

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Т.И. Данилина, Ю.В. Сахаров

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ**

Учебно-методическое пособие
по
выполнению лабораторных работ

**Томск
2025**

УДК 621.382.049.77.002(075.8)

ББК 32.844я73

Г203

Рецензент:

Троян Павел Ефимович,

доктор технических наук, профессор кафедры физической электроники ФГАОУ ВО
«Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Данилина, Тамара Ивановна

Г203 Проектирование электронной компонентной базы микроэлектроники и
микросистемной техники: Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ
/ Т.И. Данилина, Ю.В. Сахаров. - Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники,
2025. – 36 с.

Кратко освещены теоретические вопросы об элементах электронной компонентной базы микроэлектроники и микросистемной техники, исследуемых при выполнении лабораторных работ, указан порядок выполнения лабораторных работ, приведены требования к содержанию отчета. Пособие является руководством для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Проектирование электронной компонентной базы микроэлектроники и микросистемной техники» и предназначено для студентов, обучающихся по образовательным программам подготовки бакалавров, магистров и дипломированных специалистов всех форм обучения.

Предназначено для студентов высших учебных заведений технических специальностей.

УДК 621.382.049.77.002(075.8)

ББК 32.844я73

**Данилина Тамара Ивановна
Сахаров Юрий Владимирович**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ**
Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ

Одобрено на заседании кафедры физической электроники протокол №162 от 07.11.2024 года

© Данилина Т.И., Сахаров Ю.В., 2025

© Томск. гос. ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1

Исследование конструкции тонкопленочных конденсаторов.....4

Лабораторная работа №2

Исследование конструкции тонкопленочных резисторов..... 11

Лабораторная работа №3

Исследование топологии гибридных интегральных схем..... 16

Лабораторная работа №4

Определение параметров тонких пленок..... 28

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Исследование конструкции тонкопленочных конденсаторов

1 Цель работы

Приобретение практических навыков по определению электрических характеристик тонкопленочных конденсаторов.

2 Краткие теоретические сведения.

2.1 Параметры тонкопленочных конденсаторов

По конструкции пленочные конденсаторы чаще всего представляют собой трехслойную структуру металл – диэлектрик – металл и состоят из нижней и верхней обкладок, разделенных слоем диэлектрического материала.

К конструкции конденсаторов предъявляется ряд конструктивно-технологических требований: минимальные габаритные размеры; воспроизводимость характеристик в процессе производства; совместимость технологии их изготовления с процессами производства других элементов гибридной интегральной схемы.

Конструкция, изображенная на рисунке 1, а характерна для конденсаторов с повышенной емкостью (сотни – тысячи пикофард). Ее особенностью является то, что контур верхней обкладки полностью вписывается в контур нижней обкладки. Эта конструкция имеет следующие положительные качества: неточность совмещения контуров обкладок не сказывается на величине емкости; контур диэлектрика заходит за пределы обеих обкладок. В этом случае гарантируется надежная изоляция обкладок по периферии конденсатора при предельном их несовмещении. Пленочный конденсатор с большой емкостью может иметь сложную конфигурацию, отличную от прямоугольной, причем линии периметра обкладок обязательно пересекаются под прямым углом. При разработке топологии микросхемы конструктор может полностью использовать свободные участки площади подложки.

Конструкция пленочного конденсатора, изображенная на рисунке 1, б, характерна для конденсаторов с небольшой емкостью (десятки пикофард), когда для получения необходимой емкости достаточна площадь взаимного перекрытия двух коммутационных проводников, разделенных пленкой диэлектрика. Емкость

рассматриваемого конденсатора нечувствительна к смещению обкладок из-за неточности совмещения.

При активной площади пленочного конденсатора менее 5 мм^2 начинает сказываться краевой эффект, причем тем сильнее, чем меньше площадь. Если

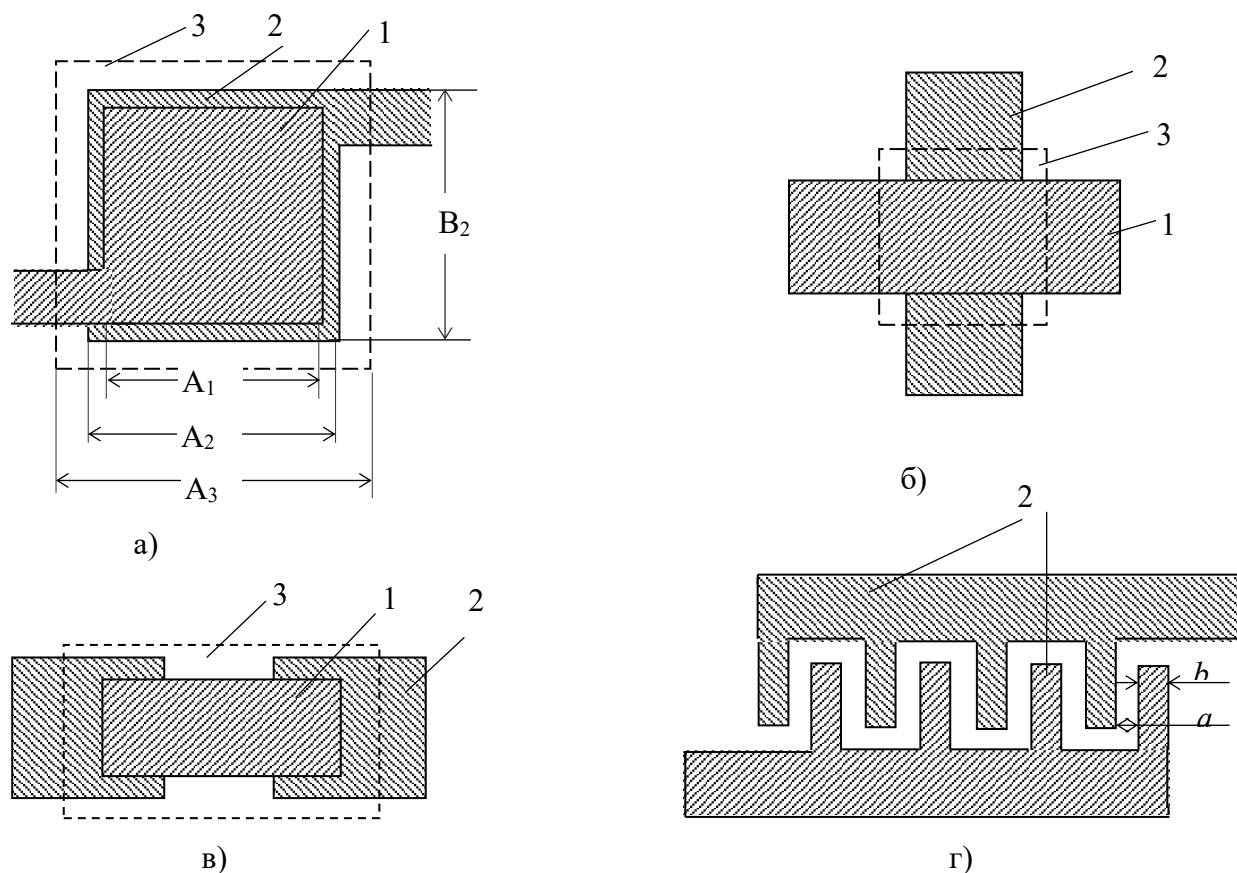


Рисунок 1 – Конструкции пленочных конденсаторов:
1 – верхняя обкладка; 2 – нижняя обкладка; 3 – диэлектрик

расчетная площадь конденсатора менее 1 мм^2 , его можно выполнять в виде двух последовательно соединенных конденсаторов (рисунок 1, в).

В высокочастотных конструкциях применяют гребенчатые конденсаторы (рисунок 1, г). Роль обкладок выполняют пленочные проводники в форме гребенки. Здесь используется составной диэлектрик: подложка – воздух или подложка – диэлектрическое покрытие. Гребенчатые конденсаторы и конденсаторы в виде двух параллельно расположенных полос используются тогда, когда необходимо получить емкость единицы и доли пикофард.

При малых емкостях (единицы или доли пикофард), когда расчетная площадь пленочного МДМ-конденсатора слишком мала и технология не позволяет его выпол-

нить в виде трехслойной пленочной структуры, можно формировать конденсатор в виде двух параллельных проводящих полосок.

Основные электрические параметры ТПК: емкость C , рабочее напряжение $U_{раб}$, тангенс угла диэлектрических потерь ($tg\delta$) и эксплуатационные параметры определяются многочисленными факторами, в том числе материалами, способами напыления, толщиной пленок и др. Конструкция и технология изготовления конденсаторов имеют ряд особенностей. Емкость конденсатора определяется как

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot s}{d} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot l \cdot b}{d}, \quad (1.1)$$

где ε_0 – электрическая постоянная;

ε – диэлектрическая постоянная материала;

s – поперечное сечение обкладок конденсатора (активная площадь);

l, b – длина и ширина обкладок;

d – толщина диэлектрической пленки.

Поскольку свойства материалов, полученных в виде тонких пленок, могут значительно отличаться от свойств массивных образцов, при проектировании конденсаторов и разработке технологии их изготовления используют понятие об удельной емкости C_0 , как одной из характеристик диэлектрического слоя

$$C_0 = \frac{C}{s} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{d}.$$

Чем больше C_0 , тем меньшую площадь занимает конденсатор на подложке. Надо выбирать материалы с большим ε или делать слишком тонкой диэлектрическую пленку. Однако применение слишком тонких пленок исключается, так как пленки менее 100-200 нм содержат большое количество дефектов.

Второй параметр, характеризующий свойства ТПК, – электрическая прочность E_{np} , т.е. напряженность электрического поля, при которой происходит пробой конденсатора. Электрическая прочность определяется экспериментально по пробивному напряжению U_{np} как $E_{np} = U_{np} / d$. Электрическая прочность для

средних толщин для одного и того же материала, полученного известным способом, является величиной постоянной. Очевидно, что рабочее напряжение конденсатора должно быть меньше напряжения пробоя, т.е.

$$U_{раб} = \frac{U_{np}}{K_3} = \frac{E_{np} \cdot d}{K_3},$$

где K_3 – коэффициент запаса ($K_3 = 2 - 4$).

Из последнего соотношения можно сформулировать условие выбора минимальной толщины диэлектрика

$$d \geq \frac{U_{раб} \cdot K_3}{E_{np}}.$$

Если из этого условия толщина диэлектрической пленки получается менее 0,1 мкм, то надо выбирать толщину, исходя из технологических соображений, в диапазоне 0,1 – 1 мкм. При толщине диэлектрика менее 0,1 мкм увеличивается вероятность короткого замыкания обкладок. При толщине диэлектрика более 1 мкм возможен разрыв верхней обкладки в месте вывода из-за большой ступеньки по толщине пленки. Оптимальная толщина диэлектрика 0,3...0,5 мкм.

Кроме диэлектрических потерь, в конденсаторе имеется еще один источник потерь, связанный с сопротивлением обоих электродов

$$tg\delta = tg\delta' + \frac{2 \cdot \omega \cdot C \cdot \rho_v \cdot l}{3 \cdot b \cdot d_1},$$

где $tg\delta$ – измеряемый тангенс угла диэлектрических потерь;

$tg\delta'$ – частотно-независимый вклад диэлектрика;

C – емкость конденсатора;

ω – угловая частота;

ρ_v – удельное объемное сопротивление материала электродов

d_1 – толщина электрода;

l, b – длина и ширина площади перекрытия верхнего и нижнего электродов.

Из этого уравнения видно, что ρ_v, d_1 и их соотношение сильно влияют на работу ТПК при высоких частотах. Ограничения по частоте для высокочастотных конденсаторов могут быть уменьшены увеличением толщины и проводимости металлических электродов.

Температурный коэффициент емкости характеризует изменение емкости в интервале температур от минус 65 до плюс 125 °С и стабильную работу ТПК.

2.2 Диэлектрические материалы

Рассмотренные параметры, а также эксплуатационные характеристики ТПК, такие как надежность, временная стабильность, частотные свойства определяются выбором материалов и способом их получения.

Рассмотрим свойства некоторых наиболее часто используемых диэлектрических материалов.

Моноокись кремния (SiO), обычно получаемая термическим испарением, имеет диэлектрическую постоянную от 3,5 до 6, что соответствует изменению состава от двуоксида кремния SiO₂ до чистой SiO, образует малодефектную и гладкую пленку. При температурах испарения более 1250 °С SiO диссоциирует в испарителе с выделением свободного кремния, который может увеличивать ϵ пленок до 10. При этом свойства пленок ухудшаются.

Пленки окиси тантала (Ta₂O₅) получают ионно-плазменным распылением (реактивное, высокочастотное) или анодным окислением. Эти пленки характеризуются диэлектрической проницаемостью, изменяющейся в диапазоне $\epsilon=16-25$, и малой дефектностью для анодноокисляемых пленок. Электрическая прочность конденсаторов с использованием диэлектрика Ta₂O₅ сильно зависит от материалов электродов и способов их получения. Также необходимо отметить, что конденсаторы с пленками на основе Ta₂O₅ могут применяться только в низкочастотных схемах с частотами до 100 кГц.

Пленки окиси алюминия (Al₂O₃) с $\epsilon=8-10$ получают ионно-плазменным распылением, электронной бомбардировкой, анодным окислением. При испарении исходного вещества Al₂O₃ с помощью электронного луча пленки на подложке

получаются нестехиометрического состава с дефицитом кислорода, что приводит к ухудшению свойств пленок.

При испарении окислов титана (TiO_2) и циркония (ZrO_2) получают соответственно пленки с $\varepsilon = 30 - 40$ и $\varepsilon = 20 - 22$. Электрическая прочность и другие параметры ТПК зависят от способов получения диэлектрических пленок и материала обкладок. Для плотных пленок TiO_2 и ZrO_2 с электродами из алюминия электрическая прочность составляет $E_{np} = 1 \cdot 10^6 \text{ В/см}$. Для изготовления конденсаторов малой емкости могут использоваться пленки на основе боросиликатного стекла (80 % SiO_2 и 20 % B_2O_3), имеющие $\varepsilon = 4$ и $E_{np} = 5 \cdot 10^6 \text{ В/см}$. Получаются такие пленки методом взрывного испарения.

2.3 Выбор материала обкладок

К материалам обкладок предъявляются следующие требования: низкое сопротивление 0,05-0,2 Ом/□, ровная и гладкая поверхность и малый коэффициент диффузии. Отказ ТПК чаще всего происходит из-за закорачивания, которое зависит как от качества диэлектрической пленки, так и от качества обкладок.

Очень зернистые пленки таких материалов, как **свинец** и **олово**, неприемлемы, т.к. их поверхность весьма шероховата. Мало пригодны также металлы с высокой температурой испарения (**хром**, **никель**, **железо**). Такие металлы приводят к большому количеству коротких замыканий, очевидно, вследствие проникновения атомов металла с большой кинетической энергией в диэлектрик при конденсации.

Золото и **серебро**, хотя имеют сравнительно низкую температуру испарения, также могут вызывать замыкание обкладок. Оно происходит из-за интенсивной диффузии атомов этих металлов из обкладок после осаждения (вдоль границ зерен).

Наилучший выход получается при использовании **алюминия**, который имеет низкую температуру испарения и малую подвижность атомов на поверхности, благодаря окислительным процессам. Надо обязательно исключить разбрызгивание, т.е. попадание крупных капель и прожигание диэлектрика при нанесении верхней обкладки.

Электрическая прочность ТПК на основе диэлектрической пленки SiO_2 с различными материалами обкладок составляет:

Al-SiO-Al - $2 \cdot 10^6$ В/см;

Cu-SiO-Cu - $0,8 \cdot 10^6$ В/см;

Ag-SiO-Ag - $0,18 \cdot 10^6$ В/см.

Если применять свинец, олово, то E_{np} снижается в 10-20 раз, а количество коротких замыканий увеличивается в 10 раз. Для плотных диэлектрических пленок окиси тантала, получаемых ионно-плазменным распылением или анодным окислением, можно в качестве материала обкладок выбирать такие металлы, как тантал, золото. Например, танталовый конденсатор делается следующим образом: сначала напыляется пленка тантала, затем она окисляется, а затем напыляется верхний электрод. Таким образом структура Ta-Ta₂O₅-Au, изготавливается за меньшее число технологических циклов.

2.4. Задание на работу

1. Измерить емкость и тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$ всех годных конденсаторов.
2. Определить толщину диэлектрика, геометрические размеры конденсатора и конструкцию конденсатора.
3. Рассчитать диэлектрическую проницаемость диэлектрика, исходя из определенной толщины диэлектрика и геометрических размеров.
4. Измерить зависимость емкости и тангенса угла потерь от частоты. Построить графики зависимости.
5. Исследовать зависимость емкости и тангенса угла потерь от температуры в диапазоне 20-100 °С. Построить графики зависимостей. Определить температурный коэффициент емкости ТКЕ.
6. Измерить напряжение пробоя полученных конденсаторов. Определить электрическую прочность материала диэлектрика.
7. Определить материал диэлектрика.
8. Сделать вывод по проделанной работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Исследование конструкции тонкопленочных резисторов

1. Цель работы

Исследовать конструкции пленочных резисторов.

2 Краткие теоретические сведения.

2.1. Конструкции резисторов

Конфигурации тонкопленочных резисторов. Типовые конфигурации тонкопленочных резисторов приведены на рисунке 1, а-г. Наиболее распространенной является прямоугольная форма как самая простая по технологическому исполнению. Резистор в виде полосок занимает большую площадь, чем резисторы типа «меандр» или «змейка».

Меандр уступает в отношении стабильности и надежности конструкции типа

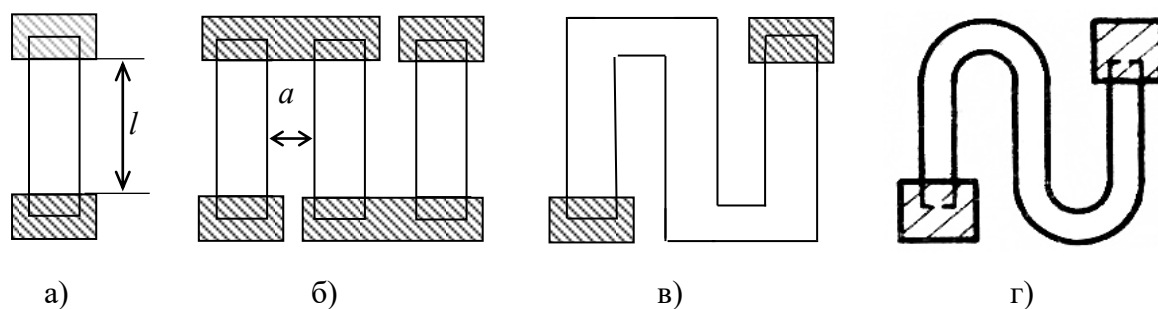


Рисунок 1 – Конфигурация тонкопленочных резисторов:
а – полоска; б – составной из полосок; в – меандр; г – змейка.

«змейка» из-за перегрева в уголках, но он предпочтительнее с точки зрения изготовления фотошаблонов и поэтому более распространен.

Контактные площадки следует располагать с противоположных сторон резистора для устранения погрешности совмещения проводящего и резистивного слоев. По этой причине придавать резисторам форму, изображенную на рисунке 2, не рекомендуется, так как сопротивление таких резисторов зависит от точности совмещения масок и фотошаблонов (неточности при совмещении изменяют длину таких резисторов).

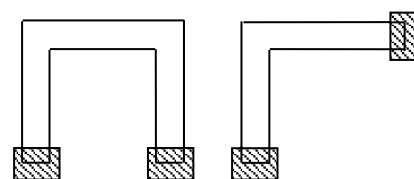


Рисунок 2 – Конфигурация резисторов, сопротивление которых зависит от погрешности совмещения слоев

В некоторых схемах требуется использовать резисторы, точность получения которых превышает точность, обеспечиваемую возможностями принятого технологического способа изготовления. В этих случаях при конструировании гибридной микросхемы применяют специальные пленочные резисторы (рисунок 3, 4), сопротивление которых перед монтажом микросхем подвергается подгонке и не выходит за пределы малых допусков.

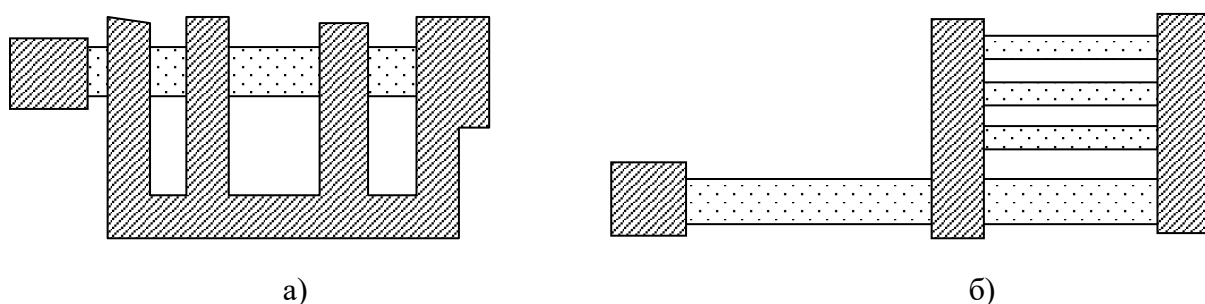


Рисунок 3 – Конструкции пленочных резисторов со ступенчатой подгонкой сопротивления: а – путем добавления секций перерезанием перемычек; б – уменьшением числа параллельно подключенных резистивных дорожек

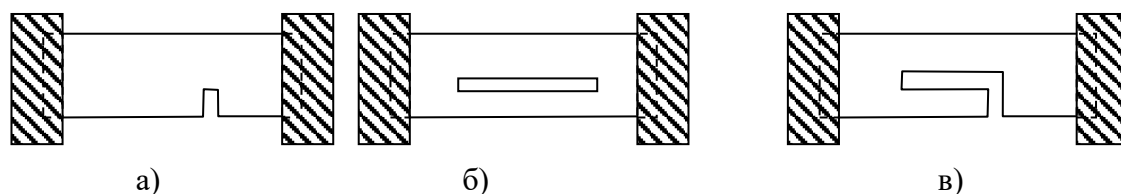


Рисунок 4 – Конструкции пленочных резисторов с плавной подгонкой сопротивления: а – грубая подгонка; б – точная подгонка; в – комбинированная подгонка.

Наиболее распространены способы подгонки сопротивления пленочных резисторов перерезанием пленки резцом манипулятора или испарением части материала резистора с помощью луча лазера.

Материалы тонкопленочных резисторов. К ним, в первую очередь, предъявляются определенные требования по поверхностному сопротивлению. Наибольшее распространение имеют резисторы с сопротивлениями от 10 Ом до 10 МОм. Линейные размеры резисторов приходится ограничивать: максимальную длину

из-за ограниченности размеров подложек, а минимальные длину и ширину – из соображений допустимого разброса. Если ограничить ширину и минимальную длину резистора размером 0,1 мм, а максимальную длину – размером 10 мм, то диапазон необходимых поверхностных сопротивлений слоя составит $10\text{--}10^5 \text{ Ом}/\square$. Получение пленок с поверхностными сопротивлениями слоя более $10^4 \text{ Ом}/\square$ представляет собой сложную задачу.

Помимо требований к удельному сопротивлению, предъявляются определенные требования и к его стабильности. Кроме того, резистивные пленки должны характеризоваться низким температурным коэффициентом сопротивления ТКС (менее $10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$).

Материалы, используемые для тонкопленочных резисторов, можно разделить на три группы: металлы; металлические сплавы; металлодиэлектрические смеси – керметы.

Удельное сопротивление массивных металлов не превышает $20\div 50 \text{ мкОм}\cdot\text{см}$ даже для таких материалов, как титан, молибден, хром, тантал. Однако при осаждении в виде тонких пленок удельное сопротивление металлов может значительно увеличиваться. Наиболее существенный вклад в повышение удельного сопротивления вносится дефектами структуры и примесями. Учитывая это, в процессе осаждения некоторых металлических пленок намеренно создаются условия для газопоглощения.

Наиболее широкое распространение для изготовления металлических резисторов имеют хром и тантал. Большой интерес к танталу как материалу для тонкопленочных резисторов обусловлен его способностью легко окисляться при химическом анодировании. Частично окисляя пленку тантала, можно тем самым уменьшать толщину резистивного слоя и одновременно обеспечивать защиту поверхности резистора. Кроме того, установлено, что танталовые пленки при введении в них ряда примесей приобретают высокое поверхностное сопротивление слоя при низком температурном коэффициенте. Особенно хорошие результаты в качестве примеси дает азот.

Тонкие пленки полупроводниковых материалов не используются для

изготовления резисторов в силу большого отрицательного температурного коэффициента сопротивления.

Помимо металлов, для изготовления резисторов широко используются металлические сплавы, обладающие более высоким удельным сопротивлением даже в объемных образцах. К таким сплавам, в первую очередь, относятся сплав никеля и хрома – нихром с удельным сопротивлением около 100 мкОм·см, а также нихром с добавками других материалов, например сплав никеля (74%), хрома (20%), железа (3%) и алюминия (3%) с удельным сопротивлением около 130 мкОм·см. Так же как и металлы, эти сплавы, полученные в виде тонких пленок, имеют более высокие удельные сопротивления, чем массивные образцы.

Керметы представляют собой металлодиэлектрические смеси. Созданию таких материалов и их широкому использованию для получения резисторов способствовали положительные результаты, полученные при окислении, азотировании и других методах введения примесей в металлические пленки при их отжигах. Намеренное изготовление смесей металлов и диэлектриков позволило получить наиболее высокие значения удельных сопротивлений. Удельное сопротивление пленок керметов в большой степени зависит от их состава. Поэтому точное воспроизведение состава кермета в пленке играет исключительно важную роль. Обычно для напыления применяют метод взрывного испарения.

Изучено большое число комбинаций металл – диэлектрик: Cr-SiO, Al-SiO, Pt-Ta₂O₅ и др. Наилучшие результаты получены для комбинации Cr-SiO.

Тонкопленочные проводники. Тонкопленочные проводники в микросхемах служат для соединения пассивных тонкопленочных элементов и создания контактных площадок для присоединения навесных элементов и внешних выводов. Тонкопленочные проводящие материалы должны иметь следующие свойства: высокую электропроводность; хорошую адгезию к подложке; способность к сварке или пайке; химическую инертность.

К материалам с высокой электрической проводимостью относятся золото, серебро, алюминий, медь. Однако пленки этих металлов не удовлетворяют всей перечисленной совокупности свойств. Например, благородные металлы имеют

плохую адгезию к подложке, алюминиевые пленки плохо поддаются пайке и сварке, медь легко окисляется.

Поэтому для получения тонкопленочных проводников используются многослойные композиции. Эти композиции включают подслой толщиной 0,01-0,03 мкм из материала, обеспечивающего хорошую адгезию, слой из материала с высокой электропроводностью толщиной $0,4 \div 0,8$ мкм и покрытие толщиной 0,05-0,08 мкм из химически инертного материала с хорошей способностью к сварке или пайке.

2.2 Задание на работу

1. Провести исследование зависимости относительного сопротивления тонкопленочного резистора при плавной подгонке сопротивления.
2. Провести исследование зависимости относительного сопротивления тонкопленочного резистора при грубой подгонке сопротивления.
3. Провести исследование зависимости относительного сопротивления тонкопленочного резистора при комбинированной подгонке сопротивления.
4. Построить полученные зависимости. Определить коэффициент корреляции каждой из зависимостей.
5. Сделать вывод по проделанной работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Исследование топологии гибридных интегральных схем

1. Цель работы

Приобретение практических навыков по исследованию топологии гибридных интегральных схем, определению основных элементов и определению их электрических параметров.

2. Схема экспериментальной установки:

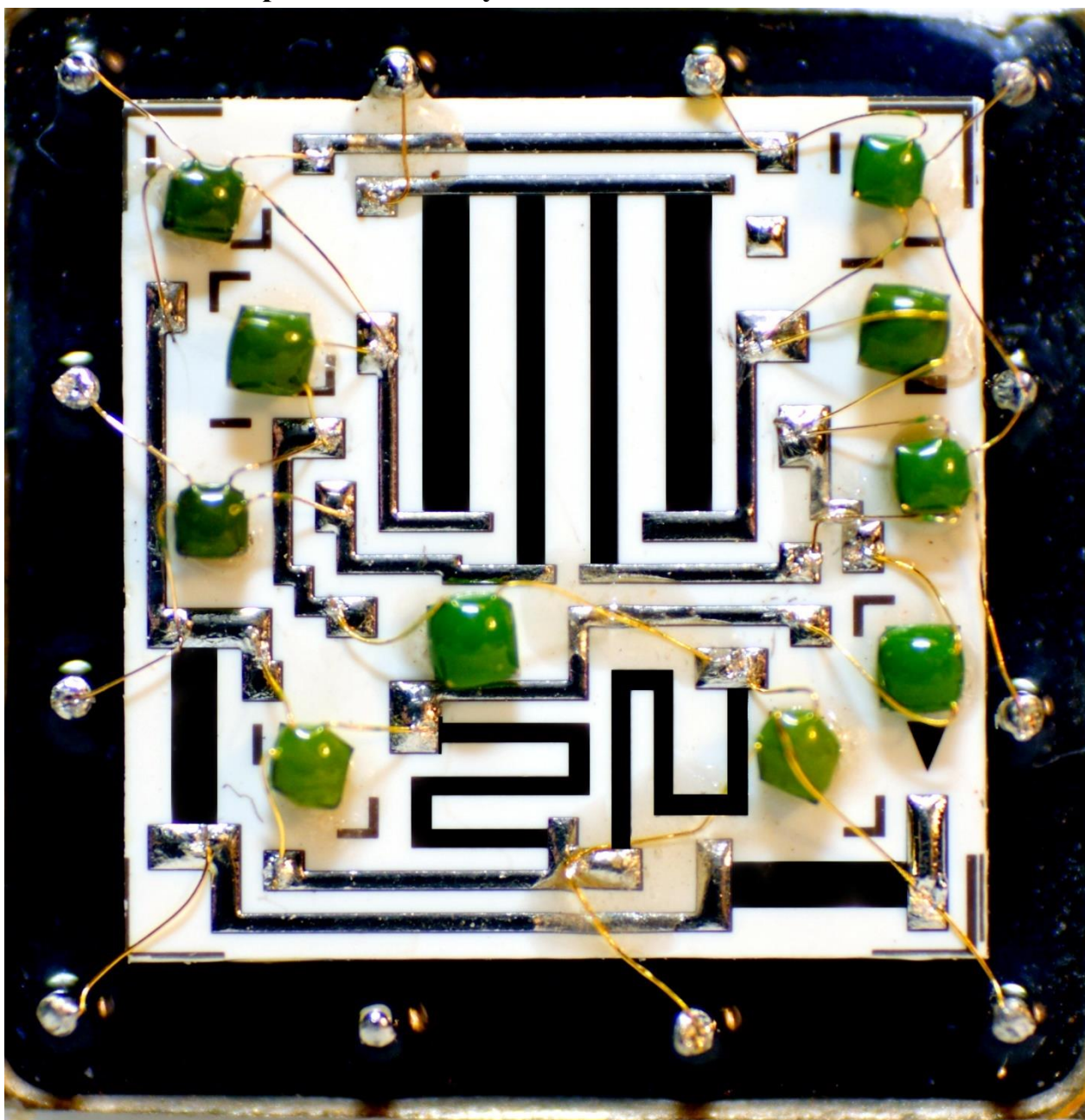


Рисунок 1 – Топология интегральной микросхемы 2TK171Б.

Размеры кристалла 8x8 мм.

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА

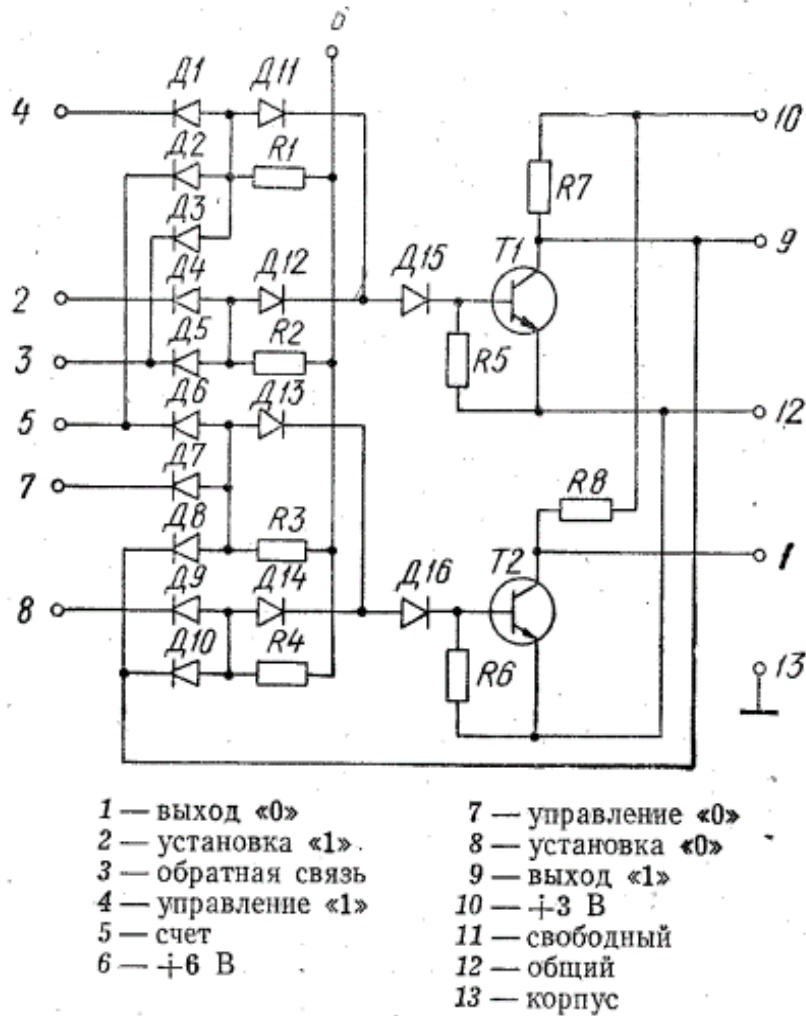


Рисунок 2 – Схема электрическая принципиальная 2ТК171Б.

3. Краткие теоретические сведения

3.1. Тонкопленочные резисторы

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

Исходные данные для расчета: номинал резистора R_i , Ом; допуск на номинал γ_R^i , %; мощность рассеяния P_i , мВт; рабочий диапазон температур $T_{\max} - T_{\min}$, °C; технологические ограничения; шаг координатной сетки, мм.

Порядок расчета:

1. Определяют оптимальное с точки зрения минимума площади под резисторами ГИС сопротивление квадрата резистивной пленки:

$$\rho_{S_{\text{опт}}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n R_i}{\sum_1^n 1/R_i}}, \quad (1.1)$$

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

2. По таблице выбирают материал резистивной пленки с удельным сопротивлением, ближайшим по значению к вычисленному $\rho_{S_{\text{опт}}}$. При этом необходимо, чтобы ТКС материала был минимальным, а удельная мощность рассеяния P_0 – максимальной.

3. Производят проверку правильности выбранного материала с точки зрения точности изготовления резисторов.

Полная относительная погрешность изготовления пленочного резистора $\gamma_R = \Delta R/R$ состоит из суммы погрешностей:

$$\gamma_R = \gamma_{K\phi} + \gamma_{\rho_s} + \gamma_t + \gamma_{R_{\text{ст}}} + \gamma_{R_K},$$

где $\gamma_{K\phi}$ – погрешность коэффициента формы; γ_{ρ_s} – погрешность воспроизведения величины ρ_s резистивной пленки; γ_t – температурная погрешность; $\gamma_{R_{\text{ст}}}$ – погрешность, обусловленная старением пленки; γ_{R_K} – погрешность переходных сопротивлений контактов.

Погрешность воспроизведения удельного поверхностного сопротивления γ_{ρ_s} зависит от условий напыления и материала резистивной пленки. В условиях серийного производства ее значение не превышает 5%.

Температурная погрешность зависит от ТКС материала пленки:

$$\gamma_t = \alpha_R(T_{\max} - 20^\circ\text{C}),$$

где α_R – температурный коэффициент сопротивления материала пленки, 1/°C.

Погрешность γ_{Rct} , обусловленная старением пленки, вызвана медленным изменением структуры пленки во времени и ее окислением. Она зависит от материала пленки и эффективности защиты, а также от условий хранения и эксплуатации. Обычно для ГИС γ_{Rct} не превышает 3%.

Погрешность переходных сопротивлений контактов γ_{Rk} зависит от технологических условий напыления пленок, удельного сопротивления резистивной пленки и геометрических размеров контактного перехода: длины перекрытия контактирующих пленок, ширины резистора. Обычно $\gamma_{Rk} = 1 \div 2\%$. Если материал контактных площадок выбран в соответствии с таблицей, то этой погрешностью можно пренебречь.

Допустимая погрешность коэффициента формы

$$\gamma_{K\Phi} = \gamma_R - \gamma_{\rho_s} - \gamma_t - \gamma_{Rct} - \gamma_{Rk}.$$

Если значение $\gamma_{K\Phi}$ отрицательно, то это означает, что изготовление резистора заданной точности из выбранного материала невозможно. В этом случае необходимо выбрать другой материал с меньшим ТКС либо использовать подгонку резисторов, если позволяет технологическое оборудование.

4. Определяют конструкцию резисторов по значению коэффициента формы K_{Φ} :

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

При $1 \leq K_{\Phi i} \leq 10$ рекомендуется конструировать резистор прямоугольной формы, при $K_{\Phi i} > 10$ – резистор сложной формы (составной, меандр или типа «змейка»), при $0,1 \leq K_{\Phi i} \leq 1$ – резистор прямоугольной формы, у которого длина меньше ширины. Конструировать резистор с $K_{\Phi i} < 0,1$ не рекомендуется, так как он будет иметь большие контактные площадки и занимать значительную площадь на подложке.

Если в одной схеме содержатся низкоомные и высокоомные резисторы, можно использовать два резистивных материала, для выбора которых определяют ρ_s сначала для всех резисторов по формуле (1.1), после чего разбивают резисторы на две группы так, чтобы $R_{i \max}$ первой группы было меньше, а $R_{i \min}$ второй группы – больше значения $\rho_{\text{сорт}}$, вычисленного для всех резисторов. Затем по этой же формуле

рассчитывают $\rho_{\text{Сопп1}}$ и $\rho_{\text{Сопп2}}$ и выбирают материалы для каждой группы резисторов в отдельности.

5. Дальнейший расчет проводят в зависимости от формы резисторов.

Расчет прямоугольных полосковых резисторов. Для резисторов, имеющих $K_{\phi} > 1$, сначала определяют ширину, а затем длину резистора. Расчетное значение ширины резистора должно быть не менее наибольшего значения одной из трех величин:

$$b_{\text{расч}} \geq \max \{ b_{\text{техн}}, b_{\text{точн}}, b_p \},$$

где $b_{\text{техн}}$ – минимальная ширина резистора, определяемая возможностями технологического процесса; $b_{\text{точн}}$ – ширина резистора, определяемая точностью изготовления:

$$b_{\text{точн}} \geq \frac{\Delta b + \Delta l / K_{\phi}}{\gamma_{K_{\phi}}}, \quad (1.2)$$

$$b_p = \sqrt{\frac{P \rho_s}{P_0 R}} = \sqrt{\frac{P}{P_0 K_{\phi}}}. \quad (1.3)$$

где Δl , Δb – погрешности изготовления ширины и длины резистора, зависящие от метода изготовления; b_p – минимальная ширина резистора, при которой обеспечивается заданная мощность:

За ширину b резистора принимают ближайшее к $b_{\text{расч}}$ большее значение, кратное шагу координатной сетки, принятому для чертежа топологии с учетом масштаба. Для тонкопленочной технологии шаг координатной сетки обычно составляет 1 или 0,5 мм. Например, если шаг координатной сетки 1 мм, масштаб 20:1, то округление производят до величины, кратной 0,05 мм.

Далее находят расчетную длину резистора:

$$l_{\text{расч}} = b K_{\phi}.$$

За длину l резистора принимают ближайшее к $l_{\text{расч}}$ значение, кратное шагу координатной сетки, принятому для чертежа топологии с учетом масштаба. При этом следует оценивать получающуюся погрешность и при необходимости выбирать большее значение ширины b резистора, при котором округление длины $l_{\text{расч}}$ дает приемлемую погрешность.

Определяют полную длину резистора с учетом перекрытия контактных площадок:

$$l_{\text{полн}} = l + 2e,$$

где e – размер перекрытия резистора и контактных площадок.

При использовании метода двойной фотолитографии $l_{\text{полн}} = l$.

Площадь, занимаемая резистором на подложке, $S = l_{\text{полн}} \cdot b$

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

Расчетное значение длины резистора $l_{\text{расч}}$ выбирают из условия

$$l_{\text{расч}} \geq \max \{l_{\text{техн}}, l_{\text{точн}}, l_p\},$$

где $l_{\text{техн}}$ – минимальная длина резистора, определяемая разрешающей способностью выбранного метода формирования конфигурации; $l_{\text{точн}}$ – минимальная длина резистора, при которой обеспечивается заданная точность:

$$l_{\text{точн}} \geq \frac{\Delta l + \Delta b \cdot K_{\Phi}}{\gamma_{K_{\Phi}}}, \quad (1.4)$$

l_p – минимальная длина резистора, при которой рассеивается заданная мощность:

$$l_p = \sqrt{\frac{P \cdot K_{\Phi}}{P_0}}. \quad (1.5)$$

За длину l резистора принимают ближайшее к $l_{\text{расч}}$ значение, кратное шагу координатной сетки, принятому для чертежа топологии.

Расчетную ширину резистора определяют по формуле

$$b_{\text{расч}} = \frac{l}{K_{\Phi}}. \quad (1.6)$$

За ширину b резистора принимают ближайшее к $b_{\text{расч}}$ значение, кратное шагу координатной сетки. При этом следует оценивать получающуюся погрешность и при необходимости корректировать значение длины l резистора в большую сторону, при котором округление ширины $b_{\text{расч}}$ дает приемлемую погрешность.

Затем определяют полную длину резистора с учетом перекрытия контактных площадок и площадь резистора.

Для проверки находят действительную удельную мощность и погрешность резистора. Очевидно, резистор спроектирован удовлетворительно, если:

- 1) удельная мощность рассеяния P_0 не превышает допустимого значения P_0 :

$$P_0' = P / S \leq P_0;$$

- 2) погрешность коэффициента формы $\gamma_{K\phi}$ не превышает допустимого значения $\gamma_{K\phi \text{ доп}}$:

$$\gamma_{K\phi}' = \Delta l / l_{\text{полн}} + \Delta b / b \leq \gamma_{K\phi \text{ доп}}.$$

Конструктивный расчет тонкопленочных резисторов сложной формы.

При конструировании резистора в виде отдельных резистивных полосок, соединенных проводящими перемычками, сумма длин резистивных полосок должна быть равна длине, определенной по формуле:

$$l = b \cdot K_{\phi}.$$

Резисторы типа «меандр» (рисунок 3) рассчитывают из условия минимальной площади, занимаемой резистором.

Расчет меандра проводят после определения ширины b резистора в такой

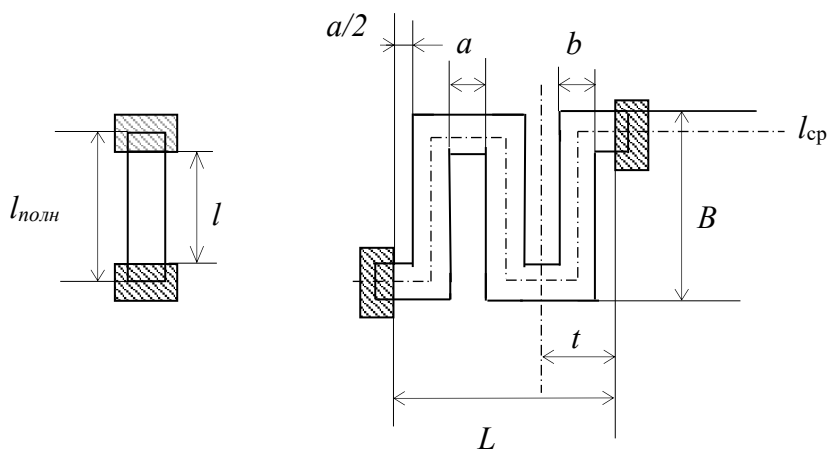


Рисунок 3 – Конструкция резисторов типа «полоска» (а) и «меандр» (б)

последовательности.

Определяют длину средней линии меандра:

$$l_{\text{ср}} = b \cdot K_{\phi}.$$

Задают расстояние между резистивными полосками a . С учетом технологических ограничений при масочном методе $a_{\min}=300$ мкм, при фотолитографии $a_{\min}=100$ мкм

(обычно задают $a = b$).

Находят шаг одного звена меандра:

$$t = a + b. \quad (1.7)$$

Определяют оптимальное число звеньев меандра $n_{\text{опт}}$ из условия, чтобы площадь, занимаемая резистором типа «меандр», была минимальной. Очевидно, это будет в случае, когда меандр вписывается в квадрат ($L = B$).

Если отношение длины средней линии меандра к ширине резистивной полосы больше 10, то оптимальное число звеньев меандра может быть вычислено по приближенной формуле

$$n_{\text{опт}} \approx \sqrt{\frac{l_{\text{ср}} L}{tB}}. \quad (1.8)$$

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

$$n_{\text{опт}} \approx \sqrt{\frac{K_{\Phi}}{2}}. \quad (1.9)$$

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

Определяют длину меандра:

$$L = n \cdot (a + b). \quad (1.10)$$

Вычисляют ширину меандра:

$$B = \frac{l_{\text{ср}} - an}{n}, \quad (1.11)$$

где n – оптимальное число звеньев меандра, округленное до ближайшего целого.

Расстояние a выбирают из конструктивно-технологических соображений. Например, при напылении резисторов через маску размер a_{min} определяется минимально возможным расстоянием между соседними щелями в маске. Для обеспечения требуемой жесткости маски оно должно удовлетворять условию

$$B_{\text{max}}/a \leq 10.$$

Если это условие не выполняется, необходимо изменить расстояние a и вновь вычислить $n_{\text{опт}}$, L , B . Для фотолитографического метода указанное условие не критично.

Приведенные расчетные соотношения не учитывают, что в резисторах типа «меандр» плотность тока в изгибах неравномерна (рисунок 4). Это приводит к сокращению электрической длины пленочного резистора и уменьшению его сопротивления. Неравномерное распределение плотности тока наблюдается в пределах трех квадратов области изгиба (рисунок 5, а, б).

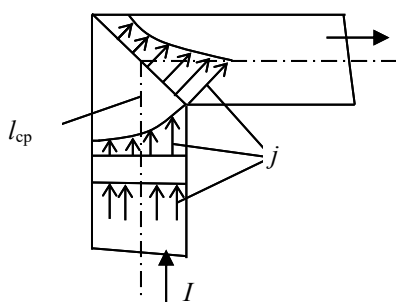


Рисунок 4 – Распределение плотности тока в резисторах типа «меандр»

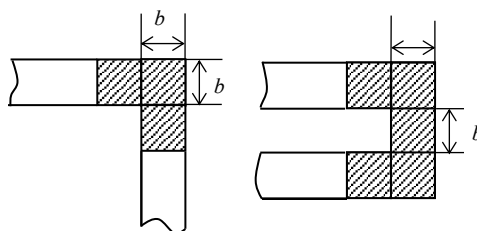


Рисунок 5 – Конструкции изгибов пленочных резисторов типа «меандр»: а – изгиб под прямым углом; б – П-образный изгиб

Для уточненного расчета с учетом изгибов конструкцию резистора типа «меандр» можно представить в виде последовательно соединенных прямолинейных участков и изгибов. При этом его сопротивление можно определить как сумму сопротивлений прямолинейных участков и изгибов:

$$R = R_{\text{и}} m + \frac{l_{\text{п}} n}{b} \rho_S, \quad (1.12)$$

где $R_{\text{и}}$ – сопротивление изгибов; m – число изгибов, $l_{\text{п}}$ – длина прямолинейных участков; n – число звеньев меандра.

Для изгиба под прямым углом (рис. 2.6, а) $R_{\text{и}} = 2,55\rho_S$, для П-образного изгиба (рисунок 5, б) $R_{\text{и}} = (a/b+3)\rho_S$. Отсюда длина прямолинейного участка одного звена меандра

$$l_{\text{п}} = \frac{R - mR_{\text{и}}}{\rho_S n} b. \quad (1.13)$$

После этого корректируют размеры L и B с целью обеспечения заданного номинала резистора.

Квадратная или близкая к ней форма резистора типа «меандр» часто

оказывается неудобной при компоновке пленочных элементов на подложке микросхемы, например, из-за отличной от квадрата площади, отводимой под резистор. Тогда, зная габаритную площадь меандра и задавшись одним из размеров меандра (например, B), определяют второй размер L и число звеньев меандра n .

Задание на работу:

1. Определить тип микросхемы
2. Определить типы и расположение элементов на подложке.
3. Определить коэффициенты формы резисторов на топологии
4. Определить удельное сопротивление резистивного материала.
5. Определить резистивный материал.
6. Определить мощность рассеяния (при условии, что ширина резистора определяется рассеиваемой мощностью).
7. Определить коэффициент запаса резисторов по мощности. При расчете мощности рассеивания резисторов допускать возможность падения на них всего напряжения питания. Обратите внимание, схема с двойным питанием. На 10 вывод +3В, на 6 вывод +6В. Следовательно на резисторах **R7-R8** падение напряжение может достигать до 3В, на остальных – до 6 В.
8. Сделать выводы по проделанной работе.

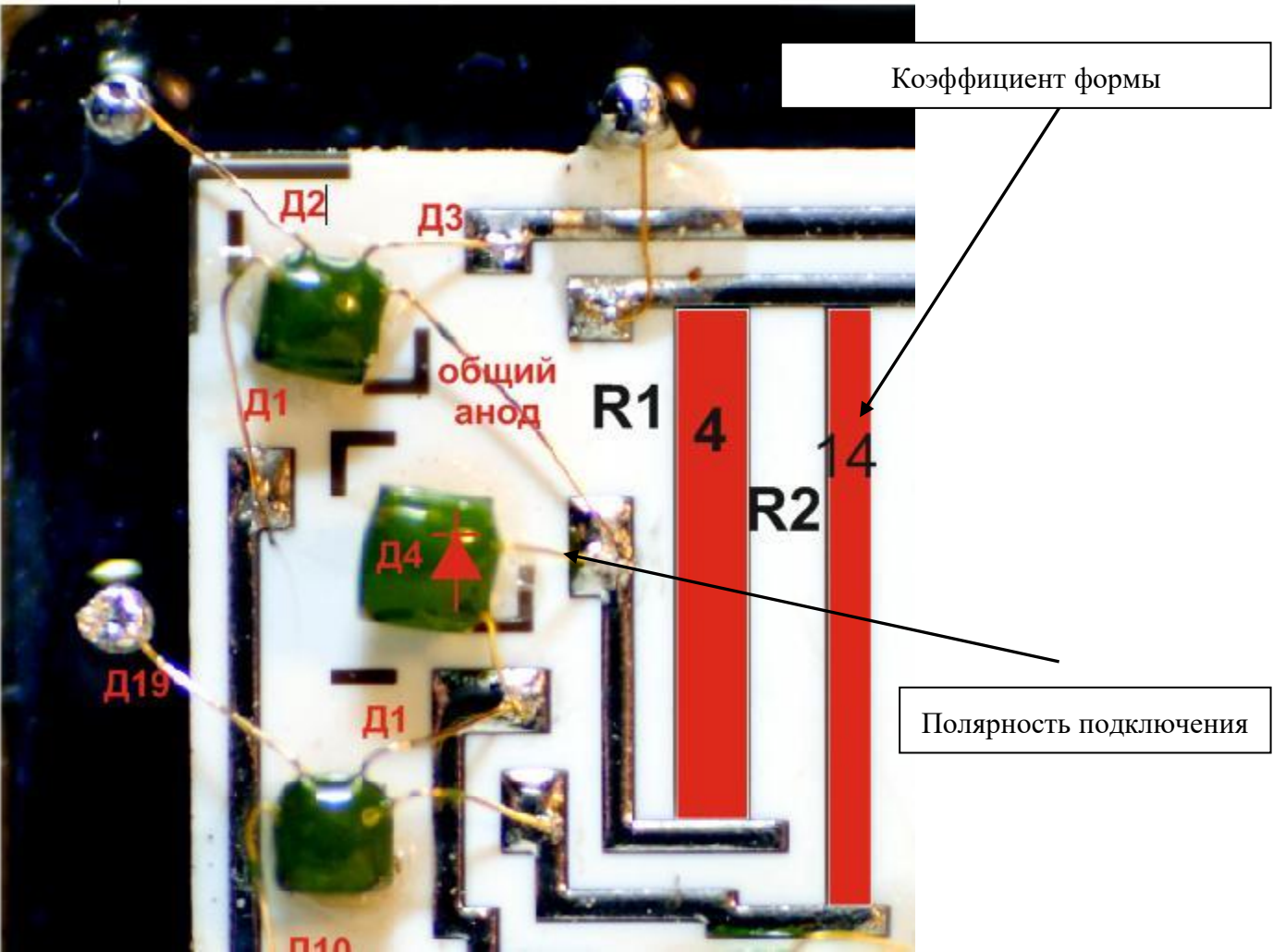
Результаты исследования представить в виде таблицы:

Элемент	Номинал, Ом	тип	Тип монтажа	Геометрические размеры, (Коэффициент формы, Кф) мкм			Удельное сопротивление, Ом/□	Материал	Рассеиваемая мощность, исходя из ширины, P ₁ , мВт	Рассеиваемая мощность, исходя из напряжения питания, P ₂ , мВт	Коэффициент запаса по мощности P ₁ / P ₂
				l	b	Кф					
R1	3500	Тонкопленочный резистор типа меандр	Напыление	1200	400	12	2000	Нихром	30	15	2
Д1-Д3		Диодная сборка с общим анодом	Навесной с гибкими выводами								
T1		Транзистор	Навесной с гибкими выводами								

Измеренные номиналы сопротивлений резисторов

Элемент	Номинал, Ом
R1	2120,3
R2	4187,7
R3	2117,2
R4	4192,8
R5	8092,2
R6	8097,4
R7	1189,2
R8	1194,5

Пример обозначения элементов на топологии



ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Определение параметров тонких пленок

1. Цель работы

Приобретение практических навыков по определению параметров тонких пленок

2 Краткие теоретические сведения.

2.1. Определение удельного сопротивления

Для измерения удельного поверхностного сопротивления ρ_s широкое распространение получил четырехзондовый способ. Размещение зондов показано на рисунке 1.

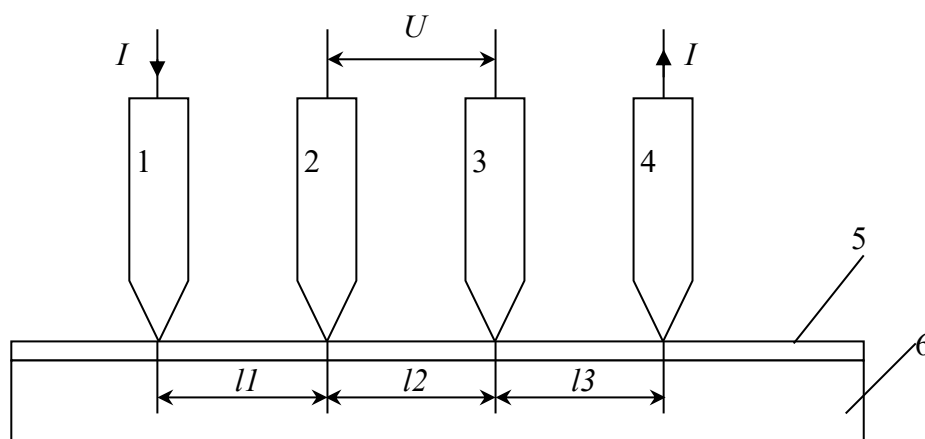


Рисунок 1 - Зондовый метод определения удельного сопротивления:

1–4 – зонды; 5 – пленка; 6 – подложка.

При размещении зондов в линию на материале полубесконечного объема при $l1=l2=l3=l$ объемное удельное сопротивление ρ_v выражается равенством:

$$\rho_v = U \frac{2\pi \cdot l}{I} \quad (1.1)$$

Если материал, на который устанавливается зонд, представляет собой бесконечно тонкую пластину, укрепленную на изолирующей подложке то уравнение примет следующий вид:

$$\rho_v = \frac{U \cdot d \cdot \pi}{\ln 2 \cdot I} \quad (1.2)$$

или

$$\rho_s = \frac{\rho_v}{d} = 4,532 \frac{U}{I}, \quad (1.3)$$

2.2 Определение толщины тонких пленок

Интерференционный метод. Этот метод определения толщины плёнок основывается на явлении интерференции света, которое возникает при прохождении света через тонкие плёнки. При этом свет отражается от поверхности плёнки, а затем проходит через несколько слоёв её материала, которые создают дополнительную разность хода между отражёнными лучами. Эта разность хода вызывает явление интерференции, при котором происходит возникновение светлых и тёмных полос на экране. Для определения толщины плёнок с помощью интерференционного метода используются интерференционные приборы, такие как интерферометры или микроскопы зондирования с оптической силой. Они позволяют измерять толщину плёнки с точностью до нескольких нанометров. Интерференционный метод является очень точным и чувствительным, однако он требует специального оборудования и навыков работы с ним. Кроме того, данный метод определения толщины плёнок не всегда применим, например, в случае, когда плёнка имеет высокую неровность поверхности или сильно поглощает свет. 19 При напылении на подложке формируют так называемую ступеньку, боковую границу пленки, перекрывая часть подложки заслонкой. Визуально в микроскопе изображено смещение интерференционных полос, показанных на рисунке 2. Чередование полос с шагом L на поверхности смещается относительно друг друга у их границы на определенную величину l .

Толщина пленки рассчитывается по формуле:

$$d = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{l}{L} \right)$$

где λ – длина волны монохроматического света, равна 0,54 мкм; $L = 1/2 \lambda$ – шаг между соседними интерференционными полосами; l – смещение интерференционной полосы.

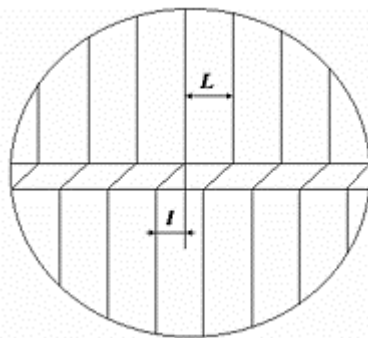


Рисунок 2 – Смещение интерференционных полос

2.3 Измерение адгезии тонких пленок к подложке

Под адгезией понимают способность двух разнородных поверхностей прилипать друг к другу под действием сил притяжения и механических воздействий. В более широком смысле, адгезия – это физический процесс сцепления между двумя различными материалами, который может быть вызван, например, химическим взаимодействием молекул. Как правило, адгезия важна в различных рабочих процессах, таких как сварка, клеение, смачивание поверхности материала жидкостями. Адгезия плёнки к подложке зависит от нескольких факторов, таких как:

1. Состояние поверхности подложки: чистая, сухая и гладкая поверхность способствует лучшей адгезии пленки.
2. Химические свойства подложки и пленки: сочетание химических свойств материалов может повлиять на их способность к адгезии.
3. Механические свойства подложки и пленки: разница в коэффициенте теплового расширения между материалами может вызвать разрывы адгезии.
4. Способ нанесения пленки: правильный выбор и использование клеевого состава и методов нанесения могут значительно повысить адгезию.
5. Температура и влажность: экспонирование подложки и пленки в условиях повышенной температуры и влажности может негативно повлиять на адгезию.

Адгезию можно рассчитать по следующей формуле:

$$G = \frac{F}{S},$$

где F – сила, прикладываемая для отрыва, S – площадь отрыва.

Измерение адгезии выполняют различными способами, в зависимости от назначения измерения и типа поверхностей, которые нужно измерить. Вот несколько примеров методов измерения адгезии:

1. *Метод скрежета.* Метод заключается в использовании специальных скребков со стандартизированным острием, которые применяются для стирания покрытий с поверхности материала. Данный метод может использоваться для измерения адгезии на покрытиях с низкой адгезией.

2. *Метод растяжения.* Метод заключается в измерении силы, необходимой для отрыва соединения покрытий от поверхности материала. Данный метод может использоваться для измерения адгезии на поверхностях с высокой адгезией.

3. *Метод фрикционных сил.* Метод заключается в использовании специальных приборов, которые могут наносить механические воздействия на поверхность материала. Измерение проводится на основе силы трения, возникающей между поверхностью материала и прибором.

4. *Метод отжима.* Метод заключается в измерении силы, необходимой для наложения покрытия на поверхность материала. Данный метод может использоваться для измерения адгезии на поверхностях средней адгезии.

5. *Метод микротвердости.* Метод заключается в измерении глубины прохода острия твердого тела в поверхность соединения. Данный метод может использоваться для измерения адгезии между клиньями из различных материалов.

6. *Метод атомно-силовой микроскопии (АСМ).* Метод заключается в использовании микроскопа, способного измерять атомные силы, взаимодействующие между поверхностью и зондом. Данный метод может использоваться для измерения адгезии на микроскопическом уровне.

2.4 Измерение температурного коэффициента сопротивления (ТКС)

Температурный коэффициент электрического сопротивления – величина, равная отношению изменению электрического сопротивления при изменении температуры на один градус.

$$\text{ТКС} = \frac{1}{R} \frac{\Delta R}{\Delta T}$$

Температурный коэффициент сопротивления характеризует зависимость электрического сопротивления от температуры и имеет размерность обратную температуре. В СИ измеряется в кельвинах в минус первой степени (1/К).

Также часто применяется физическая величина «температурный коэффициент проводимости». Он равен значению коэффициента сопротивления с обратным знаком.

Для большинства металлов и металлических сплавов температурный коэффициент сопротивления положителен: их удельное сопротивление растёт с ростом температуры вследствие рассеяния электронов на фононах (тепловых колебаниях кристаллической решётки).

2.4 Задание на работу

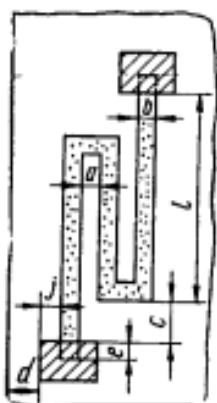
1. Измерить удельное поверхностное сопротивление и определить разброс этой величины по подложке. Построить график распределения толщины пленки по подложке. Оценить факторы, влияющие на удельное поверхностное сопротивление напыленных пленок.
2. Определить толщину напыленных пленок d и рассчитать объемное удельное сопротивление ρ_v .
3. Сравнить полученное значение ρ_v для тонкой пленки с ρ_v для массивного материала, взятое из справочника или определенное экспериментальным путем.
4. Определить величину адгезии.
5. Определить удельную мощность рассеяния.
6. Определить значение ТКС.
7. Сделать выводы по проделанной работе.

ПРИЛОЖЕНИ Б

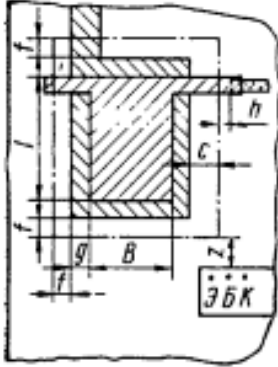
Таблица 3.15

Конструктивные и технологические ограничения
при проектировании тонкопленочных ГИС

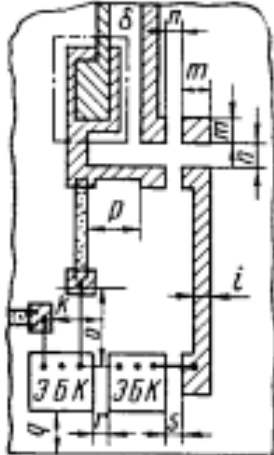
Элемент топологии	Содержание ограничения	Размер ограничения, мм, при использовании метода				
		М	Ф	МФ	ЭИ	ТА
	Точность изготовления линейных размеров пленочных элементов и расстояний между ними Δl , Δb , Δa , ΔL , ΔB и других при расположении пленочных элементов в одном слое, мм	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$
	Минимально допустимый размер резистора, мм		0,1		0,15	0,05
		0,3	0,1	0,3		0,1
	Минимально допустимые расстояния между пленочными элементами, расположенными в одном слое, а, мм	0,3	0,1	0,3	0,1	0,05
	Максимально допустимое соотношение размеров l/a	10	100	30		100
	Максимально допустимое расстояние между пленочными элементами, расположенными в разных слоях, с, мм	0,2	0,1	0,2		0,1
	Перекрытия для совмещения пленочных элементов, расположенные в разных слоях, е, мм	$\geq 0,2$	$\geq 0,1$	$\geq 0,2$		$\geq 0,1$
	Минимальное расстояние от пленочных элементов до края платы d, мм	0,5	0,2	0,5	0,4	0,2
	Минимальная ширина пленочных проводников i, мм	0,1	0,05	0,1	0,1	0,05
	Минимально допустимое расстояние между краем пленочного резистора и краем его контактной площадки j, мм	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1



Продолжение табл. 3.1

Элемент топологии	Содержание ограничения	Размер ограничения, мм, при использовании метода				
		М	Ф	МФ	ЭИ	ТА
	Минимально допустимые расстояния, мм: между краями диэлектрика и нижней обкладки конденсатора f	0,1	0,1	0,1	0,1	—
	между краями верхней и нижней обкладок конденсатора g	0,2				
	между краем диэлектрика и соединением вывода конденсатора с другим пленочным элементом h	0,3				
	между краем диэлектрика и нижней обкладкой конденсатора в месте вывода верхней обкладки c	0,2				
	от пленочного конденсатора до приклеиваемых навесных компонентов z	0,5				
	Минимальная площадь перекрытия обкладок конденсаторов $L \times B$, мм ²	0,5×0,5				
	Максимальное отклонение емкости конденсатора от номинального значения, %	±12				
	Минимальное расстояние от проволочного проводника или вывода до края контактной площадки или до края пленочного проводника, не защищенного изоляцией, k , мм	0,2				

Продолжение табл. 3.15

Элемент топологии	Содержание ограничения	Размер ограничения, мм, при использовании метода				
		М	Ф	МФ	ЭИ	ТА
	Минимальные размеры контактных площадок для монтажа навесных компонентов с шариковыми или столбиковыми выводами, мм	<div> <div>m</div> <div>0,2</div> </div> <div> <div>n</div> <div>0,1</div> </div>				
	Минимальные размеры контактных площадок для контроля электрических параметров, мм	0,2×0,2				
	Минимальное расстояние между контактными площадками для пайки и припайки проводочных проводников, мм	0,2				
	Максимальная длина гибкого вывода без дополнительного крепления o , мм	3,0				
	Минимальные расстояния, мм, между контактными площадками для монтажа навесных компонентов с шариковыми или столбиковыми выводами и пленочным резистором p , диэлектриком конденсатора δ	<div>0,6</div> <div>0,35</div>				
	Минимальные расстояния, мм, от края навесного компонента, до:	<div> <div>0,4</div> <div>0,4</div> <div>0,6</div> <div>0,4</div> <div>0,3</div> <div>0,2</div> </div> <div> Для всех методов </div>				
	края платы q					
	края другого компонента r					
	края навесного пассивного компонента					
	края контактной площадки, предназначенной для пайки проводочных выводов, s					
	проводочного проводника					
	луженого пленочного элемента					

Продолжение табл. 3.15

Элемент топологии	Содержание ограничения	Размер ограничения, мм, при использовании метода				
		М	Ф	МФ	ЭИ	ТА
	Минимальные размеры контактных площадок для приварки проволочных проводников или проволочных выводов навесных компонентов при диаметре проволоки, мм:					
	$\varnothing 0,03$ { для одного проводника для двух проводников для трех проводников				0,15×0,1 0,2×0,2 0,2×0,3	
	$\varnothing 0,04$ { для одного проводника для двух проводников для трех проводников				0,2×0,15 0,25×0,25 0,25×0,40	
	$\varnothing 0,05$ { для одного проводника для двух проводников для трех проводников				0,25×0,2 0,3×0,3 0,3×0,5	