.1)$$

где $K$ – коэффициент использования площади подложки (для ориентировочных расчетов его значение берётся равным 2 … 3), $S_{Ri}$ – площадь i - го резистивного элемента, $S_{Ci}$ – площадь $i$ - го емкостного элемента, $S_{Li}$ – площадь $i$ - го индуктивного элемента, $S_{Ai}$ – площадь, занимаемая $i$ - м навесным активным или пассивным компонентом, $N$ – число контактных площадок, $S_K$ –

площадь одной контактной площадки; $n$, $m$, $k$, $l$ – число пленочных резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности и активных компонентов соответственно.

Разработку топологии тонкопленочной микросхемы рекомендуется выполнять в несколько этапов.

***На первом этапе*** определяют оптимальное число элементов на подложке. К числу основных задач конструктора микроэлектронных РЭС относится выбор рациональной компоновки отдельных микросхем. Эта сложность определяется рядом факторов: принципом действия и схемой изделия, способами компоновки узлов, ремонтоспособностью, технологией производства и т.д. Основным фактором, определяющим сложность узла, является функциональный принцип деления изделия.

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

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

С другой стороны, с увеличением числа элементов на подложке повышается вероятность брака всей подложки из-за некачественного изготовления того или иного элемента. Это обстоятельство приводит к большому проценту отбраковки подложек с негодными элементами, что, в свою очередь, снижает выигрыш при производстве подложек с большим числом элементов.

Очевидно, что для каждого конкретного случая в зависимости от вероятности брака различных элементов существует их оптимальное число на подложке, при котором в процессе изготовления схемы будет изготовлено минимальное число плат.

Расчет оптимальной сложности схем с однотипными элементами

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

Вероятность изготовления годной подложки с $N$ элементами равна:

$$P_N = P^N, \tag{4.2}$$

где $P$ – вероятность изготовления годного элемента (0<P<=1).

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

$$n = \frac{m}{N \cdot P^N}. \tag{4.3}$$

Из формулы видно, что число изготовленных подложек будет минимальным, если произведение $N \cdot P^N$ примет наибольшее значение. Максимальное значение функции $y = N \cdot P^N$ можно найти, взяв первую производную от этой функции:

$$(N \cdot P^N)' = y' = N \cdot P^N \cdot \ln P + P^N.$$

Приравнивая её к нулю, получим:

$$P^N (N \ln P + 1) = 0$$

Так как $p \neq 0$, $N \ln P + 1 = 0$, откуда

$$N_{опт} = -\frac{1}{\ln P}, \tag{4.4}$$

где $N_{опт}$ – оптимальное (соответствующее минимуму затрат на изготовление) число элементов на подложке.

Вероятность изготовления одного годного элемента определяется из статистических данных.

На основании формулы (4.4) на рисунке 4.1 приведена зависимость оптимального числа элементов на подложке от вероятности изготовления годного элемента. Так как величина $N$ может принимать только целые значения, зависимость представлена в виде ступенчатой кривой.

Для выявления приемлемых отклонений числа однотипных элементов на подложке от оптимального был проведен анализ, который показал, что отклонение величины $N$ от $N_{опт}$ на 40 … 50% приводит к необходимости увеличения числа изготовленных подложек примерно на 10%.

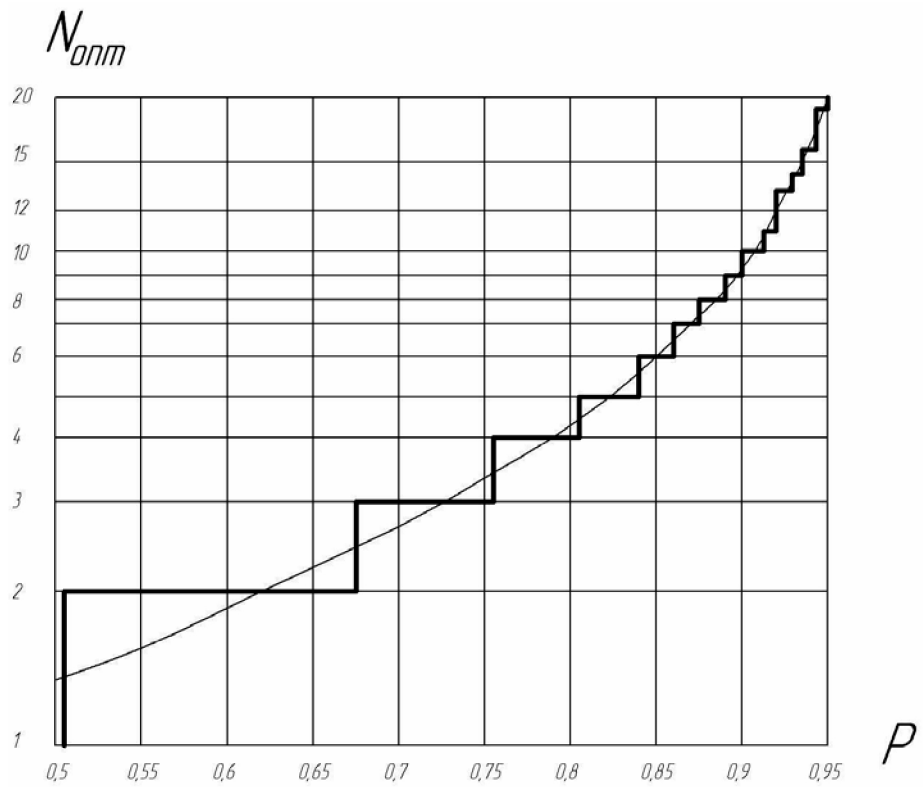



Рисунок 4.1 – Зависимость оптимального числа элементов на подложке от вероятности изготовления $P$ годного элемента.

## Расчет оптимальной сложности схем с элементами, имеющими различную вероятность брака

Рассмотренный случай имеет ограниченное применение, так как вероятность брака у различных элементов колеблется в довольно широких пределах. Пусть $N_1, N_2, \ldots, N_n$ – число элементов на подложке с примерно одинаковой вероятностью брака, а $P_1, P_2 \ldots P_n$ – средние вероятности изготовления годного элемента в группах. Будем считать, что вероятность брака одного элемента не отражается на вероятности брака другого даже при их одновременном изготовлении.

По аналогии с приведенными выше рассуждениями уравнение (4.3) с учетом теоремы умножения вероятностной можно записать в виде:

$$n = \frac{m}{N_{\Sigma} \cdot P^{N1} P^{N2} \ldots P^{Nk}}. \qquad (4.5)$$

Из-за наличия многих независимых переменных ($N_1$, $N_2$, …, $N_n$) определение оптимального числа элементов на подложке затруднено. В этом случае целесообразно с помощью формулы (4.5) сравнить несколько наиболее интересных вариантов компоновки схемы, а затем, выбрав наилучший, произвести определение $N_{опт}$ по следующей методике.

1. Подсчитать вероятность изготовления годной подложки $P_0$:

$$P_0 = P^{N1} P^{N2} \ldots P^{Nk}. \qquad (4.6)$$

2. На основании известного общего числа элементов на подложке $N_\Sigma$ и полученного значения $P_0$ по графику, изображенному на рисунке 4.2, определить среднюю вероятность изготовления годного элемента $Pcp$.
3. Используя график, изображенный на рисунке 4.1, по значению $Pcp$ определить $N_{опт}$.

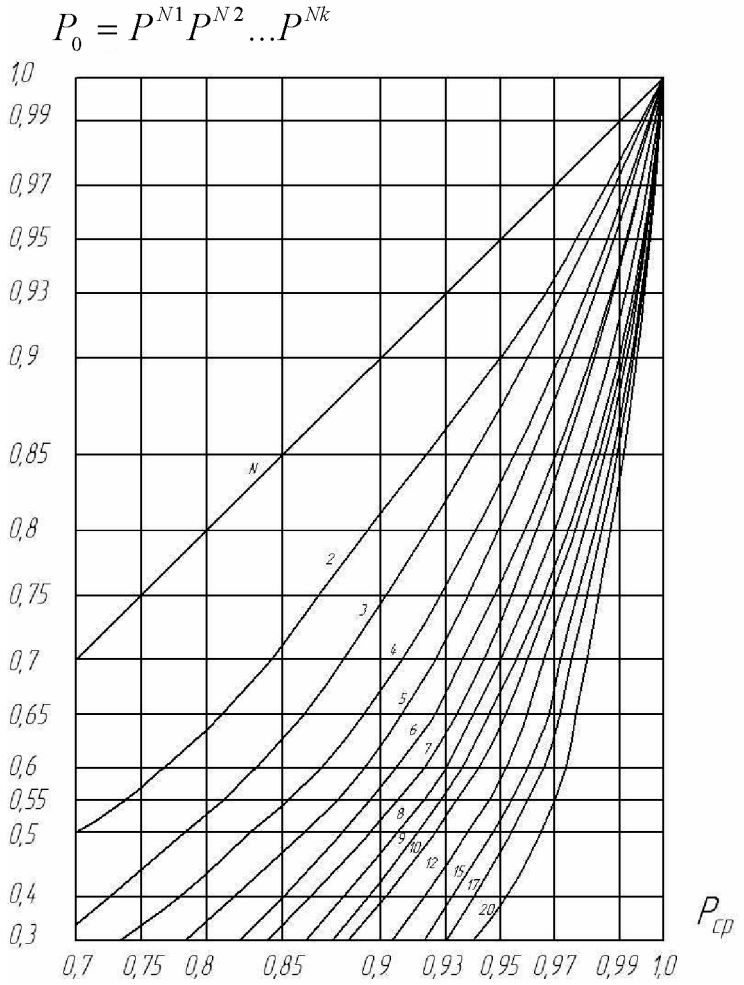



Рисунок 4.2 – Зависимость функции $P^N = P_0$ от значений $P$ и $N$.

Если оптимальное число элементов отличается от выбранного на величину, большую 40…50%, рекомендуется изменить выбранное число элементов ($N_1$, $N_2$, … , $N_n$ ). При этом следует иметь в виду, что особенно сильно на $N_{опт}$ влияет изменение числа элементов с большей вероятностью брака. Возможно, после определения оптимального числа элементов на подложке придется корректировать размеры подложки.

***На втором этапе*** производят преобразование электрической принципиальной схемы, из которой исключают все навесные компоненты; выводы компонентов заменяют контактными площадками. Схему перечерчивают таким образом, чтобы уменьшить число пересечений проводников и сократить их длину. Для подсоединения внешних выводов и выводов навесных компонентов производят предварительное размещение контактных площадок с учётом конструктивных и электрических требований, оговоренных в техническом задании. Принципиальная электрическая схема (рис. 4.3,а), переработанная указанным образом, носит название ***коммутационной схемы*** (рис. 4.3,б). После проработки нескольких вариантов коммутационной схемы и получения оптимального (с точки зрения минимальной длины соединительных проводников и минимального числа пересечений между ними) варианта производят уточненный расчет геометрических размеров тонкопленочных элементов.

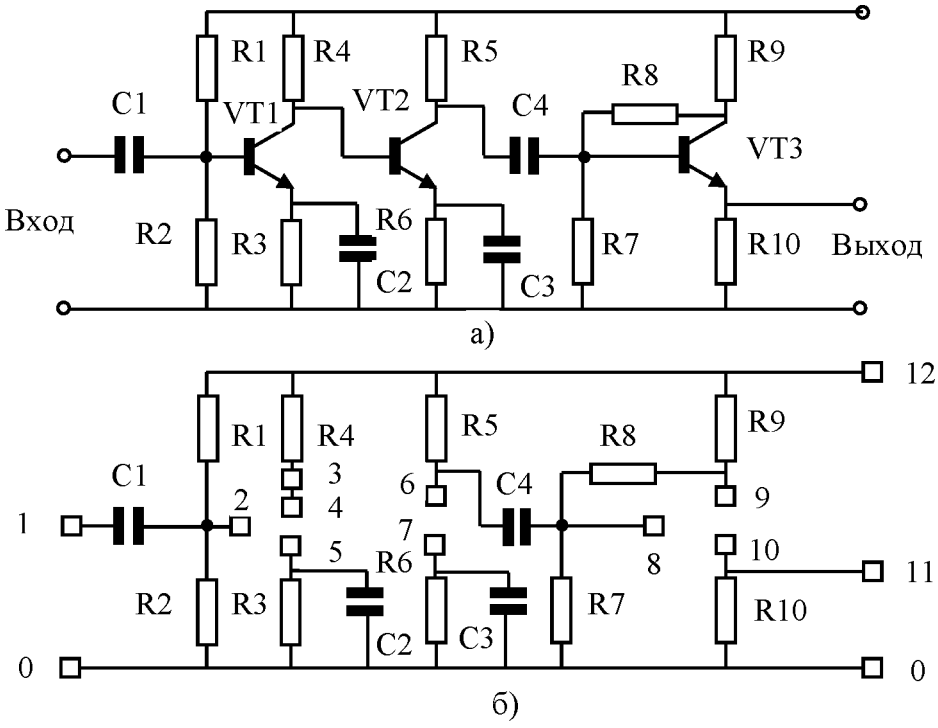



Рисунок 4.3 – Преобразование электрической принципиальной схемы (а) усилителя в коммутационную (б).

По вычисленному значению $S$ выбирают типоразмер подложки из ряда рекомендуемых (табл. 4.1).

Таблица 4.1 – Рекомендуемые типоразмеры подложек.

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

Механические и электрофизические характеристики материалов подложек приведены в таблице 4.2.

Выбор корпуса для микросхемы

По рассчитанной величине площади подложки $S$ и коммутационной схеме можно определить конструктивные признаки корпуса для микросхемы. По найденным признакам из числа нормализованных подбирается подходящий корпус.

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

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

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

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

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

На этапе ***технического проектирования*** осуществляется разработка топологии ГИМС и общей конструкции ГИМС.

Таблица 4.2 – Механические и электрофизические характеристики материалов подложек

| ХАРАКТЕРИСТИКА | СИТАЛЛ СТ50-1 НТх0.027. 029ТУ | СТЕКЛО С41-1 НП0.027. 600ТУ | СТЕКЛО С48-3 НТх0.027. 010ТУ | КЕРАМИКА | | | | Кремний |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 22ХС 027.002ТУ | ПОЛИКОР НТх0.02Т.02ТТУ | 98% окись бериллия МРТУ95-100-68 | Глазуро-ванная | |
| Шероховатость поверхности (класс) | 13 –14 | 14 | 14 | 12 | 12 –14 | 12 | 14 | 14 |
| Температурный коэффициент линейного расширения, $\alpha\ 10^{-7}$, 1/градус, в интервале температур 20...300°С | 46...50 | 40...43 | 46-50 | 55...80 | 75...85 | 70 | 73-80 | 23 |
| Теплопроводность $\lambda\ 10^{3}$, кал/см град | 3,4 | 0,8...1,3 | 0,8...1,3 | 20 | 60...90 | 500 | 2,5...3,5 | 100 |
| Диэлектрическая проницаемость при $f = 10^{5}$ Гц и t = +20°С | 8,5 | 7,5 | 6,8 | 10,3 | 10,5 | 6,4...9,5 | 13...16 | 11,7 |
| Тангенс угла диэлектрических потерь при $f = 10^{5}$ Гц и t = +20°С | $20 \cdot 10^{-4}$ | $20 \cdot 10^{-4}$ | $15 \cdot 10^{-4}$ | $6 \cdot 10^{-4}$ | $1 \cdot 10^{-4}$ | - | $18 \cdot 10^{-4}$ | 150 |
| Электрическая прочность, кВ/мм | 40 | 40 | 40 | 50 | 50 | - | 50 | – |

***Разработка топологии*** является одним из основных этапов конструирования гибридных пленочных микросхем, на котором решается задача размещения пленочных элементов микросхемы с учетом требований технического задания, особенностей электрической принципиальной схемы и технологических возможностей производства, а также выводов, сделанных на этапе эскизного проектирования. В процессе разработки топологии определяется взаимное расположение пленочных элементов микросхемы, уточняются их форма и геометрические размеры, выбираются места расположения контактных площадок.

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

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

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

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

микросхемы разрабатывают в виде функциональных и конструктивно законченных изделий, надежно защищенных от воздействия внешних условий;

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

микросхемы общего применения выпускают только в унифицированных корпусах;

номинальные значения питающих напряжений выбирают из следующего ряда: 1,2; 3,0; 4,0; 5,0; 6,3; 10,0; 12,6; 20 и 27 В;

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

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

микросхемы разрабатывают на подложках, размеры которых соответствуют ряду, приведенному в табл. 4.1;

конструкция микросхемы должна исключать возможность появления локальных нагревов, превышающих допустимую температуру для элементов, расположенных в зоне нагрева;

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

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

основные электрические параметры микросхемы;

номинальные значения основных технических параметров пленочных и навесных элементов, их стабильность и допуски;

допустимый уровень паразитных связей между отдельными цепями микросхемы;

требования по устойчивости к механическим и климатическим воздействиям;

рекомендуемый тип корпуса.

**Основные *технологические* данные и ограничения, учитываемые при разработке топологии**

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

***Для микросхем, не содержащих конденсаторы:***

первый слой – резистивный;

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

третий слой – диэлектрический, – в местах пересечения проводников;

четвертый слой – оставшаяся часть проводников;

пятый слой – защитный.

***Для микросхем с конденсаторами:***

первый слой – резистивный; он же – подслой под контактные площадки;

второй слой – выводы резисторов, нижние обкладки конденсаторов и часть проводников;

третий слой – диэлектрик для конденсаторов и в местах пересечения проводников;

четвертый слой – верхние обкладки конденсаторов и часть проводников;

пятый слой – диэлектрический, защитный.

Если проводящий слой выполняется из алюминия или меди, на места будущих контактных площадок следует нанести ещё один слой, как правило из никеля, толщиной 100 …200 ангстрем для защиты от окисления и улучшения условий пайки или термокомпрессии.

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

Предложенная последовательность нанесения слоев микросхемы характерна для технологического процесса получения конфигурации тонких пленок путем термического напыления материалов на подложку через затеняющие трафареты (маски). Последовательность нанесения слоев и технология формирования рисунка элементов при использовании метода фотолитографии, который находит все большее применение при изготовлении компактных и точных микросхем, подробно описаны в литературе [5].

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

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

резисторы, обкладки ТПК, плёночные катушки индуктивности располагают от краев подложки на расстоянии не менее 0,7...1,0 мм;

для совмещения элементов, лежащих в разных слоях, предусматривают перекрытие не менее чем на 200 мкм;

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

минимально допустимые размеры контактной площадки для пайки – 600×600 мкм, для сварки – 300×300 мкм, для контроля параметров элементов – 300×300 мкм;

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

граница диэлектрика отстоит от края контактной площадки на расстояние не менее 500 мкм;

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

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

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

не допускается припайка или приварка двух и более навесных компонентов к одной контактной площадке;

во избежание возникновения паразитных связей не рекомендуется применять один пленочный коммутационный проводник для подвода пита-

ния к нескольким функциональным узлам, расположенным на одной подложке;

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

в нижнем левом углу подложки размещают ключ (треугольник), необходимый для её ориентации при сборке.

Выбор места установки навесного компонента и расположения контактных площадок для его подсоединения определяется цоколёвкой навесного компонента, длиной и жесткостью его выводов. Допускается установка навесных компонентов на плёночные проводники и маломощные резисторы, предварительно защищенные слоем диэлектрика. Минимальное расстояние от края контактной площадки до навесного компонента, выводы которого подключаются к этой площадке – 500 мкм, максимальное – 3000 мкм.

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

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

Пленочные элементы в процессе их размещения вычерчивают (в системе «КОМПАС» или другой подобной системе в масштабе 10:1 или 20:1. Для удобства просмотра конфигураций отдельных слоев целесообразно окрашивать их в различные цвета.

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

На основе откорректированного топологического чертежа микросхемы (рис. 4.4; прил. 4) изготавливают чертежи слоев, на которых приводят координаты всех точек пересечения линий контуров элементов, отсчитываемые от координатных осей 0X и 0Y, образующих базовый угол микросхемы.

Технологию изготовления микросхемы разрабатывают в укрупненном варианте. Конструктор, исходя из технического задания, выбрав тот или иной технологический процесс, с учетом программы выпуска микросхем выбирает оборудование для операций изготовления микросхемы, приспособления (маски, испарители), используемые материалы, устройства и приборы контроля режимов изготовления, устройства и приборы контроля готовых микросхем. Особое внимание обращает на экономичность и эффективность технологических процессов и оборудования, указывает также требования охраны труда. При разработке технологического процесса изготовления микросхемы следует пользоваться методическими указаниями [9].

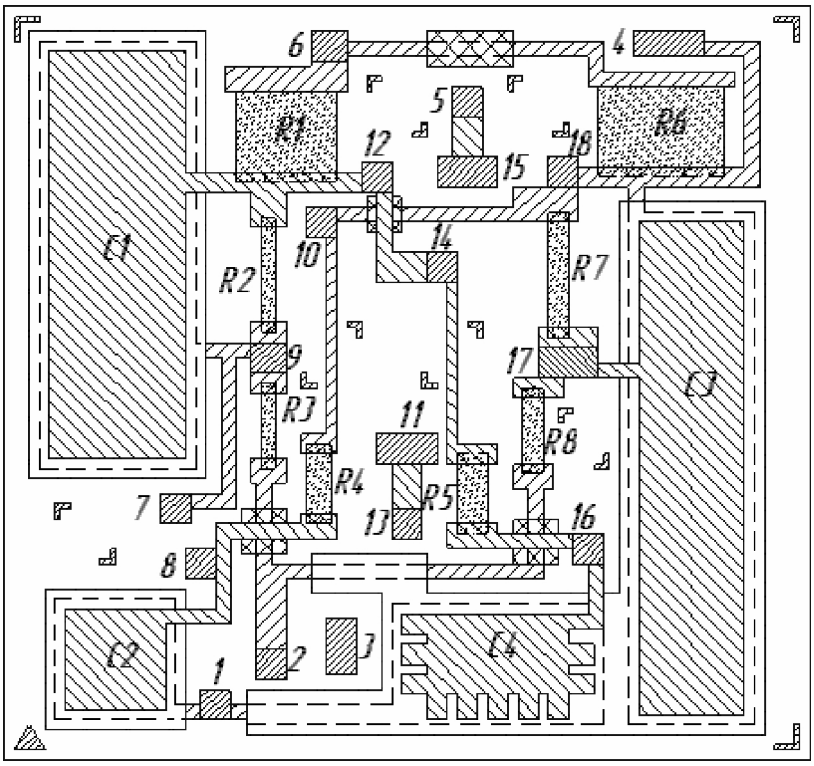



Рисунок 4.4 – Топологический чертеж микросхемы.

Сборка и защита гибридных интегральных микросхем

Гибридная интегральная микросхема состоит из плёночной схемы и навесных пассивных и активных компонентов. Навесные компоненты монтируют непосредственно на подложке с напыленной схемой, либо устанавливают на основании корпуса, в котором размещается плёночная интегральная микросхема, либо собирают на отдельной плате.

В качестве навесных активных компонентов в гибридных плёночных микросхемах применяют миниатюрные (корпусные и бескорпусные) транзисторы, диоды, транзисторные и диодные матрицы. Основными требованиями, предъявляемыми к активным компонентам гибридных ИМС, являются малые габариты и вес. Этим требованиям отвечают бескорпусные активные компоненты, в которых кристаллы полупроводника защищены методом пассивации поверхности или с помощью лаков, эмалей, смол, компаундов и т. д.

Электрические и конструктивные характеристики и габаритные чертежи некоторых типов транзисторов, диодов и диодных матриц приведены в методических указаниях к курсовому и дипломному проектированию [8].

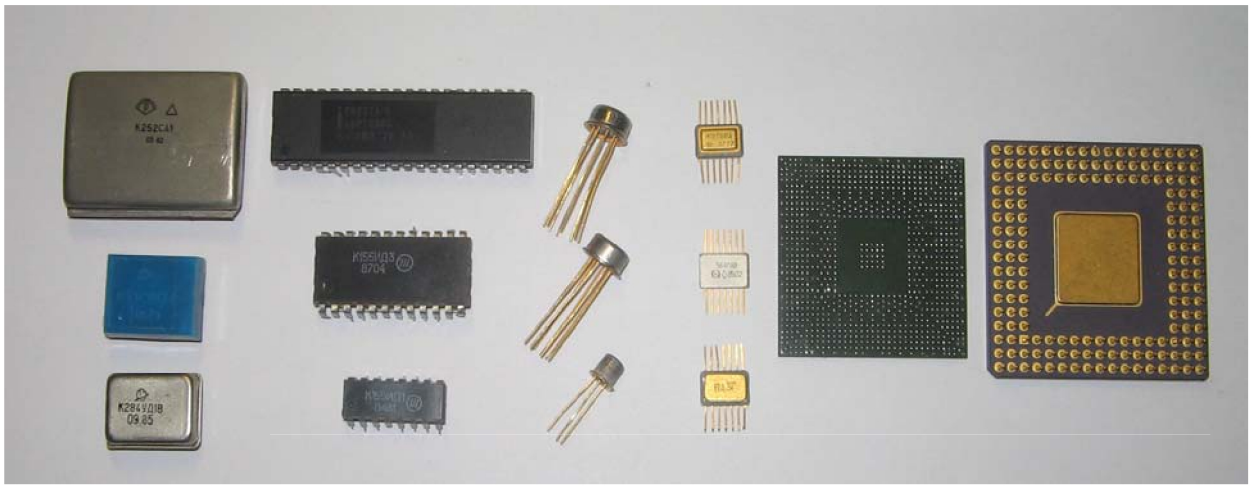
Навесные компоненты устанавливают на промежуточную плату или на основание корпуса в том случае, когда диаметр выводов этих компонентов больше 100 мкм. Механическое крепление навесных компонентов осуществляется путем приклеивания их к подложке или основанию корпуса с помощью клеев холодного отвердения, изготовленных на основе эпоксидной смолы ЭД-5, ГОСТ 10587-84. Присоединение выводов навесных компонентов к контактным площадкам, а также контактных площадок к внешним выводам производится пайкой или сваркой. Соединение контактных площадок с вы-

водами корпуса осуществляется с помощью проволочных перемычек теми же методами. Сварку микросхем производят на установках типа УКМ-1, Контакт-3А, пайку – на установках ПИН-1 и др.

От воздействия внешней среды гибридные плёночные микросхемы защищают, помещая их в герметичные металлостеклянные, металлокерамические, металлополимерные или пластмассовые корпуса. Бескорпусная защита (лаками, компаундами) применяется в качестве предварительной или при кратковременном пребывании ГИМС (до двух суток) в условиях повышенной влажности. В качестве защитного покрытия применяют лаки № 976-1, ФП-525, УР-231, эмаль ФП-545 и др. Схемы, защищенные лаком УР-231, могут работать в диапазоне температур – 60...+90°С. Метод сушки лака может быть конвекционным (6 ч. при 80…90°С) или терморадиационным (40 мин при 80°С). Лак УР-231, ВТУ ГИПИ-4 № 366-62 обладает высокой влагостойкостью и хорошими электроизоляционными свойствами.

Корпусная защита рекомендуется при эксплуатации ГИМС в условиях повышенной влажности (98% при ±40°С) в течение 10 и более суток. Пластмассовые и металлополимерные корпуса просты по конструкции, имеют низкую стоимость, но не обеспечивают надежную защиту микросхем при работе в сложных климатических условиях. Более высокую герметичность и надежность при работе в трудных условиях имеют металлостеклянные и металлокерамические корпуса. Герметизация корпуса осуществляется лазерной сваркой крышки с основанием корпуса по периметру, холодной сваркой, пайкой или склеиванием.

Корпуса интегральных микросхем (рис. 4.5) классифицируют по форме и расположению выводов и делят на 6 типов в соответствии с ГОСТ 17467-88. По форме и расположению выводов указанные типы корпусов подразделяются на подтипы.



Тип 1 Тип 2 Тип 3 Тип 4 Тип 5 Тип 6

Рисунок 4.5 – Конструкции корпусов для ИМС.

Подтипы обозначаются двузначными цифрами, например: для корпусов типа 1 подтипы обозначаются цифрами 11, 12, 13, 14, 15 – (первая цифра указывает на тип корпуса). Каждому типу корпуса присваивается шифр, состоящий из обозначения типа корпуса (двузначное число) и порядкового номера типоразмера двузначное число), например: 1209, 4130, 5202.

Конструкция корпуса ИМС должна:

- защитить интегральные микросхемы от воздействия окружающей среды и механических повреждений, а также обеспечить чистоту среды, окружающей элементы и компоненты ИМС;
- обеспечить удобство и надежность монтажа кристаллов полупроводниковых интегральных микросхем и плат гибридных интегральных микросхем в корпусе;
- отвести тепло от микросхемы, размещенной внутри корпуса; обеспечить надежное электрическое соединение элементов схемы и в то же время обеспечить электрическую изоляцию между токопроводящими элементами;
- обеспечить надежное крепление корпуса, быть простой и дешевой в изготовлении и обладать высокой надежностью.

Все типы корпусов в зависимости от применяемых для их изготовления материалов подразделяют на следующие виды: металлостеклянные, металлокерамические, металлополимерные, пластмассовые и керамические. Корпуса 1-го типа изготавливаются в металлостеклянном, металлополимерном и значительно реже – в металлокерамическом исполнении. Для изготовления корпусов 2-го типа чаще всего используются пластмасса и керамика. Корпуса 3-го типа изготавливают только в металлостеклянном исполнении. 4-, 5-, и 6-го типов – в металлостеклянном, металлополимерном и металлокерамическом исполнении.

Наибольшей механической прочностью обладают металлостеклянные и металлокерамические корпуса. Надежная герметизация микросхем обеспечивается металлостеклянными корпусами, в которых крышка к основанию крепится методом сварки, осуществляемой в вакууме или в среде инертного газа под давлением, несколько превышающем атмосферное.

Высокой герметичностью обладают и металлокерамические корпуса. Крышка в них крепится к основанию методом пайки. Наименее герметичны пластмассовые и металлополимерные корпуса.

Для герметизации гибридных интегральных микросхем следует применять в основном металлостеклянные, металлокерамические и пластмассовые корпуса 1-. 4-, и 5-го типов.

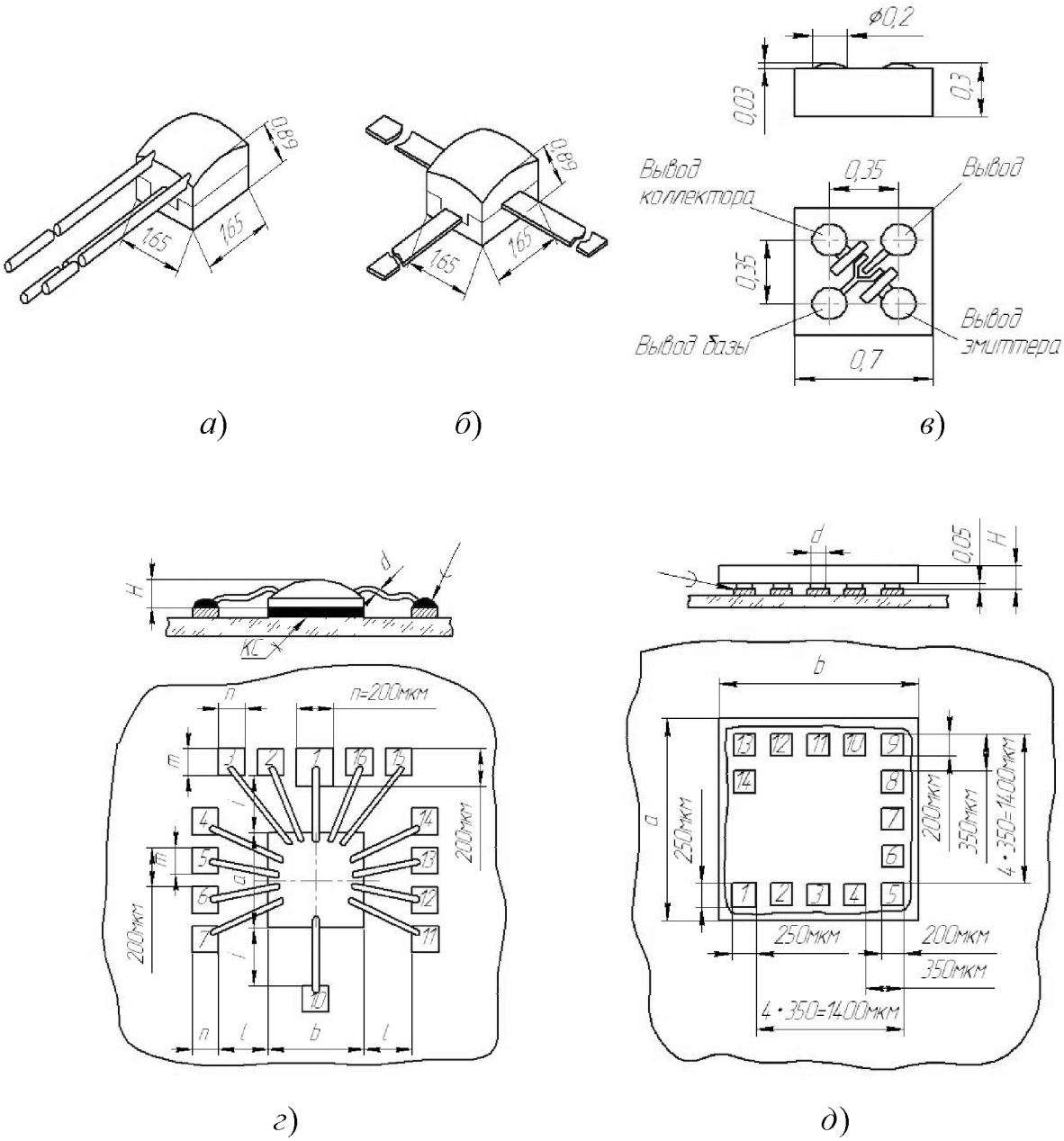
Условное обозначение корпуса в конструкторской документации должно состоять из слова «Корпус»; типоразмера, включающего в себя номер подтипа корпуса и двузначное число, обозначающее порядковый номер типоразмера; цифрового индекса, определяющего действительное количество выводов; порядкового регистрационного номера и обозначения стандарта. Пример обозначения: Корпус 2105.14-5 ГОСТ 17467-88.

Более подробно конструктивные данные корпусов для ИМС представлены в методических указаниях к курсовому проектированию [8].

## Навесные компоненты ИМС и микросборок

В качестве навесных компонентов ИМС используют полупроводниковые микросхемы и БИС, диодные и транзисторные матрицы, миниатюрные корпусные диоды и транзисторы, бескорпусные диоды и транзисторы, миниатюрные резисторы, конденсаторы, индуктивности, дроссели, трансформаторы.

### 1. Активные компоненты ГИМС




*а*) *б*) *в*)

*г*) *д*)

Рисунок 4.6 – Конструкции активных компонентов гибридных микросхем: бескорпусные транзисторы с гибкими (*а*), балочными (*б*) и шариковыми (*в*) выводами и бескорпусные полупроводниковые микросхемы с гибкими (*г*) и столбиковыми (*д*) выводами.

Выбор компонентов для конкретной гибридной интегральной микросхемы проводят, исходя из схемотехнических, конструктивно-технологических требований, требований к надежности, массогабаритным характеристикам устройства, условий эксплуатации и технологии производства, сроков освоения, стоимости и т. п.

До настоящего времени не созданы активные пленочные элементы с необходимой надежностью и воспроизводимостью электрических характеристик, поэтому при конструировании ГИС и БГИС в качестве активных элементов применяют навесные полупроводниковые микроминиатюрные компоненты (рис. 4.6):

- бескорпусные диоды и транзисторы;
- диодные и транзисторные матрицы;
- полупроводниковые ИМС.

По способу герметизации навесные компоненты делят на корпусные и бескорпусные. В бескорпусных компонентах кристаллы полупроводника защищены от воздействия окружающей среды при помощи герметизации специальными защитными покрытиями (лаки, эмали, смолы, компаунды) и заключены в специальные пластмассовые корпуса (тару), которые снимают перед монтажом компонентов на подложку ГИМС.

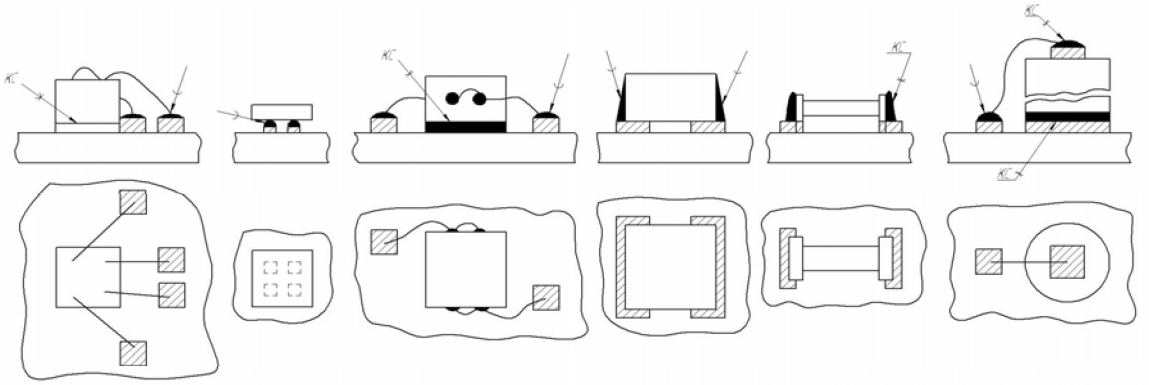


Рисунок 4.7 – Способы крепления и присоединения выводов навесных компонентов гибридных интегральных микросхем.

Недостатком компонентов с гибкими выводами (рис. 4.6, *а, г*) является трудность автоматизации процессов их монтажа в гибридную микросхему. Применение компонентов с шариковыми выводами (рис. 4.6, *в*) затрудняет контроль процесса сборки. Приборы с балочными выводами (рис. 4.6, б) дороги, но позволяют автоматизировать сборку, контролировать её качество, увеличивать плотность монтажа.

Способ монтажа компонентов на плату гибридной микросхемы должен обеспечить сохранность их формы, параметров и свойств, отвод тепла от них, стойкость микросхемы к термоциклированию, вибрациям и ударам (рис. 4.7).

**Миниатюрные диоды и диодные матрицы.** В качестве диодных структур преимущественное применение находят бескорпусные диодные

матрицы (рис. 4.8). Они выполняются в двух вариантах: с общим катодом и с общим анодом. Кроме диодных матриц в конструкциях гибридных микросхем используются дискретные диоды.

В качестве выпрямительных и импульсных применяются кремниевые сплавные или диффузионные, а также арсенид-галлиевые диоды. Часть из них выпускается в бескорпусном варианте, остальные – в миниатюрных пластмассовых или металлостеклянных корпусах.

В гибридных микросхемах, предназначенных для усиления и генерации электрических сигналов, в качестве навесных компонентов используются миниатюрные туннельные и обращённые диоды. В оптоэлектронных микросхемах широко используются миниатюрные и бескорпусные светодиоды.

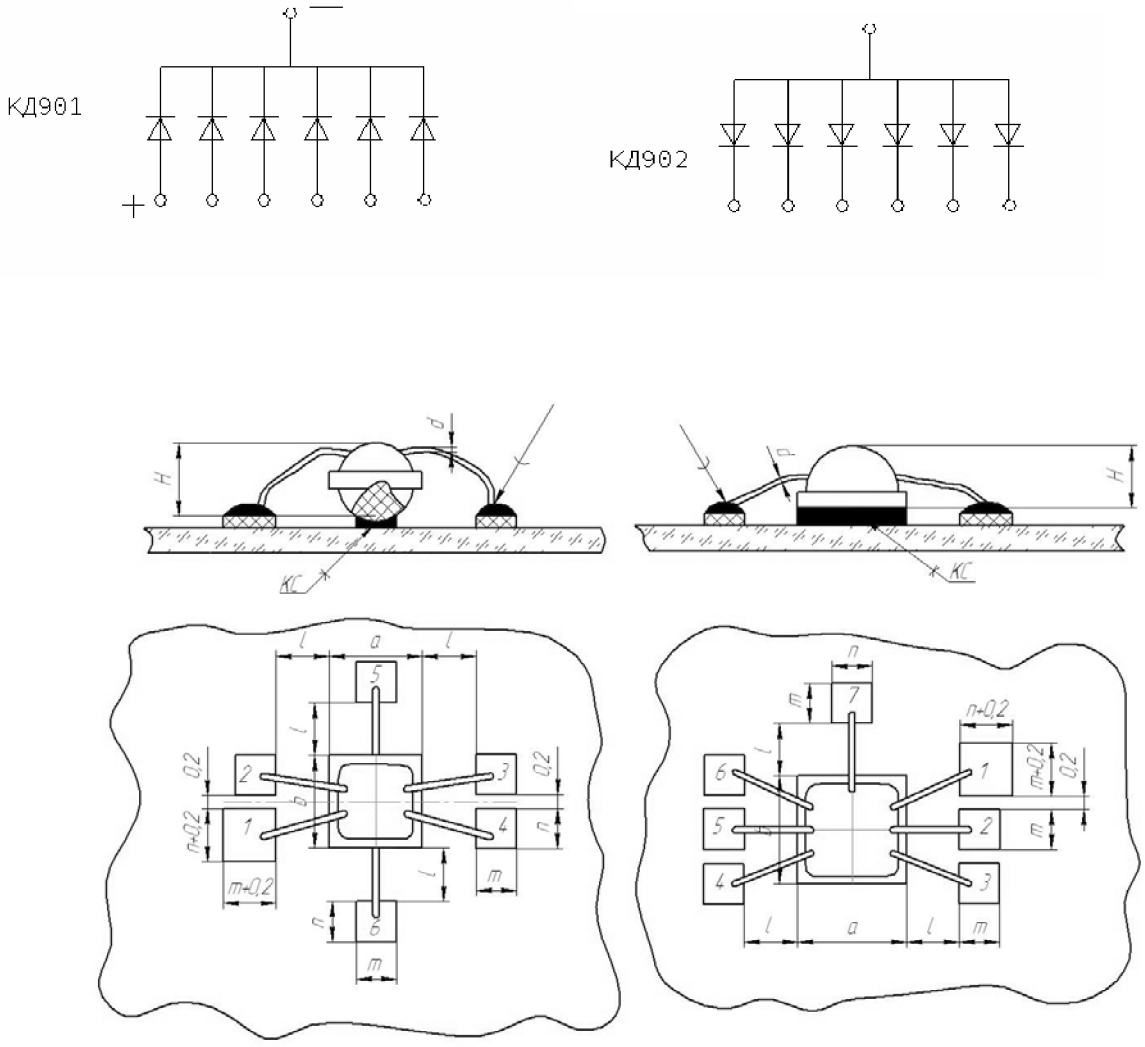



Рисунок 4.8 – Схемы соединений диодов и способы установки диодных матриц и сборок на плату гибридной микросхемы.

В качестве примера в таблице 4.3 приведены характеристики некоторых диодов и диодных матриц.

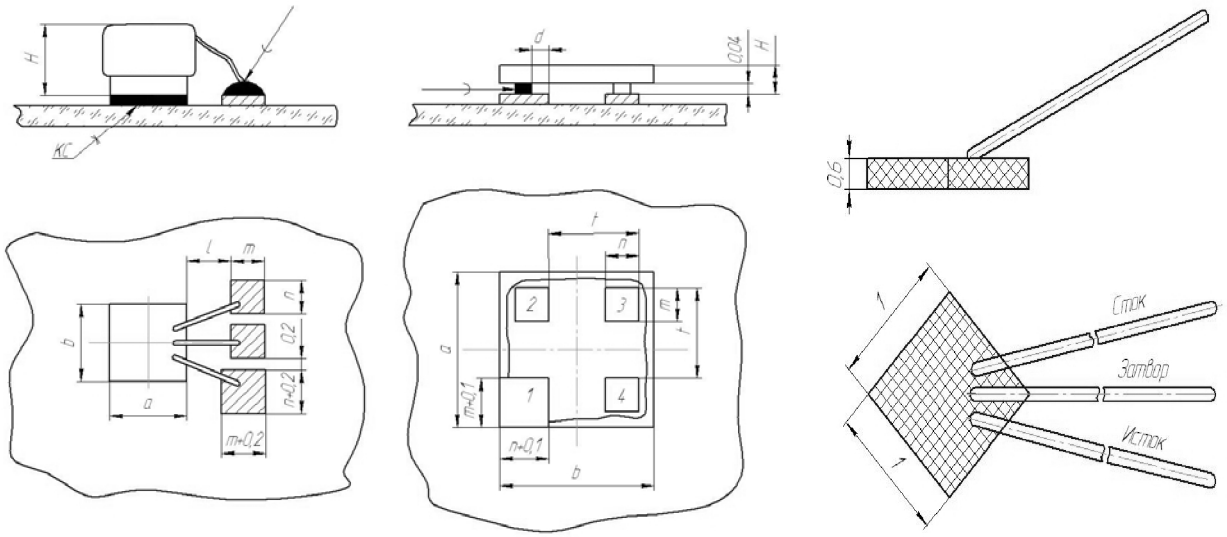
Таблица 4.3 – Бескорпусные диоды и диодные матрицы

| Тип | Uобр, В | I пр, мА | Uпр при Yпр=1мА | Тв, нс | Сд, пФ | Габариты, мм |
|---|---|---|---|---|---|---|
| КД901 | 10 | 5 | 0,7 | 20 | 4 | 1,1х1,3х0,8 |
| КД902 | 5 | 5 | 0,8-0,85 | 10 | 2 | 1,2х1,2х0,8 |
| КД904 | 10 | 5 | 0,8 | 10 | 2 | 1,0х1,0х1,0 |
| КД907 | 40 | 50 | 1,0 при Iпр=50мА | 4 | 4 | 1,7х1,7х1,0 |
| КД913 | 10 | 5 | 0,7 | 10 | 4 | 1,0х1,0х0,33 |

Число элементов диодных матриц: КД904 – 4 диода с общим анодом, КД907 – отдельные диоды, КД913 – с общим катодом.

**Миниатюрные корпусные и бескорпусные транзисторы и транзисторные матрицы.** Габаритные чертежи некоторых вариантов конструкций бескорпусных транзисторов показаны на рис. 4.9, а, б. В бескорпусном исполнении выпускаются и полевые транзисторы (рис. 4.7, в).

*КТ307, КТ317* *КТ348, КТ359* *КП201*
*КТ318, КТ332*




а) б) в)

Рисунок 4.9 – Габаритные чертежи бескорпусных транзисторов.

В настоящее время промышленностью выпускаются бескорпусные спаренные полевые транзисторы типа КПС202. Эти структуры включают по два бескорпусных транзистора, устанавливаемых на общей подложке размером 1х2 мм. В пару подбираются транзисторы с идентичными электрическими параметрами.

Таблица 4.4 – Основные электрические и конструктивные данные бескорпусных транзисторов

| Тип | Структура | Fг, МГц | Рк max | Габариты |
|---|---|---|---|---|
| КТ307 | n-p-n | 250 | 15 | 0,7x0,7x0,8 |
| КТ319 | n-p-n | 100 | 15 | 1,3x1,3x1,1 |
| КТ324 | n-p-n | 600-800 | 15 | 0,5x0,5x0,6 |
| КТ331 | n-p-n | 250-400 | 15 | 1,0x1,0x0,8 |
| КТ332 | n-p-n | 300-500 | 15 | 1,0x1,0x0,8 |
| КТ336 | n-p-n | 250-450 | 50 | 0,7x0,7x0,4 |
| КТ348 | n-p-n | 100 | 15 | 1,0x1,0x0,2 |
| КТ353 | n-p-n | 100 | 30 | Ø 1,6,h0,7 |
| КТ354 | n-p-n | 1000-1300 | | 1,0x1,0x0,8 |
| 1Т612 | n-p-n | 1500 | 360 | Ø6,3,h1,6 |
| КП102 | p-n кремний | | | 1x1x0,6 |
| КП103 | p-n | | | 1x1x1,6 |
| КП201 | p-n | | | 1x1x0,6 |

**Транзисторные матрицы**

В ГИМС дифференциальных и операционных усилителей, где требуется идентичность размеров и температурных характеристик транзисторов, широко применяются транзисторные матрицы К1НТ291. Их габариты 1,2 х 1,7 х 0,8 мм.

**Бескорпусные полупроводниковые интегральные микросхемы.** Они предназначены для эксплуатации в составе микросхем и микросборок, ячеек и блоков микроэлектронной аппаратуры, подвергающихся общей герметизации. Бескорпусную герметизацию полупроводниковых микросхем проводят после пассивации поверхности кристалла пленками окисла кремния, боро- или фосфоросиликатного стекла. Для бескорпусной герметизации используют кремнийорганические эпоксидные эмали, фосфоросодержащие лаки, эпоксидные компаунды. Эмали и лаки наносят на одну рабочую сторону кристалла, компаунды – на обе стороны и на боковые грани. Толщина герметизирующего покрытия 200 ... 400 мкм. Как правило, бескорпусные микросхемы имеют прямоугольную форму, что целесообразно для оптимального разделения полупроводниковых пластин на кристаллы и более удобно для их размещения на подложках микросхем и микросборок в сочетании с другими элементами и компонентами. Способы установки на плату бескорпусных микросхем аналогичны приведённым на рис. 4.7 – 4.9. В бескорпусном варианте выпускаются логические и цифровые полупроводниковые микросхемы, например КБ102-1, КБ103-1, КБ743-3. В числе бескорпусных аналоговых полупроводниковых микросхем наиболее широко используются операционные усилители. Характеристики некоторых операционных усилителей приведены в таблице 4.5. Для крепления к подложке микросхемы компонентов с гибкими и балочными выводами используются стекла с температурой обработки 450...500°С, термостойкие

клеи на неорганической основе, клеи на основе компаундов. Они не должны разрушать защитное покрытие бескорпусных компонентов.

Таблица 4.5 – Бескорпусные операционные усилители

| ТИП ОУ | U, В | P, мВт | Коэффициент усиления | Rвх, кОм | Fгр, МГц |
|---|---|---|---|---|---|
| К740УД1А | 8 | 200 | 20000-100000 | 40-400 | 10 |
| К740УД3 | 3 | 40 | 400-4500 | 20 | 20 |

Жидкое стекло наносится в виде небольшой капли, на неё устанавливается кристалл, затем производится нагрев в печи или на установке для пайки. Температура отверждения клеевого соединения с использованием эпоксидной смолы 60... 110°С. Толщина клеевого соединения 0,05... 0,1 мм. Рекомендуется применять эпоксидный клей ВК-9. Крепление приборов может также осуществляться с помощью припоя или эвтектическим сплавом. В этом случае место крепления компонента на плате гибридной микросхемы нужно металлизировать. Крепление компонентов с шариковыми выводами к контактным площадкам микросхемы производится в защитной атмосфере аргона, азота или гелия с применением припоя. Применение ультразвука позволяет улучшить качество сборки.

Соединение выводов компонентов с контактными площадками микросхемы проводится одним из многочисленных способов микросварки: термокомпрессией, сдвоенным электродом, с помощью ультразвуковых колебаний (25...50 кГц) и т. д. Для контактирования компонентов с пленочным монтажом применяется также пайка низкотемпературными припоями. Остатки флюса на месте пайки должны обладать изоляционными свойствами, не вызывать коррозии и быть негигроскопичными. Резисторы и конденсаторы с лужёными контактными поверхностями присоединяются либо пайкой, либо с помощью контактола К13-А.

Бескорпусные компоненты следует размещать на подложке или плате гибридной микросхемы с учетом рационального использования её площади, обеспечения минимизации длины проводников и числа их пересечений. Необходимо также обеспечить заданный тепловой режим работы компонентов, максимально уменьшить паразитные связи, обеспечить ремонтопригодность (возможность замены). Как правило, оптимизировать конструктивные параметры гибридной микросхемы или микросборки удаётся, лишь используя ЭВМ.

Основные конструктивные и технологические ограничения при размещении компонентов определяются техническими условиями, характером и разрешающей способностью существующих технологических процессов и используемого оборудования.

2. Пассивные навесные компоненты

**Миниатюрные резисторы.** Чаще всего применяют резисторы типов С2-12, С3-2, С3О3 и др. (рис. 4.10).

*С2-12, С3-3* *СТ3-22* *С3-2, СТ3-28*

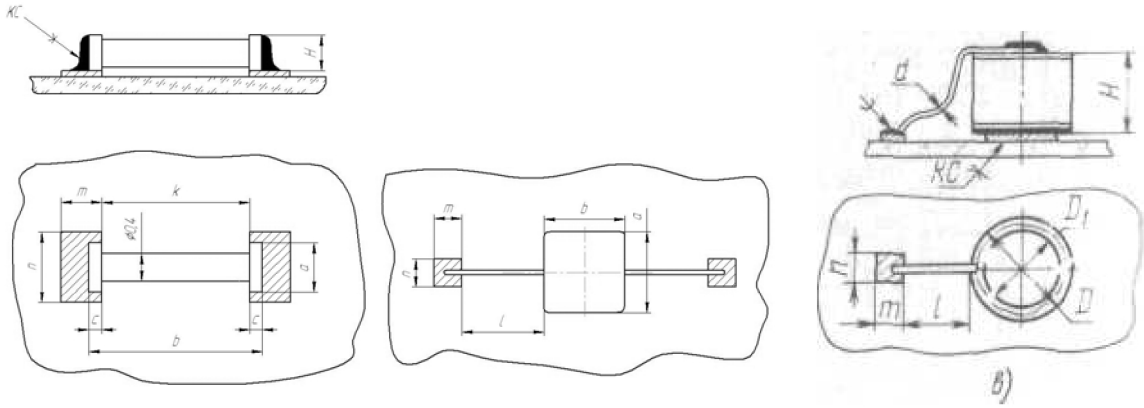


Рисунок 4.10 – Миниатюрные навесные резисторы.

**Миниатюрные конденсаторы** часто применяют в гибридных микросхемах. Это вызвано тем, что методами пленочной технологии получить конденсаторы с требуемыми рабочими характеристиками удается далеко не всегда. Промышленностью выпускается несколько типов миниатюрных конденсаторов (рис. 4.11).

Выбор типа конденсатора производят по значению ёмкости, рабочего напряжения, интервала рабочих температур, допустимой реактивной мощности, допустимого отклонению ёмкости от номинала, величины ТКС.

Наиболее перспективны керамические конденсаторы К10-9 и К10-17, обладающие высокой ёмкостью и приемлемыми значениями других характеристик. Эти конденсаторы выпускаются двух типов – с нелужёными (посеребренными) и лужёными торцами, являющимися выводами обкладок. Нелужёные выводы предназначены для присоединения к контактным площадкам с помощью гибких выводов, лужёные – непосредственно к контактным площадкам платы гибридной микросхемы (рис. 4.11).

В качестве электролитических целесообразно использовать малогабаритные оксидно-полупроводниковые конденсаторы. Они рассчитаны на рабочее напряжение до 30 В в интервале температур – 60 ...+ 85°С, применяются в основном в фильтрах вторичных источников питания, цепях развязки. Электролитические конденсаторы К53-15 и К53-16 отличаются конструкцией выводов. Конденсатор К53-15 имеет шариковые выводы и предназначен для автоматизированного монтажа, а конденсатор К53-16 имеет гибкие выводы и монтируется на плату с помощью проволочного монтажа.

Электрофизические характеристики некоторых типов малогабаритных конденсаторов приведены в таблице 4.6. Более подробные данные о каждом типе можно получить из справочников, или методических указаний. Номер таблицы и номер рисунка в таблице 4.6 соответствуют данным методических указаний [8].

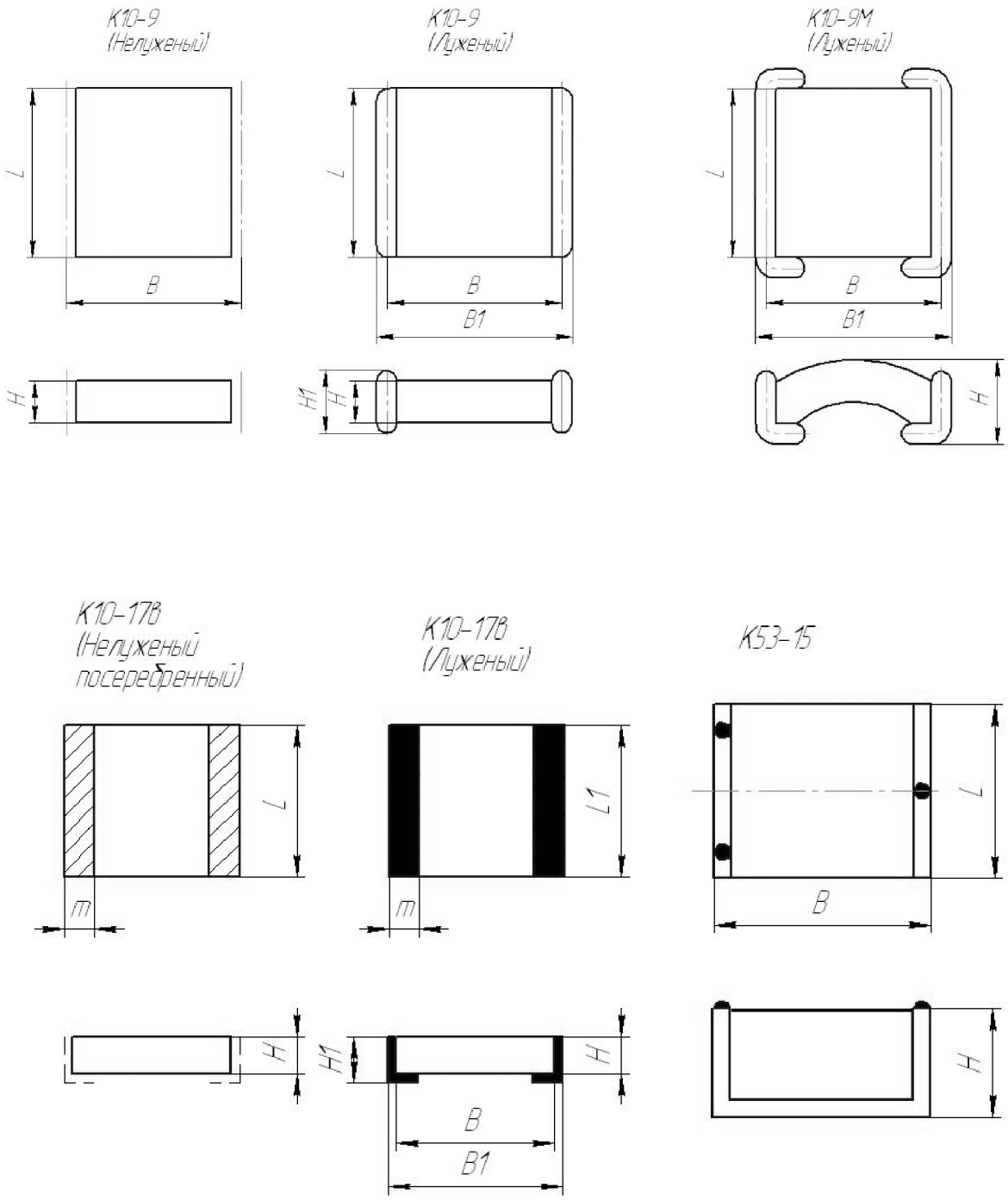



Рисунок 4.11 – Миниатюрные конденсаторы.

Таблица 4.6

Электрофизические параметры малогабаритных конденсаторов

| Тип конденса-тора | Диапазон ёмкости | Номинальное напряжение, В | Температура окружающей среды. °С | Относит. влажн.воздуха при +25°С, % | Вибрационная нагрузка | № таблицы | № рисун-ка |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| К10-9 | 2,2 пФ … 0,47 мкФ | 15; 25;(Н20) | -60 …+85 | До 80 | до 40g | 2 | 1 |
| К10-17-1 | 2,2 пФ … 0,68 мкФ | 50; 40 (Н90) | -60 …+85 | - " - | - " - | 3 | 2 |
| К10-17-2 | 36 пФ … 1,5 мкФ | 25 | - " - | - " - | - " - | 4 | 2 |
| К10-27 | 2×0,015 … 5×0,47мкФ | 16 | - " - | - " - | - " - | 5; 6; 7 | 3; 4; 5 |
| К10-28 | 0,22 … 1,0 мкФ | 50 | - " - | - " - | - " - | 8 | 2 |
| К10-42 | 1,0 … 22 пФ | 50 | - " - | - " - | - " - | 9 | 2 |
| К10-47 | 0,68 … 6,8 мкФ<br>0,047 … 2,2 мкФ<br>1000пФ … 0.047 мкФ | 25; 50; 500 | - " - | - " - | - " - | 10 | 2 |
| К10-49 | 0,022 … 0,47 мкФ | 25 | - " - | - " - | - " - | 11 | 2 |
| К10-50 | 22 пФ … 33 мкФ | 25; 10 (Н90) | - " - | - " - | - " - | 12 | 2 |
| К22-4 | 33 пФ … 0,12 мкФ | 25 | - " - | - " - | - " - | 13 | 6 |
| КН1-5 | 2,2 … 0,47пФ | 3,2 | +1 … +45 | - " - | В диап. частот 1 … 200Гц до 5g | 14 | 6 |
| КН1-6 | 4,7; 6,8; 10 пФ | 3,2 | +10 … +55 | - " - | - " - | 14 | 7 |
| К53-15 | 0,1… 47 мкФ | 3; 6,3; 10; 20; 30 | -60 …+85 | - " - | до 40g | 15 | 8 |
| КТ4-27 | 1… 20 пФ | 50; 25; 16 | - " - | - " - | - " - | 16 | 9 |
| КТ4-28 | 1 … 40 пФ | 25 | +1 … +60 | До 90 | До 40g | 17 | 9 |
| КН2-2 | 47; 68; 100 пФ | | +1 … +40 | До 80 | В диап. частот 1 … 200Гц до 10g | 18 | 10 |

## 4.2 Разработка конструкторской документации на ГИМС

В состав конструкторской документации на ГИМС входят:

1. Технические условия.
2. Конструкторская документация.

**Технические условия**

1.1 Общие технические условия (ОТУ)

Общие технические условия на интегральные микросхемы широкого применения установлены в ГОСТ 18725-75. В них определяются требования ко всем видам ИМС. В их состав входят требования к электрическим параметрам, конструкции, устойчивости к механическим и климатическим воздействиям, надёжности, долговечности и сохраняемости, правилам приёмки и маркировки.

Электрические параметры интегральных микросхем должны оставаться в указанных пределах при заданном изменении напряжения питания, механических и климатических воздействий, а также в процессе хранения и транспортировки. Напряжение питания по ГОСТ 17230-71 рекомендуется выбирать из следующего ряда: 1,2; 2.4; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 9,0; 12,0; 15,0; 24,0; 30,0; 48,0; 100; 150; 200 В.

ИМС должны иметь определенные размеры, внешний вид, массу и быть герметичными. Их выводы должны выдерживать растягивающие усилия и изгибы, легко паяться и свариваться. Бескорпусные микросхемы должны быть стойкими к процессу сборки. ИМС должны сохранять в заданных пределах электрические параметры и прочность конструкции в процессе и после воздействия вибрационных нагрузок с частотой от 1 до 600 Гц при максимальным ускорении до 10g, ударных – с длительностью от 2 до 6 миллисекунд и ускорением 75g, центробежных – с ускорением до 25g, а также сохранять электрические параметры, внешний вид и маркировку в процессе и после воздействия: повышенной (+55, +70, +80 °С) и пониженной (–10, –25, – 45°С) температуры окружающей среды, а также многократных циклических воздействий (число циклов уточняется в частных технических условиях – ЧТУ) указанных температур; повышенного давления окружающей среды до 3 атмосфер и пониженного давления до 666,5 Па; относительной влажности воздуха 98% при температуре +25 °С в течение 10, 30 или 56 суток (уточняется в ЧТУ); дополнительных факторов: инея и росы, морского тумана, плесневых грибков, радиационного облучения (уточняется в ЧТУ).

Минимальное значение вероятности безотказной работы ИМС в течение 500 ч (режимы указываются в ЧТУ) при достоверности 0,9 должно составлять не менее 0,9. Долговечность ИМС должна быть не менее 10000 ч. Сохраняемостъ корпусных ИМС в ЗИПе, в составе РЭА, при хранении в складских помещениях должна быть не менее 6 лет, из них в течение одного года температура может меняться от - 50 до +50 °С, а относительная влажность до 98% при температуре +30 °С (полевые условия). К концу срока эксплуатации допускается изменение электрических параметров ИМС до значений, определяемых ЧТУ.

Для проверки соответствия ИМС требованиям ОТУ и ЧТУ проводятся испытания (приёмо-сдаточные, контрольно-выборочные, конструктивные, на надёжность, долговечность, сохраняемость) Число ИМС одного вида (типа) в испытуемой партии составляет 25…500 штук.

На каждой выпускаемой предприятием корпусной ИМС должна быть маркировка, содержащая условное обозначение (шифр ИМС), обозначение первого вывода, товарный знак, год и месяц выпуска, клеймо ОТК. Если конструкция микросхем или габаритные размеры не позволяют наносить маркировку непосредственно на корпус микросхемы, то её наносят на технологическую тару. В технической документации помещают указания о нанесении маркировки.

Все корпусные микросхемы должны быть упакованными в тару, исключающую возможность повреждения микросхем и деформацию выводов. Бескорпусные микросхемы должны быть упакованы в индивидуальную тару, защищающую их от механических повреждений и обеспечивающую возможность измерения электрических параметров. ОТУ на микросхемы специального назначения изложены в ОСТ 4ГО. 005. 211.

Микросхемы специального назначения должны выдерживать более жесткие условия эксплуатации.

1.2 Частные технические условия (ЧТУ)

ЧТУ разрабатываются в соответствии с ОТУ. В ЧТУ определяются: назначение данного вида ИМС, их принадлежность к определенному ряду и серии, уточняются нормы на параметры и режимы испытаний, устанавливаются специальные и дополнительные требования. ЧТУ согласовываются с заказчиком. ЧТУ, как правило, входят в комплект конструкторских документов. Соблюдение ЧТУ и ОТУ является обязательным для заказчика, разработчика и изготовителя.

1.3 Временные технические условия (ВТУ)

ВТУ устанавливаются на время проведения разработки и изготовления опытной партии, когда проектировщику ещё не известны точные значения некоторых параметров.

## 2 Конструкторская документация.

2.1 Схема электрическая принципиальная

Схема электрическая принципиальная отражает полный состав электрических элементов ИМС и электрические связи между ними, даёт полное представление о принципе работы изделия. Схема служит заданием для разработки конструкции ИМС, а также используется при изготовлении, регулировке, контроле и эксплуатации изделия. Схемы электрические принципиальные выполняют по ГОСТ 2. 702-75.

Элементы и компоненты изображают на электрической принципиальной схеме в соответствии с ГОСТ 2.721 – ГОСТ 2.756. Должно быть обеспечено удобство чтения схемы. Связи между элементами должны быть кратчайшими и иметь минимальное число пересечений. На схеме указываются места соедине-

ния (точками). Каждый элемент имеет буквенно-цифровое позиционное изображение (VT1, R3, C2 … и т.д.). Последовательность присвоения порядковых номеров возрастает сверху вниз и слева направо. Позиционные обозначения проставляют рядом с условным обозначением элемента справа или под ним.

На схеме должны быть указаны обозначения внешних выводов микросхемы. На поле принципиальной электрической схемы допускается помещать функциональную схему микросхемы в виде условных графических обозначений, установленных соответствующими стандартами ЕСКД.

В основной надписи (угловой штамп) указывают обозначение принципиальной электрической схемы с шифром ЭЗ.

2.2. Перечень элементов

По ГОСТ 2.702-75 все электрические элементы, изображённые на схеме, заносятся в перечень, имеющий определенную форму (табл. 4.7). Ниже приведен пример перечня элементов к принципиальной электрической схеме.

Таблица 4.7 – Перечень элементов

| Позиционное обозначение | Наименование | Количество | Примечание |
|---|---|---|---|
| | Резисторы | | |
| *R1* | 1,2 к0м ± 10%; 0.02 Вт | 1 | |
| *R2, R4* | 510 0м ± 10%; 0.02 Вт | 2 | |
| | Конденсаторы | | |
| *C1* | 200 пФ ± 15%; 12 В | 1 | |
| *C2* | 380 пФ ± 15%; 12 В | 1 | |
| | Матрица диодная | | |
| *VD2* | 2Д910А ЦИ3.560.00ТУ | 1 | |
| *VT1* | Транзистор кремниевый | | |
| | 2Т318В ЩИ 3.365. 002 ТУ | 1 | |

Запись производят в следующей последовательности: сначала указывают резисторы, а затем остальные элементы и компоненты в алфавитном порядке.

В графе НАИМЕНОВАНИЕ указывают номиналы элементов и допуски, а также величину максимальной мощности рассеяния (для резисторов), максимальное рабочее напряжение для конденсаторов, условное обозначение компонентов, номера ГОСТ или ТУ, по которым их изготовляют.

В пределах каждой группы элементы (компоненты) записывают под общим заголовком по возрастанию порядковых номеров. В конце группы можно оставлять пустую строку для дополнений. Рядом стоящие одинаковые элементы (компоненты) можно записывать в одну строку, например *R2…R4, VD3…VD5*. При повторении наименований допускается использовать кавычки.

По ГОСТ 2.702-75 перечень элементов в виде таблицы размещают на первом листе электрической схемы. Графу ЗОНА допускается не вводить. Перечень элементов может быть выполнен на отдельном листе. В этом случае он находится в комплекте конструкторских документов, помещенных после схемы электрической принципиальной.

## 2.3 Паспорт микросхемы

Паспорт микросхемы – документ, отражающий гарантированные предприятием-изготовителем основные параметры и характеристики изделия. Как правило, паспорт на микросхему выполняют на нескольких листах формата А4. На первом листе указывают товарный знак, условное обозначение и функциональное назначение микросхемы, которое даётся в словесной формулировке, там же представлена схема электрическая принципиальная вместе с таблицей выходов. Согласно ГОСТ 2. 743-91 для элементов и устройств цифровой вычислительной техники показывают условное графическое обозначение функционального назначения данной микросхемы, например, схема логического элемента И-НЕ обозначается прямоугольником. В левом верхнем углу такого прямоугольника выполняется знак, являющийся указателем функции. Этот указатель составляется из соответствующих символов по ГОСТ 13052-72.

На втором листе паспорта выполняют габаритный чертеж микросхемы в корпусе в двух проекциях, необходимых для простановки габаритных размеров (высоты, длины, ширины или наибольшего диаметра). Почти все размеры записывают максимальными без допусков. На том же листе приводят вес микросхемы, напряжение питания и основные электрические параметры.

В основной надписи указывают обозначение габаритного чертежа с шифром *Г* или *ГЧ* [9].

Следующие листы содержат информацию об условиях хранения, о приёмке, упаковке, комплектности поставки, гарантийных обязательствах и др. При заполнении сопроводительного паспорта используют принятые по ГОСТ 2.316-68 сокращения.

## 2.4 Сборочный чертеж микросхемы

Сборочный чертеж микросхемы должен давать представление о расположении и взаимной связи основных составных частей, соединяемых согласно данному чертежу, и обеспечивать возможность сборки и контроля сборочной единицы. Все соединения на сборочном чертеже микросхемы (в корпусе) неразъемные.

Выполнение сборочного чертежа гибридной плёночной микросхемы начинают с разметки мест для видов, основной надписи и спецификации (если она выполняется на том же листе). После этого вычерчивают плату по размерам, указанным на топологическом и сборочном чертежах платы. Все выводы микросхемы нумеруют.

Должны быть видны: корпус, плата, плёночные элементы и навесные компоненты, технологические знаки, «ключ».

В нижней части чертежа наносят технические требования – ряд технических указаний, характеризующих свойства и особенности микросхем в окончательном виде (точность размеров и формы, отклонение подложки, сведения технологического порядка и т.д.).

В правом верхнем углу помещают товарный знак, условное обозначение микросхемы, дату изготовления, обозначение клейма ОТК.

В основной надписи указывают обозначение сборочного чертежа с шифром СБ. Наименование микросхем в конструкторской документации, как правило, должно состоять из слова МИКРОСХЕМА и её сокращенного условного обозначения.

## 2.5. Сводная спецификация

На микросхему и на каждую сборочную единицу составляют спецификацию на отдельных листах. Согласно ГОСТ 2.106-96 спецификация имеет разделы, располагаемые в следующей последовательности: документация, комплексы, сборочные единицы, детали, стандартные изделия, прочие изделия, материалы, комплекты. Название раздела записывают в графу НАИМЕНОВАНИЕ и подчеркивают сплошной тонкой линией.

Обозначение составляют следующим образом: вначале записывают индекс предприятия, разработавшего документ, затем идёт четырехзначная характеристика, устанавливаемая с помощью классификатора. Класс обозначается двухзначным числом. Каждый документ относится к своему классу. Каждый класс содержит до 10 групп. Группа содержит до 10 подгрупп, каждая подгруппа – до 10 видов. Обозначение класса и характеристики выделяют точками. После этого записывают порядковый регистрационный номер документа. Так, в обозначении СГАУ.431241.001СБ, СГАУ означает индекс предприятия, первые две цифры 43 – класс микросхем, 1 – подкласс, 2 – группа, 4 – подгруппа, 1 – вид, 001СБ – порядковый регистрационный номер. Графы ФОРМАТ и ОБОЗНАЧЕНИЕ в разделах СТАНДАРТНЫЕ ИЗДЕЛИЯ, ПРОЧИЕ ИЗДЕЛИЯ и МАТЕРИАЛЫ не заполняются. В разделе ПРОЧИЕ ИЗДЕЛИЯ записывают компоненты с наименованием документов, по которым их приобретают на предприятиях-изготовителях.

Спецификация, как и чертежи деталей, не имеет шифра.

## 2.6. Топологический чертёж платы микросхемы

Плата гибридной ИМС может содержать осажденные проводники, резистивные и диэлектрические слои, контактные площадки. Чертёж такой микросхемы будет выполнен на нескольких листах. Эти чертежи называются ***топологическими*** и имеют наименование ПЛАТА.

Топологические чертежи выполняются в масштабах, обеспечивающих достаточную наглядность взаимного расположения элементов в слоях, таких, как: 10:1; 20:1; 30:1; 40:1; 50:1; 100:1. На первом листе изображают плату со всеми нанесенными на неё плёночными слоями и соединениями между ними. Позиционные обозначения изображенных элементов указываются в соответствии с электрической принципиальной схемой.

На первом листе топологического чертежа при большом числе слоёв или элементов допускается не показывать отдельные слои или элементы (за исключением тех, которые используются при дальнейшем монтаже микросхемы). В этом случае в технических требованиях чертежа приводят соответствующие пояснения. На топологических чертежах плат с небольшим числом элементов допускается совмещение в одном виде нескольких слоев (не более трех), каждый слой выделяют с помощью штриховки, при этом совмещенный вид должен иметь достаточную наглядность.

Все слои, изображенные на первом листе, штрихуют по-разному. Условное обозначение штриховки расшифровывают в таблице, приводимой на том же листе. Направление штриховки у верхней обкладки и выводов нижней обкладки должно быть разным. Диэлектрический слой показывают штрихпунктирной или сплошной линией без штриховки площади диэлектрика. Защитный слой обозначают штрихпунктирной линией без штриховки площади защищенных участков.

На изображениях контактных площадок проставляют порядковые номера. Сначала нумеруют внешние контактные площадки от ключа против часовой стрелки, а затем внутренние, начиная с левого верхнего угла сверху вниз слева направо.

Для того чтобы обозначение внешних контактных площадок можно было отличить от маркировки выводов компонентов, нумерацию последних целесообразно помещать в скобки. На первом листе указывается также ключ – начало отсчёта контактных площадок.

Рекомендуется устанавливать соответствие между нумерацией внешних контактных площадок и нумерацией выводов нормализованного корпуса.

На первом листе топологического чертежа (прил. 1) помещают технические требования, содержащие:

требования к подложке (материал, его марка, ГОСТ или ТУ, шероховатость, неплоскостность поверхностей);

требования к точности выполнения размеров слоев;

данные по изготовлению отдельных слоев;

требования к внешнему виду готовой платы;

указания по обозначению контактных площадок;

указания и данные по проверке параметров элементов и отдельных участков схемы;

указания о том, что обозначения контактных площадок и элементов являются условными.

Технические требования допускается выносить в отдельный документ.

На последующих листах топологического чертежа помещают послойные изображения всех наносимых слоев. Над изображением отдельных слоев разрешается помещать надпись типа ВИД НА РЕЗИСТИВНЫЙ СЛОЙ и т. д. Топологический чертеж каждого слоя платы должен иметь реперные знаки для ориентировки рисунка относительно подложки и совмещения слоев между собой. Размеры элементов в чертежах слоев предпочтительно задавать в прямоугольной системе координат и сводить в таблицу, которую следует располагать

справа или под изображением слоя. Вершины элементов нумеруют с левой нижней точки вверх, затем направо по типу «змейка». Нумерация вершин каждого отдельного элемента, как правило, ведётся с нижней левой точки и продолжается по часовой стрелке. В такой же последовательности координаты точек заносятся в таблицу.

При нанесении номеров вершин элементов на чертеже допускается отдельные номера вершин не проставлять в случае отсутствия возле них свободного места. В таблицах все вершины в пределах каждого элемента должны быть пронумерованы. При расположении элементов по горизонтальным рядам допускается нумерацию вершин производить с переходом от одного элемента к другому в пределах ряда. При внесении изменений допускается нарушение сквозной нумерации вершин. Вводимые дополнительные вершины следует нумеровать цифрами с буквенным индексом.

Координаты, относящиеся к разным элементам, следует отделять утолщённой линией или увеличением интервала. Перед записью координат, относящихся к определенному слою, допускается указывать его наименование. С разрешения отдела (бюро) стандартизации допускается задавать значение координат в масштабе чертежа. Соответствующие указания об этом приводят в технических требованиях. Таблицы координат элементов в слоях следует приводить на листах чертежа, где они изображены, либо выпускать в виде самостоятельного документа на все слои или для каждого слоя отдельно.

Реже геометрические размеры элементов указывают с помощью координатной сетки. В этом случае шаг сетки берут равным 0,05, 0,1 или 0,2 мм, а вершины фигур элементов располагают в точках пересечения линий координатной сетки.

Обозначение топологических чертежей, как правило, следует производить по классу 7, видам 7.100 или 7.107. При выпуске таблиц координат в виде самостоятельного документа последнему присваивается то же обозначение, что и у чертежа, но с шифром «ТБ». В технических требованиях делают соответствующую ссылку. На первом листе помещают таблицу, в которой указывают условное обозначение и наименование слоёв, материалы слоёв (с указанием ГОСТ, ОСТ, ТУ), электрические характеристики, номера листов чертежей и таблиц координат. Если качество микросхемы гарантируется только определенными методами изготовления и очерёдностью нанесения слоя, в таблицу следует дополнительно ввести графы МЕТОД НАНЕСЕНИЯ СЛОЁВ, ОЧЕРЕДНОСТЬ НАНЕСЕНИЯ СЛОЁВ. На том же листе следует разместить таблицу, в которой даны проверяемые величины, предельные отклонения, точки измерения.

В приложениях 2 и 3 приведены сборочный чертеж платы ИМС и сборочный чертеж микросхемы в корпусе. Конструкторские документы на серию микросхем рекомендуется выполнять в виде групповых по ГОСТ 2. 113-70.

2.7. Патентный формуляр

Патентный формуляр составляется по ГОСТ 2 110-68 и содержит общие данные:

таблицу составных частей или элементов объекта, проверенных на патентную чистоту в отношении патентов на изобретения;

выводы по результатам проверки объекта в отношении патентов на изобретения;

результаты проверки объекта в отношении промышленных образцов, патентную защиту объекта;

результаты проверки объекта в отношении товарных знаков;

таблицу изменений, внесённых в объект и влияющих на его патентную чистоту; сведения о проверках патентной чистоты объекта;

заключение Государственного комитета РФ по делам изобретений и открытий;

лист регистрации изменений.

Основой для составления патентного формуляра является отчет о патентных исследованиях, проведённых на стадии разработки рабочей документации. Патентные исследования проводятся научными, конструкторскими, проектными и технологическими подразделениями организаций под методическим руководством и при непосредственном участии патентного подразделения. Главными задачами на данной стадии является обеспечение патентной чистоты, конкурентоспособности и определение технического уровня разработанной микросхемы.

Микросхема считается обладающей патентной чистотой в отношении изучаемой страны только в том случае, если при экспертизе не было выявлено ни одного действующего патента, имеющего отношение к микросхеме в целом и её элементам, либо если такие патенты обнаружены, но в процессе анализа установлено, что на микросхему и её элементы они не распространяются. Если изделие будет в дальнейшем использоваться только на территории Российской Федерации, патентная чистота должна быть обеспечена только в отношении России.

Так как микросхема является комплектующим изделием для других предприятий, то кроме патентного формуляра необходимо составить информационную карту по специальной форме. Информационная карта составляется той организацией, которая разработала патентный формуляр. Карточка подписывается главным инженером (главным конструктором) и руководителем патентного подразделения. Их подписи скрепляются печатями.

## 4.3 Разработка технологической документации на ГИМС

1. Маршрутная карта

*Маршрутная карта* – документ, содержащий описание технологического процесса изготовления изделия со всеми операциями в технологической последовательности с указанием соответствующих данных по оборудованию, оснастке, материалам, трудовым и другим нормативам. На микросхемы,

имеющие один и тот же конструктивный чертеж, но изготовляемые по разным технологическим процессам, составляются разные варианты маршрутных карт.

Маршрутная карта оформляется в соответствии с ГОСТ 3.1105-84 и ГОСТ 3.1103-82. Все технологические сведения располагаются в виде таблицы, в которой в порядке последовательности выполнения даются номера и перечень операций, соответствующее им оборудование, оснастка и нормативные данные. Наименование операций выражают именем существительным, например, НАПЫЛЕНИЕ ПЛАТЫ, или именем прилагательным, производным от вида оборудования, например, ШЛИФОВОЧНАЯ. Операции нумеруются арабскими цифрами. Подписи лиц, разработавших и утвердивших маршрутную карту, располагаются сверху или снизу.

Маршрутные карты помещают в начале альбома операционных карт. На особо ответственные изделия оформляют сопроводительные маршрутно-технологические паспорта, которые прилагают к изготовляемой микросхеме. Паспорт передаётся с одного рабочего места на другое вместе с микросхемой. Исполнители расписываются в нём за каждую выполненную операцию. Технологический паспорт по необходимости оформляют с титульным листом, картой измерений, картой эскизов и схем.

Состав операций, подлежащих включению в паспорт, определяется службой главного технолога и согласовывается со службой технического контроля. Технологические паспорта заполняют по формам I и 1а ГОСТ 3.1503-74.

2. Комплект операционных карт

*Операционная карта* – документ, который содержит описание операции технологического процесса изготовления изделия с расчленением её на переходы и указанием режимов работы и трудовых нормативов, оформляется в соответствии с ГОСТ 3.1408-85. Количество операционных карт равно числу операций технологического процесса.

3. Комплект технологических инструкций

*Технологическая инструкция* – документ, содержащий описание специфических приёмов работы, методик контроля, правил пользования оборудованием и приборами (условия вакуумной гигиены), а также описание физико-химических явлений, происходящих при выполнении отдельных операций технологического процесса. Форма инструкции произвольная. В инструкции должны быть ответы не только на вопросы, что и как делать, но и почему так делать и что при этом происходит. Например, в инструкции по отжигу тонкопленочных конденсаторов приведена кривая изменения подъёма температуры и скорости охлаждения. Основные надписи оформляют в соответствии с ГОСТ 3.1103-82.

4. Контрольные карты

Для оформления операций контроля при изготовлении гибридных микросхем используют контрольные карты. В контрольных картах указывают, что и как контролировать, метод и средство контроля, а также процент изделий,

подлежащих контролю. Операционные карты технического контроля разрабатываются на наиболее сложные контрольные операции.
Выбор методов контроля осуществляется разработчиком контрольных операций с учётом их сложности и степени стабильности технологического процесса изготовления.

Формы операционных карт технического контроля установлены в ГОСТ 3.1502-85, как правило, используют форму 2. Основные надписи в карте заполняют по ГОСТ 3.1103-82, а дополнительные графы заполняют по ГОСТ 2.104-68.

5. Ведомости оборудования

На используемое в процессе изготовления микросхемы стандартное и нестандартное оборудование, технологическую оснастку, инструмент и приборы составляются ведомости, в которых указывают наименование оборудования, ГОСТ (ТУ или номер чертежа), техническую характеристику и завод-изготовитель (либо разработчик).

6. Другие виды технологических документов

Согласно ГОСТ 3.1102-83 оформляют и разрабатывают и другие документы общего и специального назначения:

титульный лист, карту эскизов, технологическую инструкцию, карту типового технологического процесса, карту типовой операции, карту технологической информации, комплектовочную карту, ведомости оснастки, материалов и др.; состав документов определяется разработчиком документов в зависимости от стадии разработки технологической документации, типа и характера производства.

Титульный лист выпускают для оформления комплекта технологической документации на изготовление, на технологические процессы изготовления или на отдельные виды технологических документов.

Для пояснения выполнения технологического процесса (операции или перехода) изготовления изделия оформляют карту эскизов. В целях сокращения объёма разрабатываемой технологической документации выпускают технологическую инструкцию, в которой описаны технологические процессы, методы и приёмы, повторяющиеся при изготовлении изделия, правила эксплуатации средств технологического оснащения.

Карта технологической информации предназначена для указания дополнительной информации, необходимой при выполнении отдельных операций и связанной с применением уникальных средств технологического оснащения, прогрессивных методов изготовления изделия.

Литерность документации

На стадии разработки конструкторской документации «Техническое предложение» технологическая документация не разрабатывается.

При разработке технологической документации, предназначенной для изготовления и испытания макета изделия, ей присваивается литера «П». Литера не присваивается технологической документации, предназначенной для

изготовления и испытания опытного образца (опытной партии) и разработанной на основе конструкторской документации, не имеющей литеры. После изготовления и проведения предварительных испытаний опытного образца (опытной партии) осуществляется корректировка технологической документации с присвоением литеры «О». Литера присваивается на основании конструкторской документации, имеющей литеру «О».

По результатам изготовления, приёмочных испытаний опытного образца (опытной партии) и по результатам корректировки конструкторской документации корректируется или разрабатывается технологическая документация с присвоением ей литеры «$О_1$». Конструкторская документация также имеет литеру «$О_1$». Литера «$О_2$» присваивается технологической документации, разработанной по результатам повторного изготовления и приёмочных испытаний опытного образца (опытной партии) и по результатам корректировки конструкторской документации.

При разработке технологической документации, предназначенной для изготовления и испытания изделий серийного и массового производства, ей, соответственно, присваивают литеру «А» или «Б» на основании конструкторской документации, имеющей ту же литеру.

Директивной технологической документации, предназначенной только для решения необходимых инженерно-технических, планово-экономических и организационных задач, постановки изделия на производство присваивают литеру «Д» на основании конструкторской документации, имеющей литеру «А» или «Б».

Для разового изготовления одного или нескольких изделий в единичном производстве разрабатывается технологическая документация с литерой «И». Конструкторская документация в этом случае также имеет литеру «И».

### 4.4. Классификация микросхем

Для классификации интегральных микросхем разработана система обозначений. Условное обозначение отечественных микросхем состоит из пяти элементов.

Первый элемент – цифра, обозначающая группу микросхемы по технологическому исполнению. Второй элемент – две цифры, обозначающие порядковый номер разработки данной серии. Первый и второй элементы обозначения указывают номер серии, в которую входит данная микросхема. Третий элемент – две буквы, обозначающие функциональное назначение микросхемы. Четвертый элемент – цифра, обозначающая порядковый номер микросхемы данного функционального назначения в серии. Пятый элемент – буква, обозначающая величину разброса электрических или эксплуатационных параметров у микросхемы одного и того же типа. При маркировке на корпусах буква может быть заменена цветной точкой. Конкретные значения разброса параметров микросхем и цвет маркировочной точки указываются в соответствующей технической документации. Шестой элемент – цифра, обозначающая вариант конструктивного исполнения бескорпусной микросхемы. В условное обозначение

микросхем широкого применения вводится буква «К», которая ставится в начале обозначения.

Для микросхем, разработанных до введения ГОСТ 18682-73, используется другой способ обозначения. Разница состоит в том, что в старом обозначении после цифры, указывающей на вариант технологического исполнения, ставятся две буквы, обозначающие функциональное назначение. Две цифры, обозначающие порядковый номер разработки данной серии, ставятся после указанных букв. Таким образом, номер серии состоит из первого и третьего элементов обозначения. Кроме того, в старой системе обозначений отсутствует шестой элемент.

По технологическому исполнению микросхемы обозначаются следующим образом: полупроводниковые – 1, 5 и 7; гибридные – 2, 4, 6 и 8; прочие – 3. Например, полупроводниковая логическая микросхема 121 серии, выполняющая функции И-НЕ/ИЛИ-НЕ, имеет следующее обозначение –121ЛБ1А. Гибридная логическая микросхема 217 серии, выполняющая те же функции, но разработанная до введения нового ГОСТа на обозначения, имеет следующее обозначение – 2ЛБ172А. Буква «А» обозначает, что для питания микросхемы используется источник напряжения 6В.

Бескорпусные микросхемы по конструктивному исполнению имеют следующие обозначения: 1 – бескорпусная микросхема с гибкими выводами; 2 – с ленточными (паучковыми) выводами и выводами, выполненными на диэлектрической плёнке; 3 – с жесткими (шариковыми или столбиковыми) выводами; 4 – бескорпусные микросхемы, выполненные на общей подложке или пластине и неотделённые друг от друга; 5 – бескорпусные микросхемы, выполненные на общей подложке или пластине и отделённые друг от друга без потери ориентировки (например, наклеенные на плёнке); 6 – бескорпусная микросхема с контактными площадками без выводов. Например, последняя цифра в обозначении К740УДЗ-Б-1 указывает, что данная бескорпусная микросхема имеет гибкие выводы.

Конструктивно-технологические характеристики микросхем

К основным показателям, характеризующим конструктивно-технологические особенности интегральных микросхем, следует отнести плотность упаковки и степень интеграции.

Плотность упаковки ИМС – отношение числа компонентов и элементов интегральной микросхемы, в том числе содержащихся в составе компонентов, к объёму ИМС без учета объёма выводов. При оценке ГИМС часто пользуются понятием плотности упаковки на площади $y_s$, которая равна отношению числа элементов $N_Э$ и компонентов $N_K$ к площади подложки (платы) $S_n$ или кристалла $S_k$.

$$y_s=(N_Э+N_K)/S_n. \quad (4.7)$$

$$y_s=(N_Э+N_K)/S_K. \quad (4.8)$$

Этот показатель характеризует технологический уровень и составляет в настоящее время для ГИМС 20-1000 элементов/см$^2$ и более.

Степень интеграции ИМС – показатель степени сложности микросхемы, характеризуемый числом содержащихся в ней элементов и компонентов.

Степень интеграции интегральной микросхемы определяется по формуле

$$K = \lg N, \qquad (4.9)$$

где N – число элементов и компонентов ИМС. Значение $K$ округляют до ближайшего большего целого числа. При этом, если $K<=1$, ИМС считается простой, $1<K<2$ – средней, $2<K<4$ – большой интегральной схемой (БИС), при $K > 4$ – сверхбольшой ИМС (СБИС). В настоящее время выпускаются микросхемы шести степеней интеграции.

В гибридном исполнении обычно выполняются микросхемы частного применения, которые разрабатываются специально для определенного вида аппаратуры и выпускаются в единичном варианте или малыми партиями. Чаще всего это аналоговые и линейные схемы и устройства, в которых сигналы носят непрерывный характер и изменяются в широких пределах как по мощности, так и по частоте. В связи с этим они должны иметь широкий диапазон номиналов пассивных элементов.

Гибридные микросхемы обладают следующими достоинствами: широкий диапазон и высокая точность изготовления номиналов пассивных элементов, низкий уровень паразитных связей между элементами, возможность рассеяния большой мощности, высокая стабильность пассивных элементов, относительная легкость реализации многослойной схемы, легкость топологических решений.

В таблице 4.8 приведены условные обозначения, отражающие функциональное назначение микросхемы.

Таблица 4.8 Условные обозначения микросхем.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
| Электронные ключи | К | Прочие | И | КП |
| Фильтры | Ф | Верхних частот | В | ФВ |
| | | Нижних частот | Н | ФН |
| | | Полосовые | П | ФП |
| | | Заградительные | Г | ФГ |
| | | Сглаживающие | С | ФС |
| Линии задержки | Ш | Схемные | С | ШС |
| | | Прочие | П | ШП |
| Логические элементы | Л | «И» | И | ЛИ |
| | | «ИЛИ» | Л | ЛЛ |
| | | «НЕ» | Н | ЛН |
| | | «И – НЕ, ИЛИ – НЕ» | Б | ДБ |
| | | «И-ИЛИ» | С | ЛС |
| | | «И-ИЛИ-НЕ» | Р | ЛР |
| | | Расширители | Э | ЛЭ |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | «И-ИЛИ-НЕ, И-ИЛИ» | К | ЛК |
| | | «ИЛИ-НЕ, ИЛИ» | М | ЛМ |
| | | Прочие | П | ЛП |
| Элементы запоминающих устройств | Я | На магнитных пленках | Л | ЯЛ |
| | | Матрицы | М | ЯМ |
| | | Прочие | П | ЯП |
| Элементы арифметических и дискретных устройств | И | Регистры | З | ИР |
| | | Сумматоры | С | ИС |
| | | Полусумматоры | Л | ИЛ |
| | | Счетчики | Е | ИЕ |
| | | Шифраторы | Ш | ИШ |
| | | Дешифраторы | Д | ИД |
| | | Комбинированные | К | ИК |
| | | Прочие | П | ИП |
| Наборы элементов | Н | Резисторов | С | ИС |
| | | Конденсаторов | Е | НЕ |
| | | Диодов | Д | НД |
| Усилители | У | Синусоидальные | С | УС |
| | | Импульсные | И | УИ |
| | | Повторители | Э | УЭ |
| | | Прочие | П | УП |
| Генераторы | Г | Синусоидальных колебаний | С | ГС |
| | | Сигналов специальной формы | Ф | ГФ |
| Преобразователи | П | Частоты | С | ПС |
| | | Фазы | Ф | ПФ |
| | | Формы | М | ПМ |
| | | Напряжения | Н | ПН |
| | | Кодирующие | К | ПК |
| | | Декодирующие | Д | ПД |
| | | Уровня (согласователи) | У | ПУ |
| | | Прочие | П | ПИ |
| Модуляторы | М | Амплитудные | А | МА |
| | | Частотные | С | МС |
| | | Фазовые | Ф | МФ |
| | | Импульсные | И | МИ |
| | | Прочие | П | МП |
| Детекторы | Д | Амплитудные | А | ДА |
| | | Частотные | С | ДС |
| | | Фазовые | Ф | ДФ |
| | | Импульсные | И | ДИ |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Прочие | П | ДП |
| Триггеры | Т | Со счетным запуском | С | ТС |
| | | С раздельным запуском | Р | ТР |
| | | С комбинированным запуском | К | ТК |
| | | Шмитта | Ш | ТШ |
| | | Динамические | Д | ТД |
| Электронные ключи | К | Транзисторные | Т | КТ |
| | | Диодные | Д | КД |
| | | Оптоэлектронные | Э | КЭ |

**Контрольные вопросы**

1. Назовите основные этапы проектирования топологии и конструкции ГИМС.
2. В чем заключается анализ технического задания на разработку ИМС?
3. Какие задачи решаются на этапе эскизного проектирования ИМС?
4. Из каких соображений выбирается корпус ИМС?
5. Сформулируйте общие электрические и конструктивные требования, обязательные для всех разработчиков микросхем.
6. Перечислите основные этапы разработки топологии ГИМС.
7. Как рассчитать площадь подложки гибридной микросхемы?
8. Сформулируйте специальные электрические и конструктивные требования к микросхемам.
9. Сформулируйте основные технологические данные и ограничения, учитываемые при разработке топологии.
10. Как крепятся навесные компоненты к пленочной ИМС, как осуществляется монтаж выводов ИМС?
11. Что входит в состав конструкторской документации на ГИМС?
12. Что такое общие (ОТУ) и частные (ЧТУ) технические условия?
13. Что должно быть изображено на топологическом чертеже ИМС?
14. Что изображается на сборочном чертеже ИМС?
15. Что входит в состав технологической документации на ГИМС?
16. Расскажите о классификации ИМС.
17. Какие Вы знаете конструктивно-технологические характеристики микросхем?
18. Каким требованиям должна удовлетворять конструкция корпуса ИМС?
19. Расшифруйте условное обозначение микросхемы К140УД1А.

# Глава 5. RC-цепи распределёнными параметрами

Цепи с распределёнными постоянными (параметрами) являются цепями, в которых параметры сопротивления, ёмкости или индуктивности не могут рассматриваться как сосредоточенные в одной точке пространства. Хорошо известной цепью с распределёнными параметрами являются линия передачи. При конструировании схем на тонких плёнках инженер встречается со специальным классом цепей с распределёнными постоянными, образованных резистивными, проводящими, диэлектрическими (или полупроводниковыми) плёнками, которые размещаются так, чтобы их поля взаимодействовали. Цепи с распределёнными параметрами позволяют создавать плёночные схемы с такими характеристиками, которые невозможно обеспечить при использовании ограниченного конечного числа элементов с сосредоточенными постоянными.

Плёночные RC-цепи с распределёнными параметрами представляют собой многослойные структуры. Помимо того, что такая конфигурация очень хорошо подходит для целей микроминиатюризации, она способна выполнять многие функции, недостигаемые в цепях с сосредоточенными постоянными.

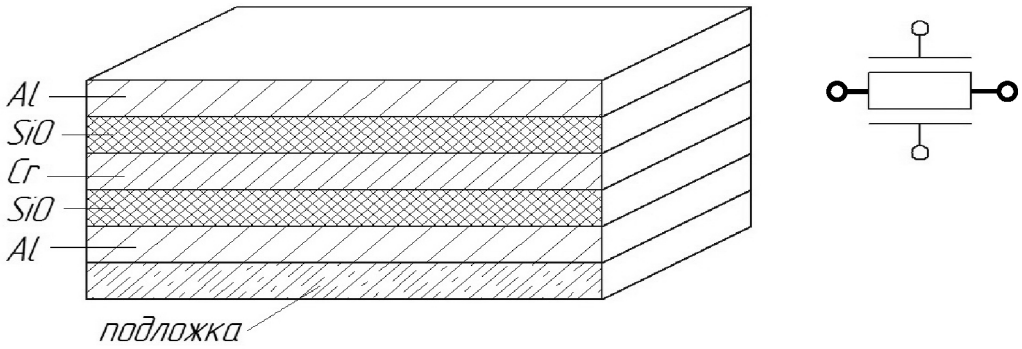



Рисунок 5.1 – Многослойная резистивно-емкостная структура.

Тонкопленочные элементы на основе RC-цепей с распределёнными параметрами являются достаточно «гибкими», их характеристики можно регулировать изменением формы и свойств резистивных, проводящих и диэлектрических плёнок, а также большим числом возможных вариантов включения выводов.

Можно изготовить элементы, в которых сопротивление и ёмкость на единицу площади будут меняться вдоль элемента по любому наперёд заданному закону.

RC-структуры с равномерно распределённым сопротивлением и ёмкостью называются однородными RC-структурами, они эквивалентны линиям передачи с постоянным волновым сопротивлением. RC-цепи, в которых R и C изменяются вдоль длины плёнок, называются неоднородными RC-структурами, они аналогичны линиям передачи с переменным волновым сопротивлением.

Строгий анализ схем с распределёнными параметрами требует описания управляющих электрического и магнитного полей с помощью уравнений Максвелла. Ясное представление о природе таких цепей можно получить более простым способом, рассматривая эквивалентную схему одномерной однородной $RC$ – структуры с распределёнными параметрами .

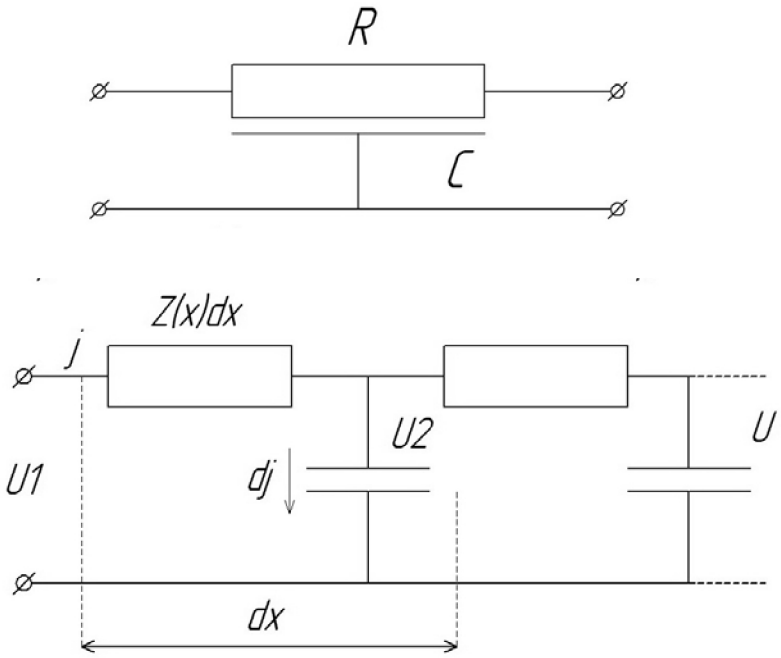



Рисунок 5.2 – Эквивалентная схема RC – структуры.

Рассмотрим наиболее простой тип RC-структуры, состоящей всего лишь из трех плёнок: резистивной, диэлектрической и проводящей.

Для упрощения расчетов краевыми явлениями и неоднородностью структуры плёнок пренебрегаем. При данном подходе допускается замена RC-цепи с распределёнными параметрами цепью последовательно соединённых бесконечно малых элементов $r(x)dx$.

Анализ

Запишем мгновенные значения напряжения и тока в элементарной ячейке (рис. 5.2):

$$\begin{cases} \dfrac{\partial U}{\partial x} = -r(x)\cdot i & (5.1) \\ \dfrac{\partial i}{\partial x} = -c(x)\cdot\dfrac{\partial U}{\partial t}. & (5.2) \end{cases}$$

Найдем вторую производную от напряжения:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = -\left[ r(x)\frac{\partial i}{\partial x} + i\frac{\partial r(x)}{\partial x} \right]. \qquad (5.3)$$

Из (5.1) выразим значение i

$$i = -\frac{1}{r(x)} \cdot \frac{\partial U}{\partial x}. \qquad (5.4)$$

Подставляя (5.2) и (5.4) в (5.3) получим:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - \frac{1}{r(x)} \cdot \frac{\partial r(x)}{\partial x} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} - r(x) \cdot c(x) \frac{\partial U}{\partial t} = 0, \qquad \text{или}$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - \frac{r'(x)}{r(x)} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} - r(x) \cdot c(x) \frac{\partial U}{\partial t} = 0. \qquad (5.5)$$

Для установившегося синусоидального режима имеем:

$$U = \mathrm{Re}\left[E(x) \cdot e^{j\omega t}\right], \qquad (5.6)$$

$$i = \mathrm{Re}\left[I(x) \cdot e^{j\omega t}\right]. \qquad (5.7)$$

Найдем первую и вторую производные выражения (5.6) по $x$ и первую производную по $t$

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial [E(x) \cdot e^{j\omega t}]}{\partial x} = \frac{\partial E(x)}{\partial x} \cdot e^{j\omega t}, \qquad (5.8)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 E(x)}{\partial x^2} \cdot e^{j\omega t}, \qquad (5.9)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = j\omega \cdot e^{j\omega t} \cdot E(x). \qquad (5.10)$$

Подставляя (5.8 – 5.10) в (5.5), получим:

$$\frac{\partial^2 E(x)}{\partial x^2} \cdot e^{j\omega t} - \frac{r'(x)}{r(x)} \cdot \frac{\partial E(x)}{\partial x} \cdot e^{j\omega t} - r(x) \cdot c(x) \cdot j\omega \cdot E(x) \cdot e^{j\omega t} = 0.$$

Разделим обе части уравнения на $e^{j\omega t}$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} - \frac{r'(x)}{r(x)} \cdot \frac{\partial E}{\partial x} - j\omega r(x) C(x) \cdot E = 0. \qquad (5.11)$$

Мы получим дифференциальное уравнение 2-го порядка для общего случая изменения сопротивления *r(x)* и ёмкости *c(x)* RC- структуры.

Зависимость сопротивления от длины неоднородной RC- структуры имеет вид:

$$r(x) = \rho \cdot \frac{l}{S} = \rho \cdot \frac{1}{b_1 \cdot \Delta_1 \cdot f_1(x)} = r_0 \cdot \frac{1}{f_1(x)}, \qquad (5.12)$$

где $r_0$ – сопротивление плёнки резистора однородной RC- структуры,

$b_1$ – начальная ширина резистивной плёнки,

$\Delta_1$ – начальная толщина резистивной плёнки,

$f_1(x)$ – функция, выражающая степень неоднородности RC- структуры по сопротивлению.

Найдем $r'(x)$:

$$r'(x) = -r_0 \cdot \frac{f_1'(x)}{[f_1(x)]^2}. \qquad (5.13)$$

Если изменяется также и ёмкость (вдоль длины), то имеем

$$c(x) = K \cdot \frac{\varepsilon \cdot l \cdot b_2}{\Delta_2 \cdot f_2(x)} = c_0 \cdot \frac{1}{f_2(x)}, \qquad (5.14)$$

где $c_0$ – значение удельной ёмкости на входе RC- структуры,

$\varepsilon$ – значение диэлектрической проницаемости плёнки диэлектрика,

$b_2$ – начальная ширина диэлектрической плёнки,

$\Delta_2$ – начальная толщина диэлектрической плёнки,

$f_2(x)$ – функция, выражающая степень неоднородности RC- структуры по ёмкости.

Подставим (5.12), (5.13) и (5.14) в (5.11):

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{f_1'(x)}{f_1(x)} \cdot \frac{\partial E}{\partial x} - j\omega r_0 c_0 \cdot \frac{1}{f_1(x) \cdot f_2(x)} \cdot E = 0. \qquad (5.15)$$

Мы получили уравнение в частных производных. Так как в данном уравнении одна переменная ($x$), частные производные можно заменить полными производными.

В более компактной форме уравнение (15) можно записать так:

$$E'' = \frac{f_1(x)}{f_1(x)} \cdot E' - j\omega r_0 \cdot c_0 \cdot \frac{1}{f_1(x) \cdot f_2(x)} \cdot E = 0. \qquad (5.16)$$

## Однородная RC-структура

В том случае, если резистивная и диэлектрическая пленки однородны по толщине, выражение (5.16) упрощается:

$$E'' = j\omega r_0 \cdot c_0 \cdot E = 0. \qquad (5.17)$$

Линейное однородное дифференциальное уравнение второго порядка является частным случаем телеграфного уравнения или уравнения теплопроводности. Его решение имеет вид:

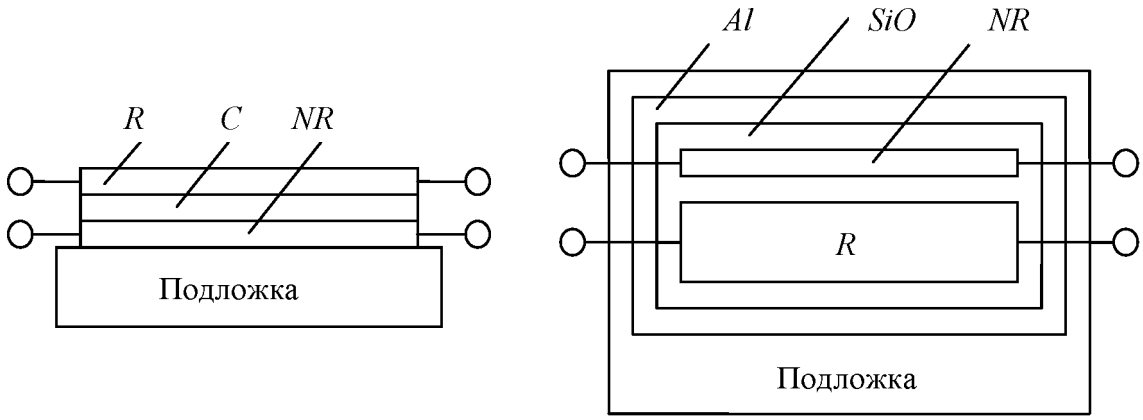
$$U = A \cdot e^{\alpha x} + B \cdot e^{-\alpha x},$$

где $\alpha = \sqrt{j\omega RC}$, $R = r_0 \cdot l$; $C = c_0 \cdot l$.

В настоящее время широкое распространение получили многослойные R-C-NR- и C-R-NC структуры с распределёнными параметрами.

## R-C-NR–структура

R-C-NR–структура представляет собой многослойную конструкцию из резистивной, диэлектрической и второй резистивной плёнки, сопротивление которой отличается в N раз от сопротивления первой.

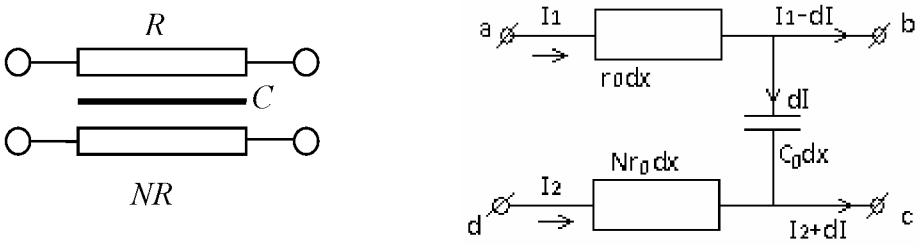



*а*) *б*)

Рисунок 5.3 – Варианты конструктивного решения R-C-NR–структуры.

Может быть два варианта конструкции R-C-NR–структуры (рис. 5.3): а) резистивные плёнки разделены диэлектрической пленкой; б) резистивные плёнки нанесены на диэлектрическую плёнку, под которой находится проводящая плёнка.

Условное обозначение и эквивалентная схема ячейки R-C-NR–структуры приведены на рис. 5.4:




а) б)

Рисунок 5.4 – Условное обозначение (а) и эквивалентная схема (б) R-C-NR–структуры.

На основании анализа схемы (рис. 5.4, б) следует:

$$\partial I = j\omega C_0 \cdot U_2 \cdot dx,$$

так как $dx \to 0$ $U_2 \approx U_1$, тогда $\partial I = j\omega C_0 \cdot U_1 \cdot dx,$ или

$$\frac{\partial I}{\partial x} = j\omega C_0 U_1 \qquad (5.18)$$

Принимая U=E в выражении (5.17) с учетом выражения (5.18) можно записать:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 U_1}{\partial x^2} - j\omega r_0 C_0 (N+1) U_1 = 0, \\ I_{1,2} = \pm j\omega C_0 \int U_1 dx. \end{cases} \qquad (5.19)$$

Система уравнений (5.19) полностью определяет напряжения и токи в схеме.

Решение этой системы уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned} U &= A \cdot e^{\alpha x} + B \cdot e^{-\alpha x}, \\ I_{1,2} &= \pm \frac{j\omega C_0}{\alpha} (A \cdot e^{\alpha x} - B \cdot e^{-\alpha x}) + D_{1,2}, \\ \alpha &= \sqrt{j\omega R_0 C_0 (N+1)}, \end{aligned} \qquad (5.20)$$

где $D_1$, $D_2$ – произвольные постоянные.

Выражая произвольные постоянные через потенциалы $U_{jk} = U_j - U_k$ и токи в выводах, получим систему уравнений

$$U_{ad} = U_{dc} = U(x=0) = A + B,$$

$$U_{bc} = U_{ab} = U(x=l) = A \cdot l^{\theta} + B \cdot l^{-\theta},$$

$$U_{ba} = U_{ad} = \int_0^e -I_1 \cdot R(x) dx = \frac{1}{1+N} \left[ A(e^{\theta} - 1) + B(e^{\theta} - 1) \right] + G,$$

$$U_{cd} = U_{bc} = \int_0^e -I_2 \cdot NR(x) dx = \frac{N}{1+N} \left[ A(1 - e^{\theta}) + B(1 - e^{\theta}) \right] + G;$$

здесь G – постоянная интегрирования,

$$\theta = \alpha \cdot l = \sqrt{j\omega RC(N+1)}, \qquad (5.21)$$

$l$ – полная длина структуры,

$R = r_0 \cdot l$ – суммарное сопротивление RC-структуры,

$C = c_0 \cdot l$ – суммарная ёмкость RC-структуры.

Токи выводов в соответствии с (5.20) равны:

$$I_b = \frac{\theta}{(1+N)R} (A \cdot e^{\theta} - B \cdot e^{-\theta}) + \frac{G}{R}, \qquad (5.22)$$

$$I_c = -\frac{\theta}{(1+N)R} (A \cdot e^{\theta} - B \cdot e^{-\theta}) + \frac{G}{R}, \qquad (5.23)$$

$$I_d = \frac{\theta}{(1+N)R} (A - B) - \frac{G}{NR}, \qquad (5.24)$$

$$I_a = -\frac{\theta}{(1+N)R} (A - B) - \frac{G}{NR}. \qquad (5.25)$$

Уравнениями (5.20 – 5.25) определяются напряжения и токи структуры, выраженные через произвольные постоянные величины A, B, G, которые можно найти, если конкретизировать вид цепи (соединения выводов) и подключить источник тока и напряжения.

Однако можно представить соотношения (5.20 – 5.25) в ином виде, если исключить из них произвольные постоянные и вместо разности потенциалов между соседними выводами ввести потенциал конечного вывода. Тогда связь между токами и потенциалами выводов можно записать в форме неопределённой матрицы полных проводимостей:

$$\begin{Vmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_d \end{Vmatrix} = \frac{1}{(1+N)R} \begin{Vmatrix} \frac{\theta}{th\theta}+N & 1-\frac{\theta}{th\theta} & \frac{\theta}{sh\theta}-1 & \frac{\theta}{sh\theta}-N \\ 1-\frac{\theta}{th\theta} & \frac{\theta}{th\theta}+\frac{1}{N} & -\frac{\theta}{sh\theta}-\frac{1}{N} & \frac{\theta}{sh\theta}-1 \\ \frac{\theta}{sh\theta}-1 & \frac{\theta}{sh\theta}-\frac{1}{N} & \frac{\theta}{sh\theta}+\frac{1}{N} & 1-\frac{\theta}{th\theta} \\ -\frac{\theta}{sh\theta}-N & \frac{\theta}{sh\theta}-1 & 1-\frac{\theta}{th\theta} & \frac{\theta}{th\theta}+N \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \\ U_d \end{Vmatrix}. \qquad (5.26)$$

Эта матрица существенно упрощает вычисления характеристик для конкретных способов соединения выводов. Каждый столбец и строка матрицы определяют потенциал или ток вывода соответственно.

Производные схемы получаются из общей схемы либо за счёт попарного соединения выводов, что эквивалентно закорачиванию входа, образуемого этими двумя выводами, либо за счет того, что некоторые выводы остаются свободными (отсоединёнными). Указанные операции можно применять последовательно к производным схемам и получать новые схемы.

Для определения характеристик производных схем с помощью неопределённой матрицы полных проводимостей следует учесть, что операция соединения двух выводов приводит к равенству их потенциалов, из-за чего исключается одна независимая переменная, а именно, потенциал. При отсоединения вывода следует считать ток равным нулю и затем последовательно исключить зависимые переменные (потенциалы).

Для некоторых способов соединения выводов вычисления упрощаются, если использовать неопределённую матрицу полных сопротивлений, которую также можно получить из соотношений (5.20 – 5.25).

Из выражения (5.26) следует, что полные сопротивления, а также коэффициенты передачи производных цепей выражаются гиперболическими функциями. Следовательно, характеристики таких схем с распределёнными постоянными R и C вообще невозможно получить с помощью комбинаций конечного числа сосредоточенных сопротивлений и емкостей.

За счет различных соединений выводов основной схемы можно получить 37 производных цепей. Простейшими из них являются двухполюсники – их 13; следующие по сложности – трехполюсники: восемь из них имеют емкостную связь между входом и выходом, а семь – резистивную. Наконец, существуют шесть четырехполюсников.

## C-R-NC-структура

C-R-NC-структура с распределенными параметрами представляет собой многослойную конструкцию из проводящей, диэлектрической, резистивной, второй диэлектрической и второй проводящей плёнки. Величина ёмкости между резистивной пленкой и первым проводящим слоем отличается от емкости между резистивной пленкой и вторым проводящим слоем в N раз.

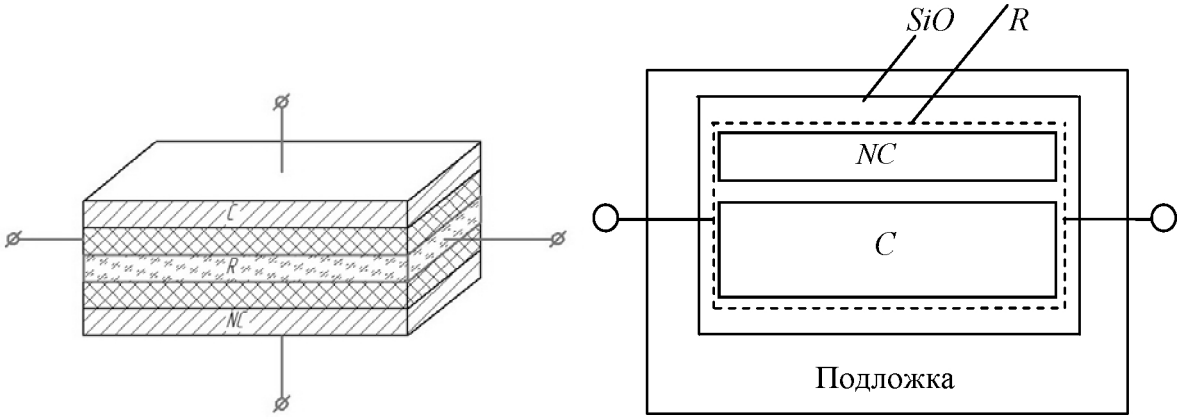
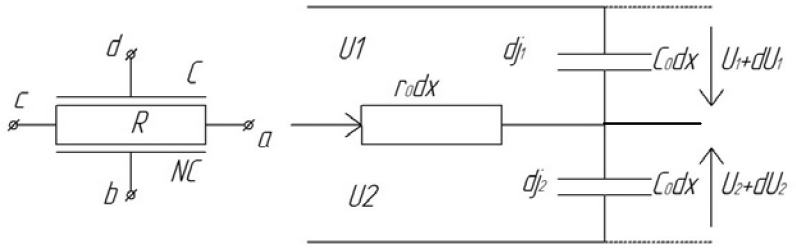



Рисунок 5.5 – Варианты конструктивного решения C-R-NC-структуры.




а) б)

Рисунок 5.6 – Условное обозначение (а) и эквивалентная схема (б) C-R-NC-структуры.

Предполагая $r_0$, $c_0$ и N постоянными можно аналогичным путем, как и для R-C-RN структур, получить дифференциальные уравнения для напряжения и тока C-R-NC-структуры в установившемся режиме при синусоидальном возбуждении:

$$\begin{cases} \dfrac{d^2 i}{dx^2} - j\omega r_0 C_0 (1+N)\cdot i = 0 & (5.27) \\ \dfrac{dU_1}{dx} = \dfrac{dU_2}{dx} = -ir_0 & (5.28) \end{cases}$$

с решениями $i = A\cdot e^{\alpha x} + B\cdot e^{-\alpha x}$,

$$U_1 = (-\frac{r_0}{\alpha})(A\cdot e^{\alpha x} - B\cdot e^{-\alpha x}) - D_1$$

$$U_2 = (-\frac{r_0}{\alpha})(A \cdot e^{\alpha x} - B \cdot e^{-\alpha x}) - D_2$$

где $D_1$, $D_2$, A и B – произвольные постоянные, $\alpha = \sqrt{j\omega r_0 c_0 (N+1)}$.

Применяя преобразования, аналогичные проведенным при анализе R-C-NR структуры, можно получить матрицы полных проводимостей или полных сопротивлений для C-R-NC структуры. Следует заметить, что цепи C-R-NC и R-C-NR дуальны, $\|y\|$ матрица C-R-NC структуры и $\|z\|$ матрица R-C-NR структуры совпадают, если R заменить на $j\omega C$ и $j\omega C$ заменить на R.

Рассмотрим некоторые производные цепи, полученные из R-C-NR или C-R-NC структур.

## Двухполюсники

При N ≠ 0, как отмечалось выше, можно получить 13 производных двухполюсных цепей, при N = 0 существуют четыре производные цепи с двумя выводами, показанные в таблице 5.1. В этой же таблице приведены выражения для полного сопротивления каждого двухполюсника.

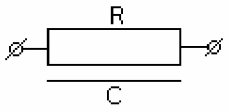
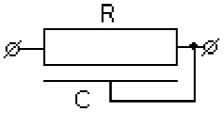
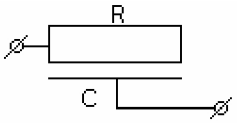
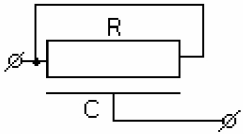
| Тип схемы |  1 |  2 |  3 |  4 |
|---|---|---|---|---|
| $\frac{Z}{R}$ | $\frac{2}{\theta} th \frac{\theta}{2}$ | $\frac{th\theta}{\theta}$ | $\frac{cth\theta}{\theta}$ | $\frac{cth\theta/2}{2\theta}$ |

Таблица 5.1. Двухполюсники на основе RC- структуры.

Здесь $\theta = \sqrt{j\omega RC}$.

Нетрудно заметить, что первые две схемы характеризуются наличием резистивной связи между выводами. На низких частотах они эквивалентны сосредоточенному активному сопротивлению.

Третья и четвертая схемы не имеет резистивной связи между выводами. Такие цепи на низких частотах эквивалентны сосредоточенной ёмкости.

Полное сопротивление Z двухполюсника 2 (ускоряющая цепочка) имеет вид

$$Z = R\frac{th\theta}{\theta}, \qquad (5.29)$$

а модуль и фаза соответственно равны:

$$\left|\frac{Z}{R}\right| = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\omega RC}} \cdot \sqrt{\frac{ch\sqrt{2\omega RC} - \cos\sqrt{2\omega RC}}{ch\sqrt{2\omega RC} + \cos\sqrt{2\omega RC}}} = \frac{1}{\gamma}\sqrt{\frac{ch2\gamma - \cos 2\gamma}{ch2\gamma + \cos 2\gamma}}, \qquad (5.30)$$

$$\varphi = arctg\sqrt{\frac{\sin\sqrt{2\omega RC} - sh\sqrt{2\omega RC}}{\sin\sqrt{2\omega RC} + sh\sqrt{2\omega RC}}} = arctg\sqrt{\frac{\sin 2\gamma - sh2\gamma}{\sin 2\gamma + sh2\gamma}}, \qquad (5.31)$$

где $\gamma = \sqrt{\frac{\omega RC}{2}}$.

Зависимость модуля и фазы полного сопротивления этого двухполюсника от частоты показаны на рис. 5.7.

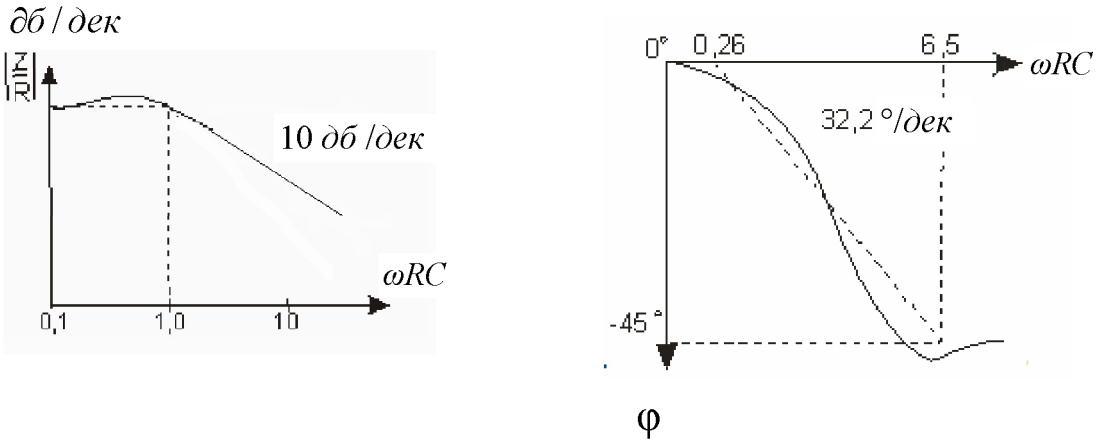



Рисунок 5.7 – Модуль и фаза полного сопротивления двухполюсника 2; пунктир – аппроксимирующая кривая.

Из рисунка видно, что двухполюсник ведет себя аналогично параллельному соединению сосредоточенных сопротивления и ёмкости. Отличие состоит в том, что на высоких частотах модуль полного сопротивления цепи с распределёнными параметрами уменьшается на 10 *дб/дек* вместо 20 *дб/дек* для RC-цепи с сосредоточенными параметрами, а фазовый угол на высоких частотах стремится не к 90°, а к 45°. Поэтому такую цепь иногда называют «полусекцией RC».

Двухполюсные цепи первой группы (1 и 2) могут быть использованы как сопротивления, шунтированные ёмкостью, в цепи эмиттера, где полный фазовый сдвиг 90°, получающийся при параллельном соединении сосредоточенных элементов (резистора и конденсатора), нежелателен. Они могут также служить для замены дифференцирующих конденсаторов, например, в схемах триггеров.

Полное сопротивление двухполюсника 3, относящегося ко второй группе, выражается формулой

$$Z = \frac{R}{\theta \cdot th\theta}, \quad \text{или} \quad \frac{Z}{R} = \frac{Cth\theta}{\theta}, \qquad (5.32)$$

откуда:

$$\left|\frac{Z}{R}\right| = \frac{1}{\gamma}\sqrt{\frac{ch2\gamma + \cos 2\gamma}{ch2\gamma - \cos 2\gamma}}, \qquad (5.33)$$

$$\varphi = arctg\sqrt{\frac{\sin 2\gamma + sh2\gamma}{\sin 2\gamma - sh2\gamma}}. \qquad (5.34)$$

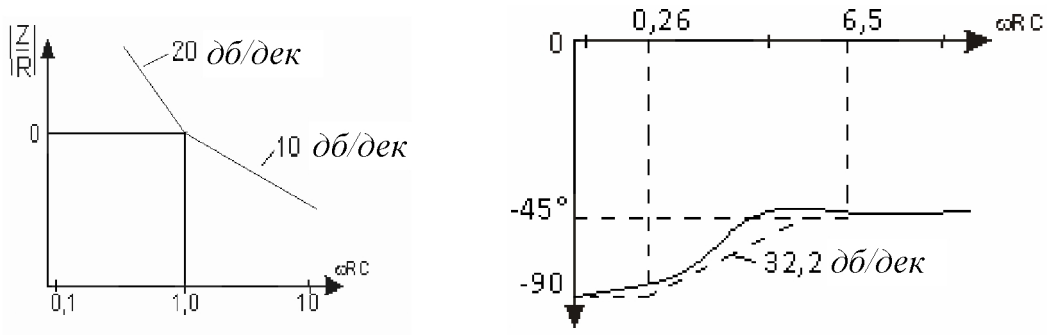



Рисунок 5.8 – Модуль и фаза полного сопротивления двухполюсника 3. Пунктир – аппроксимирующая кривая.

Графики показывают, что рассматриваемая цепь на низких частотах эквивалентна сосредоточенной ёмкости, а на высоких частотах ведет себя как «полусекция RC».

## Трёхполюсники

Трёхполюсники с распределёнными параметрами позволяют улучшить некоторые характеристики схем при замене ими электрических схем с сосредоточенными параметрами. Передаточную функцию трёхполюсника определяемую как

$$K(\omega) = \frac{U_2(\omega)}{U_1(\omega)},$$

легко получить из матриц полных сопротивлений, которые для приведённых ниже схем, имеют вид.

Коэффициент передачи для схемы 1 при разомкнутом выходе ($I_2 = 0$) можно записать в виде

$$K(\omega) = \sec h\theta. \qquad (5.35)$$

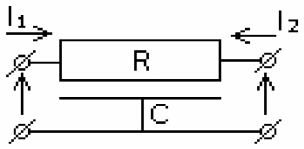
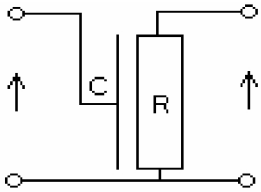
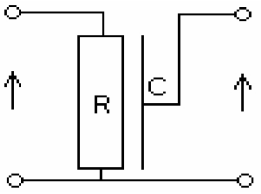
Отсюда легко получить амплитудно-частотную $A(\omega)$ и фазочастотную $\varphi(\omega)$ характеристики

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{ch^2\gamma \cdot \cos^2\gamma + sh^2\gamma \cdot \sin^2\gamma}}, \qquad (5.36)$$

$$\varphi(\omega) = -arctg[th\gamma \cdot tg\gamma], \qquad (5.37)$$

где $\gamma = \sqrt{\frac{\omega RC}{2}}$.

Таблица 5.2 – Матрицы полных сопротивлений трёхполюсников.

| № п.п. | Тип схемы трехполюсника | Матрица полных сопротивлений |
|---|---|---|
| 1 | U1  U 2 | $\left\|\begin{matrix}U_1\\U_2\end{matrix}\right\| = \frac{R}{\theta}\left\|\begin{matrix}cth\theta & c\sec h\theta\\ c\sec h\theta & cth\theta\end{matrix}\right\| \cdot \left\|\begin{matrix}I_1\\I_2\end{matrix}\right\|$ |
| 2 | U1  U2 | $\left\|\begin{matrix}U_1\\U_2\end{matrix}\right\| = \frac{R}{\theta}\left\|\begin{matrix}cth\theta & th\theta\\ th\theta & 2th\theta\end{matrix}\right\| \cdot \left\|\begin{matrix}I_1\\I_2\end{matrix}\right\|$ |
| 3 | U1  U2 | $\left\|\begin{matrix}U_1\\U_2\end{matrix}\right\| = \frac{R}{\theta}\left\|\begin{matrix}2th\theta & th\theta\\ th\theta & cth\theta\end{matrix}\right\| \cdot \left\|\begin{matrix}I_1\\I_2\end{matrix}\right\|$ |

Для низких и высоких частот выражения (5.36) и (5.37) можно упростить:

$$A(\omega) = \begin{cases} 1 & при \quad \omega \prec\prec \dfrac{1}{RC} \\ 2\exp(-\gamma) & при \quad \omega \succ\succ \dfrac{1}{RC} \end{cases} \qquad (5.36,а)$$

$$A(\omega) = \begin{cases} th\gamma \cdot tg\gamma & при \quad \omega RC \to 0 \\ -\gamma & при \quad \omega RC \to \infty \end{cases} \qquad (5.37,а)$$

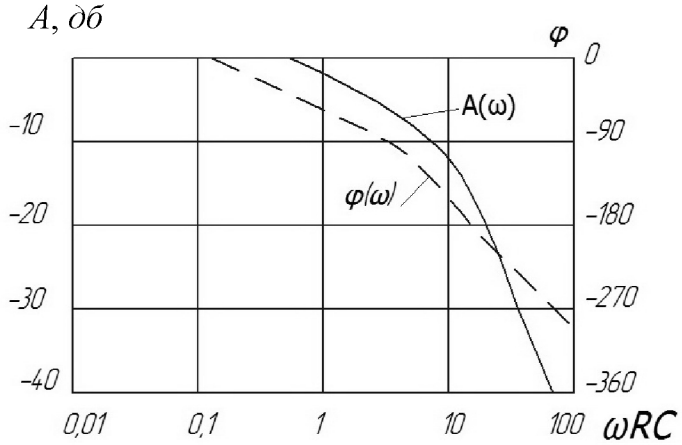



Рисунок 5.9 –Амплитудно-частотная $A(\omega)$ и фазочастотная $\varphi(\omega)$ характеристики трёхполюсника 1.

Значения модуля и фазы коэффициента передачи трёхполюсника (1) приведены на рис. 5.9. Такая схема может быть использована в качестве фильтра нижних частот. Её амплитудно-частотная характеристика лучше (круче), чем характеристики эквивалентных ей одно- и двухзвенных фильтров с сосредоточенными параметрами.

Аналитические выражения для функций передачи цепей 2 и 3 при разомкнутом выходе можно получить, положив $I_2 = 0$.

Для схемы 2 имеем

$$K(\omega) = 1 - \sec h\theta ,$$

откуда

$$A(\omega) = \left[1 - \frac{2ch\gamma \cdot \cos\gamma - 1}{ch^2\gamma \cdot \cos^2\gamma + sh^2\gamma \cdot \sin^2\gamma}\right]^{1/2}.$$

Для схемы 3 $$K(\omega) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{2}.$$

Эту схему можно применять в качестве частотно-независимого аттенюатора с постоянным затуханием 6 дб.

На рис 5.10 показаны амплитудно-частотные характеристики трёхполюсников 2 и 3. Для сравнения на графике построена АЧХ. однозвенного RC-фильтра (в).

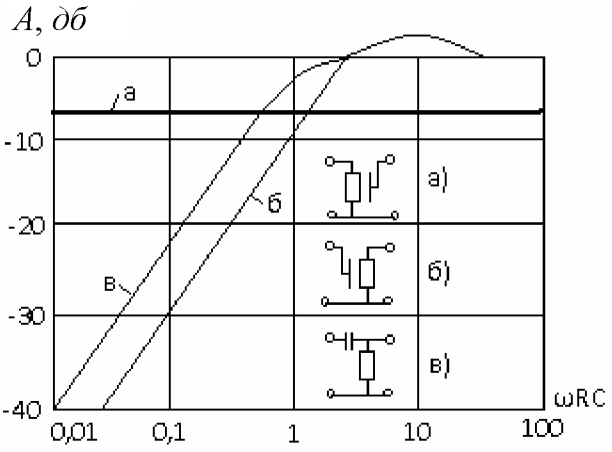



Рисунок 5.10 – АЧХ схем 2 и 3.

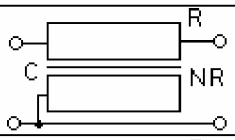
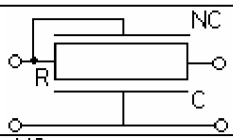
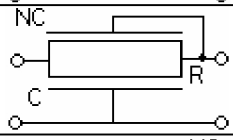
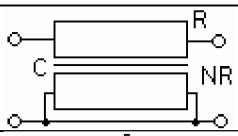
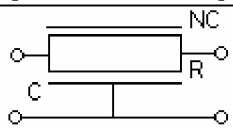
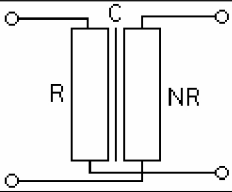
Следует отметить, что у схемы 2 в некотором диапазоне частот наблюдается усиление по напряжению; так, например, при $\omega RC \approx 10$ усиление по напряжению составляет 1,2.

Это свойство RC-цепи с распределёнными параметрами может быть использовано для создания RC-генераторов.

## Частотно-избирательные схемы с распределёнными параметрами

Схемы, обладающие частотной избирательностью, можно получить на основе некоторых производных цепей, а также их комбинаций. Анализ неопределённых матриц полных проводимостей для R-C-NR и C-R-NC структур показывает, что существует несколько частотно-избирательных схем, являющихся производными от основных схем.

Таблица 5.3 – Частотно-избирательные схемы на основе RC-структур

| № п.п | Тип схемы R-C-NR | ωRC(1+N) | N | Тип схемы C-R-NC | S |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 |  | 19,8 | 0,0864 |  | 0,1757 |
| 2 | | 19,8 | 0,0864 |  | 0,1605 |
| 3 |  | 30,8 | 0,2189 |  | 0,093 |
| 4 |  | 13,7<br>13,7 | 6,40<br>0,156 | – | – |

На рис. 5.11 приведены амплитудно-частотные характеристики трех видов частотно-избирательных схем. Как видно, все они имеют неравномерную амплитудно-частотную характеристику. Лучшей по избирательности и симметрии АЧХ является схема 1.

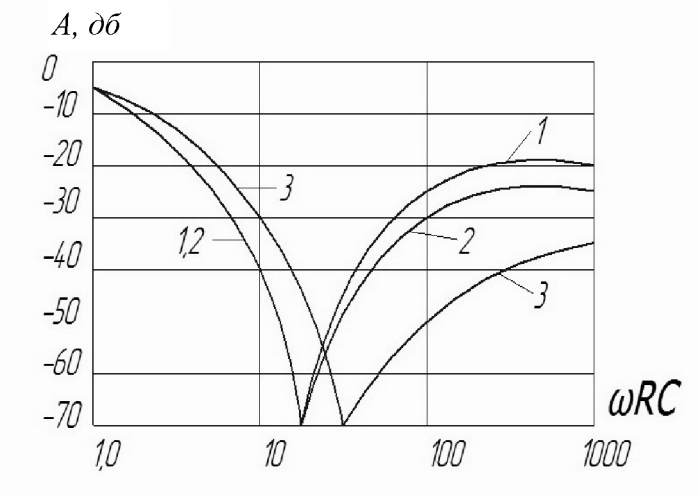



Рисунок 5.11 – Амплитудно-частотные характеристики схем 1 – 3.

Поскольку коэффициенты передачи напряжения всех схем выражаются гиперболическими функциями, условия равенства нулю модуля коэффициента передачи на некоторой частоте записываются в виде трансцендентных уравнений, решения которых дают множество значений $N$ и $\omega_0$.

С целью улучшения симметричности АЧХ частотно-избирательного фильтра предложена «гибридная» схема, содержащая RC-структуру с распределёнными параметрами и дополнительное сосредоточенное сопротивление $R_0$.

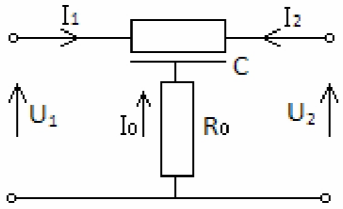



Рисунок 5.12 – Комбинированный частотно-избирательный фильтр.

Коэффициент передачи по напряжению этой схемы при разомкнутом выходе имеет вид

$$K(\omega) = \frac{\alpha + \theta \cdot sh\theta}{\alpha \cdot ch\theta + \theta \cdot sh\theta}, \qquad (5.38)$$

где $\alpha = \frac{R}{R_0}$.

Нетрудно определить, что при $\omega \to 0$, $K(0) = 1$, а при $\omega \to \infty$, $K(\infty) = 1$.

Для частотно-избирательного фильтра числитель коэффициента передачи обращается в нуль при некотором значении частоты. Существует бесконечная последовательность значений $\alpha_{on}$ параметра $\alpha$, при которых возможно равенство нулю числителя коэффициента передачи.

Полагая в выражении (5.38) числитель равным нулю, получим:

$$\alpha = -\theta \cdot sh\theta, \quad \theta = \gamma + j\gamma, \qquad (5.39)$$

или $\alpha = -(1+j)\gamma \cdot sh(1+j)\gamma$, где $\gamma = \sqrt{\frac{\omega_{on} RC}{2}} = \sqrt{\frac{\omega_{on}}{\omega_1}}$;

величина $\omega_1 = \frac{2}{RC}$ характеризует параметры RC-цепи.

Здесь $\omega_{on}$ – так называемые нулевые частоты фильтра.

Приравнивая к нулю действительную и мнимую части числителя коэффициента передачи (5.38), получим условия, определяющие нулевые частоты $\omega_{on}$:

$$th\gamma = -tg\gamma, \qquad (5.40)$$

и выражение для α:

$$\alpha_{on} = 2\gamma \cdot ch\gamma \cdot \sin\gamma. \qquad (5.41)$$

Уравнение (5.40) для определения нулевых частот является трансцендентным и может быть решено графически, если построить отдельно функции $th\gamma$ и $tg\gamma$ и определить точки их пересечения.

Следует заметить, что значения $\alpha = \frac{R}{R_0}$ положительны только при n = 1,3,5…(2n+1), т.е. при нечётных значениях n.

Первое пересечение thγ и tgγ имеет место при $\frac{\omega_{01}}{\omega_1} = 5{,}5951$, или при $\gamma \approx 2{,}365$. При этом $\alpha_{01} = 17{,}786$, крутизна амплитудно-частотной характеристики в точке режекции $S_{01} = 0{,}334$.

Третье и все остальные нечетные пересечения более высокого порядка приближенно выражаются формулой:

$$\frac{\omega_{on}}{\omega} = (n\pi - \frac{\pi}{4})^2 .$$

Особенностью функции передачи этого фильтра при значениях параметра α, близких к $\alpha_{on}$ является скачкообразная смена диапазона изменения фазы при переходе от значений α меньших $\alpha_{on}$ к значениям $\alpha > \alpha_{on}$ (рис. 5.13). Например, при $\alpha < \alpha_{on}$ и изменении частоты от 0 до ∞ фаза коэффициента передачи $\varphi(\omega)$ изменяется от $-\pi/2$ до $+\pi/2$, а при $\alpha > \alpha_{on}$ от $-\pi$ до $+\pi$.

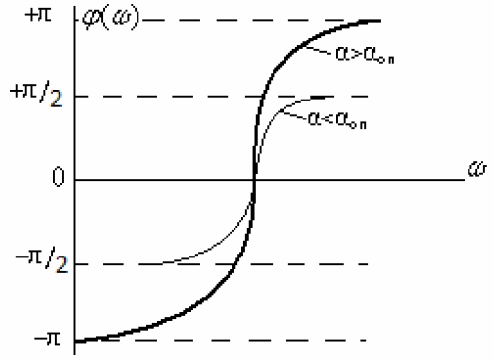



Рисунок 5.13 – Зависимость фазочастотной характеристики фильтра от значений α.

## Реальные схемы

Рассмотренные частотно-избирательные фильтры, в частности, фильтр с дополнительным сопротивлением $R_0$, могут применяться в сочетании с линейным усилителем, имеющим высокий коэффициент усиления $K$. Такая комбинация позволяет получить узкополосный перестраиваемый усилитель,
что достигается за счет использования селективного фильтра в качестве цепи отрицательной обратной связи. При высоком коэффициенте усиления $K$ широкополосного линейного усилителя функция передачи избирательного усилителя целиком определяется функцией передачи фильтра.

Приведенная схема может быть использована в качестве перестраиваемого генератора, если выбрать $\alpha > \alpha_{01}$. При этом на некоторой частоте $\omega_\Gamma$ селективный фильтр обеспечивает сдвиг фаз 180°.

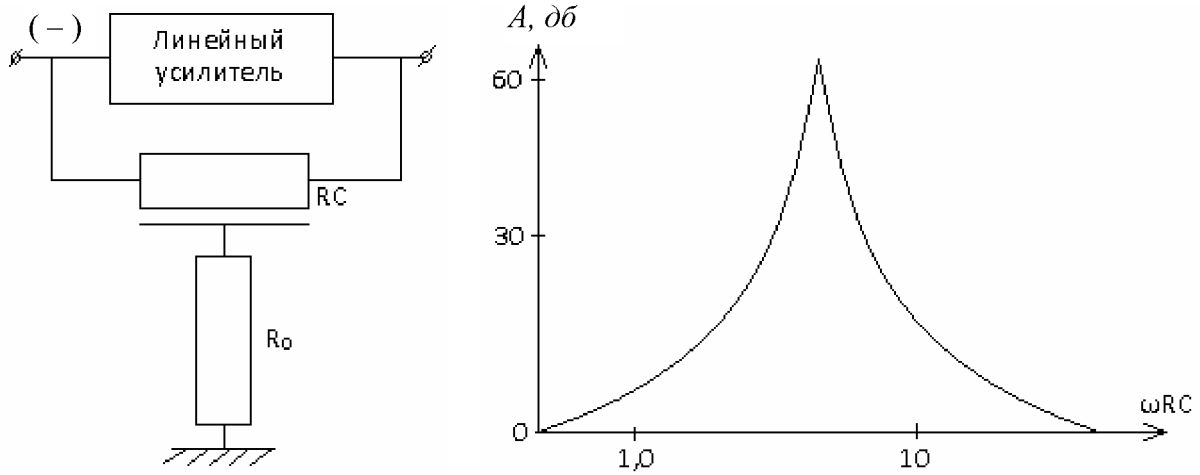



Рисунок 5.14 – Узкополосный перестраиваемый усилитель на основе RC – структуры с распределёнными параметрами.

Высокая чувствительность фазового сдвига, обеспечиваемого селективным гибридным фильтром, к изменениям α вблизи значений $\alpha_{01}$ делает возможным создание двустабильных приборов, работающих на этом принципе. Если сопротивление $R_0$ превышает некоторое критическое значение, в схеме колебаний не будет. Если сопротивление по какой-либо причине станет меньше критического, произойдет скачкообразное изменение фазы и в схеме возникнут колебания.

Такая система с двумя устойчивыми состояниями может быть использована в качестве порогового датчика. Таким способом можно контролировать любую физическую величину, влияющую на сопротивление $R_0$: температуру, давление, интенсивность света, радиацию, электрический потенциал.

Переходные характеристики. Для разработчиков схем представляют интерес переходные характеристики RC-структур с распределенными параметрами. Например, представленные в таблице 1 двухполюсники 1 и 2 могут быть использованы в качестве ускоряющих цепочек. Представленная в таблице 2 схема 1 кроме функций фильтра нижних частот и фазовращающей цепочки может выполнять функции линии задержки и интегрирующей цепочки. При использовании RC-структуры в качестве линии задержки и интегрирующей цепочки она включается по одной и той же схеме. Однако конструктивные параметры RC-структуры для обеих этих схем заметно отличаются. В линиях задержки стремятся получить возможно большую задержку при наименьших искажениях фронта выходного импульса. В интегрирующих цепочках, которые обычно используются для удлинения коротких импульсов, расширение последних достигается путем увеличения искажений фронта выходного импульса.

Как показывают расчеты, время задержки выходного импульса, определяемое на уровне 0,01 от установившегося значения составляет $0{,}065\cdot\tau$ ($\tau$ = RC), а на уровне 0,1 всего $0{,}146\tau$. Время нарастания фронта (определяемое как время, в течение которого амплитуда выходного импульса увеличивается с 0,1 до 0,9 установившегося значения) оказывается равным $0{,}9\tau$. Как и следовало

ожидать, в однородной линии отношение времени задержки к времени нарастания фронта мало́ и не зависит от конструктивных параметров элемента. Это отношение можно увеличить применением неоднородных RC-структур. При приближённых расчетах однородную линию можно представить в виде идеальной линии с задержкой 0,09τ, на выходе которой имеется простая интегрирующая цепочка с такими же параметрами, что и ускоряющая цепочка, т.е. Rи = R; Си = 0,4С. Эти же величины характеризуют RC-структуру и при использовании её в качестве интегрирующей цепочки.

В некоторых расчетах можно использовать приближенную характеристику линии

$$U_u(t) = U_m\left[1 - \frac{4}{3}e^{-2,56\frac{t}{\tau}} + \frac{1}{3}e^{-10,24\frac{t}{\tau}}\right]. \qquad (5.42)$$

Схема включения RC-структуры, используемая в качестве дифференцирующей цепочки, отличается от схемы интегрирующей цепочки только тем, что у неё выходными зажимами служат выводы от пленочного сопротивления R (табл. 5.2, схема 2). Выходные напряжения этих цепей отличаются лишь на величину выходного импульса. В случае, когда на вход дифференцирующей цепочки попадает идеальный перепад напряжения величиной $U_m$, её выходное напряжение определяется соотношением

$$U_д(t) = U_m - U_и(t),$$

где $U_и(t)$ – выходное напряжение интегрирующей цепочки, определяемое выражением (5.42).

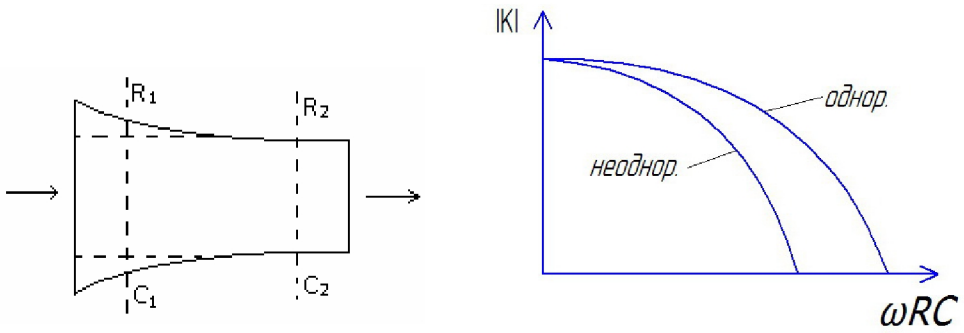
Анализ переходных процессов в RC-структуре с распределёнными параметрами, используемой для осуществления различных функций в импульсных схемах, показывает, что в инженерных расчетах можно использовать однозвенную эквивалентную схему, состоящую из сопротивления, величиной, равной распределённому сопротивлению RC-структуры, и ёмкости в 2,5 раза меньшей суммарной ёмкости RC-структуры. При более точных расчетах можно использовать двухзвенную эквивалентную схему, состоящую из двух R и C, величины которых связываются с параметрами RC-структуры при помощи приближенного выражения (5.42).

При разработке схем рассчитывают требуемые величины эквивалентной ёмкости и сопротивления, а затем, используя связь этих величин с параметрами RC-структуры, определяют конструктивные размеры плёнок.

## Пленочные неоднородные RC-структуры с распределёнными параметрами

Применение неоднородных RC-структур с распределёнными параметрами, у которых величина сопротивления и ёмкости изменяется вдоль длины структуры, позволяет улучшить амплитудно-частотные характеристики RC-цепи по сравнению с характеристиками однородной структуры.

В неоднородной RC-структуре величины сопротивления и ёмкости зависят от длины $x$ элемента и изменяются по определённому закону $R(x)$ и $C(x)$.




а) б)

Рисунок 5.15 – Модель конструкции неоднородной RC-структуры с распределёнными параметрами (а) и АЧХ фильтра нижних частот на основе однородной и неоднородной структур (б).

Система дифференциальных уравнений для неоднородной $RC$-структуры имеет вид:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial U}{\partial x} = I \cdot R(x) \\ \dfrac{\partial I}{\partial x} = j\omega C(x) U \end{cases}. \qquad (5.43)$$

Решая совместно эти уравнения, получим:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - \frac{1}{R(x)} \cdot \frac{\partial R(x)}{\partial x} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} - j\omega C(x) \cdot R(x) \cdot U = 0, \qquad (5.44)$$

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} - \frac{1}{C(x)} \cdot \frac{\partial C(x)}{\partial x} \cdot \frac{\partial I}{\partial x} - j\omega C(x) \cdot R(x) \cdot I = 0. \qquad (5.45)$$

Полученные уравнения имеют решения только при определенных законах изменения сопротивления и ёмкости $R(x)$ и $C(x)$.

Например, при линейном изменении параметров уравнения имеют решения в функциях Бесселя.

При экспоненциальном законе сужения эти уравнения сводятся к дифференциальным уравнениям с постоянными коэффициентами. Законы изменения $R$ и $C$, при которых уравнения (5.44) и (5.45) имеют решения, позволяют конструктивно реализовать соответствующие $RC$-структуры.

В случае экспоненциального закона изменения $R$ и $C$ можно записать:

$$R(x) = r(o) \cdot e^{\alpha x} \qquad (5.46)$$

$$C(x) = c(o) \cdot e^{-\alpha x},$$

где

$$\alpha = \frac{1}{l} \ln \left[ \frac{r(l)}{r(o)} \right], \qquad (5.47)$$

$r(l)$ – сопротивление единицы длины на выходе RC-цепи.

$r(o)$ – сопротивление единицы длины на входе RC-цепи.

С увеличением $\alpha$ амплитудно-частотная характеристика улучшается. Для этого необходимо, чтобы сопротивление RC-цепи на входе было меньше, а ёмкость – больше, чем на выходе. В противном случае амплитудно-частотная характеристика ухудшается.

Необходимую неоднородность параметров в плёночных RC-структурах проще всего получить изменением ширины пленки вдоль длины. Сужающейся плёнке соответствует возрастание сопротивления и пропорциональное уменьшение ёмкости.

Недостатком такого варианта реализации неоднородной RC-структуры является увеличение занимаемой площади. Неоднородные RC-структуры, имеющие минимальную площадь, можно получить, применяя резистивные и диэлектрические пленки переменной толщины. Рассмотрим возможные варианты реализации RC-структур с неоднородностью плёнок по толщине.

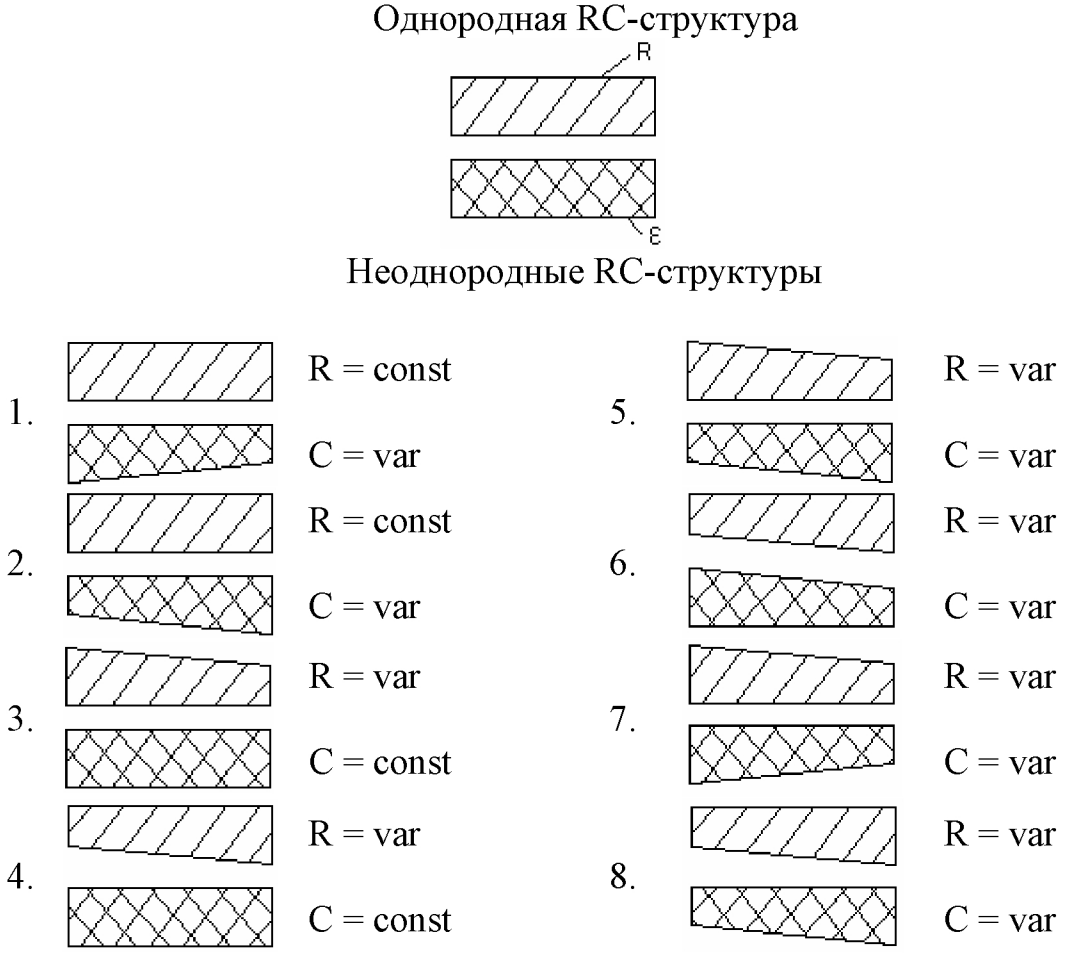



Рисунок 5.16 – Варианты неоднородности по толщине в RC-структурах с распределёнными параметрами.

У однородной RC-структуры толщина резистивной и диэлектрической плёнок постоянна вдоль длины. Для неоднородных по толщине RC-структур имеем несколько вариантов: анализ показывает, что наилучшей амплитудно-

частотной характеристикой обладает RC-структура, выполненная по варианту 5 (рис. 5.16), (на выходе R – наибольшее, C – наименьшее). Спад амплитудно-частотной характеристики в этом случае более крутой.

Сравним различные варианты выполнения RC-структур по коэффициенту ослабления на частоте, соответствующей фазовому сдвигу 180°.

Таблица 5.4 – Коэффициенты ослабления ФНЧ при $\varphi = 180°$.

| Тип RC-структуры | Однородная | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Коэффициент ослабления | 11,9 | 17,75 | 8,7 | 7,5 | 21,9 | 5,5 | 37,6 | 11,9 | 11,9 |

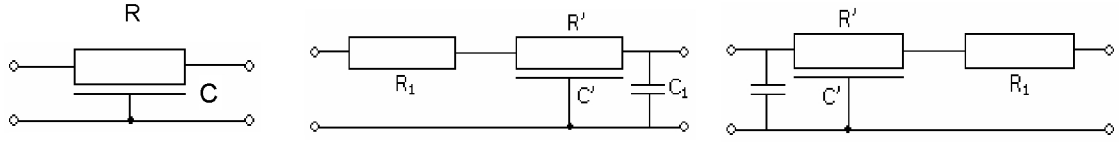
Эти данные получены при соотношении толщин плёнок на входе и выходе, равном 50, т.е. при $\frac{\Delta(o)}{\Delta(l)} = 50$, где $\Delta(0)$ – толщина плёнки на входе, $\Delta(l)$ – толщина на выходе.

Анализ таблицы 5.4 показывает, что RC-структуры с переменной толщиной плёнок позволяют получить при минимальной занимаемой площади различные коэффициенты ослабления сигнала. В случае изменения толщины пленок по экспоненциальному закону можно довести коэффициент ослабления до 2,5, а это значит, что для создания генератора на такой RC-структуре потребуется усилитель с коэффициентом усиления 2,5, в то время как при использовании RC-цепи с сосредоточенными параметрами коэффициент усиления должен быть не менее 29.

Недостаток таких конструкций: получение неоднородных по толщине тонких пленок представляет некоторые технологические трудности.

## Точность изготовления RC-структур с распределёнными параметрами.

Условное обозначение RC-структуры с распределёнными параметрами (рис. 5.17, а) в значительной степени отражает её конструкцию. У «идеальной» RC-структуры длина резистивной и проводящей плёнок одинакова.




а) б) в)

Рисунок 5.17 – Возможные варианты сдвига резистивной и проводящей плёнок.

Для получения RC-структуры с требуемыми параметрами необходимо с высокой точностью изготовить трафареты и точно их совместить. Однако сделать абсолютно одинаковой длину пленок практически невозможно, погрешно-

сти есть всегда. При тенденции размеров RC-структур к уменьшению вопросы точности приобретают весьма важное значение.

Как правило, в реальных структурах резистивная пленка является нижней, а проводящая – верхней. Предположим, что произошел сдвиг проводящей пленки относительно резистивной вправо (рис. 5.17, б), тогда часть резистивной пленки не будет перекрываться обкладкой и на входе схемы появится дополнительное сопротивления $R_1$, а на выходе – емкость $C_1$; основные параметры RC-структуры R и C уменьшатся на $R_1$ и $C_1$.

При сдвиге обкладки в другую сторону получим эквивалентную схему RC-структуры, показанную на рис. 5.17, в. Можно показать, что при сдвиге обкладки относительно резистора на 10% длины, уход частоты $\Delta\omega$ RC-генератора, если в нём используется RC-структура, составит –22% при использовании схемы (б) и +13,2% при использовании схемы (в).

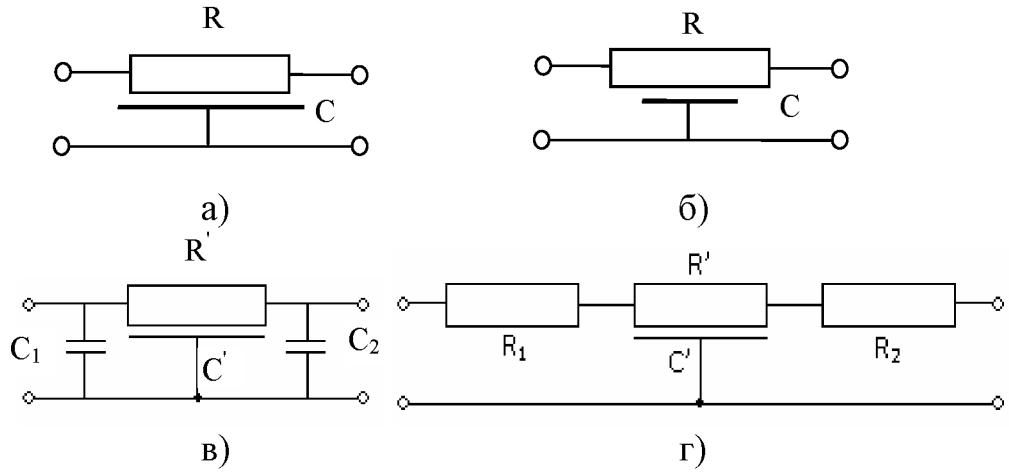



Рисунок 5.18 – Варианты размещения резистивной и проводящей плёнок.

Чтобы избежать такой погрешности, необходимо точно изготовлять трафареты и точно их совмещать. Это усложняет техпроцесс изготовления и удорожает стоимость тонкоплёночных микросхем. Повысить точность изготовления RC-структуры без удорожания стоимости можно, если применить следующие конструктивные варианты (рис 5.18). При реализации варианта «а» проводящая плёнка (обкладка) делается длиннее, чем резистивная плёнка (рис. 5.18, а) с двух концов структуры на величину возможной технологической погрешности $\Delta l$. При реализации варианта «б» более длинной (тоже с двух сторон) делается резистивная плёнка (рис. 5.18, б). Эквивалентные схемы этих конструктивных вариантов RC-структуры изображены на рис. 5.18,в и рис.5.18,г.

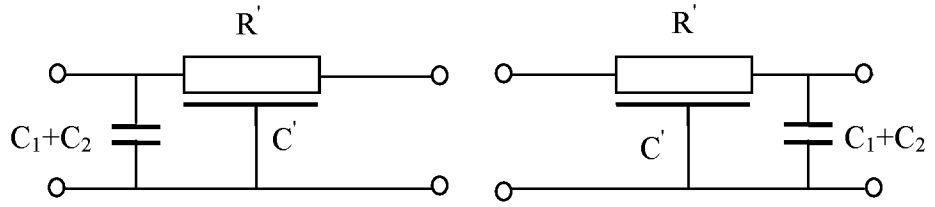



Рисунок 5.19 – Варианты сдвига резистивной и проводящей плёнок для RC-структуры, изображённой на рис. 5.18,а.

В процессе изготовления RC-структуры, изображённой на рис. 5.18,а, при максимальном сдвиге плёнок возможны следующие варианты (рис. 5.19). Как видно из рисунка, в обоих случаях постоянная времени $\tau = RC$ практически не меняется.

В процессе изготовления RC-структуры, изображенной на рис. 5.18,б, при максимальном сдвиге обкладки также возможны различные варианты перераспределения краевых элементов (рис. 5.20). Но, как видно из рисунка, в обоих случаях постоянная времени $\tau = RC$ практически не меняется.

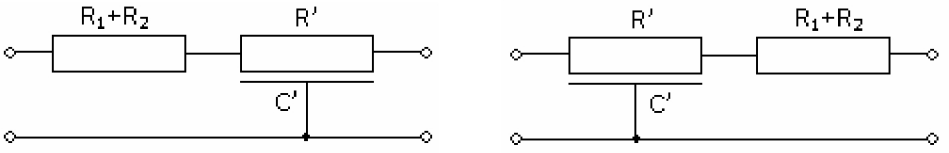



Рисунок 5.20 – Варианты сдвига резистивной и проводящей плёнок.

Таким образом, используя приведенные варианты конструкции, можно обеспечить бóльшую точность, не увеличивая точности изготовления трафаретов и точности их совмещения.

Контрольные вопросы

1. Каковы конструктивные и электрические особенности RC - структур с распределёнными параметрами?
2. В чём конструктивное отличие R-C-NR и C-R-NC - структур?
3. Напишите уравнения для мгновенных значений напряжения и тока в элементарной RC - ячейке.
4. Что такое однородная и неоднородная RC - структуры?
5. Изобразите примеры двухполюсников на основе R-C-NR и C-R-NC - структур с распределёнными параметрами.
6. Как изменяются модуль и фаза полного сопротивления двухполюсников с изменением частоты?
7. Приведите примеры трёхполюсников на основе RC - структуры с распределёнными параметрами. Какие функции они могут выполнять?
8. Приведите примеры частотно-избирательных схем с распределёнными параметрами на основе R-C-NR и C-R-NC - структур.
9. Начертите схему режекторного фильтра с дополнительным сопротивлением. В чём его отличие от избирательных схем на основе R-C-NR и C-R-NC - структур?
10. Начертите схему узкополосного перестраиваемого усилителя на основе RC - структуры.
11. Как повысить точность изготовления RC-структур с распределёнными параметрами?

# Глава 6. Конструирование и расчёт полупроводниковых интегральных микросхем

Полупроводниковая интегральная микросхема – интегральная микросхема, все элементы и межэлементные соединения которой выполнены в объёме и на поверхности полупроводника.

Основным достоинством полупроводниковых интегральных ИМС является сравнительно простая технология изготовления большого числа высококачественных активных элементов.

К недостаткам этих микросхем следует отнести наличие большого числа паразитных связей, узкий диапазон номинальных значений резисторов и конденсаторов, низкую точность их изготовления, сильную температурную зависимость сопротивления и ёмкости, трудность создания индуктивных элементов. Лучше всего в полупроводниковом исполнении реализуются цифровые схемы.

Полупроводниковые ИМС делят на биполярные (в них используются два типа носителей: электроны и дырки) и униполярные (один тип носителей).

Для изготовления полупроводниковых ИМС используют в основном монокристаллический кремний, германий, арсенид и фосфид галлия, антимонид индия (индий-сурьма JnSb).

Исключительно велико в производстве полупроводниковых ИМС значение технологии. Именно постоянное совершенствование технологии полупроводниковых ИМС привело к созданию современных БИС и СБИС.

Немного истории:

1949 г. – изобретение транзистора;
1957 г. – локальная диффузия;
1958 г. – фотолитография;
1959 г. – планарная технология ИС;
1959 г. – защита p – n переходов двуокисью кремния;
1960 г. – эпитаксиальное наращивание кремния.
1964 г. – промышленное производство ИМС.

В основе изготовления современных ИМС и БИС лежит планарная технология. Несмотря на разнообразие типов полупроводниковых ИМС, технологические процессы их изготовления основаны на чередовании нескольких основных операций, которые являются общими для всех приборов. Такими операциями являются:

1. Резка слитков кремния на пластины и механическая обработка пластин (шлифовка, полировка).

2. Химическая обработка для очистки поверхности пластин от повреждённых на предыдущих операциях кристаллов.

3. Окисление пластин кремния для получения плёнки $SiO_2$, маскирующей поверхность при последующих операциях локального легирования.

4. Фотолитография – для образования окон в плёнке $SiO_2$ с целью последующего легирования кремния и для формирования металлических соединительных полосок.

5. Эпитаксиальное наращивание кремния на кремниевые или инородные (сапфировые и др.) подложки (пластины).

6. Легирование кремния примесями методами диффузии или ионного внедрения.

7. Нанесение тонких металлических плёнок на поверхность пластины для создания контактов к слоям и получения соединений между элементами.

8. Проверка параметров всех ИМС, полученных на одной пластине, для отбраковки неработоспособных.

9. Разделение пластины на кристаллы (скрайбирование) и сборка годных ИМС.

10. Технологические испытания на механическую прочность, устойчивость к циклическому воздействию температуры, влагостойкость.

11. Окончательная проверка параметров ИМС.

В течение технологического цикла изготовления ИМС некоторые из этих операций могут повторяться неоднократно.

Названные технологические процессы, являющиеся основой планарной технологии, входят в технологию изготовления любой ИМС. Для изготовления больших и сверхбольших ИМС (БИС и СБИС) разработана модифицированная планарная технология, получившая название изопланарной. Она включает дополнительные операции по получению рельефной поверхности на кремнии методом химического травления, нанесения на поверхность кремния пленки нитрида кремния, изготовления многоуровневой металлической разводки.

При изготовлении БИС и СБИС для уменьшения размеров рисунка в пленке $SiO_2$ может применяться не фотолитография, а другие методы, основанные на использовании более коротковолнового излучения – рентгенолитография и электронолитография, а также методы ионноплазменного травления вместо обычного жидкостного травления.

## Элементы полупроводниковых ИМС на биполярных транзисторах

Транзистор является основным элементом полупроводниковых ИМС. Это объясняется не только широким применением самих транзисторов, но и тем, что все остальные элементы (диоды, резисторы, конденсаторы) формируются на основе полупроводниковых материалов областей транзисторной структуры.

Различают две основные разновидности структур транзисторов для ИМС: с вертикальными переходами и с горизонтальными переходами. Эти два понятия связаны с направлением переноса заряда от эмиттера к коллектору. Есть еще так называемые торцевые транзисторы.

Включение транзистора. Биполярный транзистор (БТ) представляет собой два перехода, объединённых общей базой.

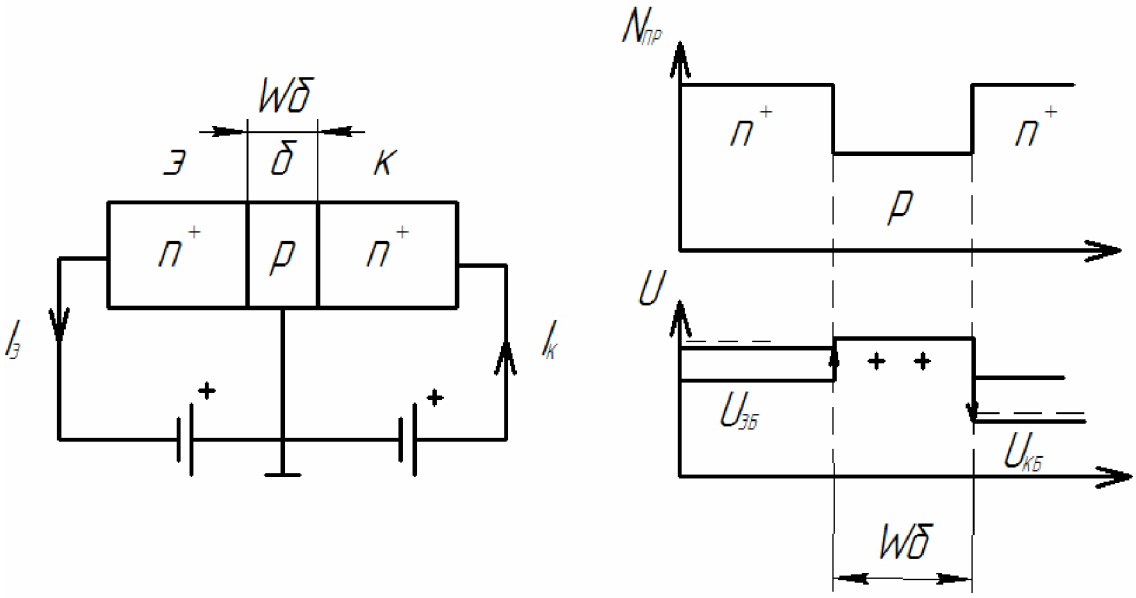



Рисунок 6.1 – Схема с общей базой: включение транзистора, распределение носителей и потенциалов.

При нормальном включении $p = N_A$ и $n = N_D$ (p и n – число дырок и электронов, $N_A$ и $N_D$ – число акцепторов и доноров). Если структура $n^+ - p$, то $N_D >> N_A$, концентрация донорной примеси больше, примерно на порядок, чем акцепторной. На рисунке изображено распределение концентрации примесей и потенциальная диаграмма.

По закону Фика $J = -D_{nб}\dfrac{dn}{dx}$,

где $J$ – плотность потока частиц,

$D_{nб}$ – коэффициент диффузии неосновных носителей (электронов) в базе,

$n$ – концентрация частиц.

Первый закон Фика связывает плотность потока частиц с градиентом их концентрации.

Если $p_б$ – основные носители (дырки) в базе, то $n_б < p_б$ (в статическом режиме).

Диффузионная длина электронов в области базы

$$L_{nб} = \sqrt{D_{nб} \cdot \tau_{nб}},$$

где $\tau_{nб}$ – время жизни электронов в базе.

Рассмотрим два конструктивных варианта.

1) Если ширина базы $W_б$ больше длины свободного пробега электронов в базе $L_{nб}$: $W_б > L_{nб}$, то все электроны рекомбинируют и $I_k \to 0$, $\alpha = I_k / I_э \to 0$. Усилительные свойства отсутствуют.

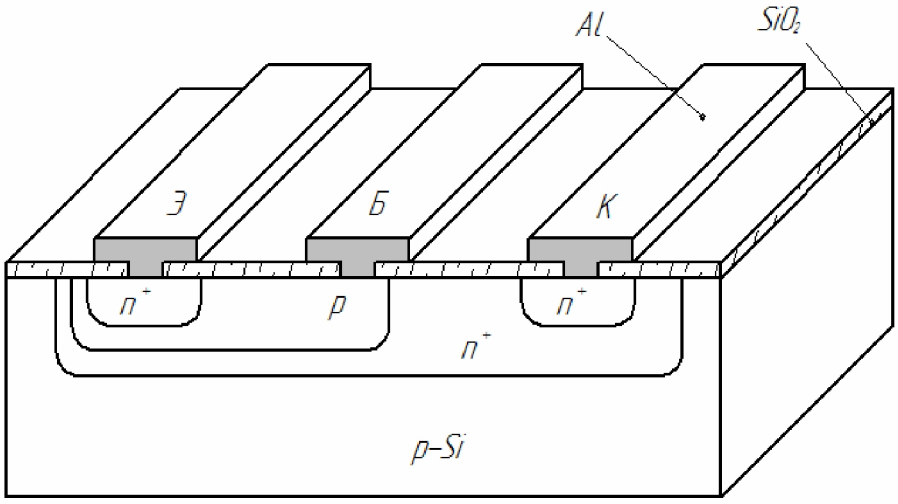
2) Если $W_б < L_{пб}$, то $I_k \approx I_Э; \alpha \to 1; \beta = \dfrac{I_k}{I_Б} = \dfrac{\alpha}{1-\alpha} \approx 10^2 \div 10^3$. Это рабочее состояние. Для кремниевых структур $L_{пб} \approx 4 мкм$.

Здесь $\alpha$ – коэффициент усиления эмиттерного тока; $\beta$ – коэффициент усиления базового тока.

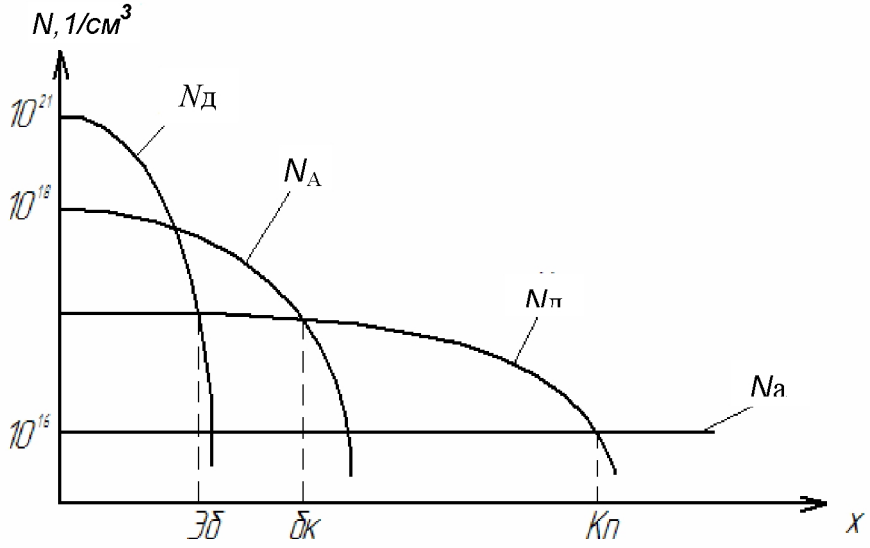
Планарные транзисторы с вертикальной (поперечной) структурой

В этих транзисторах носители зарядов перемещаются от эмиттера к коллектору в направлении, перпендикулярном поверхности кристалла.

1) Вертикальный n–p–n транзистор, полученный тройной диффузией




а)




б)

Рисунок 6.2 – Конструкция транзистора и распределение концентрации атомов примесей.

Конструкция планарного транзистора, сформированного тройной диффузией, проста в изготовлении, позволяет получить высокую плотность компоновки, но все же находит ограниченное применение. Это объясняется достаточно большим сопротивлением тела коллектора $r_{TK}$. Область $n$ – типа (коллектор), образуемая диффузией, имеет неоднородное легирование по глубине. Концентрация донорной примеси уменьшается в направлении от коллекторного перехода к переходу коллектор-подложка. Эта слабо легированная $n$-область характеризуется повышенным объёмным сопротивлением $\rho_V$. Уменьшить её сопротивление позволяет применение ионной имплантации.

2) Эпитаксиально-планарный транзистор.

а) *без скрытого* $n^+$ *- слоя:*

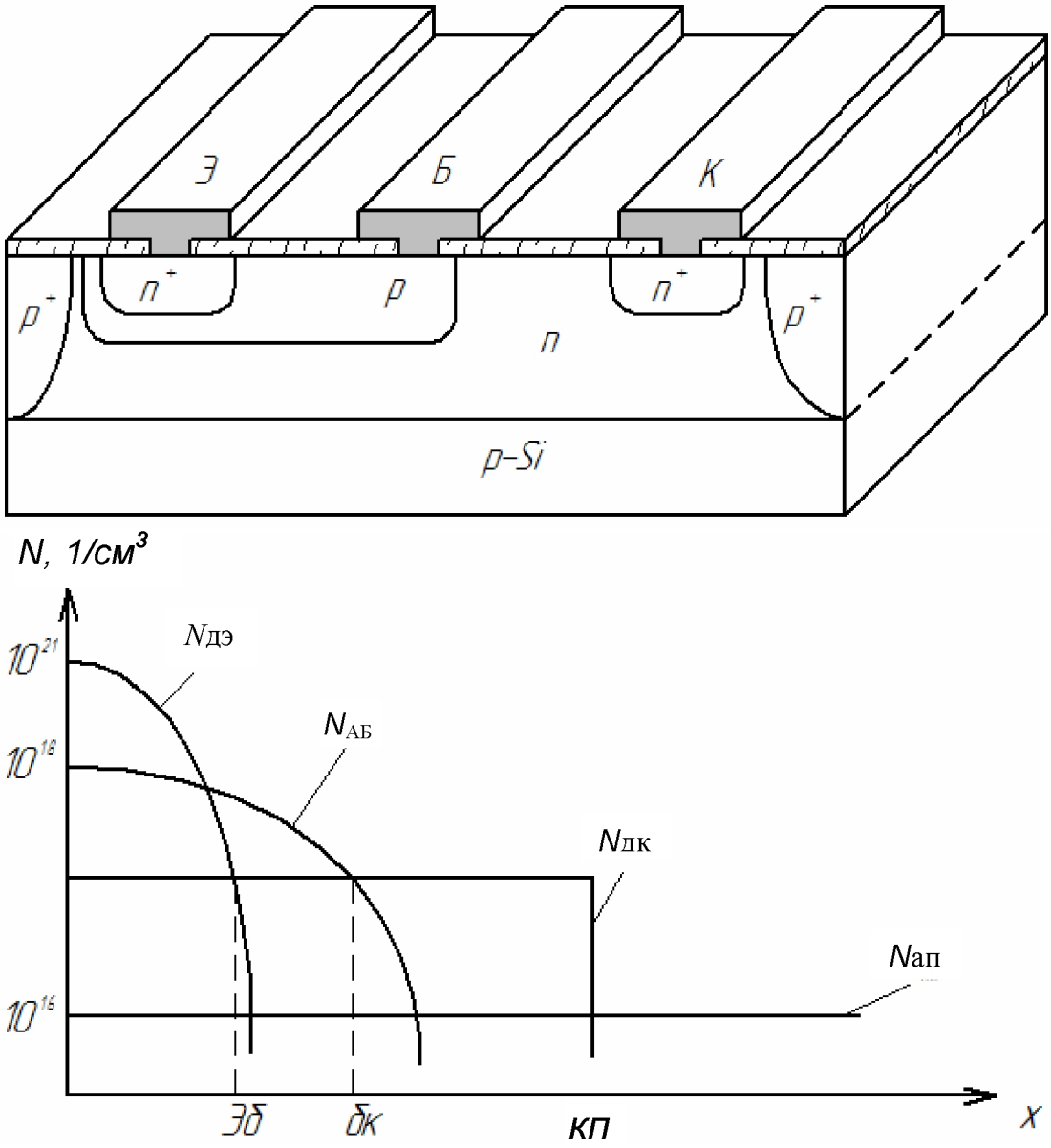



Рисунок 6.3 – Эпитаксиально-планарный транзистор без скрытого $n^+$ - слоя.

В конструкции эпитаксиально-планарного транзистора коллекторная область однородна. Она формируется с помощью эпитаксиального наращивания слоя $n$ - типа на подложку $p$ - типа и разделительной диффузии акцепторной примеси (участки материала $p^+$ - типа). Однако $r_{TK}$ все же велико.

б) *со скрытым $n^+$ - слоем:*

Наибольшее распространение в ИМС получила $n^+ - p - n^+$ транзисторная структура со скрытым подколлекторным $n^+$ - слоем.

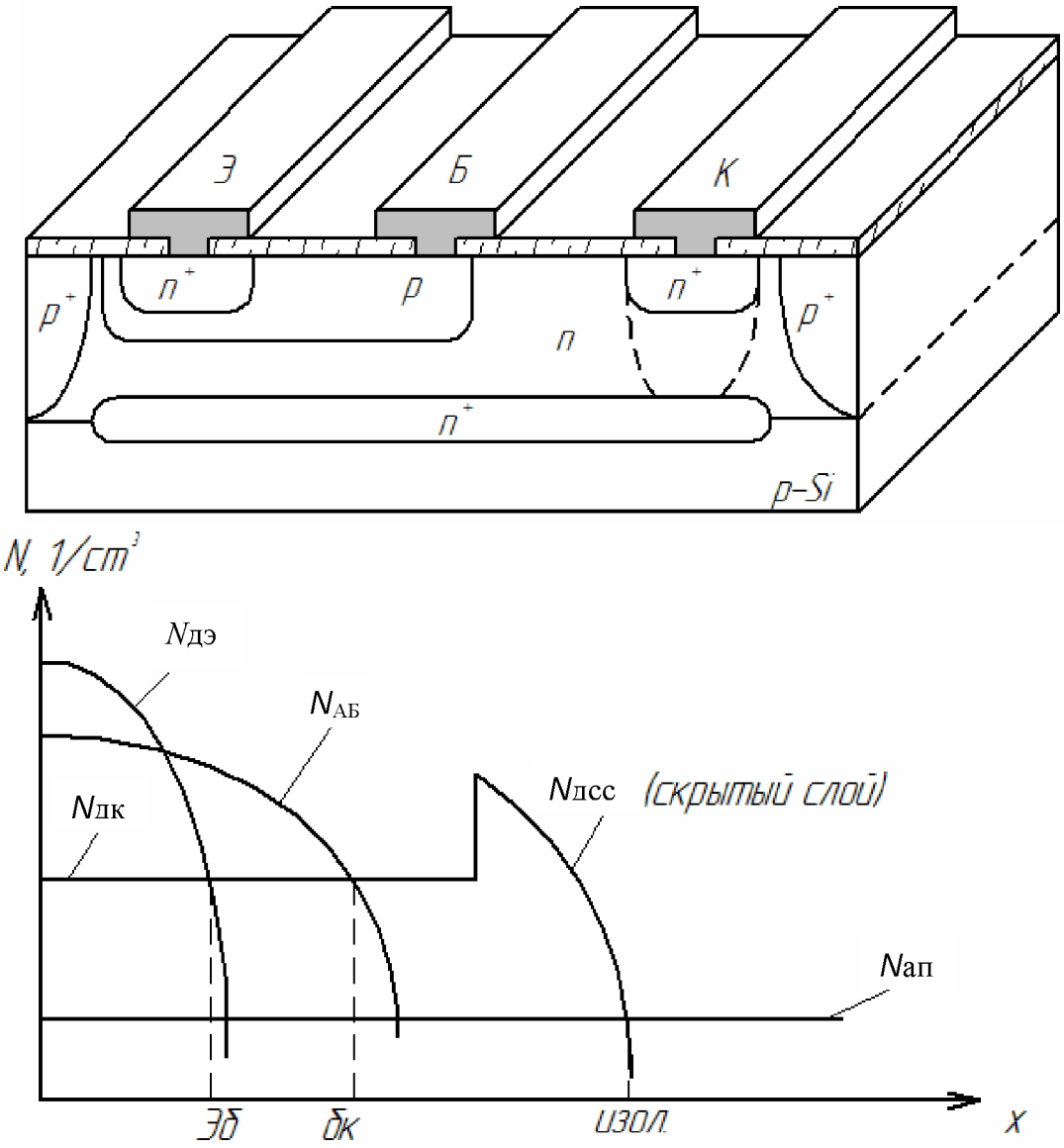



Рисунок 6.4 – Эпитаксиально-планарный транзистор со скрытым $n^+$ - слоем.

Скрытый $n^+$ подколлекторный слой применяется для снижения сопротивления тела коллектора и уменьшения влияния подложки на работу транзистора. Транзистор со скрытым $n^+$- слоем имеет низкое ( $\approx$ 10 Ом) горизонтальное сопротивление коллекторного слоя (транзистор без скрытого $n^+$- слоя имеет сопротивление $\approx$ 100 Ом).

Скрытые слои получают до наращивания эпитаксиального слоя путём диффузии атомов донорной примеси (*N*дсс). Скрытый слой частично расположен в эпитаксиальном. Это объясняется тем, что во время эпитаксиального наращивания донорные атомы скрытого слоя под действием температуры диффундируют в нарастающий эпитаксиальный *n* - слой. Чтобы уменьшить это явление и предотвратить возможное смыкание $n^+$ - слоя с базовым *p* -слоем; в качестве диффузанта для образования скрытого $n^+$ - слоя используют сурьму или мышьяк, имеющие малые коэффициенты диффузии.

Почему применен скрытый $n^+$- слой? Не лучше ли сильно легировать весь объем коллекторной области? Увеличение степени легирования всего объема коллекторной области и уменьшение её удельного сопротивления снижают пробивное напряжение перехода коллектор-база и увеличивают ёмкость этого перехода, т.е. ухудшают характеристики транзистора. Компромиссным решением этой проблемы и явилось создание скрытого $n^+$- слоя. Кроме того, при сильно легированном теле коллектора базовый слой, и тем более эмиттерный, пришлось бы легировать ещё сильнее. При этом они могут вырождаться в «полуметалл».

Толщина скрытого слоя составляет 2,5 … 10 мкм.

Удельное поверхностное сопротивление $\rho_S = 10 \div 30$ Ом/□.

Некоторые параметры структуры эпитаксиально-планарного транзистора со скрытым $n^+$- слоем:

$\rho_S$ слоя эмиттера – 2…3 Ом/□,

$\rho_S$ слоя базы – 200 Ом/□,

$\rho_V$ подложки – 10 $Ом \cdot см$,

глубина расположения эмиттерного перехода – 2,3 мкм,
глубина расположения коллекторного перехода – 2,7 мкм,
глубина расположения перехода коллектор-подложка – 10,5 мкм.

Удельная ёмкость:

эмиттерный переход: боковая – 1000 $пФ / мм^2$, дно – 350…600 $пФ / мм^2$ (для различных $\rho_V$ коллектора);

коллекторный переход: 350…150 $пФ / мм^2$,

коллектор-подложка: боковая – 250…100 $пФ / мм^2$, дно –100 $пФ / мм^2$.

Напряжение пробоя:

эмиттерный переход – 7В,

коллекторный переход – 25…70В при $\rho_{V\,колл} = 0{,}1 \ldots 1{,}2$ Ом*см.

коллектор-подложка – $35 \div 100$ В.

Рабочая зона БТ начинается непосредственно под эмиттерной зоной, поэтому для обеспечения требуемого коллекторного тока и уменьшения падения напряжения на $r_{TK}$ коллекторный контакт располагают как можно ближе к эмиттерному. При проектировании транзистора следует учитывать диффузию под

слой $SiO_2$ акцепторов базовой области и доноров $n^+$ - слоя под выводом коллектора. Необходимо, чтобы они не соединились при диффузии.

Назначение $n^+$ - области под коллекторным контактом состоит в обеспечении надежного невыпрямляющего контакта алюминия к слаболегированной $n$ - области коллектора, поскольку Al является акцепторной примесью в кремнии с растворимостью $\approx 10^{18}$ атомов/см$^3$ при температуре формирования контакта. Уровень же легирования эпитаксиального $n$ - слоя, составляющего тело коллектора, равен $10^{15} – 10^{16}$ атомов/см$^3$.

Расстояния между изолирующей $p^+$ - областью и элементами транзистора определяются также размерами боковой диффузии. Они должны быть примерно равны толщине эпитаксиального слоя.

Рассмотрим типичные конструкции интегральных транзисторов в плане (вид сверху).

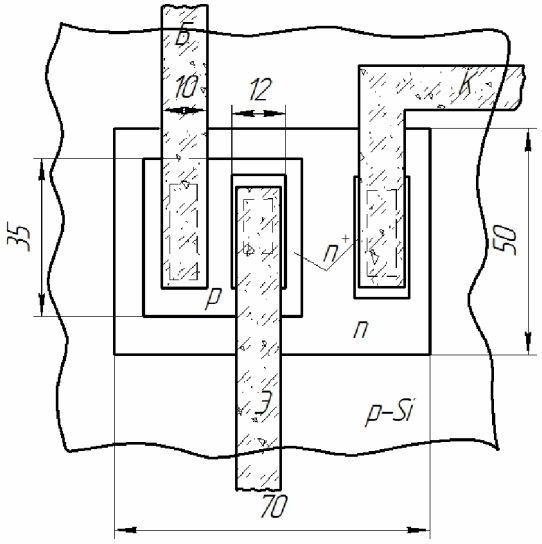



Рисунок 6.5 – Асимметричная конструкция БТ.

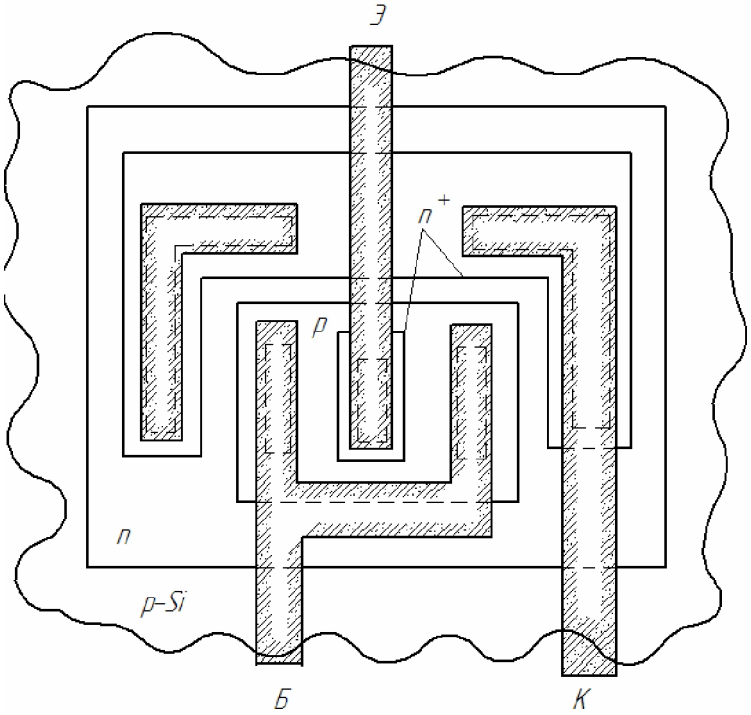



Рисунок 6.6 – Симметричная конструкция БТ.

Для асимметричной конструкции БТ характерно то, что эмиттерный ток протекает к коллектору только в одном направлении.

При симметричной конструкции БТ облегчается выполнение металлической разводки, так как алюминиевые выводы от эмиттера или базы могут проходить над коллектором по защитному слою. Кроме того, в таком транзисторе плотность тока через базу ниже.

3. Мощные транзисторы.

При больших токах значительную роль играет эффект вытеснения тока эмиттера. Он проявляется в том, что напряжение на эмиттерном переходе у его краев больше, чем в центральной части эмиттера, поэтому внешние области эмиттера работают при бóльших плотностях тока, чем внутренние. Это приводит к повышенным рекомбинационным потерям во внешних областях и уменьшению коэффициента усиления транзистора $\beta$. Конструкция мощных транзисторов должна обеспечивать максимальное отношение периметра транзистора к его площади.

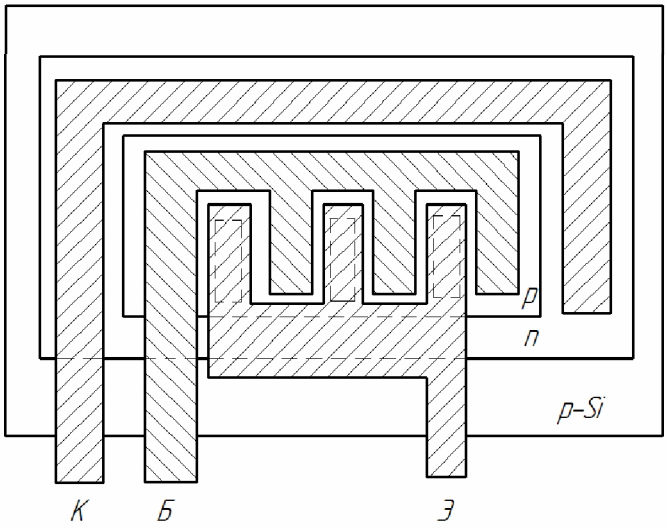



Рисунок 6.7 – Конструкция мощного транзистора (вид сверху).

Таблица 6.1 – Параметры интегральных транзисторов типа n – p – n

| Параметры | Значение | Допуск,% | Температурный коэффициент, 1/°С |
|---|---|---|---|
| Коэффициент усиления, $\beta$ | 100 – 200 | $\pm 30$ | $5 \cdot 10^{-3}$ |
| Предельная частота $f_T$, МГц | 200 – 500 | $\pm 20$ | – |
| Пробивное напряжение $U_{КБ}$, В | 40 – 50 | $\pm 30$ | – |
| Пробивное напряжение $U_{ЭБ}$, В | 7 – 8 | $\pm 5$ | $(2-6) \cdot 10^{-3}$ |

Транзисторы с тонкой базой. Обладают повышенными значениями коэффициента усиления $\beta$ и необходимы для создания ряда аналоговых ИМС (входные каскады операционных усилителей). У этих БТ ширина базы (расстояние между эмиттерным и коллекторным переходами) $W$= 0,2 … 0,3 мкм, коэффициент усиления $\beta = 2000\ldots5000$ при $I_K = 20мкА$ и $U_{КЭ} = 0{,}5В$, $U_{ПР\,КЭ} \approx$ 1,5 … 2,0 В.

Многоэмиттерные транзисторы (МЭТ). Многоэмиттерные транзисторы широко используются в цифровых ИМС (ТТЛ). Число эмиттеров может быть равным 5…8.

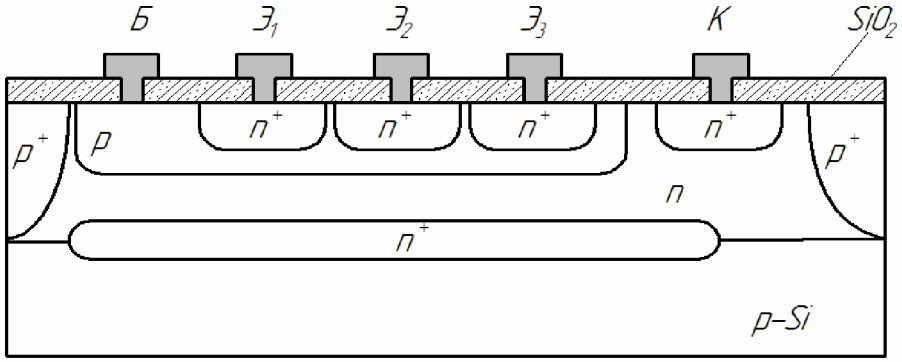



Рисунок 6.8 – Многоэмиттерный транзистор.

При конструировании МЭТ необходимо для устранения паразитных горизонтальных $n^+ - p - n^+$ транзисторов расстояние между краями соседних эмиттеров делать больше диффузионной длины носителей заряда в базовом слое. Если база легирована золотом, то $L_{АБ} \le 2 - 3мкм$ и расстояние между эмиттерами может быть равным 10 … 15мкм.

Для уменьшения паразитных токов через эмиттеры при инверсном включении МЭТ искусственно увеличивают сопротивление пассивной области базы, удаляя базовый контакт от активной области транзистора, чтобы сопротивление перешейка, соединяющего базовый контакт с базовой областью, составило 200 … 300 Ом.

Многоколлекторные транзисторы (МКТ).

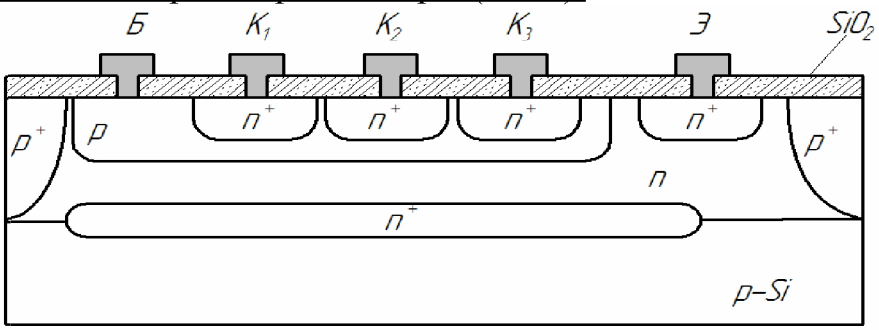



Рисунок 6.9 – Многоколлекторный транзистор.

МКТ – это практически МЭТ, используемый в инверсном режиме: общим эмиттером является эпитаксиальный слой, а коллекторами $n^+$ - области малых

размеров. Такая структура является основой ИМС интегральной инжекционной логики ($И^2Л$). Главная проблема при конструировании МКТ – обеспечение достаточно высокого коэффициента усиления в расчете на один коллектор, для чего скрытый $n^+$ - слой необходимо располагать как можно ближе к базовому, а $n^+$ - коллекторы – как можно ближе друг к другу.

Биполярные транзисторы с комбинированной изоляцией.

а) *изопланарная технология*

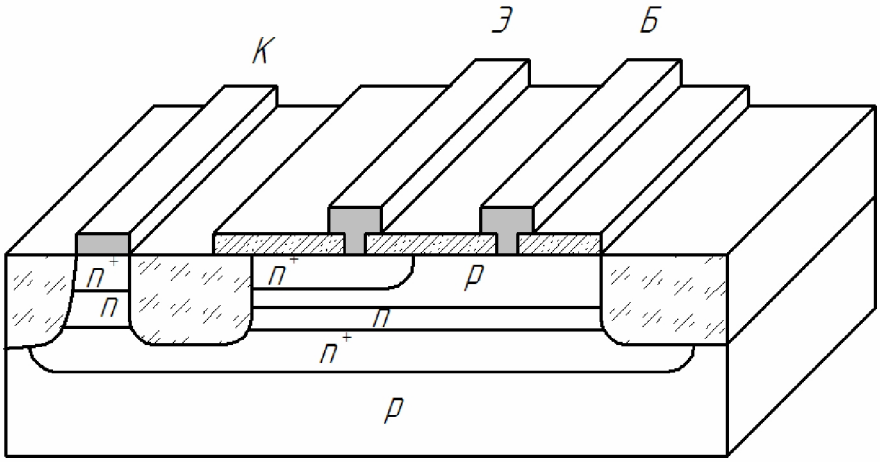



Рисунок 6.10 – Транзистор, изготовленный по изопланарной технологии.

Последовательность основных операций при изготовлении БТ с комбинированной изоляцией следующая:

1. Диффузия $n^+$.
2. Эпитаксия *n*.
3. Глубокое окисление.
4. Диффузия *p*.
5. Диффузия $n^+$.
6. Окисление поверхности пластины.
7. Фотолитография.
8. Травление $SiO_2$.
9. Осаждение проводящей пленки.

В биполярном транзисторе с комбинированной изоляцией коллектора торцевая поверхность коллекторной области изолирована от подложки *p-n* - переходом, а боковая – диэлектриком, что существенно уменьшает $C_{КП}$.

В биполярном транзисторе, изготовленном по изопланарной технологии, боковую изоляцию формируют путем локального окисления кремния. Для сокращения времени окисления используют тонкие эпитаксиальные слои. При формировании базы и частично эмиттера диффузия производится как бы_«в колодец», образуемый стенками толстого окисла. Это позволяет получить очень малые размеры интегральных транзисторов, ликвидировать боковые составляющие емкостей коллекторного и частично эмиттерного переходов и сущест-

венно ослабить требования к точности совмещения при выполнении фотолитографических процессов.

б) *полипланарная технология.*

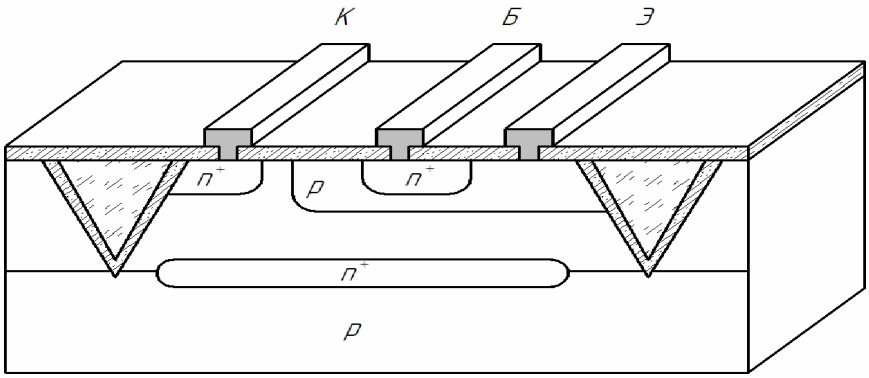



Рисунок 6.11 – Транзистор, изготовленный по полипланарной технологии.

При полипланарном процессе боковую изоляцию осуществляют плёнкой $SiO_2$ , покрывающей поверхность узких канавок, сформированных анизотропным травлением Si по заданному рисунку. Пластину Si ориентируют по плоскости «1 0 0», чтобы уменьшить ширину канавок и повысить коэффициент использования площади пластины. Для сглаживания рельефа поверхности пластины канавки заполняют поликристаллическим кремнием.

Биполярный транзистор, изолированный пленкой диэлектрика.

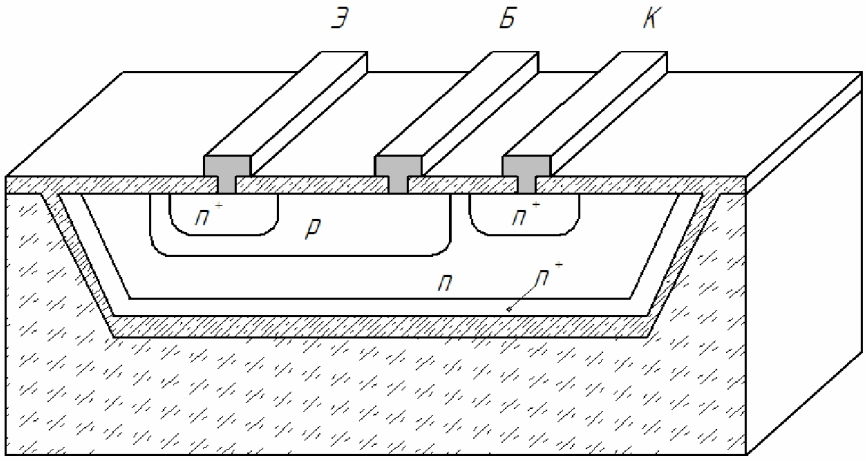



Рисунок 6.12 – БТ, изолированный пленкой диэлектрика.

Этот транзистор имеет однородно легированную коллекторную область со скрытым $n^+$ - слоем. Отличается качественной изоляцией коллектора, отсутствием активного воздействия подложки на работу БТ и малой паразитной емкостью $C_{КП}$.

Конструкция БТ, сформированного методом КИД (коллекторная изолирующая диффузия).

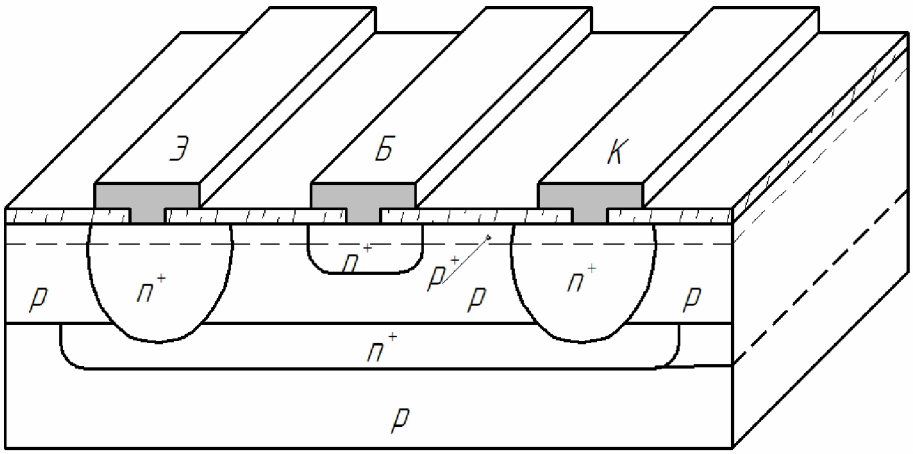



Рисунок 6.13 – БТ, сформированный методом КИД.

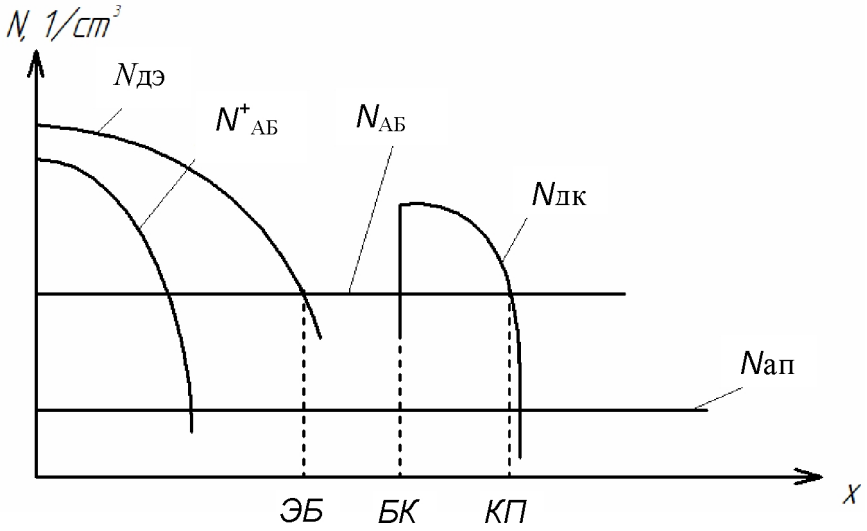



Рисунок 6.14 – Распределение концентрации атомов примесей.

Эта конструкция представляет значительный интерес. На поверхность подложки р-типа с предварительно полученным диффузией локальным (скрытым) слоем $n^+$ - типа наносят базовый эпитаксиальный слой $p$ - типа. С помощью диффузии донорной примеси формируют области $n^+$ - типа, достигающие скрытого $n^+$ - слоя и выделяющие (ограничивающие) локальные базовые области $p$ - типа. Разделительные области $n^+$ - типа совместно с сильнолегированным $n^+$ - скрытым слоем образуют коллекторную область БТ, изолированную от подложки $p$-$n$ - переходом. Эмиттер формируют отдельной диффузией.

При такой технологии сокращается одна операция диффузии, что уменьшает число фотошаблонов и увеличивает выход годных микросхем. Для получения большого коэффициента усиления эпитаксиальный слой должен быть тонким. Разделительные области $n^+$ - типа занимают малую площадь (их шири-

на несколько больше удвоенной толщины эпитаксиального слоя), что позволяет получить высокую плотность компоновки ИМС.

В тонкий поверхностный слой базы (т.е. во всю поверхность кристалла) диффузией вводят акцепторную примесь $N^{+}_{АБ}$ (без маски) – штриховая линия. Диффузионный ($p^{+}$) слой необходим для устранения поверхностных инверсных каналов (т.к. эпитаксиальный слой высокоомный), сведéния к минимуму краевой инжекции эмиттера, снижения эффективной скорости поверхностной рекомбинации из-за тормозящего статического электрического поля. Этот слой не влияет на усилительные свойства БТ, т.к. его глубина меньше глубины залегания эмиттера.

Так как коллектор сильно легирован (сурьмой), область коллектора имеет малое сопротивление $r_{ТК}$. Однако такой БТ характеризуется низким $U_{КЭ}$ (около 3В). Конструкция перспективна для создания цифровых ИМС с малым потреблением энергии.

Сравнительные характеристики биполярных транзисторов:

$p^{+}$ – разделительная диффузия – S = 0,0027 мм$^2$,
коллекторная диффузия – S = 0,0014 мм$^2$,
изоляция окислом (изопланар) – S = 0,0010 мм$^2$,
изоляция V- каналами – S = 0,0007 мм$^2$.

Планарные БТ с горизонтальной (продольной, латеральной) структурой

Планарные биполярные транзисторы с горизонтальной структурой широко используются в качестве активных нагрузок, генераторов тока и для согласования уровней потенциалов в линейных ИМС. Горизонтальные структуры наиболее широко применяют для создания транзисторов типа $p-n-p$ – типа. Они существенно уступают транзисторам $n-p-n$ – типа по коэффициенту усиления и предельной частоте. Их изготовляют одновременно с БТ типа $n^{+}-p-n$ по обычной планарной технологии.

Эмиттерный и коллекторный слои получают диффузией, причём коллекторный слой охватывает эмиттер со всех сторон. Базовая область формируется на основе эпитаксиального $n$ - слоя с подлегированием контактной области.

В горизонтальном (латеральном) транзисторе дырки, инжектированные эмиттером, движутся к коллектору в основном вдоль эпитаксиального слоя базы, т.е. горизонтально. Перенос наиболее эффективен в приповерхностной области, так как здесь расстояние $W$ (ширина базы) между коллектором и эмиттером минимально и наиболее высока концентрация примеси в $p$ - слоях. Ширину базы $W$ удаётся выполнить равной 3…4 мкм (мешает боковая диффузия под маску), в результате чего $K_y \approx 50$, $f_T = 20…40$ МГц.

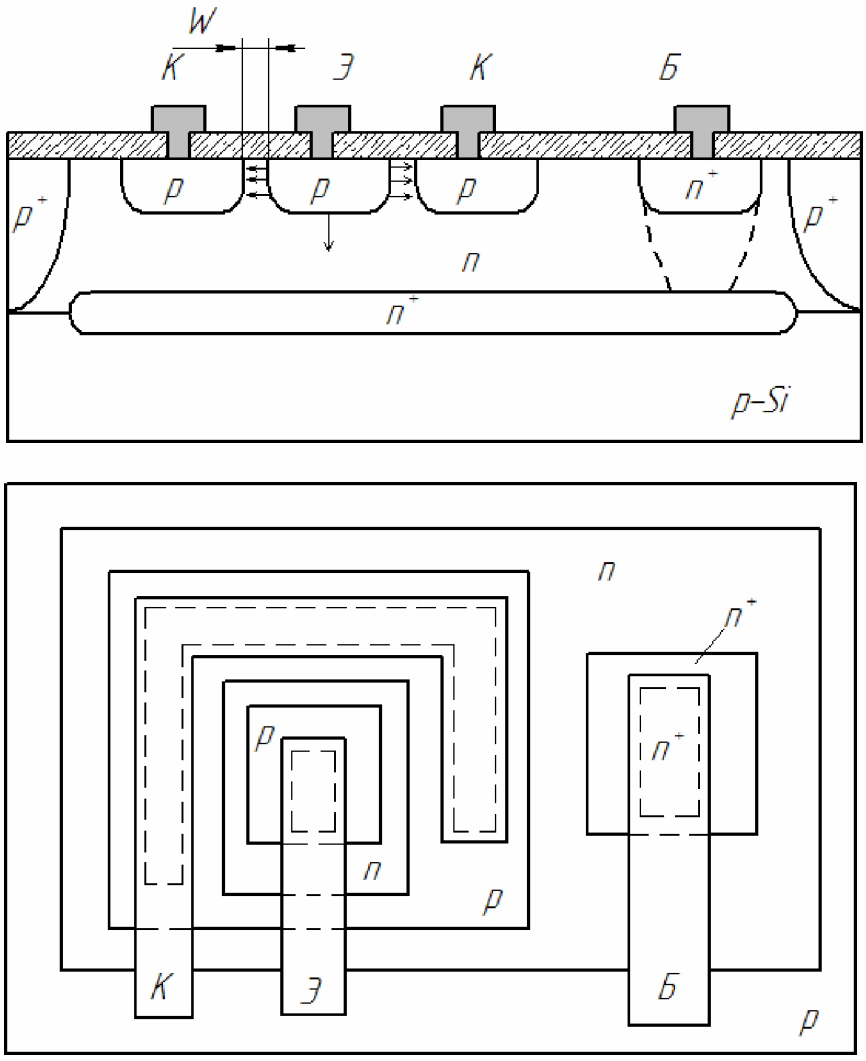



Рисунок 6.15 – Планарный БТ с горизонтальной структурой.

Для подавления действия паразитных $p - n - p$ транзисторов ($p$ –эмиттер, $n$ - эпитаксиальный слой, $p$ – подложка) стремятся уменьшить площадь донной части эмиттера (его делают возможно более узким), а также используют скрытый $n^+$ - слой, который служит отражателем для дырок.

Латеральные БТ применяют чаще всего в составе сложных транзисторных структур в сочетании с вертикальными $n - p - n$ транзисторами.

Торцевые транзисторы.

Для повышения быстродействия маломощных ИМС разработаны торцевые БТ с малыми емкостями $p - n$ – переходов.

Торцевой транзистор сформирован последовательной диффузией атомов акцепторных и донорных примесей в островок кремниевой эпитаксиальной плёнки, расположенной на поверхности сапфировой подложки (структура КНС – кремний на сапфире).

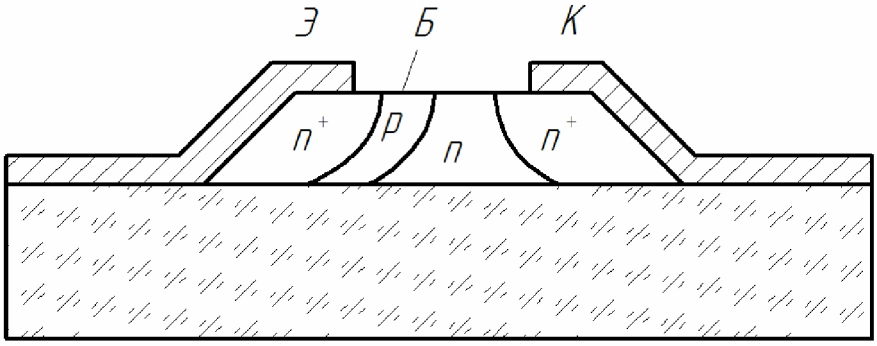



Рисунок 6.16 – Торцевой транзистор.

При площадях торцевой части эмиттера $S_Э = 6$ *мкм*$^2$ и торцевой части коллектора $S_К = 30$ *мкм*$^2$ ёмкости переходов приблизительно равны 0,001 пФ, что на один-два порядка меньше емкостей переходов других типов БТ.

Однако этот интегральный транзистор имеет малое значение $\beta \approx 2$ из-за большого числа дислокаций в эпитаксиальной плёнке у поверхности раздела полупроводник-диэлектрик вследствие различия параметров кристаллических решеток сапфира и кремния. На дислокациях сильно рассеиваются неосновные носители и уменьшается коэффициент их переноса в области базы.

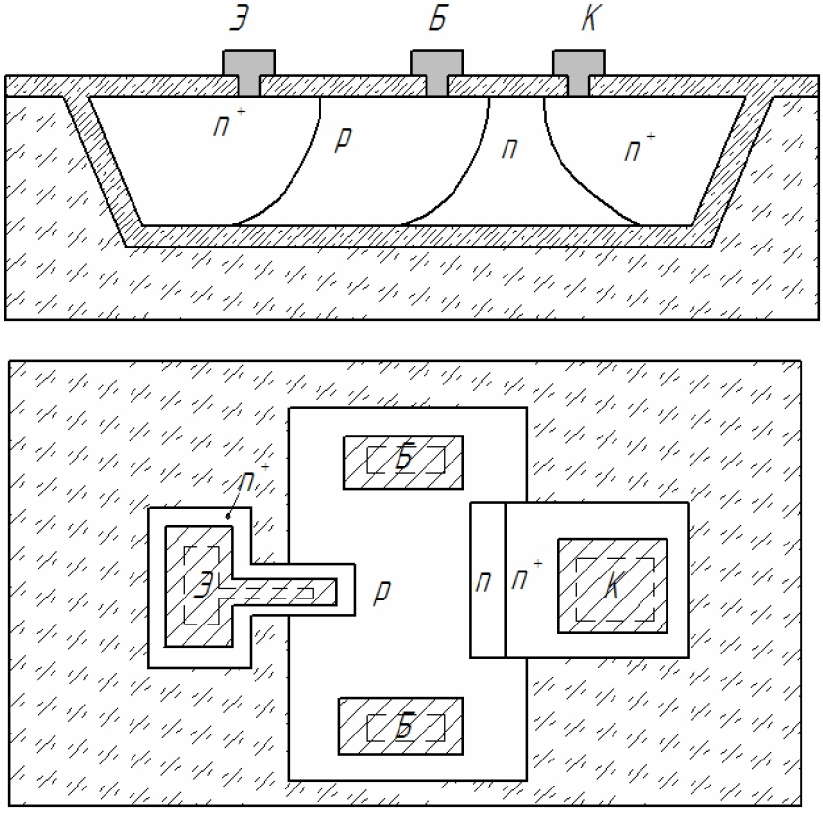



Рисунок 6.17 – Транзистор, сформированный методом ДИАК.

Значительно лучшими электрическими параметрами характеризуются торцевые транзисторы, сформированные методом ДИАК. Такой транзистор имеет $\beta \geq 100$ при $I_К \approx 50$ нА ... 1 мкА.

## Расчет биполярного транзистора.

В зависимости от функционального назначения биполярных интегральных транзисторов, входящих в состав полупроводниковой микросхемы, методика их расчёта может быть различной.

Основные этапы проектирования интегрального биполярного транзистора можно представить в следующем порядке:

1. Определение (выбор) на основе технического задания основных характеристик ИМС (усиление, мощность, быстродействие или частотный предел, шумовые характеристики и т.д.).
2. Назначение наиболее важных электрических параметров (коэффициент передачи тока, граничная частота, $U_{КЭ}$ и др.).
3. Выбор типа технологического процесса (эпитаксия, диффузия), типа структуры подложки (тип проводимости, удельное сопротивление $\rho_V$), вида изоляции элементов.
4. Ориентировочная оценка (расчёт) основных расчётных размеров структуры (глубин залегания переходов, толщины базы), а также основных геометрических размеров в плане.
5. Расчет распределения концентрации примесей (профиля распределения примесей). Точный машинный расчет всех электрических параметров.
6. Корректировка (если электрические параметры интегрального транзистора отличаются от требуемых) конструктивных параметров транзисторов, повторный расчет электрических характеристик и т.д. Этот итерационный процесс осуществляется, не выходя за рамки технологических ограничений.
7. Экспериментальный этап. Разработка комплекса фотошаблонов, выпуск опытной партии транзисторных структур. Если параметры отличаются от заданных, то методом последовательных приближений путем изменения размеров транзисторных областей и их характеристик, корректировкой режимов техпроцессов добиваются необходимого соответствия параметров.

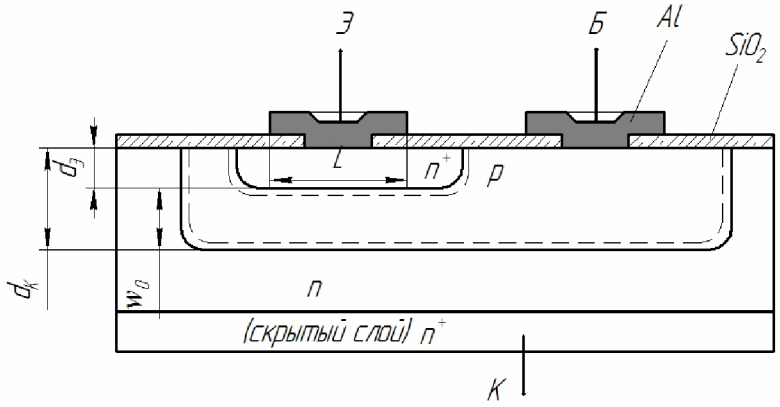



Рисунок 6.18 – Конструктивные параметры биполярного транзистора.

Расчет ИМС достаточно сложен. Поэтому на предприятии, выпускающем ИМС, формируют банки интегральных транзисторов с широким спектром ха-

рактеристик. При таком подходе задача конструктора состоит в подборе конкретных типов интегральных транзисторов для данной ИМС в соответствии с её электрической схемой.

Сначала выбирают физическую структуру различных областей интегрального транзистора (ИТ). Удельное сопротивление подложки $\rho_V$ должно быть $\geq$ (1…10) Ом*см, что обеспечивает высокое $U_{\text{проб.}}$ и малую ёмкость $C_{КП}$.

При выборе уровня легирования коллекторной области (эпитаксиального слоя) необходимо выполнить ряд противоречивых требований: для получения малого последовательного сопротивления коллектора уровень его легирования должен быть высоким, а для получения малой ёмкости и высокого $U_{\text{проб.}}$ перехода база-коллектор – низким.

Обычно $\rho_V$ эпитаксиального слоя выбирают равным 0,1…0,5 $Ом \cdot см$, а толщину в пределах 2 …15 мкм. В структурах со скрытым $n^+$ - слоем и подлегированием области коллекторного контакта последовательное сопротивление коллектора составляет 10 …50 Ом.

При выборе уровней легирования эмиттера и базы необходимо также учитывать несколько противоречивых требований: для уменьшения паразитного сопротивления между активной областью базы и контактом к базе следует увеличить уровень легирования базы. Однако это приводит к снижению эффективности эмиттера и уменьшению $U_{\text{проб.}}$ перехода база-эмиттер. Кроме того, поверхностная концентрация примеси в базовом слое не должна быть меньше $5*10^{16}$ 1/см$^3$, так как на поверхности этого слоя возможно образование инверсного проводящего канала *n* - типа, индуцированного встроенным зарядом в окисле.

Высокий уровень легирования эмиттера необходим для получения большого коэффициента инжекции. Однако при уровнях легирования эмиттерной области, достигающих предела растворимости в кремнии, в кристаллической решетке образуются точечные и линейные дефекты, которые значительно уменьшают время жизни носителей, что, в свою очередь, уменьшает коэффициент инжекции.

Частотные характеристики ИТ зависят в основном от паразитных емкостей переходов и последовательных сопротивлений его областей. Влияние паразитных параметров уменьшают за счет максимально возможного уменьшения геометрических размеров ИТ.

После выбора физической структуры выбирают конфигурацию транзистора. Здесь нужно учитывать, что:

- периметр эмиттера определяет токовые характеристики ИТ,
- площадь эмиттера – частотные характеристики,
- площадь базы – ёмкость перехода Б – К и $r_Б$,
- площадь коллектора – ёмкость перехода коллектор-подложка и $r_К$.

В маломощных ИТ все размеры стремятся сделать минимальными, хотя это может привести к снижению выхода годных изделий.

В транзисторах средней и большой мощности стремятся обеспечить максимальное отношение периметра эмиттера к его площади. Это значительно

увеличивает активную площадь ИТ и обеспечивает достаточно большой ток без увеличения размеров всей структуры.

Взаимное расположение контактов к различным областям ИТ выбирают в зависимости от общей топологической структуры. Для получения малого $r_K$ применяют ИТ с увеличенной контактной областью к коллектору. Для получения малого $r_Б$ и большого $K_У$ используют конструкции с двумя контактами к базе.

При необходимости применяют многоэмиттерные и многоколлекторные конструкции.

## Расчёт профиля распределения примесей

Профиль распределения легирующих примесей в областях ИТ определяется параметрами исходной полупроводниковой структуры подложка-эпитаксиальный слой, характеристиками примесей и технологическими параметрами диффузионных процессов.

Распределение концентрации примеси в результате диффузии из неограниченного источника примеси определяется дополнительной функцией ошибок.

$$N(x,t) = N_S \cdot erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) = N_S \cdot erfc(z), \qquad (6.1)$$

где $N$ – концентрация диффундирующей примеси в объёме полупроводника;

$N_S$ – поверхностная концентрация примеси;

x – координата;

$D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{k \cdot T}\right)$ – коэффициент диффузии;

t – время проведения диффузионного процесса;

$\Delta E$ – энергия активации атомов примеси;

k – постоянная Больцмана;

T – абсолютная температура;

$D_0$ – постоянная, зависящая от свойств примеси и полупроводника.

Поверхностная концентрация примеси $N_S$ принимается равной максимальной растворимости данной примеси в полупроводнике при температуре процесса диффузии.

При диффузии из ограниченного источника примеси закон распределения описывается экспоненциальной функцией

$$N(x,t) = \frac{\text{Nє}\cdot\Delta\text{h}}{\sqrt{4\text{Dt}}}\exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right), \qquad (6.2)$$

где N° – исходная концентрация примеси в поверхностном слое полупроводника толщиной $\Delta h$, из которого ведётся диффузия.

На практике эти два закона строго не выполняются, поэтому с достаточной точностью в обоих случаях можно использовать экспоненциальную аппроксимацию.

Тогда глубину залегания переходов можно определить из соотношения:

$$x_j = 2\sqrt{D \cdot t \cdot \ln\frac{N_S}{N_0}}, \qquad (6.3)$$

где $N_0$ – концентрация примеси в исходном полупроводниковом материале.

Градиент концентрации примеси в $p$-$n$ – переходе определяется согласно следующему выражению:

$$a = \frac{N_S}{2Dt} \cdot x_j \cdot \exp\left(-\frac{x_j^2}{4Dt}\right). \qquad (6.4)$$

Для сокращения трудоёмкости расчётов при построении профиля распределения примеси в ИТ пользуются графоаналитическим методом.

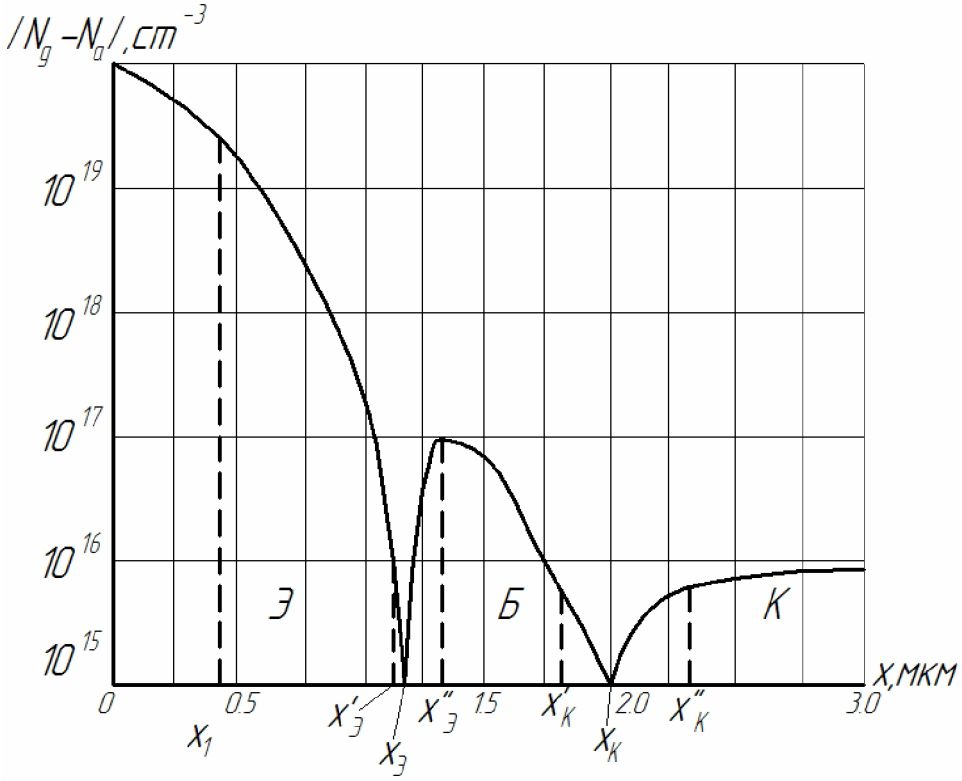



Рисунок 6.19 – Профили распределения атомов примесей в областях ИТ, полученного диффузией в эпитаксиальный слой.

Здесь $x_1$ – величина, ниже которой спад концентрации доноров можно считать экспоненциальным;

$W_\delta = x_K - x_Э$ – толщина металлургической базы;

$W_{\delta 0} = x_K' - x_Э''$ – толщина нейтральной области базы;

$x_Э'$, $x_Э''$, $x_К'$, $x_К''$ – координаты границ ОПЗ (области пространственного заряда).

Величины $x_Э''$ и $x_К'$ определяются из выражений:

$$x_Э'' = x_Э + \frac{1}{2}\sqrt[3]{\frac{12\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_{КЭ} - U_{ЭБ})}{q \cdot a}}, \qquad (6.5)$$

где $x_Э$ – координата металлургического перехода Э – Б;

$\varphi_{КЭ}$ – контактная разность потенциалов эмиттерного перехода;

$a$ – градиент концентрации примесей в эмиттерном переходе;

$\varepsilon$ – диэлектрическая проницаемость полупроводникового материала, для Si $\varepsilon = 11{,}7$;

$\varepsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/см, $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-14}$;

$q$ – заряд электрона, $q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл;

$U_{ЭБ}$ – напряжение эмиттер - база.

$$x_К' = x_К + L_a \cdot \ln\frac{l_К / L_a}{1 - \exp(-l_К / L_a)}, \qquad (6.6)$$

где $L_a = \dfrac{W_\delta}{\ln\dfrac{N_A(x_Э)}{N_{дк}}}$ ; $l_К = L_a + \sqrt{L_a^2 + \dfrac{2\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot (\varphi_{К.К} + U_К)}{q \cdot N_{дк}}}$;

здесь $\varphi_{К.К}$ – контактная разность потенциалов коллекторного перехода;

$N_{дк}$ – концентрация донорных примесей в области коллектора;

$U_К$ – напряжение на коллекторе.

## Расчёт электрофизических параметров ИМС

Электрический режим транзистора по постоянному току определяется током коллектора $I_К$ и напряжением на нем $U_К$. Для расчета основных электрических характеристик задается начальное приближенное напряжение на эмиттерном переходе $U_{ЭБ}$. Оно определяется из выражения для вольт-амперной характеристики эмиттерного перехода. Ток эмиттера первоначально считается равным току коллектора, т.е. $I_Э \approx I_К$.

$$I_Э = I_К = I_{Э0} \cdot \exp\left(\frac{U_{ЭБ}}{\varphi_T}\right), \qquad (6.7)$$

где $\varphi_T = \dfrac{k \cdot T}{q}$ – температурный потенциал.

Начальный ток эмиттерного перехода $I_{Э0}$ определяется из соотношения:

$$I_{Э0} = S_Э \cdot q \cdot \frac{n_i^2 \cdot \exp\left(\frac{U_{ЭБ}}{\varphi_T}\right)}{\int\limits_{x_Э''}^{x_K'} \frac{N_a - N_д}{D_n} \cdot dx}, \qquad (6.8)$$

где $S_Э$ – площадь эмиттерного перехода;

$x_Э''$ и $x_K'$ – границы ОПЗ в базовой области;

$D_n$ – коэффициент диффузии электронов;

$n_i$ – концентрация носителей заряда в кремнии с собственной проводимостью;

$N_a$ и $N_д$ – значения концентраций примесей на границе ОПЗ.

## Электрофизические параметры *p - n* – переходов ИС

### 1. Контактная разность потенциалов

Для эмиттерного перехода

$$\varphi_{К.Э} = \varphi_T \cdot \ln \frac{|N_д - N_a| \cdot (x_Э') \cdot |N_д - N_a| \cdot (x_Э'')}{n_i^2}. \qquad (6.9)$$

Для коллекторного перехода

$$\varphi_{К.К} = \varphi_T \cdot \ln \frac{|N_д - N_a| \cdot (x_K') \cdot N_{дк}}{n_i^2}, \qquad (6.10)$$

Для кремниевых ИТ

$\varphi_{К.Э} = 0{,}8...0{,}9B$, $\varphi_{К.К} = 0{,}6B$.

### 2. Ширина области пространственного заряда (ОПЗ)

Эта величина определяет границы *p-n* – перехода, поэтому её называют шириной *p-n* – перехода.

Эмиттерный переход при прямых смещениях можно считать плавным, с линейным изменением концентрации примеси. В этом случае его ширина:

$$d_Э = \sqrt{\frac{12\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_{К.Э} - U_Э)}{q \cdot a_Э}}. \qquad (6.11)$$

Ширина коллекторного *p - n* – перехода при обратном смещении равна

$$d_K = \sqrt{\frac{12\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_{К.К} - |U_к|)}{q \cdot N_{дк}}}. \qquad (6.12)$$

### 3. Барьерная ёмкость *p - n* – перехода.

Эта величина носит двоякий характер, зависящий от знака приложенного напряжения. При нулевом и обратном смещениях перехода в нём преобладает зарядная ёмкость, которая может быть посчитана следующим образом:

$$C_З = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \qquad (6.13)$$

где $S$ – площадь перехода;

$d$ – ширина ОПЗ.

При прямых смещениях перехода наряду с зарядной ёмкостью играет роль диффузионная ёмкость, зависящая от протекающего в прямом направлении тока:

$$C_Д = \frac{I \cdot \tau}{\varphi_T}, \qquad (6.14)$$

где $I$ – ток через переход;

$\tau$ – время жизни носителей заряда;

$\varphi_T$ – температурный потенциал.

Для эмиттерного перехода ИТ типа $n$ - $p$ - $n$ :

$$C_{ДЭ} = \frac{1}{r_Э} \cdot \frac{W_\delta^2}{2D_n}, \qquad (6.15)$$

где $r_Э = \frac{\varphi_T}{I_Э}$; $W_\delta = x_K' - x_Э''$.

Диффузионная ёмкость наиболее существенна при больших токах, протекающих через переход.

4. Напряжение пробоя $p$ - $n$ – перехода

Основными видами пробоя $p$ - $n$ – переходов в кремнии являются лавинный и туннельный.

Лавинный пробой – следствие ударной ионизации, когда носители заряда под действием сильного электрического поля в $p$ - $n$ – переходе достигают энергии, достаточной для ионизации атомов и образования, таким образом, новых электронно-дырочных пар.

Сущность туннельного пробоя заключается в том, что под действием сильного электрического поля электроны из валентной зоны полупроводника с одной стороны $p$ - $n$ – перехода на основе туннельного механизма проникают сквозь потенциальный барьер в зону проводимости по другую сторону $p$ - $n$ – перехода.

Пробой $p$- $n$ – переходов ИТ и других элементов ИМС носит, как правило, лавинный характер, поскольку в них используются такие степени легирования полупроводника, которых недостаточно для наступления туннельного пробоя.

Напряжение лавинного пробоя резкого $p$ - $n$ – перехода в кремнии (в вольтах) равно:

$$U_{ПР} = 60\left(\frac{N}{10^{16}}\right)^{-3/4}, \qquad (6.16)$$

где N – концентрация примеси в более слабо легированной части $p$ - $n$ – перехода, $1/см^3$.

Напряжение лавинного пробоя с плавным (линейным) распределением примесей определяется по формуле:

$$U_{ПР} = 60\left(\frac{a}{3\cdot 10^{20}}\right)^{-2/5}, \qquad (6.17)$$

где $a$ – градиент концентрации примесей, $см^{-4}$.

Эти соотношения справедливы для комнатной температуры. С повышением температуры напряжение лавинного пробоя увеличивается. Кроме того, для резких планарных $p$ - $n$ – переходов необходимо учитывать их кривизну.

Типичные значения $U_{ПР}$ эмиттерного, коллекторного и изолирующего переходов составляют 6 … 9 , 10 … 90 и 15 … 100 В соответственно.

## Конструкции униполярных транзисторов

Основным элементом униполярной микросхемы является транзистор. Работа униполярного (полевого) транзистора основана на использовании заряда одного знака: электронов или дырок. В отличие от БТ они управляются с помощью электрического поля (а не тока), перпендикулярного к поверхности полупроводника. Под действием электрического поля происходит изменение концентрации носителей заряда в приповерхностном слое полупроводника, а соответственно, и проводимости.

Область с повышенной концентрацией основных носителей называется обогащённой, а с пониженной – обеднённой.

Униполярные транзисторы называют также МДП или МОП транзисторами. Полевой транзистор содержит области истока и стока, а также затвор и канал. Область, от которой движутся основные носители, называют *истоком*. Та область, к которой движутся носители, называется *стоком.*

*Каналом* называют область пластины, расположенную между $p$ - $n$ – переходами, образованными областями истока и стока с объёмом пластины.

Существуют две разновидности МДП-транзисторов: с встроенным каналом и с индуцированным каналом.

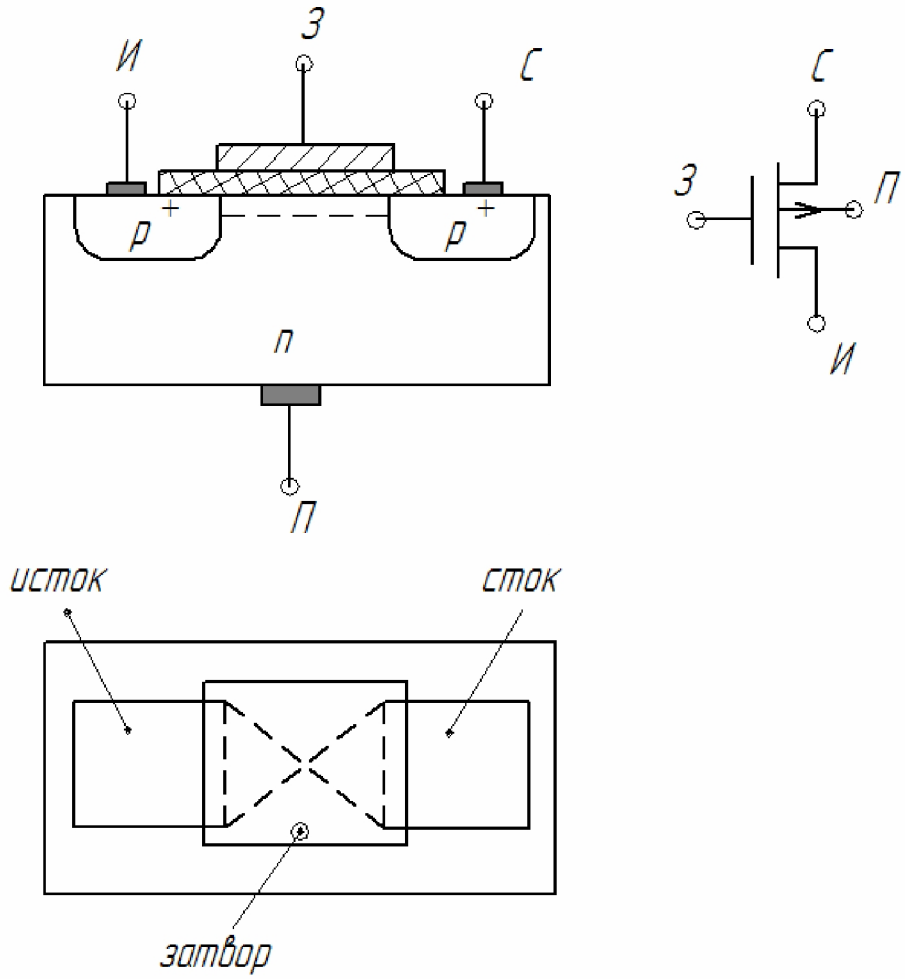



Рисунок 6.20 – МДП-транзистор с индуцированным каналом *p* - типа.

МДП - транзисторы, в которых проводящий канал устанавливается под действием поперечного электрического поля между затвором и подложкой, называются транзисторами с *индуцированным* каналом (рис. 6.20). Такие транзисторы работают только в режиме обогащения. Для этого в *n* - канальном транзисторе на затвор подаётся положительное напряжение. Поверхность полупроводника обогащается электронами и обедняется дырками (при вполне определённом напряжении на затворе происходит инверсия проводимости приповерхностного слоя полупроводника *p* - типа и между истоком и стоком устанавливается *n* - канал).

МДП-транзисторы, в которых тонкий *p* или *n* канал сформирован технологическим путем (ионное легирование), называются транзисторами со *встроенным* каналом (рис. 6.21). Они могут работать как в режиме обогащения, так и в режиме обеднения.

Технология изготовления. Важное преимущество МДП-ИМС связано с технологией их изготовления. При изготовлении МДП-ИМС используются те же процессы, что и при изготовлении биполярных ИМС: окисление, фотолитография, диффузия, металлизация и др.

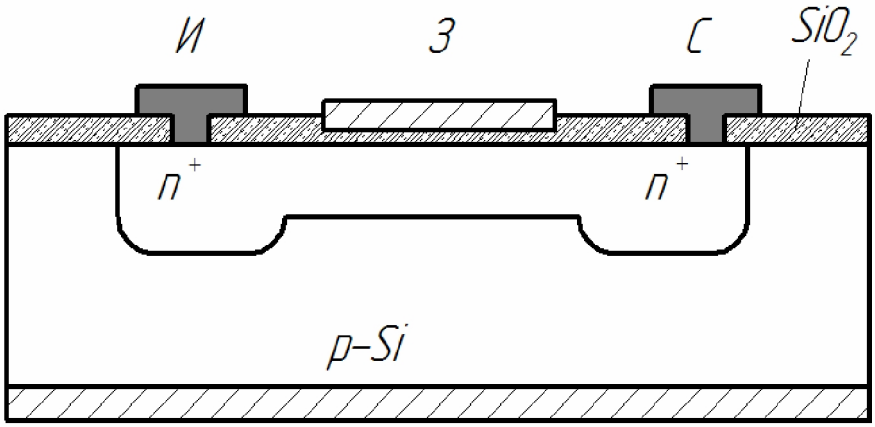



Рисунок 6.21 – МДП-транзистор со встроенным *n* - каналом.

Для создания МДП-ИМС требуется меньшее число операций, чем для биполярных транзисторов. Для МДП – одна операция диффузии, для биполярных – четыре.

Основной трудностью при изготовлении МДП - структур является получение достаточно качественной тонкой диэлектрической плёнки, изолирующей затвор транзистора. Необходимо также большое внимание уделять уменьшению поверхностных эффектов.

Комплементарные структуры.

Иногда необходимо сочетать в одном кристалле МДП - транзисторы с биполярными. В этом случае *n* - канальные транзисторы выполняют непосредственно в исходной пластине *p* - типа на этапе эмиттерной диффузии. На этапе базовой диффузии в изолирующих карманах создают *p* - канальные МДП - транзисторы.

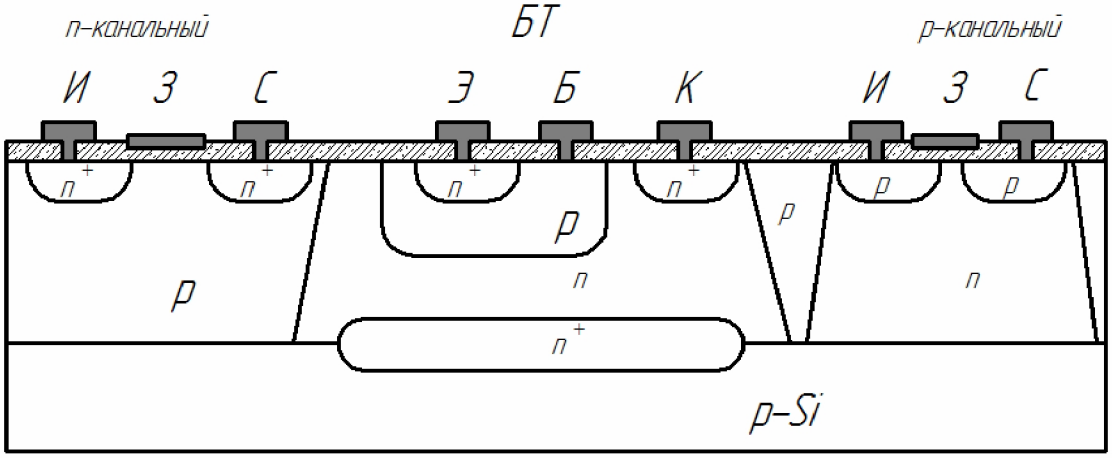



Рисунок 6.22 – Сочетание БТ и МДП - транзисторов в одном кристалле.

Для создания некоторых типов логических схем используют комплементарные структуры. В их состав входят МДП с индуцированными каналами *p*- и *n*- типов, сформированные в одном кристалле. Транзисторы работают в режиме обогащения.

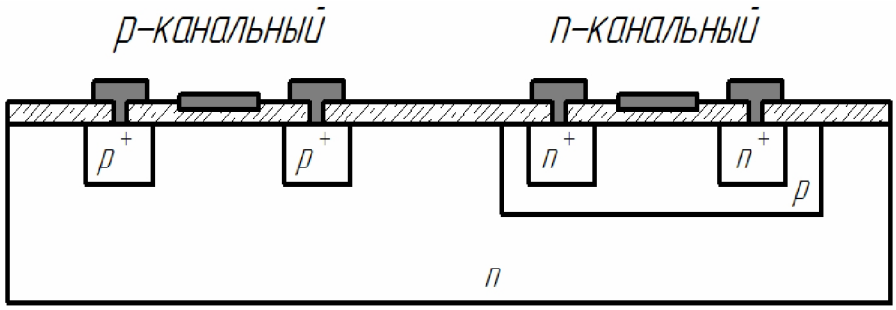



Рисунок 6.23 – Комплементарная структура.

Таким образом, МДП-ИМС имеют сравнительно простую конструкцию, обеспечивают высокий процент выхода годных схем. Геометрические размеры МДП–транзисторов значительно меньше по сравнению с биполярными. МДП–транзисторы имеют большое входное сопротивление, малое энергопотребление.

## Интегральные резисторы и конденсаторы

В полупроводниковых микросхемах широко распространены резисторы различных типов: объёмные (рис. 6.24, *а*), эпитаксиальные (рис. 6.24, *б*), диффузионные (рис. 6.24 *в* и *г*), ионно-легированные пинч-резисторы и др. Объёмные резисторы изготавливают путем создания омическлх контактов в двух точках кристалла. Точность их изготовления очень низкая.

В настоящее время резисторы ИМС формируют в любом из диффузионных слоев транзисторной структуры (эмиттерная и базовая области), в эпитаксиальном слое (коллекторная область) и с помощью ионного легирования.

Резисторы изготавливают методами селективной диффузии примесей в отдельные островки эпитаксиального слоя пластины. Эта операция проводится одновременно с диффузией, в результате которой создаются базовые или эмиттерные области транзисторов, входящих в данную интегральную микросхему. В процессе эмиттерной диффузии создаются резисторы с малым удельным сопротивлением (порядка 2,5 Ом/квадрат). При этом температурная стабильность достаточно высокая $\alpha_R = (1\ldots2)10^{-4}$ 1/°С.

В процессе базовой диффузии, для которой характерны меньшие концентрации вводимых примесей, создаются более высокоомные резисторы (100…300 Ом/квадрат).

В пинч-резисторах (пинч – канальный, сжатый, закрытый) используется высокоомная донная часть базовой области (рис. 6.24, *г* ). У таких резисторов величина R□ достигает 2…5 кОм/□. Однако, $3\sigma_R = \pm$ 50 % и $\alpha_R = (3\ldots5)10^{-3}$ 1/°С. У пинч-резисторов *р*- и *n*- слои закорочены металлизацией и соединены с выводом резистора, находящимся под бóльшим положительным потенциалом, чем остальные области структуры. Это обеспечивает обратное смещение на всех переходах пинч-резистора. Следует помнить, что пинч-резистор является линейным только до 1…1,5 вольт.

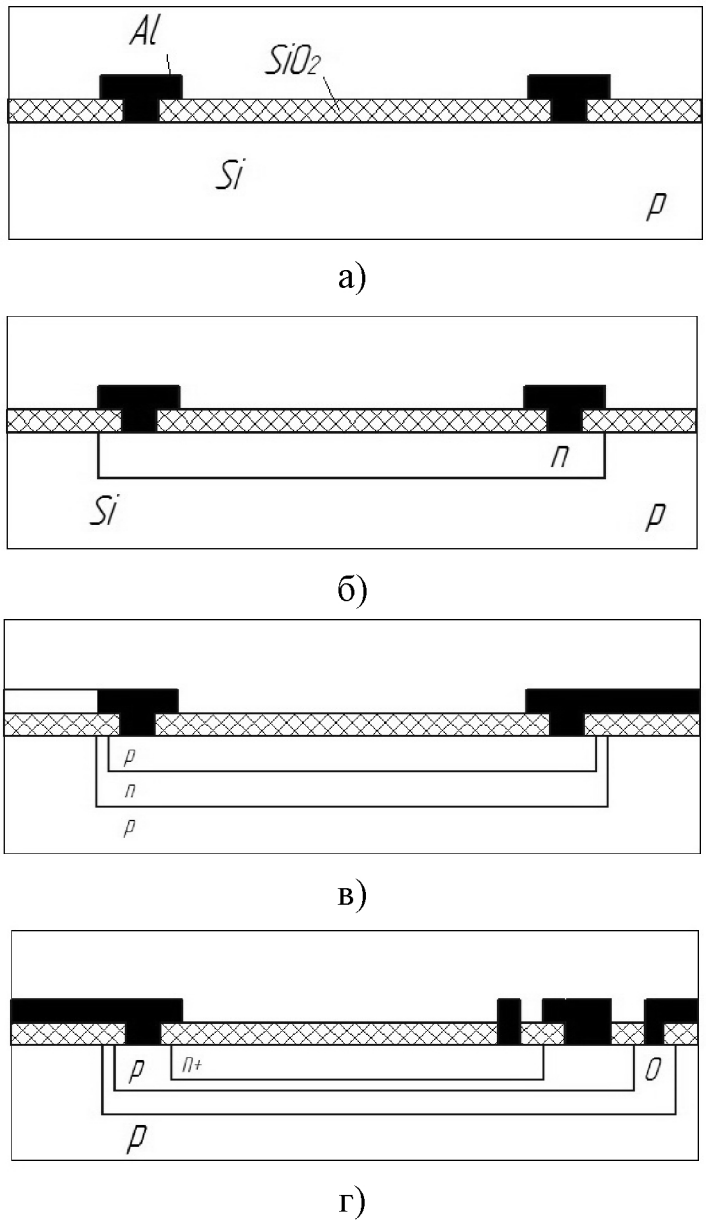



Рисунок 6.24 – Конструкции полупроводниковых резисторов.

В эпитаксиальном слое (коллекторная область) минимальная концентрация носителей; величина R□ достигает 500…5000 Ом/□. Однако, у таких резисторов большое значение ТКС.

В качестве конденсаторов полупроводниковых микросхем часто используют *p-n* переходы, смещённые в обратном направления (рис. 6.25, а). Ёмкость такого конденсатора зависит от величины приложенного напряжения. У них один или оба слоя выполнены в процессе диффузии, поэтому такие конденсаторы называют диффузионными. На рис. 6.25,б показана структура МОП-конденсатора. Нижней обкладкой служит эмиттерный $n^+$ - слой.

Основные параметры полупроводниковых конденсаторов приведены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Основные параметры полупроводниковых конденсаторов

| Тип структуры | $C_{МАКС}$, $пФ$ | $3\sigma c$, % | $U_{ПР}$, $В$ | ТКЕ, % / °С |
|---|---|---|---|---|
| Переход Б-К | 300 | ± 20 | 50 | – 0,1 |
| Переход Б-Э | 1200 | ± 20 | 7 | – 0,1 |
| МОП | 500 | ± 25 | 20 | + 0,02 |

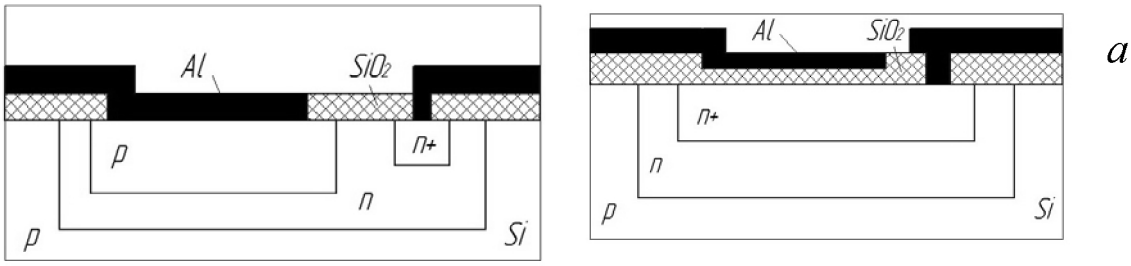



Рисунок 6.25 – Полупроводниковые конденсаторы:
а – диффузионный, б – МОП.

Преимуществом МОП - конденсаторов является то, что они работают при любой полярности напряжения. Недостаток их в том, что они, как и диффузионные конденсаторы, являются нелинейными.

## Контрольные вопросы

12. Каковы конструктивные и электрические особенности полупроводниковых ИМС?
13. Что такое планарная технология изготовления ИМС?
14. Назовите основные технологические операции планарной технологии.
15. Какие элементы можно изготовить на основе планарной технологии?
16. Что такое вертикальный и горизонтальный транзисторы?
17. Назовите акцепторные примеси для легирования кремния. Какие донорные примеси кремния Вы знаете?
18. Изобразите эпитаксиально-планарный транзистор; в чем заключаются его конструктивно-технологические особенности?
19. С какой целью в эпитаксиально-планарном транзисторе размещен скрытый $n^+$ - слой?
20. С какой целью используется $n^+$ - подколлекторный слой?
21. Какова глубина расположения эмиттерного и коллекторного переходов?
22. Изобразите симметричную и асимметричную конструкции биполярного транзистора.
23. Изобразите конструкцию мощного транзистора (вид сверху).

24. Изобразите конструкции многоэмиттерного и многоколлекторного транзисторов.
25. Изобразите конструкции БТ, выполненных по изопланарной и полипланарной технологии.
26. В чем заключаются достоинства БТ, изолированного пленкой диэлектрика?
27. Изобразите конструкцию БТ, сформированного методом КИД (коллекторная изолирующая диффузия)?
28. Приведите сравнительные характеристики биполярных транзисторов, выполненных по различным (приведенным выше) технологиям.
29. Назовите достоинства торцевых транзисторов.
30. Назовите основные этапы проектирования интегрального биполярного транзистора.
31. В чем заключается расчёт профиля распределения примесей?
32. Назовите основные электрофизические параметры *p*- *n* - переходов БТ.
33. Изобразите конструкции униполярных транзисторов с индуцированным и встроенным каналами.
34. Каков принцип работы полевого транзистора?
35. Что такое «сток», «исток» и «канал»?
36. Что такое комплементарные полупроводниковые структуры?
37. Приведите примеры конструкций полупроводниковых резисторов.
38. Почему чаще всего резисторы выполняются на основе базового слоя?
39. Приведите примеры конструкций полупроводниковых конденсаторов.

# Глава 7. Особенности конструкций ГИС СВЧ

Отличия конструктивных решений при разработке ГИС СВЧ заключаются в выборе материалов подложек и плат, в специфичности конструкций применяемых навесных активных компонентов, геометрии плёночных элементов и в их компоновке на плате. Поскольку основными областями применения ИМС СВЧ являются радиолокация и связь, важнейшую проблему представляют: повышение уровня мощности при одновременном увеличении частоты колебаний, расширение полосы усиления и снижение коэффициента шума.

До частот 1…2 ГГц при производстве ГИС СВЧ может использоваться толстоплёночная технология. Для работы на более высоких частотах необходимо применять тонкопленочную технологию, поскольку она обеспечивает более высокую точность получения геометрических размеров и удовлетворяет требованиям к допускам в диапазоне частот до 30 ГГц и выше.

В качестве активных компонентов в ГИС СВЧ используют биполярные кремниевые СВЧ транзисторы (до частот 10 ГГц), полевые транзисторы с затворами Шоттки на основе арсенида галлия (до частот 10…30 ГГц), диоды Ганна (до 100 ГГц), лавинно-пролётные диоды (до 100 ГГц). Пассивные элементы ГИС СВЧ создают на основе передающих линий с распределёнными параметрами (микрополосковых линий) или в виде элементов с сосредоточенными параметрами, как и для ГИС, работающих в диапазоне более низких частот. В последнем случае размеры элементов должны быть во много раз меньше длины волны, на которой работает устройство (для частот до 10 ГГц).

**Подложки для ГИС СВЧ.** Подложка ГИС СВЧ является несущей конструкцией, а также составной частью линии передачи СВЧ энергии, поэтому её материал должен обладать малыми диэлектрическими потерями и большой диэлектрической проницаемостью $\varepsilon$, постоянной в широком диапазоне частот и температур. Материал подложки также должен иметь: значительную теплопроводность, согласованное изменение коэффициента линейного расширения подложки и нанесенных на неё пленок в диапазоне температур, высокое значение удельного сопротивления, необходимую механическую прочность. Перечисленным требованиям в полной мере не удовлетворяет ни один материал, поэтому его выбор в каждом конкретном случае основан на компромиссном решении.

Геометрические размеры подложек варьируют в широких пределах, однако отдают предпочтение унифицированным размерам по ширине и длине, кратным числам 60 и 48. Толщина подложек стандартизирована: 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5 мм. По типу используемых материалов подложки ГИС СВЧ подразделяют на диэлектрические, ферритовые и составные «ферро-диэлектрические».

Наибольшее применение получили диэлектрические подложки из керамики с высоким содержанием окиси алюминия или окиси бериллия, а также подложки из кварца и сапфира (табл. 7.1). Хорошие электрические характеристики ГИС СВЧ можно получить при использовании поликора, А-995, ГМ, сапфирита, у которых содержание $Al_2O_3$ составляет 98…100%. При невысоких требованиях к рабочим характеристикам и низкой стоимости подложек применяют материалы 22ХС, 22Х и др., у которых содержание $Al_2Oз$ составляет 93…96%.

Таблица 7.1. Свойства диэлектрических подложек для СВЧ ИМС.

(В таблице 7.1 $\lambda$ – коэффициент теплопроводности)

| Материал подложки | $\varepsilon$ на f = 10 ГГц при t = 20° С | tg $\delta \cdot 10^{-4}$ на f=10 ГГц при t = 20° С | $\lambda \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·град) при t = 20°С | ТКЛР$\cdot 10^{7}$, град$^{-1}$ | Класс шерохова-тости |
|---|---|---|---|---|---|
| Поликор | 9,6 | 1 | 0,25 | 75 | 13. ..14 |
| А-995 | 9,65 | 1 | 0,17 | 62 | – |
| ГМ | 9,8 | 1 | 0,17...0,25 | 80 | 12 |
| Сапфирит | 9,6 | 1 | 0,21...0,25 | – | – |
| 22ХС | 9,35 | 10 | 0,13 | 61 | 11 |
| Брокерит-9 | 6,8 | 6 | 1,67 | 75—92 | 8...9 |
| Кварц | 3,78 | 1 | 0,06…0,09 | 5,5 | 14 |
| Сапфир | 9,9 | 1 | 0,25 | 50. ..67 | 14 |
| Ферриты | 9... 14 | 10...100 | 0,25 | – | – |

Для обеспечения хорошего теплоотвода применяют бериллиевую керамику с высокой теплопроводностью (брокерит-9). Высокая стабильность $\varepsilon$ и малые диэлектрические потери делают кварцевые подложки незаменимыми для фильтров СВЧ, генераторов и т. д. На сапфир можно локально осаждать плёнки полупроводниковых материалов и создавать таким способом активные приборы. Разработаны микрополосковые резонаторы с высокой стабильностью частоты (погрешность – менее 0,5%).

Ферритовые подложки характеризуются граничной частотой $f_B$, выше которой магнитная проницаемость феррита $\mu$ = 1, а потери очень малы. В ненамагниченном состоянии на частотах выше $f_B$ ферритовые подложки ведут себя как обычные диэлектрики. Диэлектрические и ферритовые подложки изготавливают прессованием с последующим спеканием под нагрузкой; при необходимости отверстия в подложке сверлят с помощью электронного луча или ультразвука, затем шлифуют и полируют поверхность и осуществляют контроль качества обработки.

Применение составных ферро-диэлектрических подложек устраняет такие недостатки ферритовых подложек, как возможность возникновения нежелательных связей между различными магнитными цепями и влияние температуры на характеристики микрополосковых линий. Наилучшие результаты получены при изготовлении монолитных составных подложек методом спекания «немагнитных» и «магнитных» ферритов, имеющих одинаковые температуры спекания, коэффициенты усадки и коэффициенты линейного расширения. Потери СВЧ энергии микрополосковых линий на таких подложках не выше, чем в линиях на подложках из лучших диэлектриков; их можно использовать в ГИС СВЧ, содержащих ферритовые циркуляторы, фазовращатели и т. д.

**Микрополосковые линии передачи.** Основным конструктивным элементом ГИС СВЧ с распределёнными параметрами является микрополосковая линия (МПЛ). Она является плоским аналогом объёмной коаксиальной линии и представляет собой узкую металлическую плёночную полоску на диэлектрической плате с экранированной обратной стороной (рис. 7.1).

Основными электрическими параметрами МПЛ являются: волновое сопротивление $z$, длина волны $\lambda$ и затухание $a$, определяющее добротность линии Q. Эти параметры могут быть рассчитаны по формулам:

$$z = z_0 / \sqrt{\varepsilon_{эф}}; \quad \lambda = \lambda_0 / \sqrt{\varepsilon_{эф}}; \quad \alpha = \alpha_0 \sqrt{\varepsilon_{эф}}, \tag{7.1}$$

где $z_0$, $\lambda_0$, $\alpha_0$ – параметры МПЛ для свободного пространства (воздуха);

$\varepsilon_{эф}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость МПЛ.

Величина $\varepsilon_{эф}$ рассчитывается в соответствии с соотношением

$$\varepsilon_{эф} \approx \frac{\varepsilon+1}{2} + \frac{\varepsilon-1}{2}\frac{1}{\sqrt{1+\frac{10h}{b}}}, \tag{7.2}$$

где ε – диэлектрическая проницаемость материала платы (обычно применяются материалы с $\varepsilon \geq 10$).

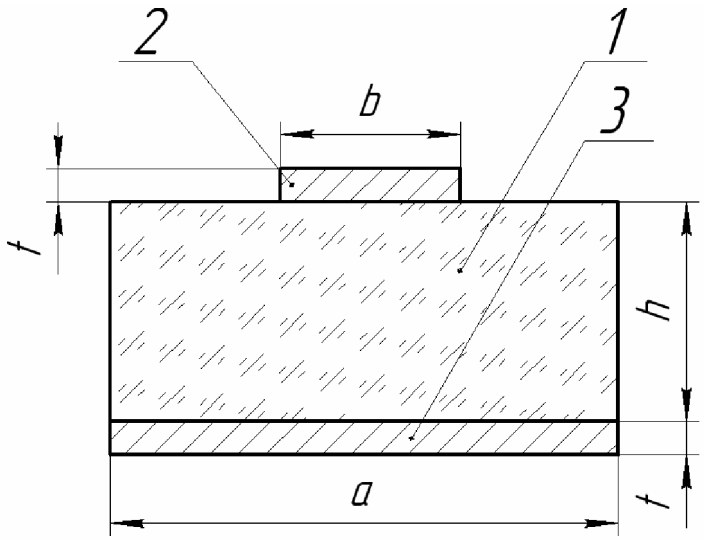



Рисунок 7.1 – Конструкция микрополосковой линии: 1 – плата; 2 – проводник; 3 – металлизация обратной стороны платы.

Величина $\alpha$ складывается из следующих составляющих

$$\alpha = \alpha_{п} + \alpha_{м} + \alpha_{и}, \tag{7.3}$$

где $\alpha_{п}$ – затухание, определяемое потерями в подложке,

$\alpha_{м}$ – затухание, определяемое потерями в металлической плёнке,

$\alpha_{и}$ – затухание вследствие излучения (при больших $\varepsilon$ $\alpha_{и} \to 0$).

Для уменьшения размеров МПЛ и подавления возникающих в ней гармоник целесообразно уменьшать ширину полоски $b$. Однако это приводит к возрастанию потерь в линии. К возрастанию потерь приводит также и уменьшение толщины платы $h$; с уменьшением $h$ также уменьшаются размеры МПЛ и снижаются потери на излучение. Стандартные размеры плат ($h$): 0,25; 0,5; 1,0 мм. Ширина основания МПЛ $a$ обычно принимается равной или большей $3b$. Толщина проводящих плёнок $t$ должна составлять величину $t = (3 \ldots 5)\delta$, где $\delta$ – толщина скин-слоя на частоте работы микросхемы. Для часто применяемых проводниковых материалов толщина скин-слоя

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \mu_0 \sigma}}, \qquad (7.4)$$

где $f$ – рабочая частота; $\mu$ – магнитная проницаемость материала плёнки; $\sigma$ – удельная проводимость материала плёнки, $(\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$.

Рабочие характеристики МПЛ определяются отношением $b/h$. Величина волнового сопротивления может быть определена из соотношения

$$Z_0 = \frac{377h}{b/h\sqrt{\varepsilon}\left[1+1{,}735\varepsilon^{-0{,}0724}(b/h)^{-0{,}836}\right]}. \qquad (7.5)$$

**Элементы с распределёнными параметрами**. Наиболее распространённые конструкции реактивных элементов, применяемых в ГИС СВЧ, приведены на рис. 7.2.

Последовательная ёмкость (рис. 7.2, *а*), образуемая за счет зазора в МПЛ, служит для осуществления слабой связи и имеет малое значение. Некоторое увеличение ёмкости достигается в конструкции рис. 7.2, *б*. Параллельная ёмкость, образованная между заземляющей пластиной и проводником МПЛ, выполняется в виде одинарного (рис. 2, *а*) или сдвоенного (рис. 2, б) шлейфа с низким волновым сопротивлением. Последовательная индуктивность выполняется в виде отрезка линии длиной $l < \lambda/8$ с высоким волновым сопротивлением (табл. 4.3). Параллельная индуктивность представляет собой короткозамкнутый параллельный шлейф, длина которого $l = \lambda/8$ (табл. 4.3).

Активные сопротивления с распределёнными параметрами используют в качестве согласованных нагрузок и аттенюаторов. Их реализуют в виде отрезков МПЛ с повышенным затуханием. Поверхностное сопротивление верхнего проводника такой линии $R_{S1}$ значительно больше поверхностного сопротивления заземляющего $R_{S2}$, в этом случае

$$\alpha_{\text{п}} \approx \frac{R_{s1}}{\rho b} \text{ (дб/ед. длины)}. \qquad (7.6)$$

Следовательно, для реализации нагрузки или аттенюатора необходимо увеличить $R_{S1}$, однако при подключении линии с высоким затуханием $\alpha_{\text{п}}$ к регулярной линии в месте соединения возникает отражение, характеризуемое коэффициентом

$$|\Gamma| = 0{,}7\, R_{S1}\Lambda/\rho в, \qquad (7.7)$$

где $\Lambda$ – длина волны.

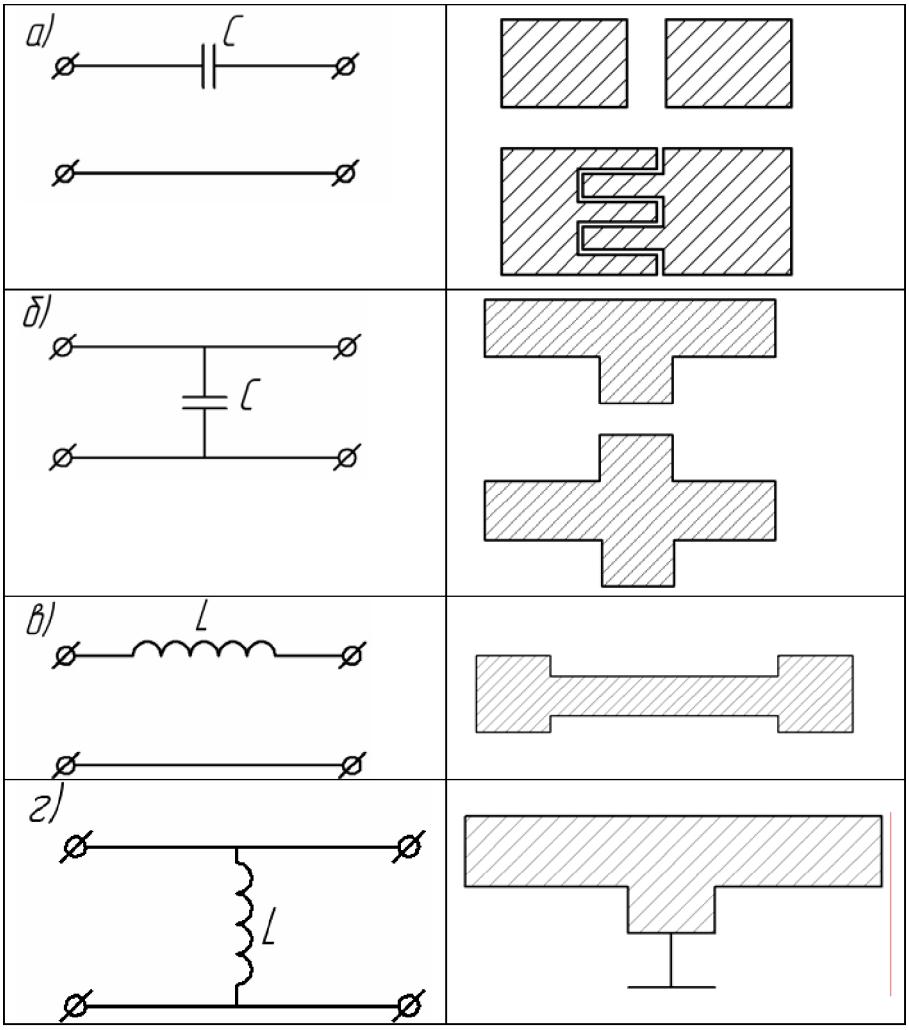



Рисунок 7.2 – Конструкции и эквивалентные схемы элементов СВЧ ГИС с распределёнными параметрами: *а* – последовательная ёмкость; *б* – параллельная ёмкость; *в* – последовательная индуктивность; *г* – параллельная индуктивность.

Поэтому при выборе $R_{S1}$ приходится идти на компромисс: задавая допустимый коэффициент отражения нагрузки $\Gamma_{max}$ из соотношения (7.7) определяют максимально возможное значение $R_{S1}$ и затем находят погонные потери $\alpha_п$ по формуле (7.6).

**Элементы с сосредоточенными параметрами** применяют тогда, когда существует возможность реализовать их размеры значительно меньшими, чем длина волны (размеры элементов должны быть меньше $\lambda$ /16). Современная технология обеспечивает применение элементов с сосредоточенными параметрами до частот примерно 10 ГГц. Выше этой границы возможно использование сочетания элементов с сосредоточенными и распределёнными параметрами. Однако на более высоких частотах из-за паразитных связей в элементах с сосредоточенными параметрами их применение нецелесообразно.

ГИС СВЧ на элементах с сосредоточенными параметрами по сравнению с ГИС СВЧ на элементах с распределёнными параметрами в диапазоне частот до

10 …15 ГГц имеют значительно более высокую плотность упаковки элементов (в 10 и более раз).

**Резисторы с сосредоточенными параметрами** в ГИС СВЧ используют в качестве согласованных нагрузок в сумматорах, делителях мощности и цепях смещения. Номинальные значения сопротивлений резисторов, применяемых в качестве согласованных нагрузок в делителях и сумматорах мощности, составляют примерно 50 –100 Ом, в цепях питания – от нескольких Ом до нескольких МОм. Реализация низкоомных резисторов не вызывает принципиальных трудностей. Высокоомные резисторы (более 10 кОм) должны иметь достаточную длину, однако следует помнить, что линейные размеры резистора должны быть меньше 0,1Λ.

Отметим некоторые конструктивные особенности плёночных резисторов ГИС СВЧ. Плёночный резистор, используемый в качестве согласованной нагрузки, представляет собой отрезок МПЛ, в разрыв которой включен сосредоточенный резистор, закороченный на заземляющий проводник МПЛ; при этом волновое сопротивление МПЛ должно быть равно сопротивлению резистора. Один из выводов (1) резистора (рис. 7.3) имеет перекрытие с проводником линии, а другой (2) подсоединяется к заземляющему основанию (3) либо по торцу, либо через отверстие в подложке. Такую конструкцию успешно применяют в качестве согласованной нагрузки на длинноволновом участке СВЧ диапазона. Для конструктивного выполнения короткозамыкателя к выходу резистора подключают разомкнутый на конце отрезок МПЛ (шлейф) длиной $l_{шл} = (2n + 1)\Lambda/4$, перекрывающий плёнку на Δs (рис. 7.4, а), входное сопротивление которого на центральной частоте равно нулю. Для расширения рабочей полосы частот в одно сечение МПЛ параллельно включают два и более разомкнутых шлейфов с $l_{шл} = (2n + 1)\Lambda/4$ (рис. 7.4, *б)*. Плёночные резисторы, применяемые в качестве оконечных нагрузок, имеют в большинстве случаев сопротивление 50 Ом при $\rho_s = 50$ Ом/□.

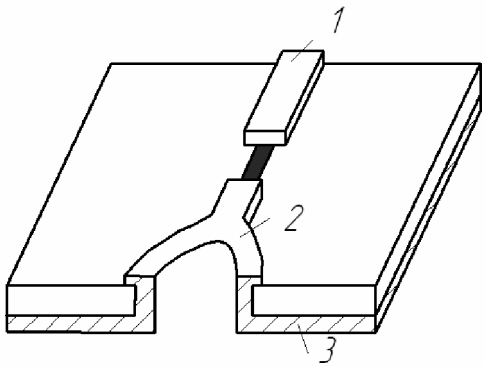
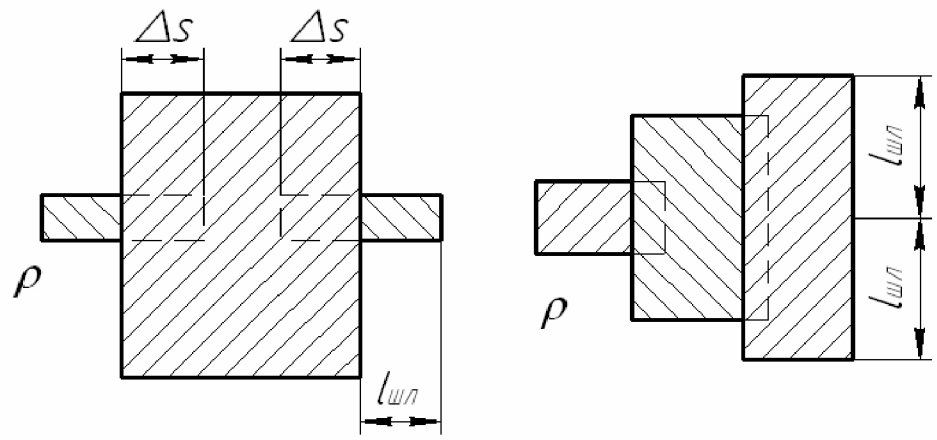



Рисунок 7.3 – Резистор с сосредоточенными параметрами.




а) б)

Рисунок 7.4 – Плёночные резисторы ГИС СВЧ.

Конденсаторы с сосредоточенными параметрами используют в ГИС СВЧ в качестве блокировочных (для шунтирования цепей питания и выводов активных приборов, подавления паразитных колебаний в СВЧ усилителях), проходных, а также в составе фильтров.

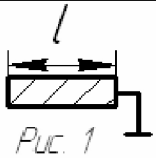
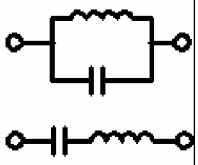
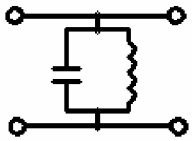
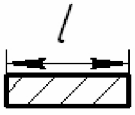
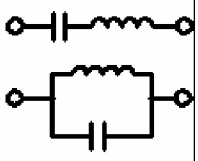
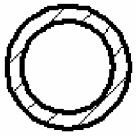
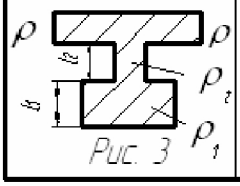
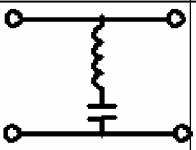
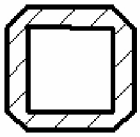
Конструкции конденсаторов с сосредоточенными параметрами аналогичны конструкциям конденсаторов с распределённой ёмкостью с той разницей, что размеры первых значительно меньше Λ. При емкостях более 2000 пФ используют дискретные навесные конденсаторы.

Индуктивные катушки с сосредоченными параметрами используют в качестве высокочастотных дросселей, элементов настройки и т. д. Их выполняют в виде меандра. При индуктивности 1 – 3,5 нГ применяют одно-, трехвитковые катушки; индуктивности менее 1 нГ реализуют в виде коротких узких проводников (например, длиной 1 мм и шириной 10 мкм).

Резонаторы, являющиеся основными элементами фильтров, генераторов и т. д., можно реализовать в микрополосковом (табл. 4.4) или объемном (рис. 7.5) исполнении. По конструкции их делят на замкнутые, разомкнутые и короткозамкнутые на конце.

Короткозамкнутый резонатор в микрополосковом исполнении (рис. 1, табл. 7.2) по сравнению с разомкнутыми на конце (рис. 2 – 4, табл. 7.2) имеет высокую собственную добротность и значительно меньшее излучение с концов. Контакт короткозамкнутых резонаторов с заземляющей поверхностью осуществляется с помощью винтов через подложку, щелей в подложке, что требует сверления отверстий и усложняет технологический процесс. В замкнутых конструкциях (рис. 5 и 6, табл. 7.2) отсутствуют элементы подавления излучений.

Таблица 7.2 – Резонаторы в микрополосковом исполнении.

| Топология резонатора | Длина | Эквивалентная схема | | Топология резонатора | Длина | Эквивалентная схема |
|---|---|---|---|---|---|---|
|  Рис. 1 | $l=\frac{\Lambda}{4}$ |  | | Рис. 4 | |  |
|  Рис. 2 | $l=\frac{\Lambda}{4}$ $l=\frac{\Lambda}{2}$ |  | |  Рис. 5 | $l=n\Lambda$ | |
|  Рис. 3 | |  | |  Рис. 6 | $l=n\Lambda$ | |

О б ъ ё м н ы е  р е з о н а т о р ы , выполненные в виде диска (рис. 7.5, *а*), параллелепипеда (рис. 7.5, б), стержня (рис. 7.5, *в*) или сферы, хорошо сочетаются с МПЛ, так как между ними устанавливается достаточно простая связь. Сигнал, частоты которого лежат в пределах полосы пропускания резонатора, переводит последний в режим магнитного диполя, излучение которого передаётся соседнему элементу. Материалами для таких резонаторов служат диэлектрики или ферриты. Диэлектрические резонаторы с $\varepsilon \geq 100$ и $\operatorname{tg}\delta = 1\cdot10^{-4}$ …$2\cdot10^{-4}$ имеют нагруженную добротность $Q_и$ = 5000…10000, что соизмеримо с $Q_и$ волноводных резонаторов. Диэлектрические резонаторы помещают в экран, размеры которого в 2 раза превышают размеры резонатора. Однако даже при наличии экрана объём, например, фильтров на диэлектрических резонаторах из $TiO_2$ ($\varepsilon$ = 85) в 3 – 5 раз меньше, чем у волноводных фильтров. Ферритовые резонаторы (чаще всего сферической формы), намагниченные до насыщения, взаимодействуют с переменным магнитным полем СВЧ, частота которого соответствует частоте ферритового резонанса.

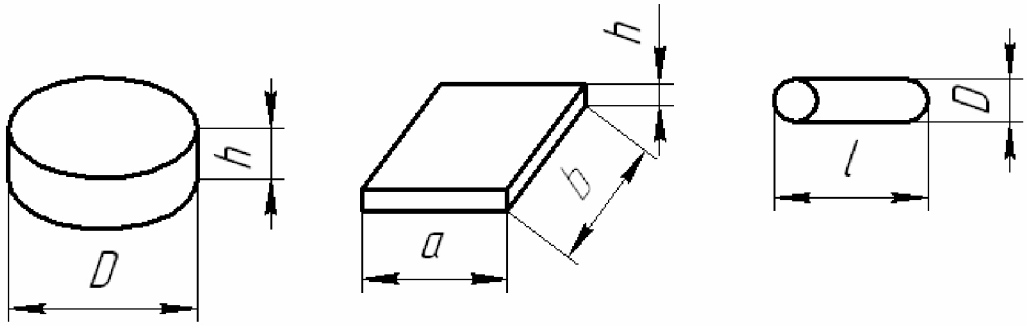



Рисунок 7.5 – Объемные резонаторы.

На рис. 7.6 изображена конструкция фильтра низкой частоты на элементах с сосредоточенными параметрами и его эквивалентная схема.

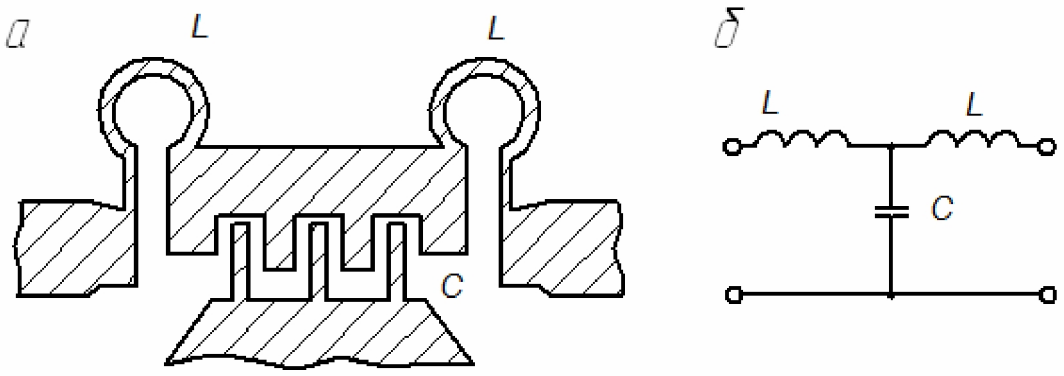



Рисунок 7.6 – Конструкция (а) и эквивалентная схема (б) фильтра низкой частоты ГИС СВЧ.

**Активные бескорпусные приборы микросхем СВЧ диапазона**. Дискретные бескорпусные транзисторы, применяемые в ГИС СВЧ и изготавливаемые по планарной полупроводниковой технологии, можно условно разделить на две группы: маломощные биполярные и полевые транзисторы с затвором Шоттки, мощные полупроводниковые приборы, разрабатываемые специально для определенного диапазона частот.

Современные маломощные биполярные бескорпусные СВЧ транзисторы имеют предельные частоты $f_г$ порядка 10 ...15 ГГц. В табл. 7.3 приведены основные параметры некоторых отечественных биполярных бескорпусных СВЧ транзисторов малой мощности ($K_P$ – коэффициент усиления по мощности).

Таблица 7.3 Характеристики некоторых СВЧ транзисторов

| Тип транзистора | $f_Г$, ГГц | $K$р на $f_Г$, ГГц | $P$к max, мВт (при $t$, °С) | $I_{КБ}$ max, мА | $U_{КБ}$ max, В | $U_{ЭБ}$ max, В |
|---|---|---|---|---|---|---|
| КТ372А | 2,4 | 10 | 50 | 10 | 15 | 3 |
| КТ3101 | 4,0 | 6 | 100 | 20 | 15 | 2,5 |
| КТ391 | 5,0 | 6 | 50 | 10 | 10 | 2 |

Полевой транзистор с затвором Шоттки на арсениде галлия является одним из перспективных полупроводниковых приборов для усиления сигналов в малошумящих ГИС СВЧ. Высокая дрейфовая скорость носителей заряда и малые размеры (длина затвора порядка 0,5 … 1 мкм) позволили получить приборы с $f_Г$ = 40 ГГц.

Мощные СВЧ транзисторы предназначены для применения в генераторах, усилителях и умножителях частоты.

Варакторные диоды с нелинейной зависимостью ёмкости от напряжения используют в транзисторно-варакторных генераторах, построенных по принципу

задающий генератор – усилитель мощности – умножитель частоты. Они позволяют повысить частоту, генерируемую с помощью транзисторных схем примерно на порядок. Смесительные диоды с затвором Шоттки являются наиболее перспективными приборами для малосигнальных СВЧ устройств – смесителей, детекторов, ограничителей, модуляторов и т. д.

Бескорпусные активные приборы выполняют такими, чтобы их можно было легко монтировать с МПЛ: либо последовательно – в разрыв микрополоскового проводника, либо параллельно – между микрополосковым и заземляющим проводниками.

Особенности элементов и компонентов обусловливают значительное своеобразие топологических решений и конструкций ГИС СВЧ.

Герметизация ГИС СВЧ осуществляют с помощью корпусов. Иногда микросхемы СВЧ не помещают в индивидуальные корпуса, а герметизируют с помощью лаков и компаундов с последующей групповой защитой от внешних воздействий в составе микроэлектронной аппаратуры кожухом и т. п. Корпуса ГИС СВЧ выполняют обычно в виде массивных металлических конструкций, имеющих высокочастотные коаксиально-полосковые соединители, служащие для подачи и отвода СВЧ сигнала. Помимо герметизации, корпус обеспечивает механическую прочность, отвод выделяющегося тепла и экранирование СВЧ электромагнитного поля.

## Контрольные вопросы

1. Назовите основные области применения ИМС СВЧ.
2. В каких случаях в ИМС СВЧ используется толстопленочная, а в каких тонкопленочная технология?
3. Какие активные компоненты используются в ГИС СВЧ?
4. Какие подложки используют для ГИС СВЧ и каковы требования к их электрическим характеристикам?
5. Что такое микрополосковые линии передачи и какими электрическими параметрами они характеризуются?
6. Какие элементы с распределёнными параметрами используются в СВЧ ИМС?
7. Какие элементы с сосредоточенными параметрами используются в СВЧ ИМС?
8. Изобразите конструкцию и эквивалентную схему фильтра низкой частоты ГИС СВЧ.
9. Приведите примеры активных бескорпусных приборов микросхем СВЧ диапазона.
10. Назовите особенности корпусов ИМС СВЧ диапазона.

# Глава 8. Тепловые режимы ГИС

При анализе теплового режима микросхемы необходимо определить температуру элементов и компонентов $T_i$ (резисторов, конденсаторов, диодов, транзисторов), расположенных на поверхности подложки, сравнить температуру элементов с допустимой температурой $T_{iд}$, оговариваемой в ТУ на материалы и навесные компоненты, и сделать заключение о приемлемости теплового режима элементов. Обычно предполагают, что корпус микросхемы изотермический и для упрощения анализа задачу разбивают на две части:

1. Определяют температуру перегрева элементов относительно температуры корпуса $T_к$:

$$\theta_i = T_i - T_k. \qquad (8.1)$$

2. Определяют температуру перегрева корпуса относительно температуры окружающей среды $T_c$:

$$\theta_k = T_к - T_c. \qquad (8.2)$$

Температуру элементов определяют, суммируя $\theta_i$, $\theta_k$ и температуру окружающей среды:

$$T_i = T_c + \theta_k + \theta_i. \qquad (8.3)$$

На поверхности подложки обычно расположено некоторое число элементов (рис. 8.1), поэтому проявляются взаимные тепловые влияния. Предполагают, что система линейна, следовательно, для определения температуры любого $i$-го элемента (рис. 8.2) можно применить принцип суперпозиции (наложения) тепловых полей

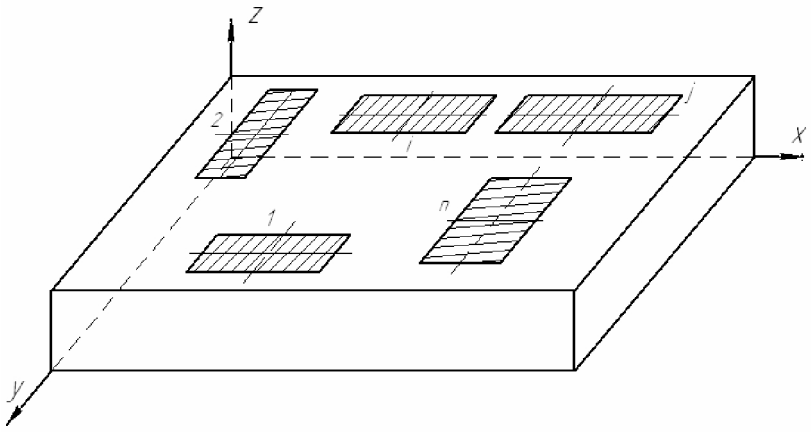



Рисунок 8.1 – Расположение элементов, выделяющих тепло.

$$T_i = T_k + \theta_{ii} + \theta_{фi} = T_k + \sum_{i=1}^{n} \theta_{ji}, \qquad (8.4)$$

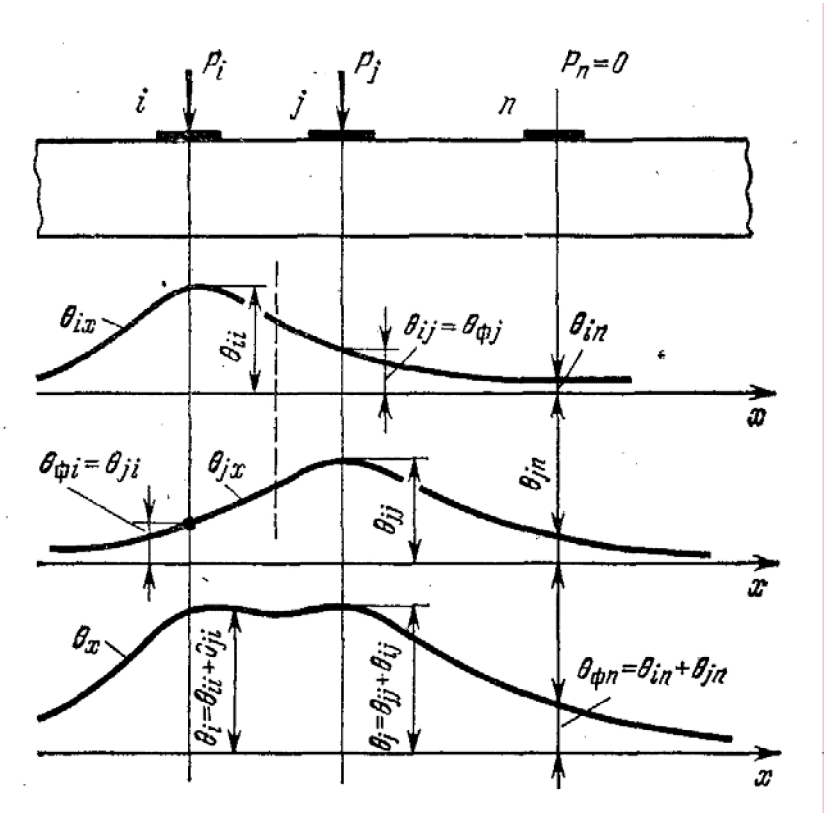



Рисунок 8.2 – Суперпозиция тепловых полей.

где $\theta_{ji}$ — собственный перегрев, обусловленный только мощностью $i$ - го источника; $\theta_{\phi i} = \sum_{i=1, j\neq i}^{n} \theta_{ji}$ – фоновый перегрев, обусловленный всеми остальными источниками тепла; $\theta_{ji}$ — фоновая составляющая перегрева $i$ - го элемента, обусловленная $j$-м источником тепла; $n$ – число источников тепла.

Температура $p$ – $n$- перехода $i$ - го навесного полупроводникового элемента (рис. 8.3) определяется выражением

$$T_{in} = T_k + \theta_{iin} + \theta_{\phi in} + \theta_{vin}, \qquad (8.5)$$

где $\theta_{iin}$ – перегрев поверхности подложки под $i$-м навесным компонентом, обусловленный мощностью элемента $P_{t\,н}$, при условии, что все тепло этого элемента передается в подложку; $\theta_{\phi in}$ – фоновая составляющая перегрева поверхности подложки под $i$-м навесным компонентом, обусловленная соседними источниками тепла; $\theta_{vin}$ – внутренний перегрев навесного компонента. При определении $\theta_{iin}$ предполагают, что на поверхности подложки сосредоточен плоский источник тепла с размерами навесного компонента и мощностью $P_{in}$ (рис.8.3).

Для навесных активных компонентов в справочной литературе приводятся данные для внутреннего теплового сопротивления с учётом теплового

сопротивления клеевой прослойки. При заданной мощности навесного компонента внутренний перегрев определяется из соотношения

$$P_{i\text{н}} = \theta_{\text{в}\,i\,\text{н}} / R_{\text{т}\,\text{в}\,i\,\text{н}}. \qquad (8.6)$$

Для определения температуры перегрева в любой точке подложки с координатами $xj$, $yj$, $z_j$, обусловленного, $i$-м источником тепла с мощностью $P_i$, составляют тепловую модель микросхемы и решают стационарное уравнение теплопроводности

$$\partial^2\theta/\partial x^2 + \partial^2\theta/\partial y^2 + \partial^2\theta/\partial z^2 = 0 \qquad (8.7)$$

при соответствующих граничных условиях, определяемых особенностями конструкции микросхемы. Решение уравнения (8.7) имеет вид:

$$\theta_{i\,i}(x_j,\ y_j,\ z_j) = P_i F_{ij}(x_j,\ y_j,\ z_j),$$

где $F_{ij}(x_i,\ y_i,\ z_i)$ – тепловой коэффициент, зависящий от размеров и координат источника, размеров и тепловых свойств подложки и координат точки, в которой определяется температура. Перегрев $i$ - го источника тепла в центре ($j = i$, $z_i = l_3$) и в точке поверхности подложки с координатами $x_j$, $y_j$, $z_j = l_3$ определяется выражениями

$$\theta_{i\,i}(x_i,\ y_i,\ l_3) = PiFii(x_i,\ y_i,\ l_3), \qquad (8.8)$$

$$\theta_{i\,j}(x_j,\ y_j,\ l_3) = PiFij(x_j,\ y_j,\ l_3). \qquad (8.9)$$

Расчет теплового режима элементов микросхемы обычно сводится к определению собственных $F_{ii}$ и взаимных $F_{ij}$ тепловых коэффициентов. По рассчитанным тепловым коэффициентам и мощности $i$-го источника тепла определяют перегрев в заданных топологией микросхемы точках поверхности подложки. Перегревы навесных полупроводниковых приборов рассчитываются по формуле (8.6). В результате суммирования собственного и взаимных (фоновых) перегревов определяют температурный режим всех элементов микросхемы.

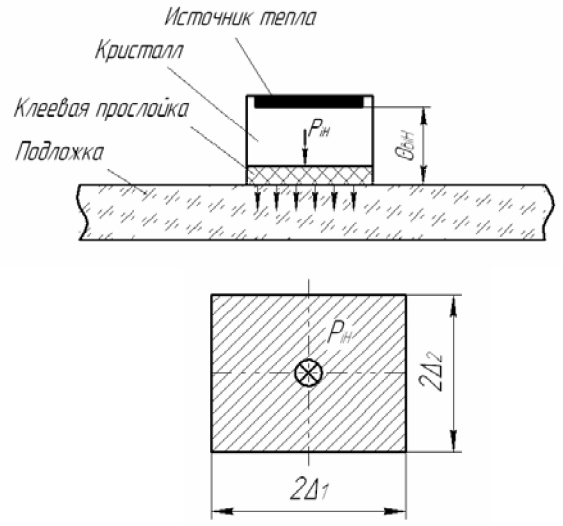



Рис. 8.3 Модель источника тепла

**Тепловые модели**. При разработке конструкции микросхемы большое внимание уделяют обеспечению нормального теплового режима элементов, так как от температуры элементов существенно зависит их надёжность. Наиболее эффективный отвод тепла осуществляется за счет кондуктивного теплообмена, поэтому конструкции микросхем можно классифицировать исходя из особенностей передачи тепловых потоков. Наиболее четко вырисовываются два типа конструкций микросхем (рис. 8.4).

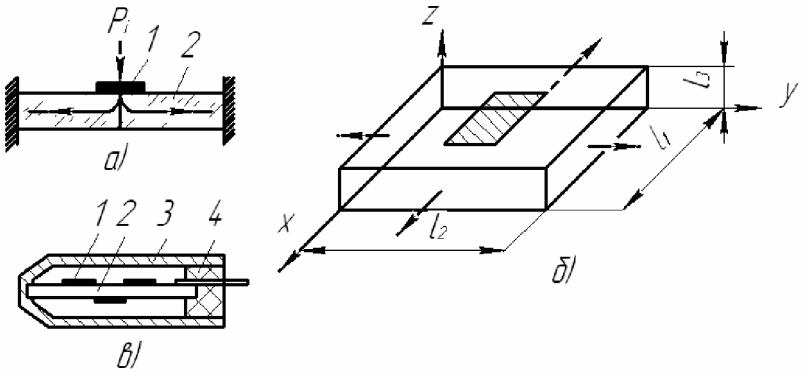



Рисунок 8.4 – Тепловые модели.

В первом типе конструкций (рис. 8.4, а) кондуктивный теплоотвод осуществляется с узких (боковых) граней подложки. Тепловой поток от источника к теплоотводу распространяется вдоль подложки. Упрощенная конструкция микросхемы, соответствующая модели (рис. 8.4, *б*), приведена на рис. 8.4, *в*. Микросхема имеет металлический корпус *3*, заливаемый компаундом *4* со стороны торца; на плате *2* расположены тепловыделяющие элементы *1*. Рассматриваемая конструкция характеризуется высокими тепловыми сопротивлениями элементов и находит ограниченное применение.

Ко второму типу относят конструкции, в которых кондуктивный теплоотвод осуществляется в основном с больших (торцевых) граней подложки (рис. 8.5, *а, б*). Тепловой поток от источника *1* к корпусу *3* передается в основном поперек подложки *2*, имеющей малую толщину и соответственно невысокое тепловое сопротивление. Конструкции микросхем, соответствующие этой модели, приведены на рис. 8.5, *в – д*. В металлостеклянном корпусе (рис. 8.5, *в*) подложка *2* припаивается к основанию металлического корпуса *3*, тепловая стенка между подложкой и корпусом практически отсутствует. В конструкции на рис. 8.5, *г* подложка *2* приклеивается к основанию металлического корпуса *3* слоем клея *4*, который имеет тепловое сопротивление, сравнимое с тепловым сопротивлением подложки.

Ко второму типу относится также конструкция, в которой подложка микросхемы приклеивается к общему теплоотводу сложного микроузла (рис. 8.5, *д*). В конструкциях, изображенных на рис: 8.5, *е, ж* вся внутренняя полость корпуса залита компаундом *4* с достаточно высоким коэффициентом теплопроводности и тепловой поток от источника к корпусу отводится в поперечном направлении относительно подложки.

Особое место занимают конструкции микросхем, показанные на рис. 8.6: *а* – металлополимерный корпус с частичной заливкой компаундом *4;* б – металлокерамический корпус, в котором многослойная коммутационная плата *2* используется в качестве подложки и основания корпуса. Если эти микросхемы устанавливаются на печатные платы *6* так, что между основанием корпуса и платой существует узкий воздушный зазор (тепловая стенка), то из-за плохой теплопроводности воздуха теплопередача от источника тепла *1* к металлической крышке *3* и выводам *5* осуществляется в основном вдоль подложки. Корпуса таких микросхем нельзя считать изотермическими. Если же рассматриваемые микросхемы приклеиваются компаундом к плате, то большой удельный вес имеет кондуктивный теплоотвод поперек поверхности подложки.

Конвективный теплообмен внутри корпусированных микросхем не имеет большого значения, так как тонкие воздушные стенки между подложкой и крышкой корпуса имеют высокое термическое сопротивление.

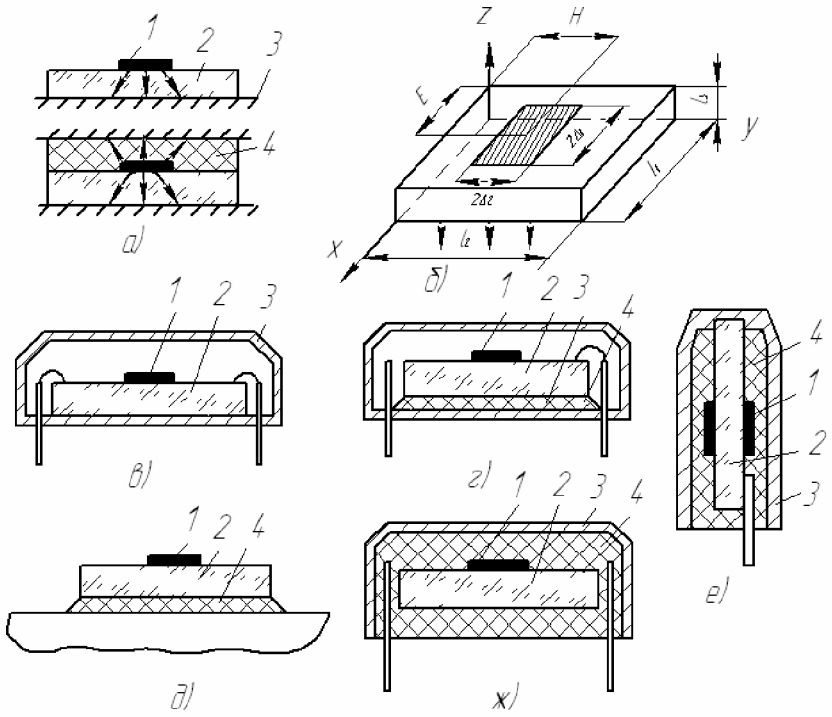



Рисунок 8.5 – Теплоотвод в ГИМС.

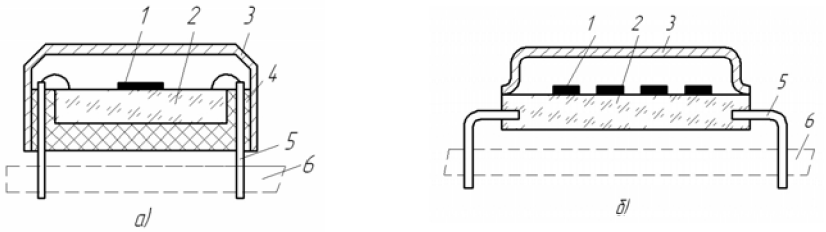



Рисунок 8.6. Металлополимерный (а) и металлокерамический (б) корпуса.

Лишь в бескорпусных конструкциях микросхем, особенно при большой поверхности подложки БГИС, достаточная доля мощности источников тепла рассеивается за счет конвективного теплообмена.

## Контрольные вопросы

1. С какой целью проводится тепловой расчет ИМС?
2. Что такое принцип суперпозиции тепловых полей?
3. В какой последовательности проводится тепловой расчет ИМС?
4. Нарисуйте известные Вам тепловые модели и укажите достоинства и недостатки каждой из них.
5. Какие способы  отвода тепла в ИМС Вы знаете?

# Глава 9. Надёжность микроэлектронной аппаратуры

Надежность – свойство ИМС выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, хранения и транспортирования.

Надежность выражается числом от 0, если аппаратура неработоспособна, до 1 (аппаратура абсолютно надёжна). Более удобными характеристиками надёжности являются: среднее время между двумя отказами Тср., выраженное в часах или его обратная величина – средняя частота отказов $\lambda$. Обычно величина $\lambda$ не является постоянной. Она повышена в начале (из-за дефектов) и в конце (из-за износа, старения) срока службы.

Так как основной причиной отказов радиоэлектронных устройств является выход из строя отдельных элементов, то и средняя частота отказов устройства определяется надёжностью всех входящих в него элементов. Чем больше элементов входит в устройство, тем меньше его надёжность. Значения Тср. для каждого типа радиоэлемента, радиодетали, узла определяется при испытании больших партий в течение длительного времени. Эти значения могут с определённой достоверностью приниматься для расчётов надёжности проектируемой аппаратуры. В настоящее время расчёт надёжности является таким же важным элементом разработки, как и расчёт чувствительности, мощности и.т.д.

Значения Тср. зависят не только от типа радиоэлемента, радиодетали, но и от режима их работы в устройстве. При повышении температуры, рабочего напряжения, рассеиваемой мощности величины Тср. уменьшаются. С целью увеличения надёжности элементы схем рекомендуется использовать на режимах, далёких от предельно допустимых. Для этого несколько увеличивают расчётные размеры элементов, а одновременно и размеры микросхемы.

Работоспособное состояние ИМС нарушается вследствие появления внезапных или постепенных отказов. Внезапные отказы возникают в результате резкого, скачкообразного изменения определяющих параметров ИМС. Они обусловлены проявлением скрытых дефектов в материалах и элементах конструкции микросхемы. Постепенные отказы являются следствием деградации физических свойств материалов под влиянием эксплуатационных факторов и естественного старения. В результате рабочие параметры ИМС выходят за пределы установленных допусков. Различная природа внезапных и постепенных отказов находит свое отражение в методах их математического описания.

При оценке вероятности возникновения внезапных отказов используются модели в виде последовательного соединения совокупности элементов, определяющих работоспособное состояние микросхемы. В гибридных ИМС можно достаточно чётко выделить такие элементы или их группы. К ним относятся: бескорпусные активные и пассивные компоненты, плёночные резисторы и конденсаторы, контакты между плёночными проводниками, проволочные перемычки, сварные и паяные контакты, подложка, корпус и др.

Каждый из этих элементов характеризуется определенными интенсивностями отказов $\lambda_i$, определяемыми в результате экспериментального исследования характеристик надёжности. Типовые значения $\lambda_i$ ($ч^{-1}$) для элементов и компонентов ГИС при $T$= +85° С представлены ниже:

Навесные транзисторы и диоды ..... $5\cdot10^{-8}$
Тонко- и толстоплёночные резисторы ..... $1\cdot10^{-9}$
Тонкоплёночные $Ta_2O_5$ – конденсаторы ..... $8\cdot10^{-9}$
Тонкоплёночные $SiO_2$ – конденсаторы ..... $1\cdot10^{-8}$
Навесные керамические конденсаторы ..... $5\cdot10^{-10}$
Керамические подложки ..... ..... $5\cdot10^{-10}$
Паяные соединения..... ..... $3\cdot10^{-9}$

В период нормальной работы ИМС закон распределения отказов во времени близок к экспоненциальному:

$$P(t) = \exp(-\lambda_t), \qquad (9.1)$$

где $\lambda_i = \sum_{i=1}^{n} N_i \lambda_i$ ($\lambda_i$ – интенсивность отказа $i$-го элемента (компонента); $N_i$ – количество однотипных элементов (транзисторов, резисторов, конденсаторов и т. д.); $n$ – количество разновидностей элементов.

Интенсивность отказов ИМС определяется из соотношения

$$\lambda = \sum_{i=1}^{N_э} \lambda_{эi} + \sum_{j=1}^{N_c} \lambda_{ci}, \qquad (9.2)$$

где $N_э$ – число элементов и компонентов, $N_c$ – число соединений.

Необходимо отметить, что в ГИС свойства материалов и физико-химические процессы, сопутствующие отказам, сильно коррелированы, так как плёночные элементы формируются одновременно в определенном цикле технологических операций. Еще более сильно корреляционные связи проявляются в полупроводниковых ИМС. Здесь в качестве компонентов ненадежности выступают монокристаллическая пластина, диффузионные полупроводниковые области, окисные плёнки, металлизация и т. п.

Постепенные отказы ИМС возникают в результате деградации физических свойств материалов под влиянием эксплуатационных факторов и собственного старения. Глубокое изучение причин и закономерностей изменения свойств материалов и элементов позволяет построить математические модели для определения уровня надёжности по постепенным отказам. Математическая модель надежности ИМС по постепенным отказам представляет собой комплекс математических выражений, отражающих связь изменений электрофизических параметров материалов или элементов с атомными или молекулярными процессами в материалах и на границах их раздела. Физические параметры материалов и элементов представляют собой случайные (или случайно-детерминированные) функции времени или случайные величины. Поэтому используются вероятностные математические модели.

Высокая надежность ИМС ($\lambda \approx 10^{-6}...10^{-5}$ ч$^{-1}$) обусловлена особенностями их конструкций, технологии изготовления, организации производства и контроля. Малые размеры и объемы элементов, малые размеры конструкций обеспечивают высокую механическую прочность ИС; высокая культура производства позволяет обеспечить малое количество различных дефектов. Формирование контактов в условиях вакуума или в инертной среде способствует обеспечению высокой надёжности внутренних электрических соединений. Применение механизации и автоматизации производственных процессов и жёсткого пооперационного контроля позволяет ослабить влияние на надежность отклонений режимов технологических процессов. На заключительном этапе производства ИМС с повышенной надёжностью применяют специальные методы отбраковки.

Основные физические причины отказов пассивных элементов ГИС

Наиболее существенное влияние на надёжность плёночных резисторов оказывают дефекты, обусловленные технологическими процессами. Дефекты, связанные с механическими повреждениями резистивной плёнки в процессе изготовления, ведут, как правило, к внезапным отказам. К таким дефектам относятся царапины и трещины, образующиеся при термокомпрессии и герметизации вследствие механических нагрузок или термомеханических воздействий.

Раковины и полости в резистивном слое могут появиться в местах локализованных загрязнений как в процессе нанесения плёнки, так и при фотолитографических процессах. Отслоения плёнки наблюдаются при плохой адгезии к подложке вследствие недостаточного обезжиривания поверхности перед напылением или нарушения режима напыления. Микрошероховатости размером более 0,01 мкм на подложке могут привести к выходу резистора из строя либо из-за механического разрыва пленки, либо из-за локального перегрева и выгорания слабых участков.

В процессе изготовления микросхем возможны загрязнения резистивного слоя посторонними примесями. Загрязнения являются источником химической, а при наличии влаги, электрохимической коррозии материала резистивной плёнки и контактных площадок в процессе эксплуатации микросхем. При этом могут возникнуть как обрывы, так и короткие замыкания резисторов. Короткие замыкания обусловлены миграцией ионов по увлажненной поверхности. Для создания бездефектных резисторов необходимо применять подложки с гладким рельефом, ликвидировать источники загрязнения в предварительных операциях и в процессах нанесения резистивной плёнки.

Основными источниками ненадежности плёночных конденсаторов являются подложка, диэлектрическая плёнка и обкладки. Параметры тонкоплёночных конденсаторов чрезвычайно чувствительны к микрорельефу поверхности подложки. Наличие микровыступов сопряжено с внезапными отказами из-за пробоя тонких мест в диэлектрике. Допустимые микронеровности не должны превышать порядка $10^{-6}$ см. Короткие замыкания вызываются электрическим и тепловым пробоем диэлектрика, изменениями проводимости диэлектриков из-за диффузии атомов металлов обкладок по порам диэлектрика, который имеет зернистую структуру. Обрывы наблюдаются при сильной коррозии или пробое.

На надежность тонкоплёночных конденсаторов большое влияние оказывают условия эксплуатации и электрические нагрузки. Интенсивность отказов конденсаторов удваивается, а средний срок службы уменьшается вдвое при повышении температуры среды на каждые 10°С. Для повышения надёжности конденсаторов применяют подложки с поверхностью высокого качества; диэлектрики с бездефектной структурой (равномерная толщина, отсутствие пор, упорядоченная структура); материалы верхних обкладок с пониженной миграционной способностью атомов; оптимизируют площадь обкладок.

Надежность ИМС существенно зависит от качества металлизации и контактов. Из-за некачественных контактов происходят в основном внезапные и релаксационные отказы. В результате объёмной и поверхностной диффузии одного материала в другой в области контакта и приграничных областях (например, в контакте проволочки с тонкой плёнкой) образуются скопления вакансий (пор), которые со временем приводят к появлению пустот и, следовательно, разрыву проводников. В контактах, образованных золотым шариком проволочного вывода и алюминиевой плёнкой, при определенных условиях возможно образование интерметаллических соединений, что снижает механическую прочность контактов.

Отказы в коммутационных проводниках возникают из-за электродиффузии при высоких плотностях токов (более $10^6$ А/мм$^2$) и взаимодействия металла с окислом на участках с очень тонкой металлизацией. Такие участки образуются в окнах диэлектрических слоев при одно- и многослойной металлизации.

Надежность бескорпусных полупроводниковых приборов с проволочными выводами существенно зависит от физических свойств герметизирующего компаунда. Из-за разницы температурных коэффициентов линейного расширения кристалла, проволочных выводов и компаунда возможны обрывы проволочных выводов в области контакта. Это ограничивает уровень максимальной рабочей температуры бескорпусных полупроводниковых приборов.

Обеспечение высокой надежности в процессе проектирования и производства микросхем. Прогнозирование качества и надёжности. Отказы ИМС могут возникать в результате нарушения установленных правил и норм конструирования (конструкционный отказ) и нарушения установленного процесса изготовления (производственный отказ). При проектировании элементов ИМС учитывают нагрузочные характеристики материалов (рабочая напряженность электрического поля, допустимая плотность тока, допустимая удельная мощность рассеяния, допустимые механические напряжения), температурные коэффициенты, коэффициенты старения и конструктивно-технологические ограничения (минимальные размеры элементов, расстояния между элементами, точность геометрических размеров элементов и др.), определяемые видом технологических процессов и современным уровнем технологии. Неправильный выбор нагрузочных характеристик материалов приводит к снижению надёжности как по внезапным, так и по постепенным отказам. Поэтому на этапе проектирования ИМС повышенной надёжности выбирают достаточно низкие коэффициенты использования нагрузочных характеристик материалов.

Производственная надёжность определяется уровнем технологии и технологической дисциплины, качеством и эффективностью входного контроля и

контроля технологии на всех этапах технологического процесса, степенью автоматизации производственных процессов и контрольных операций, квалификацией персонала, наличием и эффективностью системы отбраковки потенциально ненадёжных образцов, эффективностью контроля качества и надёжности. Для отбраковки потенциально ненадёжных ИМС используются визуальный контроль монтажа открытых микросхем с помощью микроскопов, испытания на герметичность, на воздействие линейных ускорений, термоциклирование, термоэлектротренировки и др.

Для прогнозирования качества и надёжности микросхем используют математические и физические методы. Математическое прогнозирование осуществляется с помощью математических моделей. Достоверное моделирование может быть выполнено при наличии исходной статистической информации об изменениях параметров материалов и элементов в условиях эксплуатации микросхем. Физическое прогнозирование качества и надёжности ИМС осуществляют обычно неразрушающими методами, к которым относятся: электрофизические методы, методы определения тепловых полей с помощью инфракрасного радиометра, потенциальных полей, шумов активных и пассивных элементов.

Электрофизические методы прогнозирования качества ИМС предполагают использование достаточно сильных корреляционных связей между некоторыми электрофизическими параметрами и характеристиками материалов (температурные коэффициенты, спектральные характеристики токовых шумов, напряжения начала ионизации и т. п.) и надежностью. Эти взаимосвязи устанавливают на основании результатов предварительных статистических испытаний. При прогнозировании показателей качества испытаниям подвергают плёночные элементы модулей-свидетелей, которые изготовляют одновременно с рабочими модулями. Для повышения эффективности прогнозирования применяют ускоренные испытания с повышением электрической или тепловой нагрузки.

## Контрольные вопросы

1. Сформулируйте определение надёжности ИМС.
2. Назовите характеристики надёжности ИМС.
3. Как определяют характеристики надёжности ИМС?
4. От каких факторов зависит надёжность ИМС?
5. В результате чего возникают внезапные и постепенные отказы ИМС?
6. Чем обусловлена высокая надёжность ИМС?
7. Назовите основные физические причины отказов пассивных элементов ГИС (резисторов и конденсаторов).
8. Приведите приемы обеспечения высокой надёжности в процессе проектирования микросхем.
9. Назовите методы математического и физического прогнозирования надёжности ИМС.

## Перспективы развития микроэлектроники

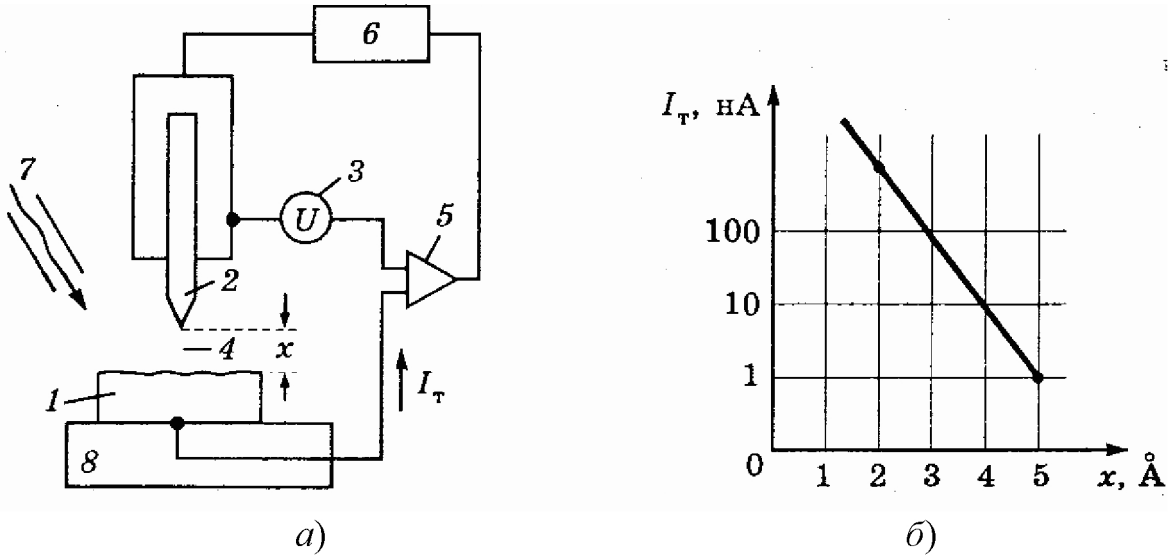
В течение всего периода развития микроэлектроники постоянно велись и ведутся поиски создания альтернативной элементной базы. Многие учёные предсказывали, что на смену полупроводниковой микроэлектронике придет функциональная электроника, одноэлектроника, оптоэлектроника, фотоника, квантовая и, наконец, биоэлектроника. Во всех перечисленных направлениях к настоящему времени достигнуты обнадёживающие результаты. Однако ни по одному из этих направлений не создана технологическая база, обеспечивающая экономически конкурентное производство высоконадёжной элементной базы.

Дальнейшее уменьшение размеров методами электронной и рентгеновской литографии ограничивается прежде всего явлениями существенного разупорядочения материалов за пределами окон в фоторезисте. Поэтому 2010-2015 годы можно считать вершиной развития микроэлектроники. В 1985 г. американские кристаллографы Дж. Карл и Г. А. Хауптман стали лауреатами Нобелевской премии за выдающиеся достижения в разработке прямых методов определения структуры кристаллов. С этого времени началась история бурного развития исследований, создания лабораторного и промышленного приборостроения и нанометровых структур, основанных на использовании туннельной микроскопии.

На рис. 1, *а* приведена схема разработанной российскими специалистами М. А. Ананяном и П. Н. Лускиновичем нанотехнологической установки. В качестве подложки могут быть использованы любые проводящие материалы с тщательно отполированной поверхностью. Зонд представляет собой металлическую иглу, как правило, из твердосплавного материала, с заточенной методами ионного травления вершиной. С микроскопической точки зрения радиус кривизны вершины зонда определяется размерами единичного атома, находящегося на вершине зонда.

Если к зонду по отношению к подложке приложить некоторое напряжение, то при уменьшении величины зазора $x$ до размеров порядка единиц ангстрем, через зазор начинает протекать туннельный ток (рис. 1, *б*). Важно отметить, что величина зазора значительно меньше величин межатомных и межмолекулярных расстояний в окружающем зазор газе (20…80 Å). Поэтому можно считать, что туннельный ток в зазоре практически протекает в вакууме. При этом напряжённость электрического поля в зазоре, даже при слабых управляющих напряжениях порядка милливольт, достигает весьма значительных величин порядка $10^6$ В/см и выше.

Как видно из рис. 1, *б,* ток в зазоре при стабилизированном управляющем напряжении линейно зависит от величины зазора. При изменении величины зазора на 1 Å величина тока изменяется в 10 раз. Измеряя туннельный ток, можно с помощью пьезопреобразователей регулировать или стабилизировать величину зазора с точностью не ниже 0,1 Å. При указанных величинах электрических полей диаметр пучка туннельных электронов, протекающих в вакууме между зазором и подложкой, составляет порядка 1,0 … 1,5 Å.



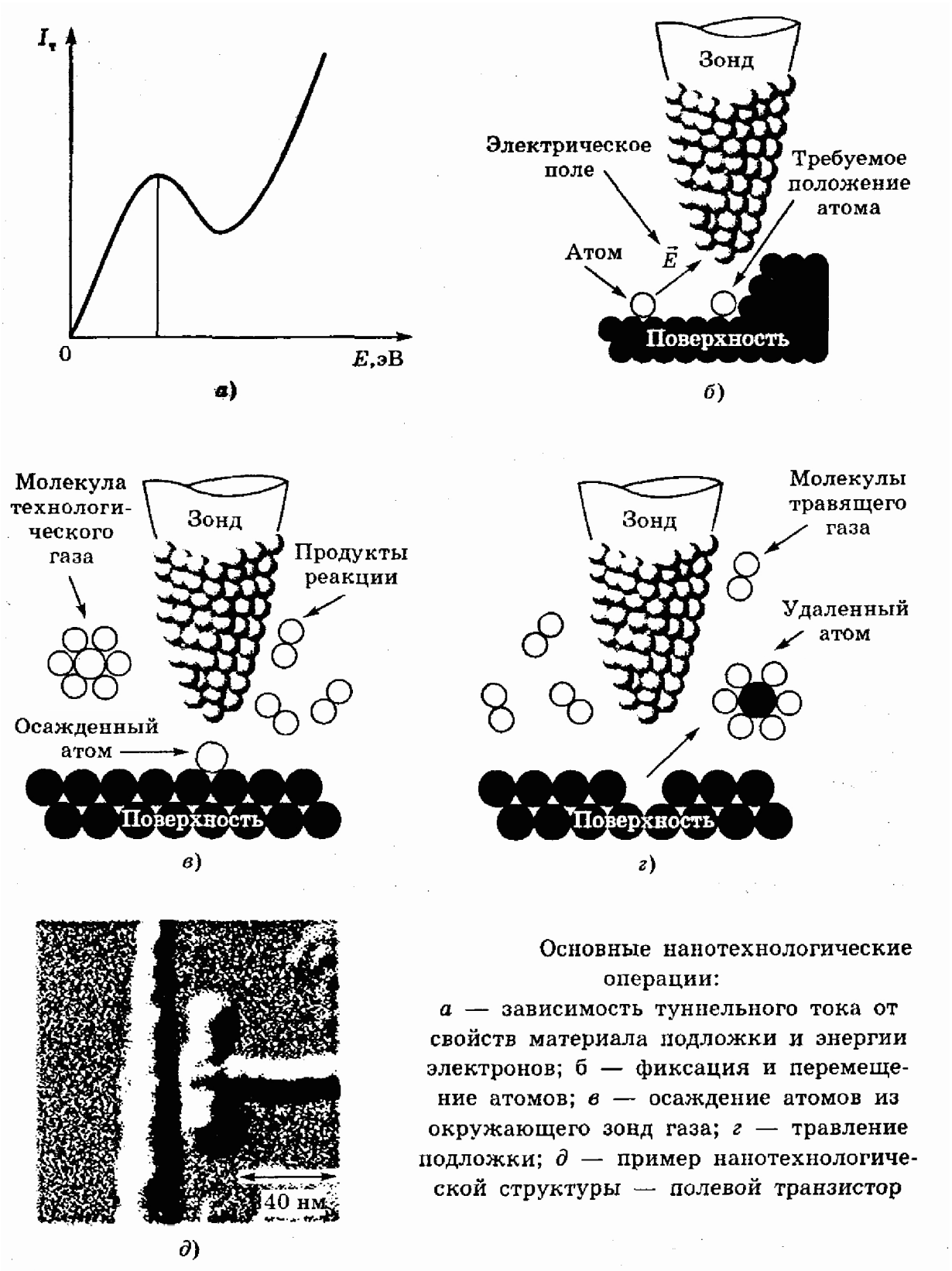

*а*) *б*)

Рис. 1. Нанотехнологическая установка: *а* — схема нанотехнологической установки на основе туннельного микроскопа; *б* — зависимость величины туннельного тока от зазора. *1* – подложка, *2* – зонд, 3 – источник питания, *4* – зазор между зондом и подложкой, 5 – усилитель туннельного тока, *6* – динамический регулятор зазора на основе пьезоманипуляторов, *7* – приспособление для напуска газообразных и жидких реактивов, *8* – система прецизионного позиционирования подложки.

В описываемой нанотехнологической установке предусмотрена возможность откачки и напуска в активный объём необходимых жидких или газообразных реактивов. Естественно, что вся конструкция технологической камеры изготовлена из коррозионно-стойких материалов. Это обстоятельство существенно отличает нанотехнологическую установку от туннельного микроскопа. Отметим также, что во избежание влияния сейсмических и акустических воздействий, вся установила снабжена системой пассивной, а в ряде случаев и активной виброзащиты.

С помощью линейных пьезоманипуляторов подложка может перемещаться относительно острия зонда в пределах 10х10 мм с точностью не менее 0,1 Å.

На рис. 2, *а* показана типичная вольтамперная характеристика, снятая для некоторого образца при постоянной величине зазора. При энергии электронов, меньшей энергии тепловых колебаний атомов материала подложки (порядка 25 мэВ), можно исследовать атомарную структуру поверхности подложки не разрушая её. При энергиях, равных или несколько больших энергии межатомных связей атомов поверхности подложки на вольтамперной характеристике появляются различные нелинейности, позволяющие снять туннельную спектрограмму подложки и определить её химический состав. При энергии пучка, равной энергии межатомных связей, можно «возбудить» отдельный атом, находящийся на поверхности, «оторвать» его от неё и «перенести», перемещая подложку, в некоторое новое положение. Снижая энергию возбуждения, можно «пришить» этот перемещённый атом к поверхности в новом положении (рис. 2, *б*).




Основные нанотехнологические операции:
*а* — зависимость туннельного тока от свойств материала подложки и энергии электронов; б — фиксация и перемещение атомов; *в* — осаждение атомов из окружающего зонд газа; *г* — травление подложки; *д* — пример нанотехнологической структуры — полевой транзистор

Рисунок 2. Основные нанотехнологические операции:
*а* – зависимость туннельного тока от свойств материала подложки и энергии электронов; б – фиксация и перемещение атомов; *в* – осаждение атомов из окружающего зонд газа; *г* – травление подложки; *д* – пример нанотехнологической структуры – полевой транзистор.

Если в активную область установки ввести молекулы технологического газа (рис. 2, *в*), то под действием сильного электрического поля эти молекулы прежде всего ионизируются и далее на поверхность подложки можно осадить необходимый атом, выбранный таким образом, чтобы он образовал с атомами подложки прочно соединённый радикал. Наращивая осаждённые атомы и перемещая подложку, можно вырастить на ней прочно закреплённые дорожки проводников или отдельные группы атомов с поперечными размерами атомарной величины (порядка 20 Å). Такие проводники и группы атомов можно назвать квантовыми проводниками и квантовыми точками.

Напуская в технологический объем газы-травители (рис. 2, *г*), можно обеспечить активацию химических реакций «захвата» и удаления с поверхности некоторых атомов, создавая «канавки» нанометровых размеров.

На рис. 2, *д* в качестве примера реализации некоторых нанотехнологических операций приведена туннельно-микроскопическая фотография полевого транзистора. Если на управляющем электроде (затворе), расположенном на фотографии справа, отсутствует заряд, по левому проводнику ток может проходить беспрепятственно – транзистор открыт. Если на затвор подать запирающее напряжение, то поле перекрывает канал и транзистор оказывается закрытым.

Чрезвычайно важно отметить, что при поперечных размерах квантовых проводников порядка 20 Å в них за счёт поперечного квантования электронов значительно уменьшается рассеяние энергии и, следовательно, резко повышается быстродействие. При размерах полевого транзистора, показанного на рис. 2, *д*, его быстродействие лежит в терагерцовом диапазоне.

Отметим еще одну принципиальную особенность отечественной нанотехнологической установки. С её помощью можно наращивать на подложке не только продольные квантовые проводники, но и последовательно формировать трёхмерные элементы. Это открывает практически неограниченные возможности разрешения проблемы «тирании» проводников. На основе трёхмерных связей могут быть реализованы не только апробированные в микроэлектронике элементы, но и весьма экзотические нейристорные структуры.

Магистральным путём решения проблемы повышения производительности однозондовых нанотехнологических установок является создание многозондовых машин. Уже в настоящее время разработаны установки, обеспечивающие сборку атомов со скоростью один кубический дециметр вещества в час при стоимости не выше одного доллара.

Формирование электрических сигналов с временем фронта $10^{-14}$ с и распространение их по двухпроводным нанопроводникам, являющимся, по существу, металло-оптическими волноводами, обеспечивает реальную интеграцию в единой среде всей гаммы электронных и оптоэлектронных схем.

Высокая степень интеграции наноэлектронных структур, быстродействие, трёхмерная сборка элементов и уменьшенное энергорассеяние закладывают фундамент для приоритетного развития на их основе быстродействующих устройств обработки информации. В частности, уже в ближайшие годы могут быть промышленно реализованы элементы памяти со сверхвысокой плотностью

($10^{12}$ бит/см$^2$) записи информации, что в тысячи раз превосходит плотность записи на традиционных лазерных дисках.

Учитывая резкий рост публикаций по нанотехнологиям, структурам и приборам и широчайший характер практических направлений исследований, можно с уверенностью сказать, что одним из ближайших продолжений развития микроэлектроники является *наноэлектроника.*

Нанотехнологии обеспечивают не только успехи в развитии элементной базы информационного приборостроения. Уже в настоящее время нанотехнологические разработки используются в медицине, робототехнике, машиностроении, атомной энергетике, оборонных системах и многих других областях. Не случайно в подавляющем большинстве развитых стран огромное внимание уделяется поддержке национальных программ по нанотехнологиям. Начало XXI века характеризуется бурным развитием нанотехнологий вообще и *наноэлектроники* в частности [1].

## Заключение

В настоящее время можно сформулировать следующие устойчивые тенденции в проектировании и производстве изделий микроэлектроники.

Непрерывно растет функциональная сложность интегральных микросхем. Многие радиоэлектронные устройства, изготавливаемые ранее из обычных радиодеталей, выполняются в виде полупроводниковых и гибридных микросхем и микросборок.

Прогресс в технологии полупроводниковых микросхем, переход к микронным и субмикронным технологиям позволяет без особых затрат на разработку создавать блоки и даже системы РЭС на основе уже имеющихся БИС и СБИС путем формирования их структур в одном полупроводниковом кристалле и создания многоуровневой разводки. Многообещающими в плане повышения степени интеграции являются трёхмерные структуры полупроводниковых микросхем, которые могут создаваться путём формирования контактных площадок как на рабочей, так и нерабочей стороне кристаллов, с последующей сборкой кристаллов в многоэтажный модуль.

Увеличение функциональной и конструктивной сложности РЭС идёт не только за счёт интеграции устройств в одном кристалле, но и за счёт более плотного размещения кристаллов в составе гибридных микросхем и микросборок. Тенденции в этом направлении таковы: новые технологические возможности в производстве полупроводниковых микросхем, создание новых принципов формирования плёночных структур и нового технологического оборудования положительно сказываются на достижениях технологии гибридных микросхем. Примером тому могут служить достижения электронной, ионной и плазменной обработки, широко внедрившиеся сначала в технологию полупроводниковых, а затем и гибридных микросхем. Заметно сближение двух технологий: плёночные структуры являются неотъемлемой частью полупроводниковых микросхем, в структуре тонкоплёночных гибридных микросхем намечается появление плёнок поликристаллического кремния со сформированными на их основе пассивными и, вполне возможно, активными элементами.

Конструирование интегральных микросхем – сложный, многогранный процесс. Специалист по проектированию ИМС должен в определенной мере владеть общей и специальной схемотехникой, для того чтобы правильно оценивать возможное влияние конструктивных и технологических факторов на будущие электрические характеристики ИМС и учитывать их при проектировании. Он должен хорошо знать современные материалы и грамотно применять их при проектировании ИМС; знать методы проектирования элементов и конструкций ИМС, в том числе вероятностные методы, позволяющие значительно улучшать массогабаритные характеристики ИМС; знать и применять методы и приёмы повышения надёжности микросхем.

Цель настоящего пособия – сформировать у будущих конструкторов РЭС профессиональные компетенции, необходимые для грамотного проектирования микроэлектронной аппаратуры.

## Список рекомендуемой литературы


1. Степаненко, И.П. Основы микроэлектроники: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, М. – СПб.: 2003. – 488 с.: ил.
2. Ермолаев, Ю.П., Конструкции и технология микросхем: Учебник [Текст] / М.Ф. Пономарев, Ю.Г. Крюков. – М.: Сов. радио, 1980. – 256 с.: ил.
3. Коледов, Л.А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок: Уч. для вузов [Текст] / Л.А. Коледов. – М.: Радио и связь, 1989. – 400 с.: ил.
4. Мироненко, И.Г. Проблемы микроэлектроники и применение ЭВМ при разработке современных радиоэлектронных средств [Текст] / И.Г. Мироненко. – Л.: ЛЭТИ, 1989. – 208 с.
5. Пикуль, М.И. Конструирование и технология производства ЭВМ. Учебник [Текст] / М.И. Пикуль, И.М. Русак, Н.А. Цырельчук. - Мн.: Выш. шк., 1996. – 263 с.: ил.
6. Разработка и оформление конструкторской документации радиоэлектронной аппаратуры: Справочник [Текст] / Под ред. Э.Т. Романычевой — М.: Радио и связь, 1989. – 448 с.: ил.
7. Расчёт и проектирование элементов гибридных интегральных микросхем: Метод. указ. к курс. и дипл. проектир. СГАУ [Текст] / Сост. А.И. Меркулов, В.Д. Дмитриев. Самара 2002. – 44 с.
8. Компоненты и корпуса интегральных микросхем и микропроцессоров: Метод. указ. к курс. и дипл. проектир. [Текст] / Сост. А.И. Меркулов, В.Д. Дмитриев. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 64 с.
9. Разработка и оформление конструкторской и технологической документации на тонкопленочные гибридные микросхемы: Метод. указания к курсовому и дипломному проектированию [Текст] / Самар. гос. аэрокосм. ун-т; Сост. М. Н. Пиганов, А.И. Меркулов. Самара, 2003. – 52 с.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

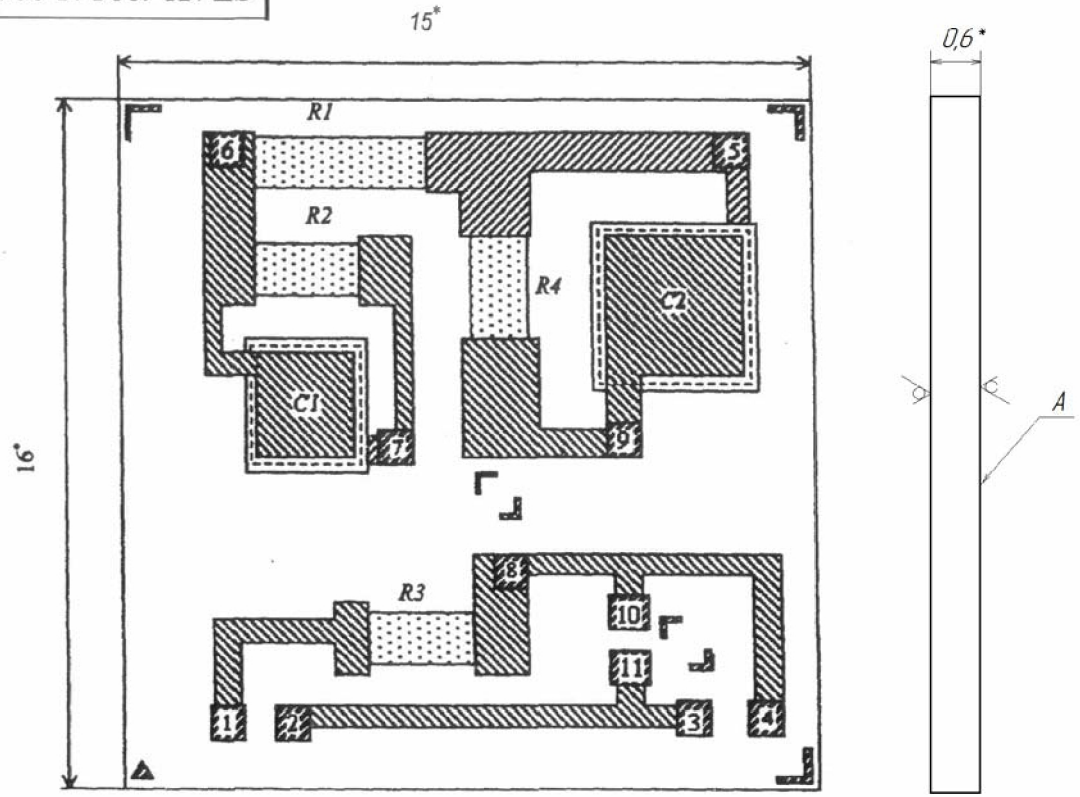



**Таблица 2**

| № измерения | Поз. обозначения | Точки измерения | Проверяемый номинал и допуск |
|---|---|---|---|
| 1 | R1 | 5-6 | 1,2 кОм±15% |
| 2 | R2 | 6-7 | 560 Ом±15% |
| 3 | R3 | 1-8 | 560 Ом±15% |
| 4 | R4 | 5-9 | 560 Ом±15% |
| 5 | C1 | 6-7 | 200 пФ±20% |
| 6 | C2 | 5-9 | 380 пФ±20% |

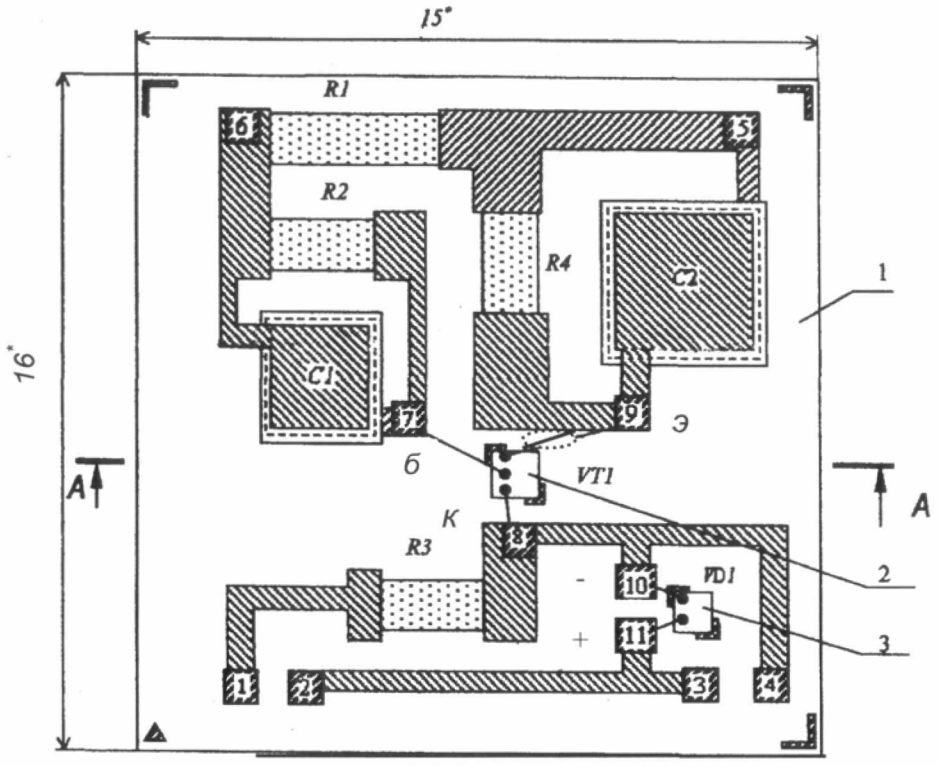
1. Размеры для справок.
2. Поверхность «А» полированная.
3. Конфигурацию плёночных элементов выполнять по координатам, приведённым в таблицах 3-7
4. Элементы слоев выполняются через маски по ОСТ4ГО.054.238.
5. Изготовление слоёв платы производить согласно таблице 1.
6. Сопротивления «R" и ёмкости «С" должны соответствовать значениям таблицы 2.
7. Обозначения элементов, нумерация контактных площадок показаны условно.
8. Общие требования по ОСТ.107.750 878.001-87.
9. Контроль $R_{\square}$ по прибору КС-1.
10. Контроль $C_{уд}$ по прибору КИТ-1.

**Таблица 1**

| № | Условное обозначение | Наименование слоёв | Обозначение материала | Электрические характеристики | Метод получения | № листа чертежа и табл.ицы |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | Резисторы и подслой | Нихром Х20Н80 ГОСТ12766–67 | $R_{\square}$ =300 Ом | Напыление в вакууме | 2, Табл.3 |
| 2 | | Нижние обкладки конденсаторов | Алюминий А99 ГОСТ11069–74 | $R_{\square}$ = 0,08 Ом | | 3, Табл.4 |
| 3 | | Диэлектрик | Боросиликатное Стекло ЕТО.035.015 ТУ | $C_0$ =10000 пФ/см$^2$ | | 4, Табл.5 |
| 4 | | Верхние обкладки конденсаторов | Алюминий А99 ГОСТ11069–74 | $R_{\square}$ =0,08 Ом | | 5, Табл.6 |
| 5 | | Контактные площадки | Медь вакуумная МВ ТУ 11Яе0.021.040–72 | $R_{\square}$ =0,06 Ом | | 6, Табл.7 |

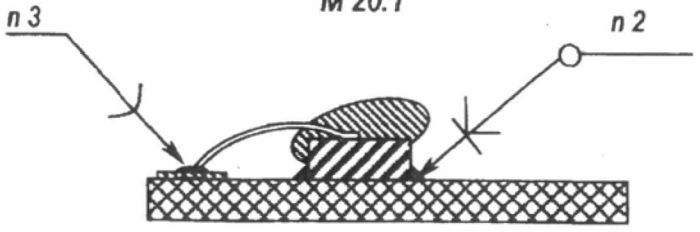
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата | СГАУ.754710.001 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Разработал | | | | | Плата Топологический чертёж ИМС 401 ПУ1 | Литер. | Масса | Масшт. 10:1 |
| Проверил | | | | | | Лист.1 | Листов1 | |
| Т.контр. | | | | | | | | |
| Н. Контр. | | | | | Ситалл СТ 50-1 ТХО.735.062.ТУ | | | |
| Утв. | | | | | | | | |

СГАУ.436545.001 СБ




A-A

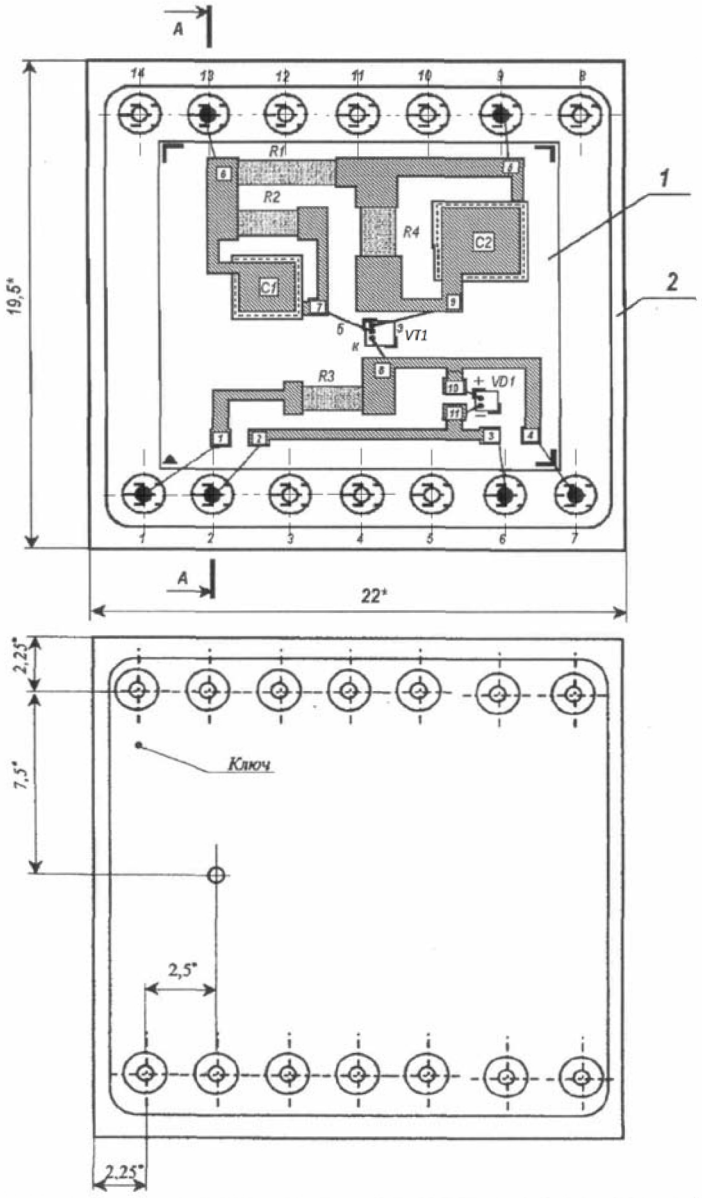
M 20:1

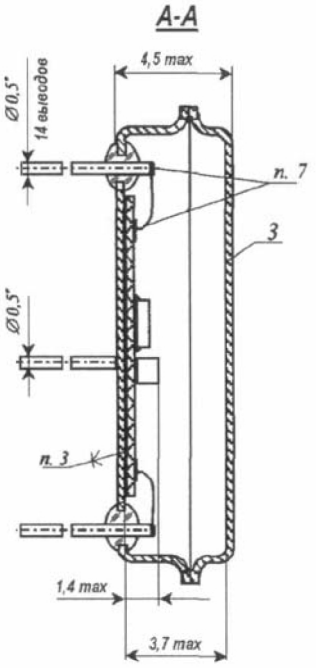



1. Размеры для справок.
2. Установку бескорпусных компонентов производить по ОСТ 107.460.084.200–88. Компоненты поз. 2,3 установить по варианту 2.
3. Компоненты поз. 2,3 клеить к плате поз 1.клеем ОСТ4 ГО.029.204 по ОСТ4 ГО.054.210. Ориентировку производить по плёночным элементам.
4. Выводы компонентов поз. 2,3 варить на установке "Контакт–3А" по ОСТ 107.460.091.004–88.
5. Длина свободных концов проволочных выводов компонентов в местах присоединения к контактным площадкам 0,5 мм max в пределах контактной площадки.
6. Фиксацию монтажа к плате в местах, обозначенных ⬭, производить клеем ВК-9 ОСТ4 ГО.029.204.
7. Элементы по электрическим параметрам должны соответствовать схеме электрической принципиальной АИ2.248.001 Э.
8. Маркировка бескорпусных компонентов, элементов и контактных площадок показано условно.

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | СГАУ.469133.001 СБ | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата | Плата Сборочный чертёж ИМС 401 ПУ1 | Литер. | Масса / Масшт. |
| Разработал | | | | | | | 10:1 |
| Проверил | | | | | | Лист.1 | Листов1 |
| Т.контр. | | | | | | | |
| Н. Контр. | | | | | | | |
| Утв. | | | | | | | |

СГАУ.431134.001.СБ

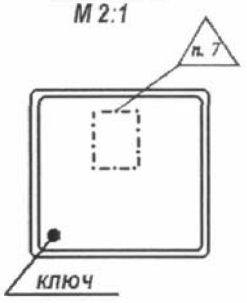



1. Размеры для справок.
2. Обозначение контактных площадок, элементов, компонентов и выводов микросхемы показано условно.
3. Плату поз. 1 клеить к детали поз. 2 клеем ВК-9 по ОСТ 107.460.091.004-88. Ориентировку проводить по пленочным элементам.
4. Герметизацию схем проводить методом лазерной сварки по ОСТ 107.460.091.004-88.
5. Контроль герметичности схем производить вакуумно-жидкостным методам по ОСТ 107.460.091.004-88.
6. Периферийные выводы платы соединить с вводами корпуса термокомпрессионной сваркой, используя проволоку Зл.999,9 ∅ 0,04мм ГОСТ6835-72, на установке "Контакт-3А".
7. Маркировку производить краской ЧМ чёрного цвета ТУ29-02-859 шрифтом 1 НО.010.007.
8. Общие требования по ОСТ 107.750878.001–67.
9. Перед установкой крышки поз.3 плату поз.1 покрыть лаком УР-231 ВТУ ГИПИ-4 №366-62.

**Пример маркировки**

**Вид сверху**
**М 2:1**




| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | СГАУ.431241.001 СБ | | | |
| | | | | | Микросхема гибридная. Сборочный чертёж ИМС 401 ПУ1 | Литер. | Масса | Масшт. |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата | | | | 10:1 |
| Разработал | | | | | | Лист.1 | Листов1 | |
| Проверил | | | | | | | | |
| Т.контр. | | | | | | | | |
| Н. Контр. | | | | | | | | |
| Утв. | | | | | | | | |

Учебное пособие

Меркулов Анатолий Игнатьевич
Меркулов Владимир Анатольевич

**Конструирование интегральных микросхем**

Редактор

Компьютерная верстка

Подписано в печать Формат 60х84 1/16

Бумага офсетная Печать офсетная

Усл печ. л. ; усл. кр.– отт. ; уч. – изд. л.

Тираж экз. Заказ №

Самарский государственный аэрокосмический университет им. Академика С.П. Королёва

443086 Самара, Московское шоссе, 34

---

РИО Самарского государственного аэрокосмического университета