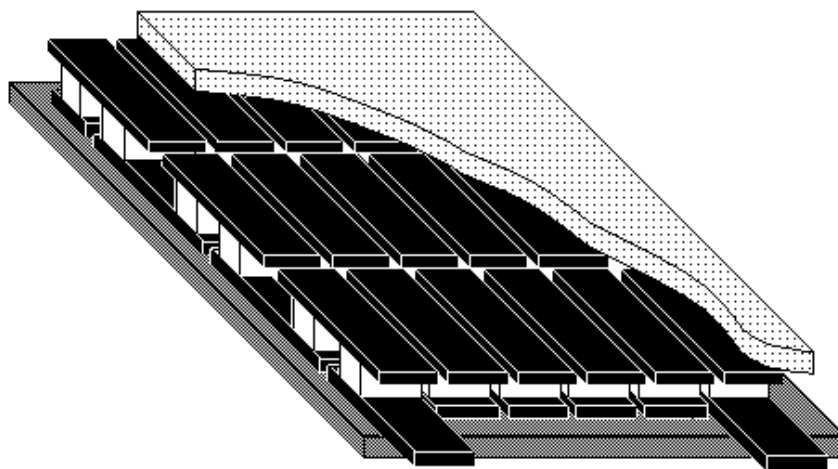


Министерство Высшего и среднего специального образования
Республики Узбекистан
Национальный Университет Узбекистана им. Мирзо Улугбека

С. И. Власов, Д.А. Толипов

Пассивные твердотельные приборы



Ташкент
«Университет»
2012

В данном учебно-методическом пособии рассматриваются основные физические принципы работы современных пассивных полупроводниковых и пленочных приборов. Подробно изложены физические модели и конструкционные особенности таких приборов как постоянные и переменные резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности. Приведены подробные методы расчетов вольт-амперных и вольт - фарадных характеристик. Подробно рассмотрены их наиболее характерные особенности, температурные и частотные зависимости. Приведены сравнительные характеристики рассмотренных приборов.

Пособие составлено на основе многолетнего чтения курса лекций «Физика полупроводниковых приборов» на кафедре «Физика полупроводников и диэлектриков» Национального Университета Узбекистана. Пособие предназначено для студентов бакалавриата и магистратуры, специализирующихся по направлениям «Физика конденсированного состояния», «Физика твердого тела», «Микро и наноэлектроника», «Полупроводниковые приборы », а также может быть полезным аспирантам, специализирующихся в указанных областях.

Рецензенты: А.Т. Мамадалимов академик Ан РУ
И.Г. Атабаев доктор физико-математических наук,
профессор

Рекомендовано к изданию научно - методическим советом
Национального Университета Узбекистана им. Мирзо Улугбека.
(протокол № 1 от 05. 09. 2012 г.)

ISBN-978-9943-305-69-4

ВВЕДЕНИЕ

С развитием электронной техники предъявляются все большие требования к компонентам и изделиям микроэлектроники. Это обусловлено и существенным уменьшением размеров электронных устройств, и необходимостью разработки электронных устройств, обладающих хорошим быстродействием при малом весе.

На сегодняшний день, практически все электронные устройства изготавливаются на основе достижений физики полупроводников и полупроводниковых приборов. Полупроводниковые приборы находят самое широкое применение во всех электронных изделиях, предназначенных для работы в различных областях деятельности человека, начиная от медицины и кончая космическими исследованиями.

В состав практически всех электронных изделий входят различные пассивные компоненты. К таким компонентам, в первую очередь, относятся постоянные и переменные сопротивления (резисторы), конденсаторы постоянной ёмкости, конденсаторы переменной (изменяемой) ёмкости, катушки индуктивности, элементы запоминающих устройств на основе различных магнитных материалов, способных сохранять записанную информацию при отключенном питании. Принципы работы всех пассивных компонентов основаны на физических явлениях, протекающих в твердых телах и в полупроводниковых материалах, при приложении к ним каких-либо внешних воздействий. Поэтому важно понять основные физические процессы, протекающие в полупроводниковых материалах и приборах при приложении к ним каких-либо внешних воздействий. Это поможет обучающемуся самостоятельно усваивать новые принципы и методы, возникающие в столь быстро развивающейся области – физике пассивных полупроводниковых приборов.

ГЛАВА I

Пассивные элементы электронных схем

Под пассивными элементами электронных схем понимаются элементы, не увеличивающие мощность электрического сигнала, а принимающие участие в процессах, связанных с накоплением электрической энергии и ее перераспределением. К таким элементам относятся конденсаторы, резисторы, катушки индуктивности, элементы запоминающих устройств и др. Пассивные компоненты разделяются на два типа: дискретные электронные компоненты и интегральные электронные компоненты. Мы будем рассматривать только интегральные компоненты. Это обусловлено тем, что с развитием микроэлектроники и с уменьшением размеров электронных приборов, все большее применение находят интегральные пассивные компоненты. Интегральные компоненты – это электронные компоненты (детали), которые входят в состав интегральных микросхем и не могут быть выделены из них в качестве самостоятельных изделий. Интегральная микросхема – это совокупность многих взаимосвязанных компонентов (транзисторов, диодов, конденсаторов, резисторов и т.д.), изготовленных в едином технологическом цикле, на одном основании – подложке. По способу изготовления различают два принципиально разных типа интегральных микросхем: полупроводниковые и пленочные интегральные микросхемы. Полупроводниковые интегральные микросхемы – это микросхемы, все составляющие элементы которых изготовлены на основе подложки из полупроводникового материала. Пленочные интегральные микросхемы – это микросхемы все составляющие элементы которых выполнены в виде пленок, нанесенных на поверхность диэлектрической подложки. В основе технологии изготовления полупроводниковых микросхем находится метод поочередного локального легирования полупроводниковой пластины донорными и акцепторными

примесями. В результате, в объёме полупроводника, в его приповерхностной области, образуются слои с различными типами проводимости, разделёнными р-п переходами. Сами образованные слои используются в качестве резисторов, а р-п переходы используются в диодных и транзисторных структурах. В основе технологии изготовления пленочных микросхем лежат различные способы нанесения пленок. В зависимости от способа нанесения пленок, различают тонкопленочные (толщиной 1-2 мкм) и толстопленочные (толщиной 10-30 мкм и больше) пленки. Отметим, что до настоящего времени различные комбинации нанесенных на диэлектрическую подложку пленок не позволяли получить активные (усилительные) элементы, поэтому пленочные микросхемы содержат только пассивные элементы.

Рассмотрим подробнее существующие процессы получения пленочных структур.

1.1. Пленочные структуры

Технологический процесс получения пленочных структур включает в себя следующие основные этапы: подготовку подложки, нанесение пленки, формирование рисунка, термическую обработку, создание токосъемных омических контактов, контроль и формирование характеристик.

Существует несколько способов нанесения пленок на подложки: химическое осаждение из газовой фазы, вакуумно-термическое испарение, катодное и ионно-плазменное распыление, вжигание паст различного состава. Наиболее широкое распространение получили способы нанесения тонких пленок (их толщина лежит в пределах долей единиц мкм) вакуумно-термическим испарением и ионно-плазменным распылением. Но даже в пределах одного метода существует множество факторов, влияющих на качество пленок и надежность микросхем. Такими факторами являются материал и состояние поверхности подложки: её микроструктура, наличие

или отсутствие на поверхности оксидных пленок, загрязнений и посторонних включений, наличие дефектов кристаллического строения, шероховатость поверхности. Эти факторы влияют на адгезию пленки с подложкой, элементный состав пленки, характер полученной микроструктуры, тип и плотность дефектов кристаллического строения, наличие упругих напряжений в пленке. Эти параметры оказывают существенное влияние на свойства пленок: величину удельного сопротивления, величину и знак температурного коэффициента расширения (ТКР), временную стабильность.

В качестве подложек для изготовления тонкопленочных схем используют: стекло, керамику, ситалл и фотоситалл, синтетический сапфир и др. Каждый из этих материалов обладает своими достоинствами и недостатками: стекло обладает низкой теплопроводностью; керамика имеет более высокую теплопроводность, но плохо поддается полировке.

В случае полупроводниковых микросхем подложками являются монокристаллы кремния с нанесенными на них изолирующими слоями.

Вследствие того, что напыление пленок производят на подложки, температура которых значительно ниже, чем температура кристаллизации металла, формирование пленок идет в условиях сильного переохлаждения, в них появляются многочисленные избыточные дефекты – вакансии, их комплексы, дислокации, межфазные и межзеренные границы, поры и др.

В связи с многочисленными эффектами, влияющими на состояние пленок, наблюдаются некоторые особенности их электрических свойств. Прежде всего – это увеличение удельного сопротивления пленки ($\rho_{пл}$) по сравнению с удельным сопротивлением (ρ) массивного материала того же состава; $\rho_{пл}$ пленки описывается соотношением

$$\rho_{пл} = \rho(1+c/h) \quad (1.1)$$

где: c – экспериментально найденная величина; h – толщина пленки.

Другой особенностью электрических свойств металлических пленок, связанной с их внутренним строением, является переход при определенной их толщине h , знака температурного коэффициента расширения через ноль и измене его на противоположный (рис.1.1).

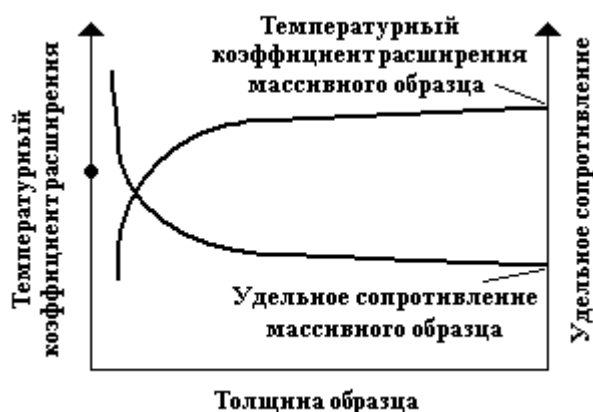


Рис. 1.1. Изменение удельного сопротивления и температурного коэффициента расширения пленок в зависимости от толщины

В связи с этим появляется возможность формирования высокостабильных по температуре пленок определенной толщины, у которых величина температурного коэффициента расширения меньше нуля.

Следует отметить ещё одну характерную особенность пленочных структур – возникновение временной и температурной нестабильности. Установлено, что с течением времени наблюдаются изменения электрических свойств пленок – уменьшение их удельного и поверхностного сопротивления, увеличение ТКР. Это явление называют естественным старением пленок. С целью исключения эффектов, связанных с естественным старением, изготовленные плёночные структуры подвергают искусственному старению – отжигу при определенных температурах.

Низкоомные пленки. Основными критериями, определяющими выбор материала для тонких пленок, являются: низкое удельное сопротивление;

способность к адгезии с подложкой; к химическому травлению (для формирования рисунка фотолитографическим методом); способность к сварке и к пайке (для присоединения внешних выводов); коррозионная стойкость; температурная и временная стабильность; малая чувствительность к изменениям электрического режима работы.

В качестве проводниковых низкоомных пленок могут использоваться пленки из Cu, Ag, Al, Au. Золото, вследствие своей высокой коррозионной стойкости, чаще всего используют в качестве внешнего слоя многослойных структур для защиты схемы от окисления (особенно для работы при повышенных температурах) и для приварки микро проволочных выводов. Пленка Al_2O_3 , образуемая на алюминии, способствует улучшению его адгезии с подложкой и служит внешней защитой от окисления.

Толщина проводящих пленок изменяется обычно от одного до нескольких мкм, ширина – от 10 до 100 мкм, расстояние между проводящими дорожками – от 10 до 100 мкм, общая их длина в составе современной микросхемы может превышать 1 м. Температура отжига зависит от материала пленки и для Si, например, лежит на уровне 250°C.

Для получения однослойных проводящих структур чаще других используют алюминий (преимущественно А999), обладающий хорошей адгезией к подложке и простотой технологии его нанесения. Алюминий широко используют при изготовлении полупроводниковых приборов и интегральных схем для формирования соединений между их элементами, омических контактов, контактных площадок и др. Пленку алюминия наносят на подложку, разогретую до $\approx 200^\circ\text{C}$. Отжиг пленок выполняют при $T=100-500^\circ\text{C}$. Температуру отжига выбирают с учетом ряда конкретных условий. Сопротивление однослойных проводящих пленок лежит в пределах 0,02-0,05 Ом/см².

В ряде случаев, однако, однослойные пленки не удовлетворяют поставленным требованиям (например, по прочности адгезии,

электрическому режиму работы и др.), и тогда прибегают к нанесению многослойных пленок. В начале наносят слой из какого-либо материала: Сг, Ni, нихрома, Ti, Mo, W, Ta толщиной 10-30 нм, отличающийся высокой прочностью адгезии к подложке (в несколько раз прочнее, чем у алюминия). На этот адгезионный слой («подслой») наносят собственно проводящий слой из таких материалов как: Al, Si, Ag, или Au толщиной 1-5 мкм. Если проводящий слой выполнен из Ni, Ag, Au, Pt, Pd, на него наносят дополнительный слой толщиной ≤ 1 мкм для защиты от внешних воздействий. Выбор материала слоев определяется рядом технологических и физико-химических соображений, в том числе возможностью взаимодействия слоев между собой. Сопротивление многослойных структур изменяется в пределах 0,02-0,2 Ом/см².

В связи с необходимостью экономии дефицитных металлов ведутся поиски их эффективной замены. Большое внимание уделяется системе медь - легирующий элемент. При этом выбор легирующих элементов определяется их способностью увеличить адгезию меди, улучшить ее совместимость с другими материалами микросхемы, повысить коррозионную стойкость, улучшить свариваемость (и это при сохранении низкого удельного сопротивления). Легирование меди такими металлами, как Mn, Ni, Co, Pt, Ti, Mg, Сг, Al, Sn и др., может быть однокомпонентным и комплексным.

Интересные результаты были получены на пленках систем Si - 8% Sn, обнаруживших высокую стабильность электрических свойств и коррозионную стойкость.

Высокоомные пленки. К материалам для высокоомных пленок предъявляют повышенные требования по величине удельного сопротивления и по температурному коэффициенту расширения, их температурной и временной стабильности, рассеиваемой мощности и др.

Допустимая мощность рассеивания пленочного резистора ($P_{\text{доп}}$) связана с удельной поверхностной рассеиваемой мощностью, зависящей от

поверхностного сопротивления R_{Π} , и от геометрии (шириной и длиной) резистивного элемента. На практике ширина резистивной пленки составляет 10-100 мкм.

На базе тонких резистивных пленок создают не только резисторы, входящие в состав той или иной микросхемы, но и монолитные резисторные схемы на различные номиналы, могущие встраиваться в состав соответствующих устройств. Отличительными чертами резисторных схем являются возможность обеспечения прецизионных параметров, удобство использования, малая стоимость.

Важное значение имеет точная подгонка номиналов резисторов. Ее осуществляют либо химическим травлением и окислением (анодированием) поверхности, либо изменением геометрических размеров резистора различными методами: механическим, лазерным, электроэрозионным, электронно-лучевым и рентгенолитографическим. В зависимости от материала резистора и метода подгонки удается достигнуть отклонений от номинальных сопротивлений, лежащих в пределах 0,1-1% и менее.

Для уменьшения суммарного температурного коэффициента расширения пленочного резистора схемы применяют методы его компенсации, соединяя в определенной последовательности резисторы с положительным и отрицательным температурным коэффициентом расширения.

Изготовление пассивных элементов по толстопленочной технологии основано на механическом нанесении на поверхность диэлектрических или полупроводниковых подложек пастообразных материалов (смесей стеклянного порошка с наполнителем, связующим и добавками, обеспечивающими определенную консистенцию). Пасты наносят через специальные трафареты, прорези в которых соответствуют конфигурации элементов. При последующей ступенчатой термической обработке пасту вжигают, окончательно формируя пассивные элементы. Толщина слоев при этом составляет 10 – 70 мкм.

Простота формирования толстых пленок, высокая эксплуатационная надежность изготавливаемых элементов при работе в жестких температурных условиях (от -180 до $+300$ °C), возможность создания резисторов большой мощности привели к широкому использованию толстопленочной технологии. Этому способствовали также совершенствование существующих и разработка на основе металлоорганических соединений новых видов паст, позволяющих формировать точные рисунки элементов.

Пасты представляют собой суспензию тонкодисперсных порошков (с размером частиц от десятых долей микрометра до нескольких микрометров) функциональных материалов и стекла. В зависимости от назначения паст (проводящая, диэлектрическая, резистивная и др.) в качестве функциональных материалов, которые придают пленкам необходимые физические свойства, используют металлы, их оксиды и смеси. Твердая фаза составляет около 75 %, из которых 5% приходится на порошок стекла. В жидкую фазу (около 25%) входят компоненты, изменяющие текучесть и вязкость паст, а также поверхностно-активные вещества (ПАВ), улучшающие смачивание частиц порошка и поверхностей подложек расплавленным стеклом.

В процессе вжигания пасты мелкодисперсное (с размером частиц 1-3 мкм) легкоплавкое (температура размягчения 425 - 600 °C) стекло, содержащее оксиды свинца, кремния, висмута, цинка, магния, расплавляется и при последующем затвердевании формирует монолитную структуру элементов с равномерно распределенными частицами функционального материала. Образующийся на границе раздела пленка-подложка переходный слой стекла толщиной 6-8 мкм обеспечивает прочную связь нанесенной пленки с подложкой.

Проводящие пасты предназначены для изготовления проводников и контактных площадок. Наибольшее распространение при изготовлении проводников, контактных площадок и электродов пленочных конденсаторов получили пасты на основе Ag и Pd-Ag (палладий вводят для снижения коррозии и миграции серебра).

Пасты на основе золота используются, когда требуется большая надежность при сохранении высоких электрофизических параметров. Перспективно также применение для многослойных пассивных компонентов золотых и марганцево-молибденовых (Mg-Mo) паст. В последнее время разработан ряд композиций, не содержащих драгоценных металлов, например пасты на основе Si, Al, Ni, W.

Температура вжигания проводящих паст на воздухе, в азоте или аргоне составляет 500-1000 °С.

Резистивные пасты предназначены для изготовления резисторов и представляют собой сложные композиции из металлов, их оксидов и стекла. Для обеспечения требуемых сопротивлений, шумовых характеристик, температурной и временной стабильности резистивной пленки используют пасты на основе серебра и палладия, рутения, оксидов индия, таллия и кадмия.

Температура вжигания резистивных паст составляет 550 - 1000 °С.

Диэлектрические пасты предназначены, в основном, для изготовления пленочных конденсаторов. Наиболее широко применяют пасты на основе титаната бария, которые позволяют получать конденсаторы с удельной емкостью до 7000 пФ/см².

Диэлектрические пасты для межслойной изоляции должны обладать низкой диэлектрической проницаемостью и высоким сопротивлением, так как предназначены для изоляции верхнего проводящего слоя от нижнего. Применение в этом случае стекол нецелесообразно, так как они аморфны и при последующей термической обработке их слои деформируются (уменьшается толщина), что увеличивает паразитные емкости.

Композиции стекол и керамических наполнителей (до 50%) не позволяют изготавливать беспористые слои (пористость снижает сопротивление изоляции под действием влаги). Наиболее перспективны композиции, состоящие из кристаллизующихся стекол, называемых ситаллоцементами (70-80 мас.%), и наполнителя из глинозема, органической связки, ланолина и вазелинового масла. При кристаллизации ситаллоцементов образуется достаточно жесткий

кристаллический каркас, препятствующий растеканию стекла. Инертный наполнитель при спекании с ситаллоцементом способствует созданию еще более жесткого каркаса. Диэлектрические пасты на основе ситаллоцемента позволяют получать пленки, удельная емкость которых при толщине 60-70 мкм и сопротивлении 10^{13} Ом равна 180-220 пФ/см².

Температура кристаллизации диэлектрических паст около 750 °С.

Магнитные пленки. Магнитные свойства пленочных материалов определяются следующими основными характеристиками: намагниченностью, магнитной восприимчивостью, магнитной индукцией, магнитной проницаемостью.

Намагниченность – это отношение магнитного момента (m) тела к его геометрическому объему (V)

$$M = m/V \quad (2.1)$$

Магнитная восприимчивость – физическая величина, характеризующая способность вещества изменять свой магнитный момент под действием внешнего магнитного поля, определяется как отношение намагниченности (M) к напряженности магнитного поля (H)

$$\chi_m = M/H \quad (3.1)$$

Магнитная восприимчивость характеризует способность вещества изменять свой магнитный момент под действием внешнего магнитного поля. В вакууме магнитная восприимчивость равна 0.

Магнитная индукция – рассматривается как сумма двух составляющих (внешняя H и внутренняя M) намагниченности:

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (4.1)$$

Здесь μ_0 -магнитная постоянная, равная $1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/ м

Магнитная проницаемость – характеристика среды, в которой возникает магнитное поле.

Абсолютная магнитная проницаемость μ_a определяется формулой

$$\mu_a = B / H \quad (5.1)$$

Относительная магнитная проницаемость (безразмерная величина) определяется формулой

$$\mu = \mu_a / \mu_0 = B / \mu_0 H \quad (6.1)$$

Магнитная проницаемость вещества связана с магнитной восприимчивостью этого вещества следующей формулой:

$$\mu = 1 + \chi_m \quad (7.1)$$

По поведению в магнитном поле все вещества делятся на следующие основные группы: 1. Диамагнетики ($\chi_m < 0$, $\mu < 1$); 2. Парамагнетики ($\chi_m > 0$, $\mu > 1$); 3. Ферромагнетики ($\mu \gg 1$); 4. Ферримагнетики ($\mu \gg 1$).

Принадлежность веществ к той или иной группе определяется строением электронных оболочек атомов. Каждый атом можно рассматривать как элементарный магнитик. От их взаимного расположения, в отсутствие магнитного поля, и зависит их поведение в магнитном поле. У диа- и парамагнетиков магнитные моменты соседних атомов расположены хаотично (рис.2.1, а). Их различная магнитная проницаемость определяется разной природой этих магнитных моментов. У ферромагнетиков магнитные моменты соседних атомов в пределах области, называемой доменом, расположены параллельно (рис. 2.1, б). У ферримагнетиков магнитные моменты расположены антипараллельно, но так как величина их различна, то в целом такой домен оказывается намагниченный (рис. 1, в)

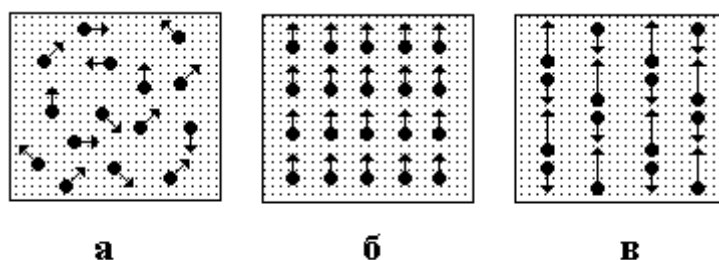


Рис. 2.1. Ориентация магнитных моментов соседних атомов

Магнитные моменты атомов в различных доменах ориентированы в различных направлениях. В областях, прилегающих к границам доменов, магнитные моменты атомов постепенно меняют ориентацию – от ориентации в одном домене до ориентации и направления в другом домене. Обычно ширина домена бывает не более нескольких микрометров, хотя в длину они могут простираются от одной границы кристаллита (зерна) до другой. Ширина доменной границы зависит от различных физических факторов и, например, у железа составляет около $5 \cdot 10^{-12}$ м, что составляет несколько сот межатомных расстояний.

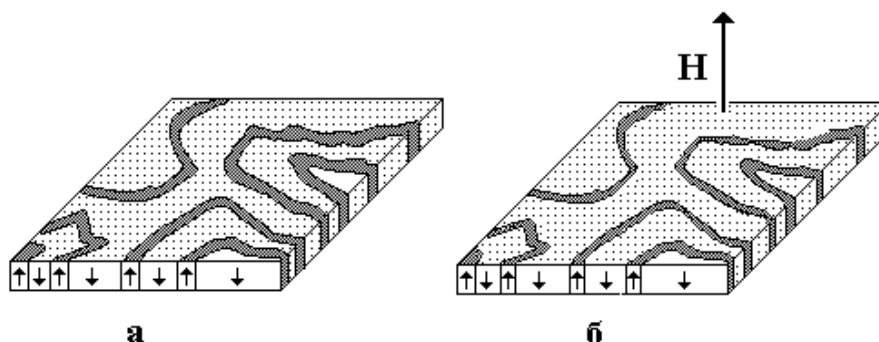


Рис. 3.1. Изменение доменной структуры гранатовой пленки под действием внешнего магнитного поля

В микроэлектронике магнитные материалы в виде пленок применяются, в основном, для создания запоминающих устройств. Такие запоминающие устройства предназначены для длительного хранения информации в отсутствие питания. Они весьма компактны: микросхема на цилиндрических

магнитных доменах площадью $0,5-1 \text{ см}^2$ содержит более $1 \cdot 10^6$ единиц информации. Рабочим элементом такого запоминающего устройства является монокристаллическая гранатовая пленка магнитного граната толщиной 1-3 мкм, нанесенная на подложку из немагнитного галлия – гадолиниевого граната. В качестве магнитного граната применяют железоиттриевые гранаты, в которых часть ионов железа и иттрия замещены ионами Ca, Ge, Bi. Пленка имеет направление легкого намагничивания, перпендикулярное ее поверхности и в отсутствие магнитного поля делится на полосовые домены (рис. 3.1, а). При наложении магнитного поля, перпендикулярного поверхности пленки - Н, площадь доменов с вектором намагниченности, противоположным приложенному полю, уменьшается (рис. 3.1,б). При выполнении некоторых условий (например, приложение импульсного магнитного поля параллельно пленке) эти домены превращаются в цилиндры (рис. 3.2). Домены цилиндрической формы могут перемещаться в кристалле граната. Для перемещения доменов используется пермалловая пленка сложной конфигурации, нанесенная поверх граната. Пленка пермаллоя, толщиной в десятые доли микрометра, изготавливается обычно из сплава, состоящего из 81% никеля и железа. Наличие или отсутствие цилиндрических магнитных доменов в заданной точке пленки, в определенный момент времени, означает, соответственно, запись единицы или нуля.

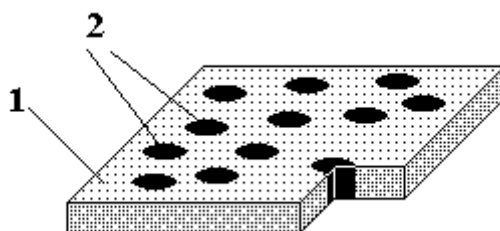


Рис. 3.2. Гранатовая пленка с цилиндрическими магнитными доменами

Для формирования цилиндрических магнитных доменов используются тонкие магнитные пленки феррит-гранатов и ортоферритов. Первые

содержат домены с размерами до 1 мкм, что позволяет получить плотность размещения информации до 10^7 бит/см², вторые обладают рекордно высокими скоростями передвижения до 104 м/с.

В последнее время начали использовать аморфные магнитные пленки сплавов переходных металлов с РЗ металлами типа Gd-Go и Gd-Fe, в которых возможно получение ЦМД с диаметром < 1 мкм, что позволяет повысить плотность записи информации до 10^9 бит/см². Недостатком таких пленок является их низкая термостабильность. Толщина пластинок из ферритов-гранатов должна быть порядка микрометра. Такие тонкие пластины механической обработкой получить нельзя. Поэтому вместо пластин применяют монокристаллические пленки, изготавливаемые эпитаксиальным методом – наращиванием пленки на немагнитной подложке. Кристаллическую структуру и постоянную решетки подложки подбирают в соответствии с требуемой структурой получаемой пленки.

Изготовление пленок эпитаксиальным методом производят путем химического осаждения металлов, входящих в состав граната, в виде галогенидных паров на монокристаллическую немагнитную подложку либо путем погружения подложки и расплав соответствующих оксидов граната.

Недостаток эпитаксиальных пленок заключается в сравнительно высокой стоимости изготовления и обработки подложки.

Диэлектрические подложки являются основой конструкции толстопленочных интегральных микросхем. Помимо изоляции элементов друг от друга и рассеивания выделяющейся при работе интегральной схемы теплоты, подложки защищают их от механических повреждений и воздействия окружающей среды. Поэтому подложки толстопленочных микросхем должны обладать хорошими диэлектрическими и механическими свойствами, необходимой точностью геометрических размеров и малой шероховатостью поверхности, хорошими теплопроводностью и адгезией к наносимым пастам, достаточными термической

(до 1000 °С) и химической стойкостью, и согласовываться по температурному коэффициенту линейного расширения с наносимыми слоями.

В наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют различные виды керамики, в первую очередь высокоглиноземистая керамика, состоящая из Al_2O_3 и добавок SiO_2 , MnO , Cr_2O_3 , CaO , B_2O_3 , MgO в различном процентном содержании. Подложки из такой керамики, в зависимости от соотношения компонентов, имеют следующие параметры: высоту микронеровностей $R_z = 2 - 20$ мкм; относительную диэлектрическую проницаемость $\varepsilon = 8,9 - 9,6$; коэффициент теплопроводности $35 - 36,7$ Вт/(м · °С); температурный коэффициент линейного расширения $= (6 - 6,4) \cdot 10^{-6} 1/^\circ C$.

Подложки из керамики на основе оксидов бериллия BeO (99,5 %) имеют следующие параметры: $\varepsilon = 6,4$, температурный коэффициент линейного расширения $= 6 \cdot 10^{-6} 1/^\circ C$ и обладают значительно более высокой теплопроводностью (около 230 Вт / м · °С), чем из Al_2O_3 .

Еще лучшим коэффициентом теплопроводности обладают металлические подложки со стекловидным покрытием.

Контрольные вопросы.

1. Какие элементы называются пассивными элементами электронных схем?
2. На чем основана технология изготовления пленочных интегральных компонентов?
3. Чем обусловлено образование избыточных дефектов в пленке при ее формировании?
4. Какие требования предъявляются к материалу для низкоомных тонких пленок?
5. Какие требования предъявляются к материалу для высокоомных тонких пленок?
6. Для чего используются проводящие пасты?
7. Для чего используются диэлектрические пасты?
8. Для чего используются в микроэлектронике магнитные материалы в виде пленок?
9. На какие основные группы делятся вещества по поведению в магнитном поле?
10. Что является рабочим элементом запоминающего устройства на цилиндрических магнитных доменах?

ГЛАВА II

Пленочные пассивные элементы

1.2. Пленочные интегральные резисторы

Пленочные резисторы могут составлять основную часть элементов пленочных интегральных микросхем, а в состав последних входят также проводники и контактные площадки.

В общем случае пленочные интегральные микросхемы представляют собой многослойные композиции, включающие проводниковые, полупроводниковые и диэлектрические слои, находящиеся в непосредственном контакте. В связи с этим конечные характеристики элементов и микросхем в целом зависят от соотношения свойств упомянутых слоев. Свойства слоев зависят от свойств исходных материалов, использованных для их формирования, технологии формирования, последующей обработки, условий хранения и эксплуатации.

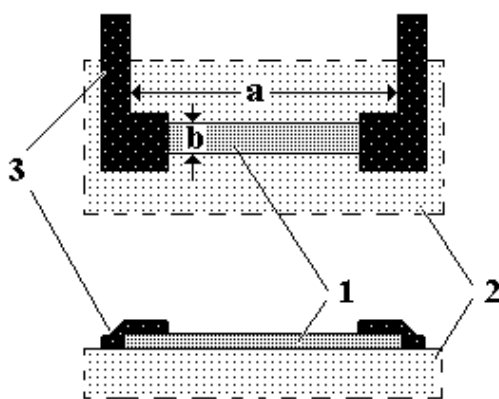
Современные пленочные резисторы изготавливаются из самых разнообразных материалов: чистых металлов, сплавов, твердых растворов, механических смесей, химических соединений, металлодиэлектрических композиций и т. п. Применение столь разнообразных материалов позволяет получать резисторы с широким диапазоном номиналов сопротивлений – от 10 Ом до 10^9 Ом.

Из чистых металлов для получения пленочных резисторов наиболее широко используются Cr, Ti, Zr, W, Mo, Nb, Re, Ta.

Пленки из этих металлов наносят на подложки преимущественно методами катодного и ионно-плазменного распыления. Диапазон изменений поверхностного сопротивления резистивных пленок из чистых металлов достаточно широк: от 10 Ом/см^2 до 10^4 Ом/см^2 . При этом значения температурного коэффициента расширения, в зависимости от толщины пленки, могут быть и положительными, и отрицательными (см. рис. 1.1).

Большое распространение получили пленки из металлических сплавов, характеризующихся широким диапазоном величины сопротивления и температурного коэффициента расширения. Для создания низкоомных пленочных резисторов (с величинами сопротивлений от долей до единиц Ом) используют медные сплавы, в частности на базе систем Си-Mn-Ti и Си-Sn-Ge. В отдельных случаях такие пленки используют для замены Аи в межсоединениях, контактных площадках и в обкладках пленочных конденсаторов.

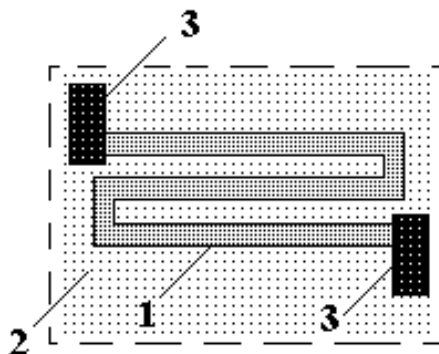
Достаточно широкий диапазон сопротивления, возможность обеспечения низкого температурного коэффициента сопротивления, относительная простота нанесения пленок, последующей термообработки и лазерной подгонки явились причиной широкого применения нихромов для формирования высоконадежных пленочных резисторов и резисторных схем, в том числе и прецизионных. Обычно используют нихром. Состав и свойства нихромовых пленок зависят от условий их нанесения, последующей обработки и эксплуатации. Современная технология позволяет получать пленки с поверхностным сопротивлением $R_s = 40-400 \text{ Ом} / \text{см}^2$ и с температурным коэффициентом расширения $\pm 30 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Отрицательный температурный коэффициент расширения характерен для пленок $R_s > 100 \text{ Ом} / \text{см}^2$. Наиболее однородные и стабильные характеристики $R_s = 10-100 \text{ Ом} / \text{см}^2$, температурный коэффициент расширения $= (2-10) \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ удается получить при температурах подложки $350-400^\circ\text{C}$. Для обеспечения высокой стабильности нихромовых пленок осуществляют их термостабилизацию в вакууме или в инертной атмосфере. На рисунке 2.2 показано устройство простого пленочного резистора. Здесь: 1 – резистивный слой, 2 – подложка, 3 – металлические контакты. Рабочий резистивный слой выполнен в виде проводящей полосы, отсюда и название резистора: пленочный резистор



**Рис. 2.2. Пленочный резистор
полосковой формы**

полосковой формы. Удельное сопротивление пленочного резистивного слоя зависит от его геометрических размеров и от используемого материала.

Для получения пленочных резисторов с большими значениями сопротивлений часто используются резисторы зигзагообразной формы. Устройство такого резистора показано на рисунке 3.2. Здесь: 1 – резистивный слой, 2 – подложка, 3 – металлические контакты. Рабочий резистивный слой выполнен в виде зигзагообразной проводящей полоски, отсюда и название резистора: пленочный резистор зигзагообразной формы.



**Рис. 3.2. Пленочный резистор
зигзагообразной формы**

На рисунке 4.2 показан внешний вид пленочного резистора зигзагообразной формы. Здесь: 1 – металлические контакты, 2 – резистивный слой, 3 – подложка.

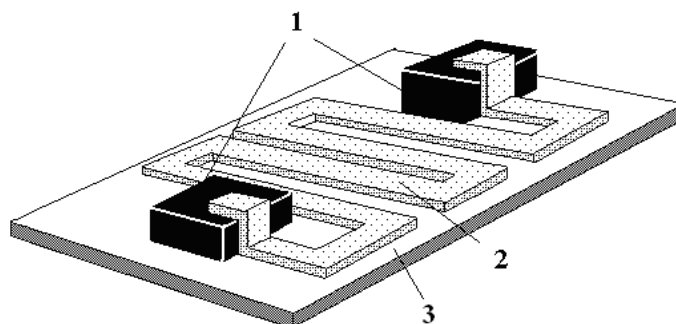


Рис. 4.2. Внешний вид пленочного резистора зигзагообразной формы

Современная микроэлектронная технология обеспечивает точность выходных параметров пленочных пассивных элементов только до $\pm (5-10)\%$. Этого недостаточно для изготовления прецизионных пассивных элементов, точность которых должна быть не ниже $\pm 1\%$. Это обуславливает необходимость подгонки пленочных элементов до близких к номинальным значениям в пределах установленных допусков.

При дискретной подгонке пленочных резисторов их конструкцией предусматриваются специальные перемычки 4 (см. рисунок 5.2). Эти перемычки перерезают (например, лучом лазера), что позволяет удалить одну или несколько секций пленочного резистора. Дискретная подгонка резисторов обеспечивает точность номиналов $\pm(2 - 3)\%$

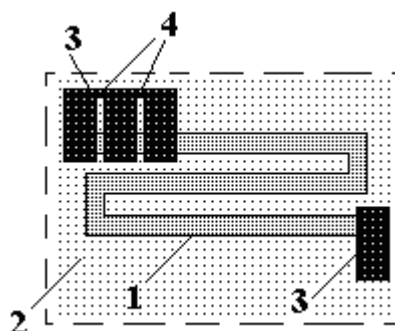


Рис. 5.2. Пленочный резистор зигзагообразной формы с подгоночными перемычками

Плавная подгонка резисторов основана на изменении, как их удельного поверхностного сопротивления, так и их геометрических размеров и обеспечивает высокую точность номиналов. Изменять значение удельного сопротивления пленочного элемента, можно воздействуя на структуру материала пленки. Известно, что пленки отличаются от массивного материала не только толщиной, но особенностями структуры, которая определяется технологией их нанесения. Например, мелкозернистые пленки металлов и сплавов, нанесенные в вакууме, имеют большое количество собственных дефектов (вакансий, избыточных атомов и др.), искажающих параметры и электрофизические свойства материала. Следовательно, при подгонке необходимо ликвидировать дефекты в пленке, снять напряжения, изменить и стабилизировать структуру и фазовое состояние, т.е. довести параметры резисторов до заданных значений.

Подгонка номиналов пленочных резисторов основана на изменении структуры пленки ее термической обработкой, пропусканием электрического тока или нагревом инфракрасным ИК либо лазерным излучением.

Все эти методы связаны с нагревом резистивной пленки, поэтому в ней одновременно происходит два процесса: окисление поверхностного слоя и упорядочение структуры пленки. Окисление поверхностного слоя резистивной пленки происходит за счет взаимодействия с кислородом окружающей среды. Упорядочение структуры происходит (кривая 2) в результате перераспределения

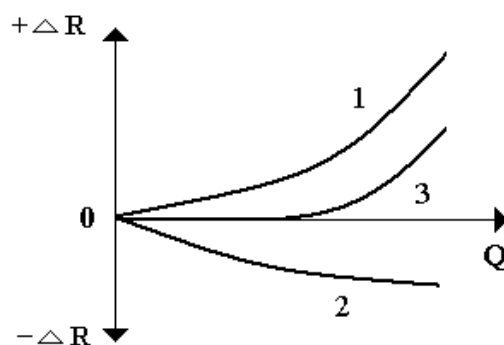


Рис. 5.3. Изменение сопротивления пленочного резистора при термической обработке

или удаления собственных дефектов, изменения границ между зёрнами и их укрупнения. Первый процесс (зависимость 1 на рисунке 5.3.) приводит к увеличению как поверхностного, так и объёмного сопротивления резисторов, а второй процесс (зависимость 2 на рисунке 5.3.) приводит к увеличению проводимости пленки, но при этом уменьшается как поверхностное, так и объёмное сопротивление пленки. Суммарное изменение сопротивления пленки показано на рисунке 5.3. (зависимость 3). Суммарное изменение сопротивления пленки зависит от интенсивности нагрева Q , его времени и условий. В каждом конкретном случае результирующая зависимость 3 может быть сдвинута как к зависимости 1, так и к зависимости 2. Так, при термической обработке пленочных резисторов на воздухе преобладают процессы окисления, а при нагревании их в вакууме – преобладают процессы упорядочения структуры. При пропускании импульсного тока через резисторы происходят аналогичные процессы. При нагреве резисторов ИК -излучением, эффект может быть различным. Длительный ИК- нагрев на воздухе существенно увеличивает как поверхностное, так и объёмное сопротивление резисторов из-за диффузии кислорода в пленку, а аналогичный нагрев в вакууме приводит к уменьшению, как поверхностного, так и объёмного сопротивления резисторов. как при термообработке.

Изменение геометрических размеров элементов при плавной подгонке осуществляется механическим, химическим и лазерным методами.

При механическом методе подгонки резисторов их поверхность обрабатывают абразивным порошком Al_2O_3 с размером зёрен около 25 мкм. Ударяясь о поверхность, зёрна порошка удаляют часть резистивной пленки, уменьшая эффективное сечение резисторов, что приводит к увеличению их сопротивления. В процессе подгонки сопротивление резистора постоянно сравнивается с сопротивлением стандартного резистора.

В основном этот метод применяют при подгонке толстопленочных резисторов. Невысокая точность ($\pm 5\%$), необходимость вскрытия защитного слоя и воздействие абразива на соседние элементы ограничивают его применение.

Химический метод предусматривает уменьшение толщины резистивной пленки травлением, что приводит к увеличению ее сопротивления, или увеличение толщины пленки гальваническим наращиванием, что приводит к уменьшению ее сопротивления. Точность подгонки номиналов сопротивлений, при использовании этого метода, составляет 1-2%. Недостатки его – малая скорость процесса и необходимость тщательной отмывки плат.

Лазерный метод получил наибольшее распространение за счет производительности и высокой точности. Высокая плотность энергии сфокусированного лазерного луча ($E = 10^{10} - 10^{15}$ Вт / см²) достаточна для испарения практически любого материала. Кратковременность воздействия лазерного излучения (0,1-5 мкс) почти не изменяет свойства соседних участков пленки, а небольшая глубина его поглощения не нарушает структуру подложки или слоев, находящихся под обрабатываемой пленкой. Сравнительные параметры пленочных резисторов приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Некоторые параметры пленочных резисторов

Тип резистора	R_s , Ом / см ²	$R_{\text{МАКС}}$, Ом	$R_{\text{МИН}}$, Ом	δ , %	ТКС, 10 ⁻⁴ /°C
Тонкопленочный	10-300	10 ⁶	10	$\pm 0,05$	0,25
Толстопленочный	5-10 ⁶	10	0,5	$\pm 0,2$	2

2.2. Пленочные интегральные конденсаторы

Электрический конденсатор представляет собой конструкцию из двух или нескольких пластин (электродов), изготовленных из токопроводящего материала и разделенных между собой изолирующим материалом (диэлектриком). Конденсаторы обладают свойством накапливать электрическую энергию и применяются в колебательных контурах для

разделения токов различной частоты, сглаживания пульсаций и других целей. Одним из основных параметров конденсаторов является номинальная емкость "С" – способность конденсатора накапливать электрический заряд. Емкость конденсатора возрастает с увеличением площади взаимного перекрытия обкладок (S) и убывает с увеличением расстояния (d) между ними:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d} \quad (1.2)$$

На рисунке 5.2 показано наиболее общее устройство плоского конденсатора. Здесь: a и b – геометрические размеры металлических обкладок, d – толщина слоя диэлектрика. На рисунке 6.2 показан внешний вид пленочного конденсатора. Здесь: 1 – слой диэлектрика, 2 – металлические обкладки, 3 – исходная подложка.

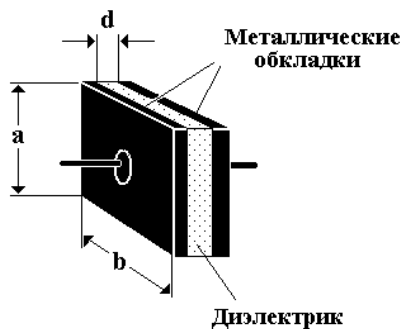


Рис. 5.2. Устройство плоского конденсатора

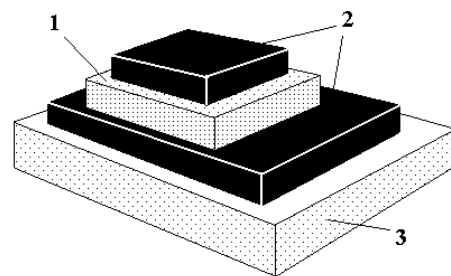


Рис. 6.2. Внешний вид пленочного конденсатора

В зависимости от типа конденсатора, его характеристик и диапазона рабочих частот реальный конденсатор может быть представлен различными эквивалентными схемами. В наиболее общем виде схемы реального конденсатора представлены на рисунке 7.2 а, б. Эти схемы учитывают не

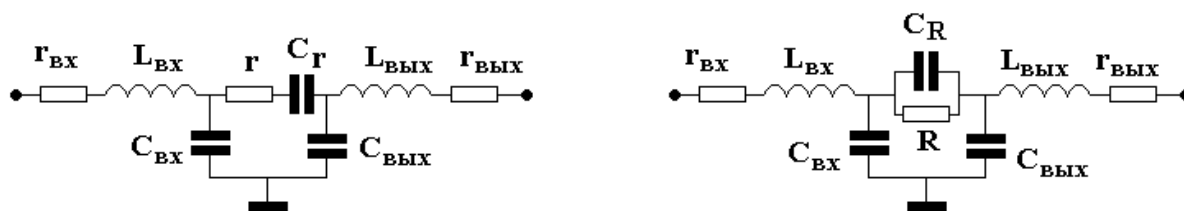


Рис. 7.2. Эквивалентные схемы конденсаторов

только основную емкость конденсатора (проходную емкость), но и емкости подводящих электродов и выводов, а также индуктивности и активные сопротивления выводов. В зависимости от условий включения, диапазона частот и емкости некоторыми элементами эквивалентных схем обычно пренебрегают и схемы значительно упрощаются. Так, например, упрощенная эквивалентная схема для реального конденсатора с точки зрения потерь энергии при данной частоте, для последовательной схемы замещения приведена на рисунке 8.2.

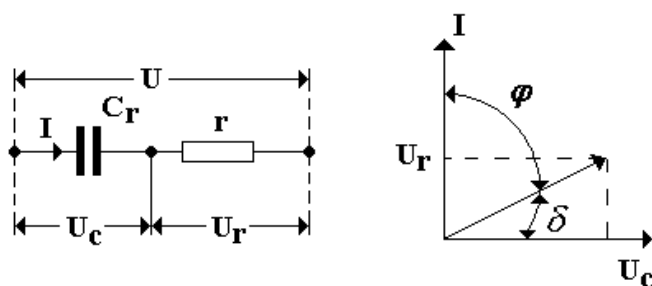


Рис. 8.2. Последовательная эквивалентная схема замещения

В соответствии с этой схемой замещения тангенс угла диэлектрических потерь равен:

$$\operatorname{tg} \delta = \omega r C_r \quad (2.2)$$

Для параллельной схемы замещения, приведенной на рисунке 9.2 тангенс угла диэлектрических потерь равен:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega R C_r} \quad (3.2)$$

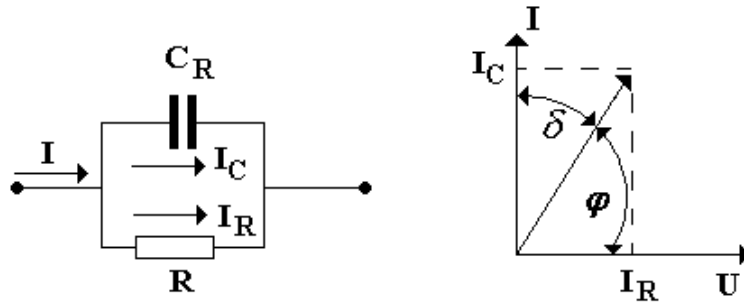


Рис. 9.2. Параллельная эквивалентная схема замещения

Эти схемы отображают свойства одного и того же конденсатора лишь в том случае, когда будет выполняться следующее соотношение:

$$r + \frac{1}{j\omega C_R} = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C_R} \quad (4.2)$$

Из этого соотношения можно получить связь между элементами различных эквивалентных схем замещения:

$$R = r (1 + \operatorname{ctg}^2 \delta) = r \sec^2 \delta ; \quad r = R \operatorname{tg}^2 \delta / (1 + \operatorname{tg}^2 \delta) ; \quad (5.2)$$

$$C_R = C_r / (1 + \operatorname{tg}^2 \delta) = C_r \cos^2 \delta ; \quad (6.2)$$

$$C_r = C_R (1 + \operatorname{tg}^2 \delta) . \quad (7.2)$$

При малых потерях в конденсаторе:

$$\operatorname{tg}^2 \delta \ll 1; \quad r = R \operatorname{tg}^2 \delta ; \quad C_r = C_R . \quad (8.2)$$

В ряде случаев удобнее охарактеризовать свойства конденсатор по его добротности:

$$Q_c = \frac{1}{r\omega C_r} = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta} \quad (9.2)$$

Последовательная эквивалентная схема лучше описывает тот случай, когда потери конденсатора преобладают в его металлических обкладках, подводящих проводниках, в то время как параллельная эквивалентная схема относится к случаю преобладания потерь в диэлектрике.

Эквивалентная схема конденсатора, полученная для определенной частоты или некоторого диапазона частот, справедлива лишь для этих частот и не может служить источником информации о поведении конденсатора при других частотах. Это обстоятельство подтверждает необходимость тщательного изучения и измерения основных параметров конденсатора в широком диапазоне частот и температур. Анализ и изучение этих данных позволяют получить представление об эквивалентной схеме реального конденсатора в той или иной рабочей области частот.

Эффективная емкость конденсатора. Если включить конденсатор в цепь переменного тока частоты ω и подать на него напряжение U , то величина тока I , протекающего через него, будет определяться значением комплексного сопротивления z конденсатора, либо его комплексной проводимостью y на данной частоте $I = U/z = U y$, где

$$1/y = z = 1/(\omega C_{\text{эфф}}). \quad (10.2)$$

Емкость, определяющую значение z конденсатора на заданной частоте, принято называть эффективной или действующей емкостью конденсатора, т. е.

$$C_{\text{эфф}} = 1/(\omega z) = y/\omega. \quad (11.2)$$

В том случае, если конденсатор описывается последовательной эквивалентной схемой (см. рис. 8.2), то

$$z^2 = r^2 + \frac{1}{(\omega C_r)^2} \quad (12.2)$$

Учитывая (9.2), получим

$$z^2 = 1 + \frac{\text{tg}^2 \delta}{\omega C_r} \quad (13.2)$$

Подставив вместо z его значение из (11.2) и решив относительно $C_{\text{эфф}}$, получим:

$$C_{\text{эфф}} = \frac{C_r}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}} \quad (14.2)$$

Аналогично при параллельной схеме (см. рис. 9.2)

$$y^2 = \left(\frac{1}{R} \right)^2 + (\omega C_R)^2 \quad (15.2)$$

Учитывая (1.2), получим из (11.2):

$$C_{\text{эфф}} = C_R \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (16.2)$$

Этот же результат может быть получен, если в (13.2) подставить значение $C_{\text{эфф}}$, найденное из (11.2). Если конденсатор описывается схемой рис. 7.2. то

$$Z = \sqrt{r^2 + (1/\omega C_r - \omega L_c)^2}, \quad (17.2)$$

где L_c – индуктивность конденсатора, равная сумме всех индуктивностей, в том числе $L_{\text{вх}}$ и $L_{\text{вых}}$ (рис. 17.2, а), а величина y определяет суммарные потери, включающие $\gamma_{\text{вх}}$ и $\gamma_{\text{вых}}$. Значениями частичных емкостей $C_{\text{вх}}$ и $C_{\text{вых}}$ пренебрегаем. Можно показать, что индуктивность конденсатора приводит к завышению значения емкости при высоких частотах по сравнению с $C_{\text{эф}}$, найденной при низких частотах, когда величиной L_c можно пренебречь. Индуктивность современных конденсаторов достаточно мала и не превышает десятков нГн. Тем не менее возможность использования конденсаторов разных типов в высокочастотных фильтрах, помехозащитных и разрядных устройствах оценивается высокочастотной эффективной емкостью ($C_{\text{эф}}$).

Электрические конденсаторы обладают следующими основными характеристиками: допускаемое отклонение емкости, температурный коэффициент емкости, рабочее напряжение.

Допускаемое отклонение емкости – максимально допустимая разность между значениями измеренной и номинальной емкости конденсатора, выражается в

процентах. Как правило, используют конденсаторы с отклонениями $\pm 1 \pm 5$, ± 10 и $\pm 20\%$ номинальной емкости.

Температурный коэффициент емкости – относительное изменение емкости конденсатора при изменении температуры окружающей среды на 1°C .

Рабочее напряжение – напряжение, которое можно прикладывать к обкладкам конденсатора.

В случае конденсаторов с пленочным диэлектрическим слоем, емкость конденсатора определяется толщиной диэлектрической пленки. Для тонких пленок $d = 0,1-0,2$ мкм, для толстых пленок $d = 10-20$ мкм. Отсюда видно, что при равных размерах площадей взаимного перекрытия пластин емкость тонкопленочных конденсаторов больше, чем емкость толстопленочных конденсаторов. Однако тонкопленочные конденсаторы обладают малым рабочим напряжением, что обусловлено малым пробивным напряжением тонких пленок. При выборе диэлектрика для высокочастотных конденсаторов, т.е. для конденсаторов работающих на высоких частотах, необходимо учитывать диэлектрические потери в самой пленке. Причем это касается как тонких, так и толстых пленок. Диэлектрические потери характеризуются тангенсом угла диэлектрических потерь. На рисунке 10.2 показано устройство пленочного конденсатора с различными площадями обкладок. Видно, что площадь верхней обкладки меньше площади нижней обкладки. Такое различие в площадях обкладок конденсаторов встречается достаточно часто (см. рисунок 10.2). Конденсаторы постоянной емкости имеют конструкцию, не предусматривающую изменение емкости, в частности все пленочные конденсаторы – это конденсаторы постоянной емкости. Емкость конденсаторов переменной емкости в процессе эксплуатации изменять нельзя. На рисунке 11.2 показан внешний вид пленочного конденсатора, обкладки которого выведены на одну плоскость.

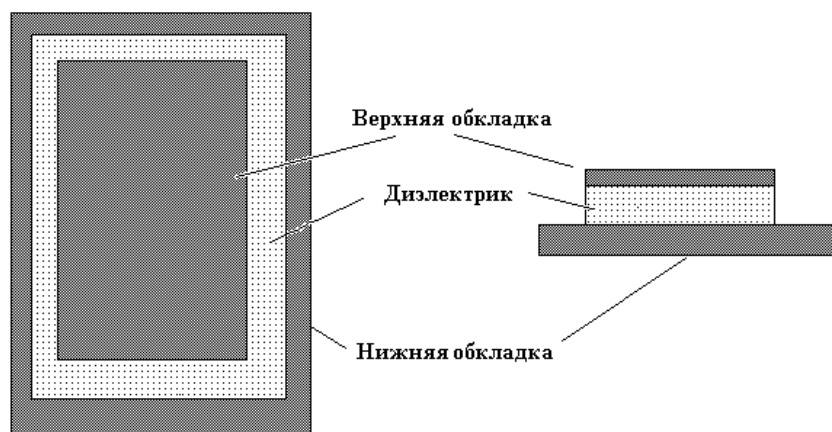


Рис. 10.2. Устройство пленочного конденсатора с различными площадями обкладок

Здесь: 1 – металлические обкладки, 2– слой диэлектрика, 3 –диэлектрическая подложка.

При дискретной подгонке пленочных конденсаторов их конструкцией предусматриваются специальные перемычки. На рисунке 12.2 показан внешний вид пленочного конденсатора. Здесь: 1– металлические обкладки, 2– слой диэлектрика, 3 –диэлектрическая подложка, 4 – подгоночные перемычки. Эти перемычки перерезают (например, лучом лазера), что позволяет удалить одну или несколько секций одной из обкладок пленочного конденсатора. Дискретная подгонка емкости пленочных конденсаторов обеспечивает точность номиналов $\pm(2 - 3) \%$

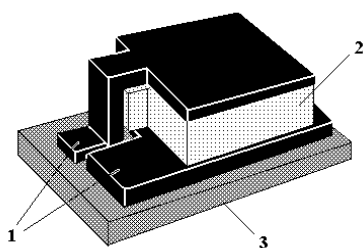


Рис. 11.2. Внешний вид пленочного конденсатора, обкладки которого выведены на одну плоскость

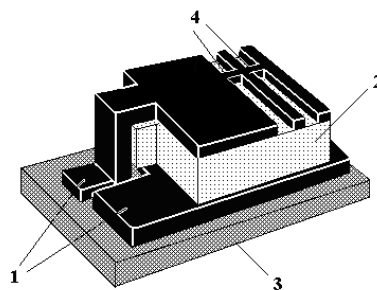


Рис. 12.2. Внешний вид пленочного конденсатора с подгоночными перемычками

В таблице 2 приведены некоторые параметры пленочных конденсаторов с различными типами диэлектриков.

Таблица 2.

Некоторые параметры тонкопленочных конденсаторов

Тип диэлектрика	C_0 , пФ/мм ²	$C_{\text{макс}}$, пФ ($S=2.5 \text{ мм}^2$)	δ , %	ТКЕ, пФ/°С
SiO	60	1500	±15	0,2
Al ₂ O ₃	1500	$4 \cdot 10^4$	±15	0,03
Ta ₂ O ₅	4000	10^5	±15	0,02

3.2. Пленочные катушки индуктивности.

Пленочные катушки индуктивности представляют собой плоские спирали, обычно прямоугольной формы, из хорошо проводящего материала. Наиболее часто используется алюминий или золото. На рисунке 13.2 показано устройство пленочной катушки индуктивности, а на рисунке 14.2 приведен внешний вид такой катушки. Здесь: 1– исходная диэлектрическая подложка, 2– токопроводящие полосы (из Au или Al).

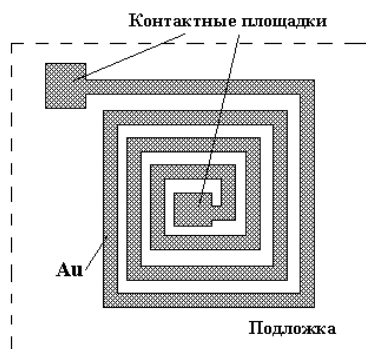


Рис. 13.2. Пленочная катушка индуктивности

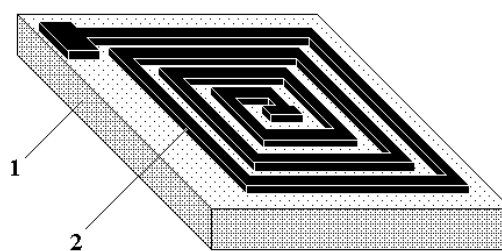


Рис. 14. 2. Внешний вид пленочной катушки индуктивности

По назначению катушки индуктивности подразделяются на катушки колебательных контуров, катушки связи, передающие электрические колебания из одной цепи в другую, и дроссели (высоких и низких частот), служащие для пропускания постоянного тока (или тока низкой частоты) и задержки токов высокой частоты.

Основные параметры катушек индуктивности – индуктивность, добротность и собственная емкость.

Индуктивность. Способность катушки индуктивности препятствовать изменению силы тока, протекающего через нее, носит название индуктивности этой катушки.

Добротность – отношение индуктивного сопротивления катушки к активному (сопротивлению потерь):

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{\omega L}{R}$$

Здесь: R – омическое сопротивление, L – индуктивность, ω – циклическая частота.

Добротность обуславливается главным образом конструкцией катушки и характеризует электрические потери в металле. Добротность катушки тем выше, чем меньше потери в ее обмотке.

Собственная емкость обусловлена емкостью обмотки и в высококачественных катушках индуктивности должна быть как можно меньше, так как она ухудшает качественные показатели катушки (добротность и стабильность).

Ширина металлических, токопроводящих полосок составляет 20-40 мкм, расстояние между полосками (просвет между витками) равняется 40-80 мкм. При таких геометрических размерах на площади 25 мм² можно получить индуктивность 250-500 нГн. Добротность пленочных катушек индуктивности, с повышением рабочей частоты, возрастает. Поэтому пленочные катушки успешно работают на частотах 3-5 ГГц. При этом число витков не превышает 3-4.

При необходимости изготовления пленочного трансформатора, входящего в состав пассивных компонентов интегральной схемы, создаётся две катушки индуктивности, расположенные друг над другом. При этом катушки разделяются дополнительным слоем диэлектрика. На рисунке 14.3.

показано устройство такого пленочного трансформатора. Здесь: 4 –исходная диэлектрическая подложка, на которой располагается одна из катушек

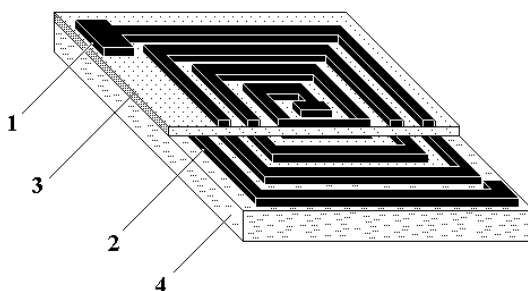


Рис. 14.3. Устройство пленочного трансформатора

индуктивности –1, 3– дополнительный изолирующий слой, 2 – ещё одна катушка индуктивности. Число витков каждой катушки определяется необходимым коэффициентом трансформации. К сложности изготовления такого трансформатора относится необходимость создания тонкого и равномерного по всей площади катушки, дополнительного слоя диэлектрика.

Контрольные вопросы.

1. Из каких материалов изготавливаются пленочные резисторы?
2. С каким поверхностным сопротивлением можно получить пленочные резисторы на основе нихрома?
3. Какими параметрами определяется удельное сопротивление пленочного резистивного слоя?
4. С какой целью используются резисторы зигзагообразной формы?
5. Какими методами осуществляется подгонка параметров пленочных резисторов?
6. Что представляет собой пленочный электрический конденсатор?
7. Что показывает эффективная емкость конденсатора?
8. Какими основными характеристиками обладают электрические конденсаторы?
9. Что представляют собой пленочные катушки индуктивности?
10. Каковы основные характеристики катушек индуктивности?
11. Как устроен пленочный трансформатор?

ГЛАВА III

Полупроводниковые пассивные элементы

Транзисторы, входящие в состав интегральных микросхем, получили название - интегральные транзисторы. Основой большинства интегральных микросхем являются транзисторы типа $n-p-n$. На рисунке 1.3. показана наиболее широко применяемая структура интегрального биполярного транзистора, изготовленного на основе кремния. Здесь: 1 – исходная подложка кремния имеющая p - тип проводимости, 2 – область коллектора имеющая n - тип проводимости, 3 – область базы, имеющая p - тип проводимости, 4 – область эмиттера, n^+ - типа проводимости, 5 – защитная пленка из диоксида кремния, 6 –металлические выводы эмиттера , базы и коллектора, 7 – n^+ область коллектора. Как видно из рисунка, все элементы транзистора – эмиттер, коллектор и база изготовлены при помощи диффузии различных примесей через одну из поверхностей кристалла, а именно через верхнюю поверхность. На этой же поверхности сформированы и выводы эмиттера, коллектора и базы.

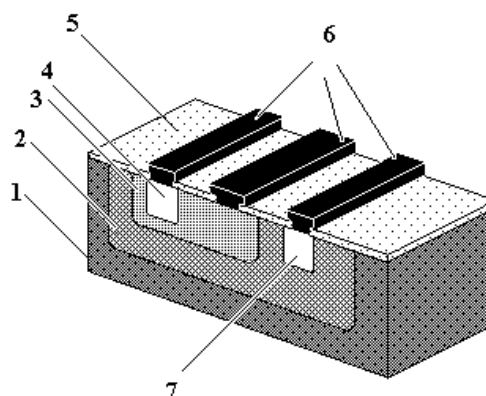


Рис. 1.3. Структура биполярного транзистора

3.1. Полупроводниковые диффузионные резисторы

В настоящее время основу диффузионных резисторов составляет один из диффузионных слоев, расположенных в изолированном кармане интегрального транзистора. При этом могут быть использованы любые из диффузионных слоев: эмиттерный, базовый или коллекторный. Наиболее часто используется базовый слой транзистора, к которому создаются два омических контакта. На рисунке 2.3 показано устройство интегрального биполярного транзистора, базовая область которого используется в качестве резистора. Здесь: 1 – токосъемные металлические (как правило алюминиевые) электроды; 2 – защитное диэлектрическое (как правило используется диоксид кремния) покрытие; 3 – базовая область транзистора; 4 – эмиттерная область транзистора. Токосъемные омические контакты к областям эмиттера и базы отсутствуют. На рисунке 3.3. показано устройство диффузионного резистора полосковой формы, располагаемого так же в базовой области транзистора. На этом рисунке: 1 – токосъемные металлические электроды; 2 – область

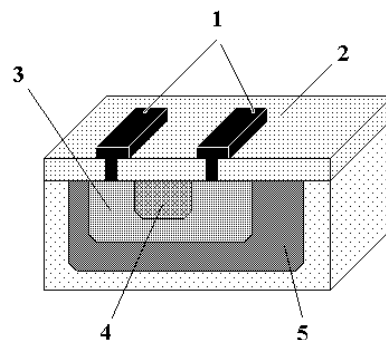


Рис. 2.3. Диффузионный резистор, расположенный в базовой области транзистора

диффузионного резистора; 3 – базовая область транзистора. В этом случае эмиттерный диффузионный слой отсутствует, а токосъемные контакты изготавливаются только для самого резистора. Как видно из рисунка, область

диффузионного резистора представляет собой протяженную полосу. Это и дало название – диффузионный резистор полосковой формы.

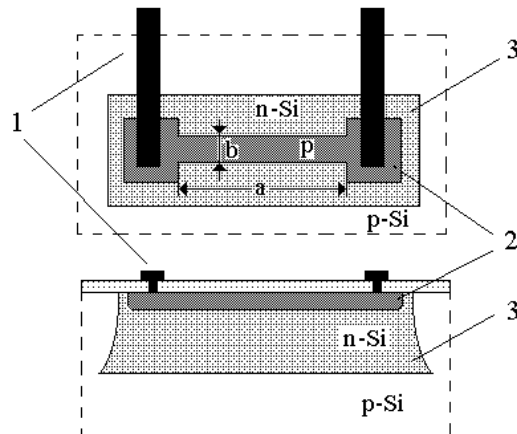


Рис. 3.3. Диффузионный резистор полосковой формы

Для такой полосковой конфигурации сопротивление диффузионного резистора записывается в виде

$$R = \rho \frac{a}{bc} . \quad (1.3)$$

Следует отметить, что длина и ширина диффузионного резистора полосковой конфигурации ограничены. Длина a не может превышать размеров самого транзистора, т. е. лежит в пределах 5 -10 мкм. Ширина b ограничена возможностями фотолитографии, боковой диффузией, а также допустимым разбросом (10–20%). Практически минимальная ширина составляет 2-3 мкм. Используя выражение (1.3), подставляя в него значения удельного сопротивления используемого базового слоя $\rho = 200 \text{ Ом/ см}$ и $a/bc = 100$, получим максимальную величину сопротивления $R = 20 \text{ кОм}$. Если необходимо увеличить величины сопротивления резистора, то используется не полосковая, а зигзагообразная форма диффузионного резистора. На рисунке 4.3 показано устройство диффузионного резистора зигзагообразной формы, располагаемый в базовой области транзистора. Здесь: 1–

токосъемные металлические электроды; 2 – область базы транзистора. При использовании резистора такой формы, его сопротивлению может быть

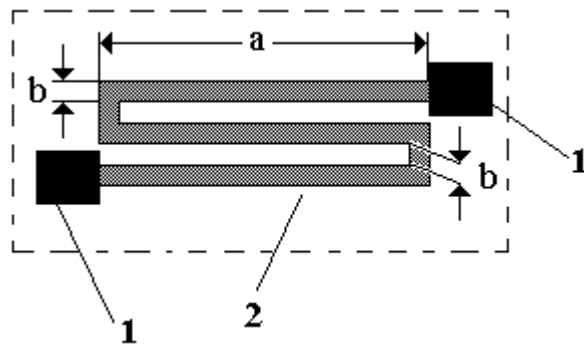


Рис. 4.3. Диффузионный резистор зигзагообразной формы

рассчитано с помощью следующего выражения:

$$R = \rho \left(\frac{\sum a}{bc} + n + 1,3 \right) \quad (2.3)$$

Здесь: ρ – удельное сопротивление используемого базового слоя; n – количество «петель» (на рисунке $2\ n = 2$), а слагаемое 1,3 учитывает неоднородность диффузионного резистора в районе омических контактов. Количество «петель» ограничено площадью, отводимой под диффузионный резистор. Обычно $n < 3$, в противном случае площадь резистора может достигать 15-20% площади всего транзистора. Максимальное сопротивление диффузионного резистора зигзагообразной формы, располагаемый в базовой области транзистора, при $n = 2-3$, составляет 50-60 кОм.

Температурный коэффициент сопротивления диффузионного резистора, выполненного на основе базового слоя, составляет 0,15- 0,30 % / °С, в зависимости от значения удельного сопротивления базового слоя. Разброс сопротивлений относительно расчетного номинала составляет $\pm (15-20)\%$.

Если необходимо изготовить резисторы с омическими сопротивлениями большими 50 – 60 кОм, используется технология пинч-резистора. Структура пинч-резистора показана на рисунке 5.3. Здесь: 1– токосъемные

металлические электроды; 2— сильно легированный n^+ слой; 3—защитное диэлектрическое покрытие; 4 – область базы транзистора, 5 – коллекторная область транзистора. Из рисунка видно, что для изготовления пинч-резистора используется донная, слабо легированная часть p - слоя базы. Для этого в эту область производится дополнительная диффузия донорной примеси, создающая n^+ слой. По сравнению с обычным диффузионным резистором, пинч-резистор имеет меньшую площадь сечения и, следовательно, большее удельное сопротивление. Поэтому у пинч - резисторов удельное сопротивление слоя обычно составляет 2-5кОм / см и более, в зависимости от толщины. При таком значении удельного сопротивления, максимальное сопротивление пинч-резистора может достигать значений 200- 300 кОм даже при простейшей полосковой конфигурации.

К недостаткам пинч-резисторов относятся следующее: большой разброс номиналов (который может составлять 50% из-за сильного влияния изменения толщины p -слоя); большой температурный коэффициент сопротивления (0,3-0,5 % / °C), что обуславливается меньшей степенью легирования донной части базового p - слоя.

Если необходимо изготовить резисторы с омическими сопротивлениями меньшими 100 Ом, используют низкоомную эмиттерную область транзистора.

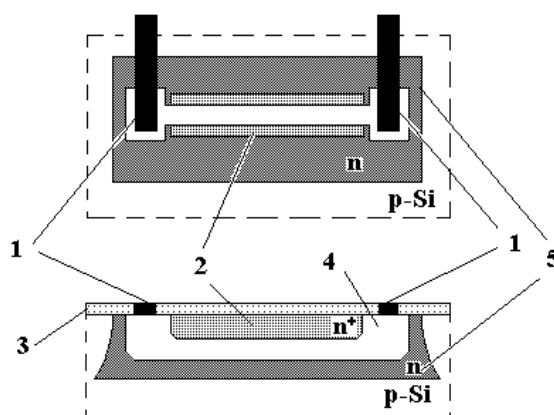


Рис. 5.3. Структура пинч - резистора

Удельное сопротивление этой области составляет 5-15 Ом / см, при таких значениях удельного сопротивления получаются резисторы обладающие значениями электрических сопротивлений 3-5 Ом с температурным коэффициентом 0,01 - 0,02 % / °С.

3.2. Полупроводниковые ионно - легированные резисторы

В последнее время большее распространение получили ионно-легированные резисторы. Такие резисторы, в отличие от диффузионных резисторов, изготавливаются не при помощи диффузии, а при помощи локальной ионной имплантации примеси. Структура ионно-легированного резистора такая же, как у диффузионного резистора, но р -слоя значительно меньше глубины базового слоя и составляет всего 0,2 -0,3 мкм. Кроме того, ионная имплантация позволяет обеспечить сколь угодно малую концентрацию примеси в имплантированном слое. Это дает возможность получения высоких удельных сопротивлений слоя - до 10-20кОм / см. При этом номиналы изготавливаемых сопротивлений могут составлять сотни килоом. Температурный коэффициент сопротивления ионно-легированных резисторов меньше, чем у диффузионных резисторов, и лежит в пределах 3-5 % / °С, а разброс значений сопротивлений не превышает (5-10)%. Поскольку глубина имплантированного слоя мала, к нему трудно осуществить омические контакты. Поэтому с обеих сторон резистивного слоя, на этапе базовой

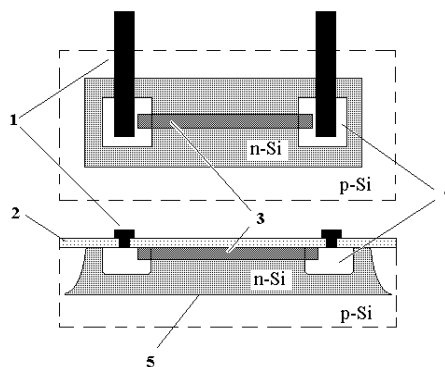


Рис. 6.3. Структура ионно-легированного резистора

диффузии, создаются дополнительные диффузионные р - слои, к которым, в последствии, осуществляется омический контакт. На рисунке 6.3. приведена наиболее распространенная структура ионно-имплантированного резистора.

Здесь: 1 – токосъемные металлические электроды; 2 – защитное диэлектрическое покрытие (как правило, используется слой SiO_2) сильно легированный n^+ слой; 3 – ионно - имплантированный слой; 4 – дополнительные диффузионные р - слои; 5– область базы используемого интегрального транзистора.

К недостаткам ионно-легированных резисторов относится необходимость создания дополнительных диффузионных р - слоёв.

Контрольные вопросы.

1. Что составляет основу интегральных диффузионных резисторов?
2. В каких областях интегральных транзисторов могут быть расположены диффузионные резисторы?
3. Для чего используется зигзагообразная форма диффузионного резистора?
4. В каких случаях используется технология пинч-резистора?
5. Какими преимуществами обладают ионно-легированные резисторы?
6. Чем структура ионно-имплантированного резистора отличается от структуры диффузионного резистора?
7. В чем заключаются основные недостатки пинч-резисторов?
8. В чем заключаются основные недостатки ионно-имплантированных резисторов?
9. В чем различие между диффузионными резистором полосковой и зигзагообразной формы?

ГЛАВА IV

Пассивные элементы на основе контактов металл– полупроводники на основе р - n переходов

1.4. Интегральные конденсаторы основе контактов металл – полупроводник

При подаче обратного напряжения U , на контакт металл–полупроводник, высота потенциального барьера, обусловленного контактной разностью потенциалов φ_0 , возрастая на величину приложенного напряжения U , становится равной $\varphi_0 + qU$. При этом возрастает и величина слоя объемного заряда полупроводника L . Так как, объемный заряд создается неподвижными, связанными с кристаллической решеткой, ионизированными атомами донорной или акцепторной примеси, то увеличение объемного заряда может быть обусловлено только расширением его в глубь полупроводника. Другими словами, при увеличении обратного напряжения, приложенного к контакту, расширяется область полупроводника $L(U)$ в которой практически отсутствуют подвижные носители заряда - электроны или дырки. При этом концентрация электронов в металле и концентрация носителей заряда в глубине полупроводника – в области электрической нейтральности – практически не изменяется. Значит контакт металл – полупроводник можно рассматривать как плоский конденсатор, обкладками которого являются металл и полупроводник, разделенные слоем объемного заряда. Рассмотрим для примера контакт металл – полупроводник n- типа проводимости, на который подано обратное напряжение U (рис. 1.4.) Пусть работа выхода полупроводника χ_1 меньше работы выхода металла χ_2 , т.е. выполняется условие $\chi_1 < \chi_2$. При этом в приграничной области полупроводника, на границе раздела с металлом,

формируется слой объемного заряда, обедненный электронами. Ширина L_n этого слоя зависит от величины напряжения, приложенного к контакту, т.е. $L_n = L_n(U)$ и с увеличением величины прикладываемого напряжения, L – возрастает. Зависимость L_n от величины приложенного напряжения для контакта металл – полупроводник имеющего площадь равную единице, может быть выражена при помощи следующего соотношения:

$$L_n = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(\varphi_0 + qU)}{qn_0}} \quad (1.4)$$

отсюда, возведя в квадрат и выделяя член в скобках, получим:

$$\frac{L_n^2 qn_0}{2\epsilon\epsilon_0} = \varphi_0 + qU \quad (2.4)$$

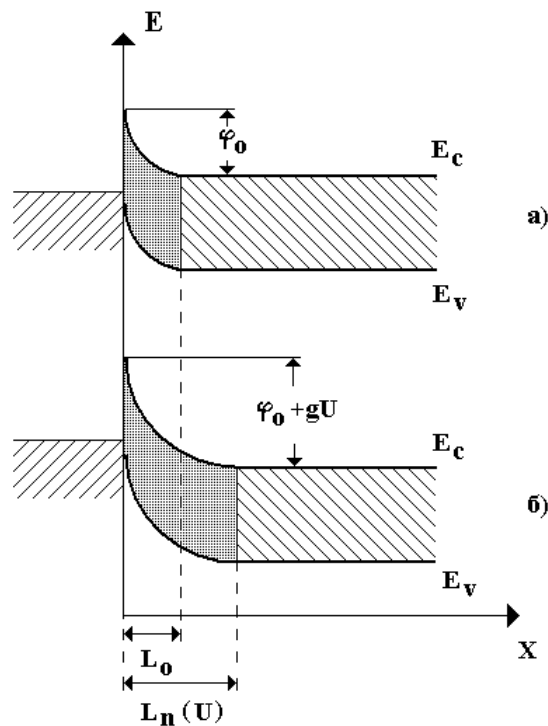


Рис. 1.4. Изменение ширины слоя объемного заряда L_n полупроводника в контакте металл – полупроводник при подаче обратного напряжения U

Пусть приложенное к контакту напряжение достаточно большое, т.е. $qU \gg \varphi_0$. При выполнении этого условия падение напряжения на контакте можно выразить следующим соотношением:

$$U = \frac{L_n^2 q n_0}{2 \varepsilon \varepsilon_0} \quad (3.4)$$

Величина заряда обедненного слоя пропорциональна концентрации свободных электронов n_0 и толщине этого слоя L_n

$$Q = q n_0 L_n \quad (4.4)$$

Электрическая емкость плоского конденсатора определяется как:

$$C = \frac{dQ}{dU} \quad (5.4)$$

Учитывая, что величина объемного заряда и падение напряжения на нем зависят от толщины L_n , найдем изменение dQ и dU при изменении dL_n

$$dQ = q n_0 dL_n; \quad dU = \frac{q n_0}{2 \varepsilon \varepsilon_0} 2 L_n dL_n = \frac{q n_0}{\varepsilon \varepsilon_0} L_n dL_n \quad (6.4)$$

Подставив полученные значения в (5.4), получим следующее выражение:

$$C = \frac{q n_0 dL_n \varepsilon \varepsilon_0}{q n_0 L_n dL_n} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{L_n} \quad (7.4)$$

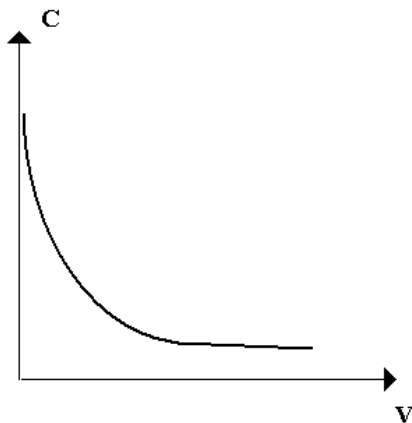
Выражение (7.4) есть выражение для емкости плоского конденсатора толщиной L_n , имеющего единичную площадь. Умножив (7.4) на площадь контакта S , получим следующую формулу для емкости плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{L_n}, \quad (8.4)$$

где L_n – есть толщина слоя объемного заряда. Толщина слоя объемного заряда полупроводника контакта металл – полупроводник зависит от величины приложенного к контакту напряжения $L_n = L_n(U)$ зависимость (1.4). Используя эту зависимость и выражение (8.4) получим аналитическое выражение, описывающее поведение емкости контакта металл – полупроводник при изменении величины приложенного к контакту напряжения. Из приведенной зависимости видно, что при увеличении обратного напряжения U , приложенного к контакту, емкость контакта уменьшается по параболическому закону:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{\sqrt{\frac{2 \varepsilon \varepsilon_0 (\varphi_0 + qU)}{q n_0}}} \quad (9.4)$$

На рисунке 2.4. показана типичная вольт-фарадная характеристика контакта металл – полупроводник.



**Рис. 2.4. Вольт фарадная характеристика
контакта
металл - полупроводник**

Интегральные конденсаторы на основе контакта металл–полупроводник могут быть расположены в любом слое как биполярного так и униполярного интегрального транзистора. В качестве примера на рисунке 3.4. показано устройство биполярного интегрального транзистора, в каждом из слоев которого расположен интегральный конденсатор на основе контакта металл–полупроводник. Здесь: 1 – область эмиттера, 2 – область базы, 3–

область коллектора, 4– защитный диэлектрический слой (наиболее широкое распространение получили диэлектрические слои на основе SiO_2), 5– омические контакты из Al, 6- выпрямляющие контакты из Au. Использование эмиттерного слоя позволяет получать конденсаторы с большим значение емкости, по сравнению с конденсаторами, изготовленными в коллекторном слое. Однако конденсаторы, изготовленные на базе коллекторного слоя, обладают значительно большей величиной пробивного напряжения. На рисунке 4.4. показано устройство униполярного интегрального транзистора, в области стока которого расположен интегральный конденсатор на основе контакта металл-полупроводник. Здесь: 1– слой подзатворного диэлектрика, 2 – омические контакты из Al, 3 – слой токопроводящего канала n- типа проводимости, 4 – исходная полупроводниковая подложка p- типа

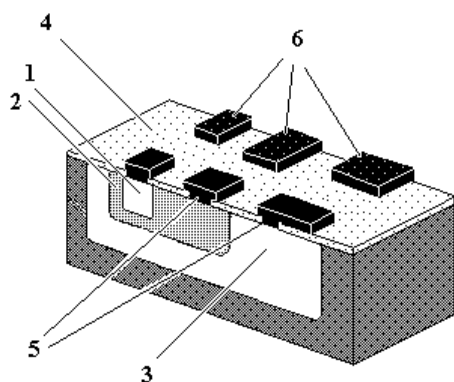


Рис. 3.4. Расположение интегральных конденсаторов в областях биполярного интегрального транзистора

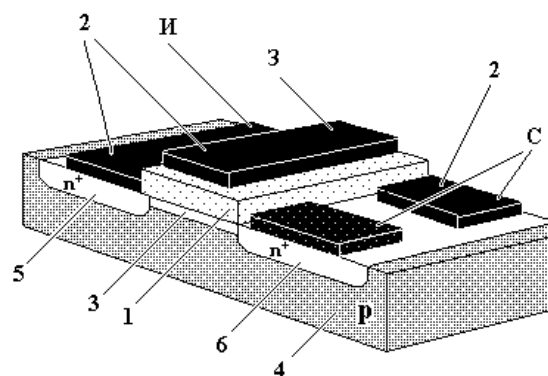


Рис. 4.4. Расположение интегрального конденсатора в области стока униполярного интегрального транзистора

проводимости, 5 – область истока транзистора, 6 – область стока, И, 3– металлизация истока и затвора (омические контакты из Al), С – обкладки интегрального конденсатора. Причем одна из обкладок выполнена из Al (омический контакт), а другая выполнена из Au (выпрямляющий контакт). Аналогичным образом, конденсатор на основе контакта металл–полупроводник, может быть расположен и в области истока.

2.4. Интегральные конденсаторы на основе р - n переходов

Рассмотрим р - n переход, на который подано постоянное напряжение U_0 и малое переменное напряжение $U_1 \exp j \omega t$. Пусть, для определенности, постоянное напряжение U_0 подано в прямом направлении, а амплитуда переменного напряжения U_1 меньше kT / q . Если величина U_0 не слишком велика, то все приложенное напряжение падает на р - n переходе. При выполнении этих условий, полное напряжение, приложенное к переходу, можно записать так:

$$U = U_0 + U_1 \exp j \omega t \quad (10.4) \quad \text{где} \quad U_1 \ll \frac{kT}{q}, \quad \text{т.е.} \quad \frac{qU_1}{kT} \ll 1 \quad (11.4)$$

Пусть частота переменного напряжения не слишком велика и время пролета носителей заряда через р - n переход намного меньше $1/\omega$. В этом случае концентрация носителей заряда на границах перехода следует за изменениями напряжения:

$$p(L_n) = p_n \exp \frac{qU}{kT} \quad n(L_p) = \exp \frac{qU}{kT} \quad (12.4)$$

Рассмотрим изменение концентрации, инжектированных из р- области дырок, на границе n - области р - n перехода:

$$p(L_n) = p_n \exp \frac{q}{kT} [U_0 + U_1 \exp j \omega t] = p_n \exp \frac{qU_0}{kT} \exp \frac{qU_1 \exp j \omega t}{kT} \quad (13.4)$$

Для упрощения полученного соотношения, воспользуемся известным выражением:

$$\exp a = 1 + a + \frac{a^2}{2} + \dots$$

При этом последний сомножитель в (13.4) можно записать в следующем виде:

$$\exp \frac{qU_1 \exp j\omega t}{kT} = 1 + \frac{qU_1}{kT} \exp j\omega t \quad (14.4)$$

Используя выражения (13.4) и (14.4), концентрацию носителей заряда на границах $p - n$ перехода, к которому приложено как постоянное, так и переменное напряжение, можно выразить так:

$$p(L_n) = p_n \exp \frac{qU_0}{kT} \left(1 + \frac{qU_1}{kT} \exp j\omega t \right) \quad (15.4)$$

$$n(-L_p) = n_p \exp \frac{qU_0}{kT} \left(1 + \frac{qU_1}{kT} \exp j\omega t \right) \quad (16.4)$$

Для того, чтобы найти распределения носителей заряда по всей области перехода в каждый момент времени, нужно решить известное уравнение непрерывности для дырок и для электронов. Это уравнение, для диффузионного тока дырок, имеет вид:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = - \frac{p - p_n}{\tau} + D_p \frac{d^2 p}{dx^2} \quad (17.4)$$

Запишем уравнение (17.4) в более удобном для решения виде:

$$D_p \frac{d^2 p}{dx^2} = \frac{p - p_n}{\tau} + \frac{\partial p}{\partial t} \quad (18.4)$$

Концентрацию дырок, в любой плоскости $p - n$ перехода, можно рассматривать как сумму двух составляющих. Это составляющая концентрации не зависящая от времени p_0 , которая определяется постоянным напряжением и составляющая концентрации зависящая от времени $p_1 \exp j\omega t$, определяемая переменным напряжением:

$$p = p_0 + p_1 \exp j\omega t \quad (19.4)$$

Дифференцируя по координате (19.4), получим:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = j\omega p_1 \exp j\omega t \quad (20.4)$$

Подставив (19.4) и (20.4) в (18.4), получим:

$$D_p \frac{d^2}{dx^2} (p_0 + p_1 \exp j\omega t) = \frac{p_0 + p_1 \exp j\omega t - p_n}{\tau} + p_1 j\omega \exp j\omega t \quad (21.4)$$

Уравнение (21.4) описывает распределение концентрации дырок, которые инжектированы в n - область при приложении к p - n переходу как постоянного, так и переменного напряжения. Распределение концентрации дырок, инжектированных в n - область при приложении к p - n переходу переменного напряжения, можно найти, решая уравнение неразрывности для переменных составляющих концентрации, т.е. для концентрации зависящей от времени:

$$D_p \frac{d^2}{dx^2} (p_1 \exp j\omega t) = \frac{p_1 \exp j\omega t}{\tau} + p_1 j\omega \exp j\omega t \quad (22.4)$$

Запишем это уравнение в следующем виде:

$$D_p \tau_p \frac{d^2 p_1}{dx^2} = p_1 + j\omega p_1 \tau \quad (23.4)$$

Введя обозначения:

$$Z_p^2 = D_p \tau, \quad \frac{d^2 p_1}{dx^2} = \frac{p_1 + j\omega p_1 \tau}{Z_p^2} \quad \text{и} \quad Z_1^2 = \frac{Z_p^2}{1 + j\omega \tau} \quad (24.4)$$

запишем (23.4 62) в виде:

$$\frac{d^2 p_1}{dx^2} = \frac{p_1}{Z_1^2} \quad (25.4)$$

Уравнение (25.4) представляет собой однородное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами. Общий вид решения этого уравнения можно записать так:

$$p_1(x) = C_1 \exp\left(-\frac{x}{Z_1}\right) + C_2 \exp\left(\frac{x}{Z_1}\right) \quad (26.4)$$

Для нахождения постоянных коэффициентов C_1 и C_2 воспользуемся тем, что на больших расстояниях от границы раздела p и n областей, концентрация инжектированных дырок пренебрежимо мала, т.е. при $x \rightarrow \infty$, $p_1(x) = 0$, следовательно, из (26.3) получим $C_2 = 0$. На границе области электрической нейтральности, т.е. в плоскости $x = L_n$, концентрация инжектированных дырок, в соответствии с (26.4), может быть записана так:

$$p_1(x) = C_1 \exp\left(-\frac{L_n}{Z_1}\right) \quad (27.4)$$

Из (27.4) находим значение C_1 и, подставляя его в (26.4), получим:

$$p_1(x) = p_1(L_n) \exp\left(\frac{L_n}{Z_1}\right) \exp\left(-\frac{x}{Z_1}\right) = p_1(L_n) \exp\left(-\frac{x - L_n}{Z_1}\right) \quad (28.4)$$

Подставив в (28.4), вместо $p_1(L_n)$, выражение (15.4), запишем распределение концентрации дырок, инжектированных в n -область за счет переменного напряжения:

$$p_1(x) = p_n \exp\left(\frac{qU_0}{kT} - \frac{qU_1}{kT}\right) \exp(j\omega t) \exp\left(-\frac{x - L_n}{Z_1}\right) \quad (29.4)$$

Учитывая, что инжектированные дырки распространяются по n области p - n перехода, в основном, за счет диффузии, найдем плотность диффузионного тока дырок в плоскости $x = L_n$:

$$j_p(L_n) = -qD_p \frac{dp_1}{dx} \quad (30.4)$$

$$j_p(L_n) = \frac{qp_n D_p}{Z_1} \exp \frac{qU_0}{kT} \frac{qU_1}{kT} \exp j\omega t \quad (31.4)$$

или в более удобном виде:

$$j_p(L_n) = \frac{qp_n D_p}{Z_p} \exp \frac{qU_0}{kT} \frac{qU_1}{kT} \exp j\omega t (1 + j\omega\tau)^{\frac{1}{2}} \quad (32.4)$$

Разложим в ряд выражение в скобках в уравнении (32.4). Это можно сделать при выполнении условия $\omega\tau \ll 1$, т.е. в случае низких частот:

$$(1 + j\omega\tau)^{\frac{1}{2}} \approx \left(1 + \frac{1}{2}j\omega\tau\right)$$

и подставим полученное соотношение в (32.4):

$$j_p(L_n) = \frac{qp_n D_p}{Z_p} \exp \frac{qU_0}{kT} \frac{qU_1}{kT} \exp j\omega t \left(1 + \frac{1}{2}j\omega\tau\right) \quad (33.4)$$

Выражение (33.4) представляет собой плотность переменного дырочного тока протекающего через переход при приложении к нему как постоянного U_0 , так и переменного $U_1 \exp j\omega t$ напряжения. Плотность переменного электронного тока, протекающего через переход, находится аналогично. Для простоты будем считать дырочную составляющую тока намного больше электронной составляющей, т.е. $j_p \gg j_n$. Далее воспользуемся понятием дифференциальной проводимости, т.е. проводимости на переменном сигнале. По определению дифференциальная проводимость это есть отношение изменения переменного тока dj к вызвавшему его изменению переменного напряжения dU :

$$Y = dj / dU \quad (34.4)$$

Из (33.4), с учетом (34.4), получим выражение для дифференциальной проводимости (на единицу площади) $p - n$ перехода:

$$Y_p(L_n) = \frac{qp_n D_p}{Z_p} \exp \left(\frac{qU_0}{kT} \right) \frac{q}{kT} \left(1 + \frac{1}{2} j\omega\tau \right) \quad (35.4)$$

Как видно из (35.4), дифференциальная проводимость $p - n$ перехода имеет как активную, так и реактивную составляющие. Причем реактивная составляющая проводимости, равная:

$$B = \frac{qp_n D_p}{Z_p} \exp \left(\frac{qU_0}{kT} \right) \frac{q}{2kT} \omega\tau \quad (36.4)$$

имеет емкостной характер. Это означает, что наиболее простая эквивалентная схема $p - n$ перехода может быть представлена в виде параллельного соединения сопротивления R и емкости C .

$$R = \frac{1}{G} = \left(\frac{qp_n D_p}{Z_p} \exp \left(\frac{qU_0}{kT} \right) \frac{q}{kT} \right)^{-1} \quad (37.4)$$

$$C = \frac{B}{\omega} = \frac{qp_n D_p}{Z_p} \exp \left(\frac{qU_0}{kT} \right) \frac{q}{2kT} \tau \quad (38.4)$$

Сопротивление R есть сопротивление слоя полупроводника толщиной L_n с концентрацией дырок $p_n \exp (qU / kT)$. Возникновение емкости C связано с накоплением зарядов – дырок и электронов в соответствующих областях перехода. Действительно, при приложении к переходу напряжения в прямом направлении высота потенциального барьера между p и n областями понижается и носители заряда диффундируют в области с противоположной концентрацией. Так, дырки из слоя области p , расположенного вблизи границы раздела, диффундируют в n область, а электроны из близлежащих слоев n области, диффундируют в область p .

Продиффундировавшие носители заряда частично рекомбинируют с основными носителями, однако большая их часть, не успевая рекомбинировать, формирует объемные заряды противоположных знаков. Образование двух слоев зарядов противоположных знаков и является ответственным за наличие емкостных свойств р - n перехода. Образование зарядов в соответствующих областях обусловлено диффузионными процессами, поэтому емкость перехода при подаче на него прямого напряжения получила название диффузионная емкость. Из (37.4) и (38.4) видно, что величина диффузионной емкости р - n перехода прямо пропорциональна времени жизни не основных носителей заряда τ :

$$C = R^{-1} \frac{\tau}{2} \quad (39.4)$$

При отсутствии рекомбинации, заряд дырок, диффундировавших в n - область р-n перехода, при подаче на него прямого напряжения U может быть выражен так:

$$Q = q \int_0^{\infty} \Delta p dx = q p_n L_p \exp \frac{qU}{kT} \quad (40.4)$$

Выражение для емкости плоского конденсатора: $C = dQ / dU$, здесь

$$\frac{dQ}{dU} = \frac{q^2 p_n L_p}{kT} \exp \frac{qU}{kT} \quad (41.4)$$

подставив (41.4) в выражение для емкости плоского конденсатора и сравнив с выражением (38.4), увидим, что (38.4) отличается от (41.4) множителем 2. Это различие объясняется тем, что в случае диффузионной емкости, диффузионные заряды электронов и дырок не разделены пространственно с зарядами основных носителей и в каждой точке объема частично нейтрализуют друг друга.

При подаче обратного напряжения на $p - n$ переход, высота потенциального барьера Φ между p и n областями и суммарная ширина слоя объемного заряда L возрастают. Действительно, при подаче обратного напряжения, под действием сил электрического поля, свободные носители заряда в p и n областях оттесняются от границы раздела в глубь соответствующих областей. Оттеснение подвижных носителей заряда от границы раздела p и n областей приводит к нарушению условия электрической нейтральности и к формированию объемных фиксированных зарядов. При не очень большом различии между концентрациями электронов в n области и дырок p в области объемный заряд создается не скомпенсированными ионизированными примесями. В n -области это положительный заряд ионизированных доноров, в p области – отрицательный заряд

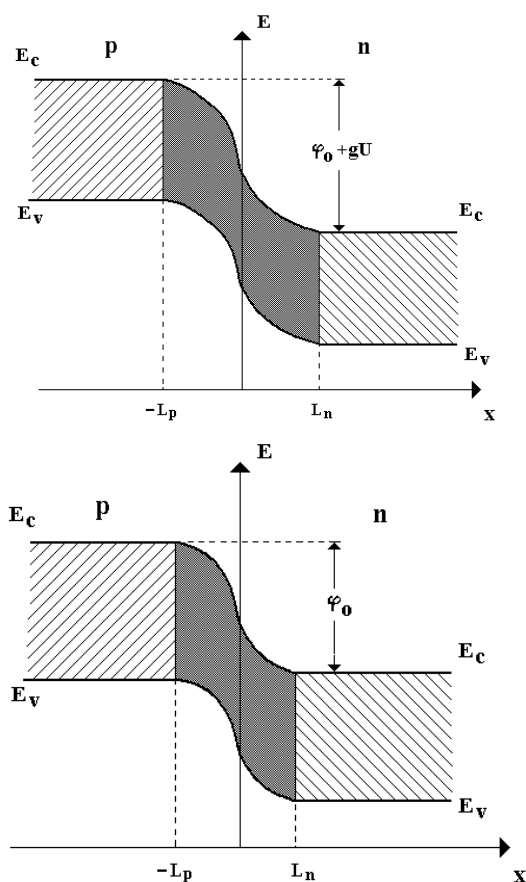


Рис. 5.4. Энергетические диаграммы $p - n$ перехода

ионизированный акцепторов. На рисунке 5.4. приведены энергетические зонные диаграммы $p-n$ перехода при отсутствии внешнего напряжения и при приложении обратного напряжения U . Видно, что при увеличении обратного напряжения высота потенциального барьера и ширина слоя объемного заряда увеличиваются. Величину объемного заряда в p и в n областях можно выразить через концентрацию электронов n и дырок p и через толщины слоев L_n L_p в n и в p областях. Действительно,

$$Q_n = qnL_n, \quad Q_p = -qpL_p \quad (42.4)$$

Толщины слоев L_n и L_p можно выразить через полную толщину L перехода:

$$L_n = L \frac{p}{n+p}, \quad L_p = L \frac{n}{n+p} \quad (43.4)$$

Далее, используя (42.4) и (43.4), получим величины объемных зарядов в каждой из областей перехода:

$$Q_n = qL \frac{np}{n+p}, \quad Q_p = -qL \frac{np}{n+p} \quad (44.4)$$

Учитывая, что при изменении напряжения изменяется ширина слоя объемного заряда L , изменение величины заряда dQ можно записать в виде:

$$dQ = q \frac{np}{n+p} dL \quad (45.4)$$

Падение напряжения на переходе запишем так:

$$U = \frac{q}{2\epsilon\epsilon_0} \frac{np}{n+p} L^2 \quad (46.4)$$

Здесь: ϵ – диэлектрическая проницаемость полупроводника, ϵ_0 – электрическая постоянная, и считается, что $qU \gg \varphi_0$, т.е. обратное напряжение достаточно большое.

Изменение напряжения на р - n переходе найдем, дифференцируя (46.4) по L , т.е. по толщине перехода:

$$dU = \frac{q}{\epsilon \epsilon_0} \frac{np}{n+p} L dL \quad (47.4)$$

Далее, используя выражение для емкости плоского конденсатора, соотношения (45.4) и (47.4) получим:

$$C = \frac{dQ}{dU} = \frac{\epsilon \epsilon_0}{L} \quad (48.4)$$

Выражение (48.4) показывает, что при подаче обратного напряжения на р- n переход он приобретает емкостные свойства, т.е. ведет себя как плоский конденсатор с толщиной диэлектрика L . Учитывая, что толщина слоя объемного заряда L зависит от величины приложенного напряжения U ,

$$L = \left(\frac{2 \epsilon \epsilon_0}{q} \frac{n_n + p_p}{n_n p_p} (\varphi_0 + U) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (49.4)$$

емкость р - n перехода можно записать так:

$$C = \epsilon \epsilon_0 S \sqrt{\frac{np}{n+p} \frac{2q}{\varphi_0 + U}} \quad (50.4)$$

здесь: S – площадь перехода.

Емкость р - n перехода, при подаче на него обратного напряжения, обусловлена увеличением высоты потенциального барьера между р и n областями, поэтому она получила название – барьерная емкость. Следует отметить, что емкость резкого р - n перехода, при подаче на него обратного

напряжения смещения, обратно пропорциональна корню квадратному из поданного напряжения и определяется величиной концентрации примесей.

В полупроводниковых интегральных микросхемах роль конденсаторов выполняют обратные смещенные переходы р - n биполярных интегральных транзисторов. У таких конденсаторов хотя бы один из слоев является диффузионным, т.е. создан при помощи диффузии, поэтому конденсаторы получили название – диффузионные конденсаторы. Типичная структура диффузионного конденсатора, в котором используется переход коллектор-

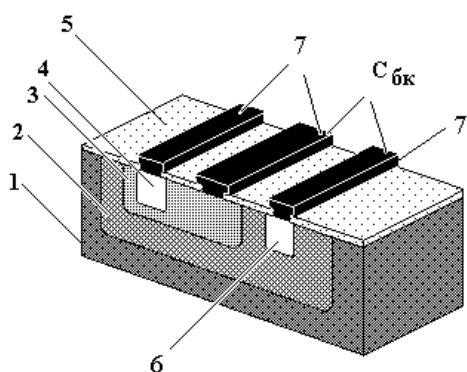


Рис. 6.4. Структура диффузионного конденсатора, в котором используется переход коллектор-база

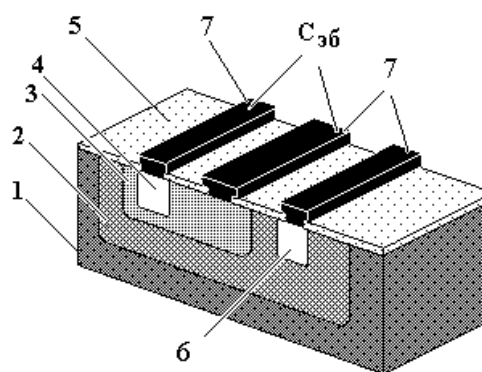


Рис. 7.4. Структура диффузионного конденсатора, в котором используется переход эмиттер-база

база ($C_{бк}$), показана на рисунке 6.4. Здесь: 1– исходная полупроводниковая подложка р-типа проводимости, 2– область коллектора интегрального транзистора, имеющая n- тип проводимости, 3– область базы, р-типа проводимости, 4 – область эмиттера, имеющая n^+ -тип проводимости, 5 – защитный диэлектрический слой (слой SiO_2), 6 – дополнительный n^+ слой коллектора, 7– омические контакты из Al. Структура диффузионного конденсатора, в котором используется переход эмиттер-база ($C_{эб}$), показана на рисунке 7.4.

Емкость таких конденсаторов можно рассчитать по формуле 50.4. В таблице 4 приведены типичные параметры диффузионных конденсаторов.

Таблица 4.

Тип конденсатора	$C_{\text{эфф}},$ пФ/мм ²	$C_{\text{макс}},$ пФ
Переход БК	150	300
Переход БЭ	1000	1200

3.4. Варакторы

Не линейная зависимость емкости $p - n$ перехода от величины приложенного напряжения смещения используется еще в одном типе диодов, получивших название – варакторы. Рассмотрим основные принципы работы этих приборов. При рассмотрении вольт – фарадных зависимостей $p - n$ перехода предполагалось, что распределение концентрации легирующих примесей по толщине перехода не зависит от координаты, т.е. $N(x) = \text{const}$. В этом случае зависимость барьерной емкости от величины приложенного напряжения описывалась квадратичной функцией (см. выражение 2.89). В случае линейного закона распределения концентрации примеси по толщине перехода зависимость барьерной емкости от напряжения описывалась кубической функцией. Рассмотрим эти зависимости в более общем виде. Пусть имеется $p - n$ переход с произвольным распределением примеси $N(x) = N_0 x^n$ по толщине области объемного заряда. Одномерное уравнение Пуассона для этого случая записывается так:

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = \frac{qN(x)}{\epsilon \epsilon_0} \quad (51.4)$$

тогда $n = 0$ соответствует однородному распределению примеси и резкому переходу, $n = 1$ соответствует линейному увеличению примеси и плавному переходу. При $n < 0$ градиент концентрации примеси очень большой, что соответствует сверх резкому переходу. Такой профиль концентрации примеси получают при помощи ионного легирования или при использовании процессов эпитаксиального выращивания.

Решение уравнения (51.4) позволяет получить следующее выражение для барьерной емкости сверх резкого перехода:

$$C = \frac{dQ}{dU} = \left[\frac{qN_0(\epsilon\epsilon_0)^{n+1}}{(n+2)U} \right]^{\frac{1}{n+2}} = A(U)^{-s} \quad (52.4)$$

Здесь: A – постоянная величина, $s = 1/n+2$. При подаче переменного напряжения к сверх резкому р-п переходу, через него протекает переменный ток. Мгновенное значение тока через барьерную емкость р - п перехода определяется из выражения:

$$i(t) = \frac{dQ}{dt} = \frac{dQ}{dU} \frac{dU}{dt} = C(t) \frac{dU}{dt} \quad (53.4)$$

где $C(t)$ – значение барьерной емкости, соответствующее мгновенному (в данный момент времени) значению напряжения $U(t)$. Примем, что приложенное напряжение полностью падает на р - п переходе, т.е. можно пренебречь влиянием последовательного сопротивления базы диода и сопротивлением омических контактов.

Пусть к диоду одновременно приложено постоянное напряжение U_0 и переменное напряжение $U(t)$. Тогда мгновенное значение барьерной емкости определяется из выражения:

$$C(t) = C_0 + \frac{dC}{dU} U_0 + \frac{1}{2} \frac{d^2C}{dU^2} U_0^2 + \frac{1}{6} \frac{d^3C}{dU^3} U_0^3 + \dots \quad (54.4)$$

Выражение (53.4), для тока протекающего через барьерную емкость, с учетом выражения (54.4) принимает вид:

$$i(t) = \left(C_0 + \frac{dC}{dU} U_0 + \frac{1}{2} \frac{d^2C}{dU^2} U_0^2 + \frac{1}{6} \frac{d^3C}{dU^3} U_0^3 + \dots \right) \frac{dU}{dt} \quad (55.4)$$

Рассмотрим случай, когда переменное напряжение U_{\approx} является гармоническим напряжением

$$U_{\approx}(t) = U_1 \sin \omega_1 t \quad (56.4)$$

Причем амплитуда переменного напряжения много меньше величины постоянного напряжения, приложенного к р - n переходу, т.е. $U_1 \ll U_{\approx}$. Подставив (56.4) в (55.4) и ограничиваясь первыми тремя членами ряда, получим следующее выражение для величины тока протекающего через барьерную емкость:

$$\begin{aligned} i(t) = \omega_1 t C_{\approx} U_1 \cos \omega_1 t + \frac{1}{2} \frac{dC}{dU} \omega_1 U_1^2 \cos 2\omega_1 t + \\ + \frac{1}{8} \frac{d^2 C}{dU^2} \omega_1 U_1^3 (\cos \omega_1 t - \cos 3\omega_1 t) + \dots \end{aligned} \quad (57.4)$$

Из выражения (57.4) следует, что вследствие нелинейности барьерной емкости, при действии синусоидального напряжения на р - n переход, появляются высшие гармоники емкостного тока. На рисунке 4.8. показано действие переменного напряжения, достаточно большой амплитуды, на нелинейную емкость р - n перехода. Из рисунка видно, что за счет нелинейности вольт – фарадной характеристики перехода выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ отличается от входного U и является не синусоидальным. Одним из характеристических параметров варактора является его чувствительность:

$$S = - \frac{dC}{C} \frac{U}{dU} = \frac{1}{n + 2} \quad (58.4)$$

Из соотношения (58.4) видно: чем больше величина S , тем больше изменение емкости C под действием приложенного переменного напряжения U . Для переходов с равномерным распределением легирующей примеси $-n = 0$ и $S = 1/2$.

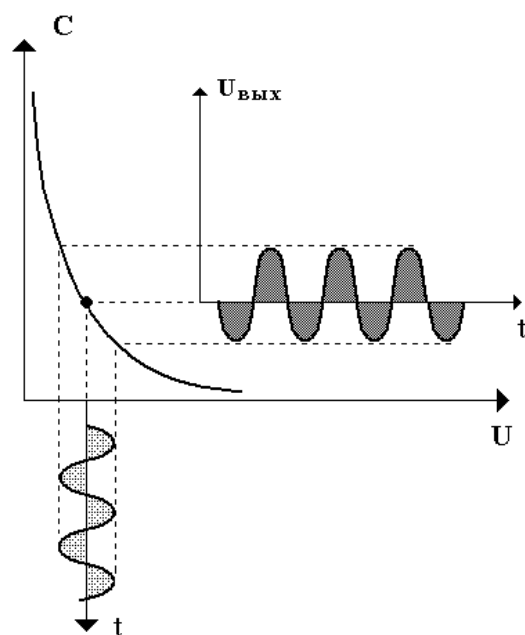
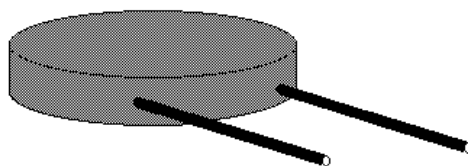


Рис. 8.4. Принцип работы варактора

Для переходов с линейным распределением примеси $n = 1$ и $S = 1/3$. Для сверх резких переходов $n = -1$ и $S = 1$, $n = -3/2$ и $S = 2$. Видно, что сверх резкий переход имеет большую чувствительность к изменению емкости при изменении напряжения. По своей структуре варакторы мало чем отличаются от структуры варикапов. Высокоомный n - слой расположен между низкоомными слоями p^+ и n^+ проводимости. При приложении напряжения, на начальном участке фолт – фарадной характеристики, емкость варактора резко уменьшается, т.к. запирающий слой расположен в высокоомной n - области. С ростом приложенного напряжения, расширяется область объемного заряда. Как только область объемного заряда достигнет сильно легированного n^+ - слоя, изменение емкости с увеличением напряжения практически прекращается. При этом на вольт– фарадной характеристике наблюдается достаточно резкий перегиб. В качестве рабочей области варактора, как правило, используется та область вольт – фарадной характеристики, которая имеет наибольшее изменение емкости при малых изменениях напряжения.



**Рис. 9.4. Внешний вид варактора,
изготовленного по дискретной
технологии**

Контрольные вопросы.

1. Принцип работы интегрального конденсатора со структурой металл-полупроводник?
2. Чем характеризуется слой объемного заряда полупроводника контакта металл-полупроводник?
3. В каких слоях биполярного транзистора расположены интегральные конденсаторы на основе контакта металл-полупроводник?
4. Принцип работы интегрального конденсатора со структурой полупроводник - полупроводник?
5. Как толщина слоя объемного заряда р-п перехода изменяется с изменением внешнего напряжения, приложенного к переходу?
6. Какой полупроводниковый прибор называется варактором?
7. Чем по своей структуре варакторы отличаются от структуры варикапов?
8. По какому закону изменяется барьерная емкость р-п перехода с изменением напряжения?
9. В каких слоях полевого транзистора расположены интегральные конденсаторы на основе контакта металл-полупроводник?
10. Какой параметр является основной характеристикой варактора?

ГЛАВА V

Пассивные элементы со структурой металл - диэлектрик - полупроводник.

1.5. Резисторы со структурой металл - диэлектрик - полупроводник

Принцип работы и упрощенная конструкция резистора со структурой металл-диэлектрик-полупроводник показаны на рисунке 1.5. Здесь, полупроводник электронного типа проводимости ($n - Si$), расположенный между двумя металлическими контактами 1 и 2, образует токопроводящий канал. При подаче на контакты напряжения U_{12} , указанной полярности, по каналу протекает электронный ток I , который зависит от величины напряжения U_{12} . Управляющий контакт 3 отделен от полупроводника тонким слоем диэлектрика, в качестве диэлектрика наиболее часто используется двуокись кремния (SiO_2). При подаче напряжения U_3 между

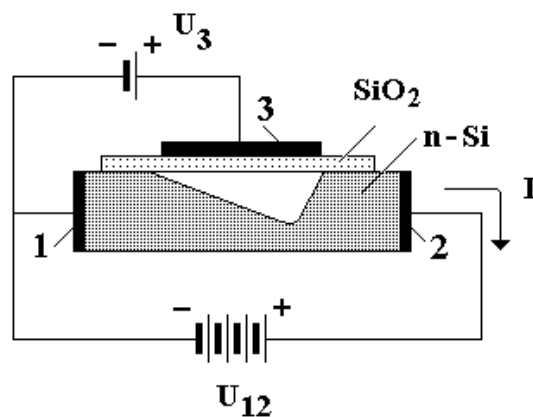


Рис. 1.5. Конструкция резистора со структурой металл-диэлектрик-полупроводник

управляющим контактом 3 и контактом 1, в полупроводнике, на границе раздела с диэлектриком, возникает электрическое поле. Возникающее электрическое поле, оттесняя электроны от границы раздела, формирует область объемного заряда. Слой объемного заряда обладает большим электрическим сопротивлением, т.к. в нем практически отсутствуют подвижные заряды. А значит, при образовании этого слоя, сопротивление

резистора возрастает, и величина тока протекающего через резистор уменьшается. При увеличении напряжения на управляющем контакте, увеличивается ширина области объемного заряда и, следовательно, уменьшается ток протекающий через резистор. При уменьшении напряжения на управляющем контакте ширина области объемного заряда уменьшается, а ток, протекающий через резистор, увеличивается. Другими словами: в интегральном резисторе со структурой металл-диэлектрик-полупроводник, управление током, протекающим через резистор, может осуществляться изменением напряжения на управляющем контакте. На этом эффекте основан принцип работы полевого транзистора с изолированным затвором.

2.5. Вольтамперные характеристики резисторов со структурой металл - диэлектрик - полупроводник

Для расчета вольтамперной характеристики резистора со структурой металл – диэлектрик –полупроводник воспользуемся упрощенной моделью, приведенной на рисунке 2.5. На этом рисунке: 1– металлические контакты, 2 – диэлектрический слой, 3 – металлический управляющий контакт, a, b, L – геометрические размеры резистора.

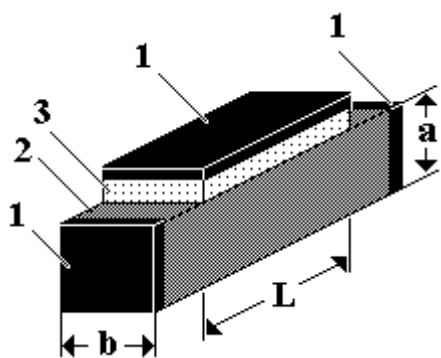


Рис. 2.5. Модель резистора со структурой металл-диэлектрик-полупроводник

Пусть, для определенности, резистор имеет проводимость n -типа. При отсутствии внешних напряжений, электропроводность резистора можно выразить при помощи известного соотношения:

$$\sigma = qn\mu \quad (1.5)$$

где q – заряд электрона, n , μ – концентрация и подвижность свободных электронов. При подаче положительного напряжения на управляющий контакт, подвижные

электроны, под действием сил электрического поля, из объема полупроводника подтягиваются к границе раздела полупроводник – диэлектрик, увеличивая тем самым электропроводность приповерхностной области:

$$\sigma = q\mu(n + \Delta n) \quad (2.5)$$

В этом выражении Δn - изменение концентрации электронов, участвующих в проводимости, которое можно выразить через полный заряд Q , заряд электрона q , и геометрию резистора abl .

$$\Delta n = Q / qabL \quad (3.5)$$

полный заряд Q связан с емкостью C и с напряжением приложенным к управляющему контакту U_3 при помощи следующего выражения:

$$Q = C U_3 \quad (4.5)$$

Используя (3.4) и (4.4), выражение (2.4) можно записать в виде:

$$\sigma = q\mu \left(n + \frac{CU_3}{qabL} \right) \quad (5.5)$$

При подаче отрицательного напряжения на управляющий контакт резистора, подвижные электроны, под действием сил электрического поля, оттесняются в глубь полупроводника от границы раздела полупроводник диэлектрик, уменьшая тем самым электропроводность приповерхностной области. В этом случае электропроводность можно описать при помощи выражения, аналогичному (5.5.):

$$\sigma = q\mu \left(n - \frac{CU_3}{qabL} \right) \quad (6.5)$$

При достаточно большом отрицательном напряжении на управляющем контакте резистора U_3 ($U_3 = U_{30}$), проводимость резистора уменьшается до нуля. В этом случае из выражения (6.5) получаем:

$$qn \mu = \mu \frac{CU_{30}}{abL} \quad (7.5)$$

Используя далее (6.5) и (7.5), выразим проводимость резистора в виде:

$$\sigma = \mu \frac{C}{abL} (U_{30} - U_3) \quad (8.5)$$

Учитывая соотношения $\sigma = 1/\rho$ и $R_k = \rho L / ab$, найдем сопротивление резистора, как функцию приложенного напряжения к управляющему контакту:

$$R = \rho \frac{1}{ab} = \frac{L^2}{\mu C} \frac{1}{U_{30} - U_3} \quad (9.5)$$

Выражение (9.5) описывает величину сопротивления резистора без учета влияния напряжения U_{12} прикладываемого к самому резистору. Влияние напряжение U_{12} проявляется в изменении ширины области объемного заряда полупроводника вблизи правой части резистора (см. рисунок 1.5.). Так, при наличии напряжения U_{12} , напряжение, прикладываемое к управляющему контакту в левой части резистора равно U_3 , а вблизи его правой части это напряжение равно $U_3 + U_{12}$. Другими словам, напряжение, прикладываемое к управляющему контакту, является функцией координаты. Поэтому выражение (9.5), при наличии напряжения U_{12} , можно использовать только для пренебрежимо малого участка длины резистора dx :

$$dR(x) = \frac{R_k}{L} dx \quad (10.5)$$

Используя, далее (9.5) и (10.5) получим:

$$dR(x) = \frac{R_k}{L} dx = \frac{L}{\mu C} \frac{dx}{[U_{30} - (U_3 + U(x))]} \quad (11.5)$$

При подаче напряжения U_{12} , через резистор протекает ток стока I , который создает падение напряжения $U(x)$ на каждом участке длины резистора dx :

$$dU(x) = IdR(x) \quad (12.5)$$

Подставив в (12.5) выражение (11.5), получим:

$$dU(x) = I \frac{L}{\mu C} \frac{dx}{U_{30} - (U_3 + U_{12})} \quad (13.5)$$

Учитывая граничные условия, в соответствии с которыми при $x = 0$, $U = 0$ и при $x = L$, $U = U_{12}$, после интегрирования (13.4), получим:

$$I \frac{L}{\mu C} \int_0^L dx = \int_0^{U_{12}} \{U_{30} - [U_3 + U(x)]\} dx \quad (14.5)$$

Отсюда находим выражение для вольтамперной характеристики интегрального резистора со структурой МДП, имеющего n-тип проводимости:

$$I = \frac{\mu C}{L^2} \left(U_{30} - U_3 - \frac{U_{12}}{2} \right) U_{12} \quad (15.5)$$

Полученное выражение справедливо при малых значениях напряжения U_{12} , т.е. в том случае когда сопротивление резистора определяется сопротивлением полностью открытого токопроводящего канала. При больших значениях U_{12} , за счет увеличения напряжения, прикладываемого к управляющему контакту и уменьшения сечения токопроводящего канала происходит уменьшение приращения тока I и его насыщение. В этом случае $U_{30} = U_3 + U_{12}$ или $U_C = U_{30} - U_3$, подставив $U_C = U_{30} - U_3$ в выражение (15.5), получим выражение для тока насыщения резистора:

$$I_{\text{нас}} = \frac{\mu C}{2L^2} (U_{30} - U_3)^2 \quad (16.5)$$

Из выражения (16.5) видно, что в режиме насыщения ток, протекающий через резистор не зависит от напряжения U_{12} , а определяется только величиной напряжения на управляющем контакте.

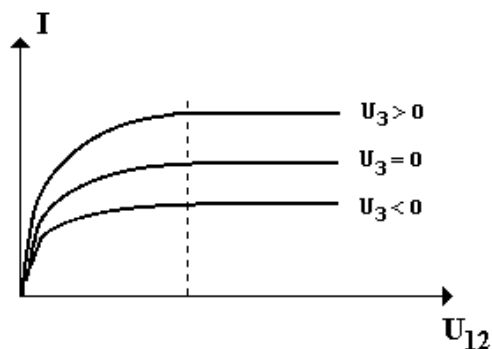


Рис. 3.5. Вольтамперные характеристики резистора со структурой металл-диэлектрик-полупроводник

Выражения (15.5) и (16.5) получены в предположении обогащения канала основными носителями заряда, т.е. в предположении, что на управляющий контакт резистора, имеющего проводимость n - типа, подается положительное напряжение. В режиме обеднения, т.е. когда на управляющий контакт этого резистора подается отрицательное напряжение, проводимость канала будет уменьшаться. Выражения для тока I будут отличаться только знаком перед величинами U_3 и U_{30} . На рисунке 3.5 показаны вольтамперные характеристики интегрального резистора со структурой металл-диэлектрик-полупроводник. Пунктирной линией показана область насыщения тока. На рисунке 4.5. показано устройство резистора со структурой металл-

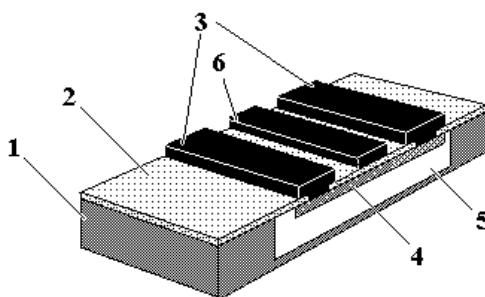


Рис. 4.5. Устройство резистора со структурой металл-диэлектрик-полупроводник

диэлектрик-полупроводник. Здесь: 1— исходная подложка полупроводника, 2— защитное диэлектрическое покрытие (SiO_2), 3— металлические контакты из

Al, 4 – токопроводящий канал n-типа проводимости, 5– слой полупроводника p-типа проводимости, 6– управляющий электрод.

Основными недостатками интегральных резисторов со структурой МДП является зависимость сопротивления от величины прикладываемого напряжения.

3.5. Конденсаторы со структурой металл - диэлектрик - полупроводник

Для расчета высокочастотной вольт-фарадной характеристики структуры металл – диэлектрик – полупроводник (МДП) используется предположение, что все электронные состояния, локализованные на границе раздела полупроводник – диэлектрик не успевают обмениваться электронами с разрешенными зонами энергий полупроводника. При выполнении этого условия, заряды поверхностных состояний (при постоянном напряжении смещения), не вносят дополнительного вклада в емкость границы раздела и, следовательно, в емкость всей структуры МДП. Это выполняется при достаточно быстром изменении полярности переменного сигнала, т.е. на достаточно высоких частотах, что и дало название методу. Для определенности рассмотрим структуру металл–диэлектрик – полупроводник, изготовленную на основе полупроводника n-типа проводимости. Предположим, что в диэлектрике отсутствуют какие либо заряды, и плотность электронных состояний, локализованных на границе раздела полупроводник – диэлектрик равна нулю. Предположим также, что донорные центры, определяющие тип проводимости полупроводника, распределены по толщине полупроводника равномерно, т.е. $N_d \neq N_d(x)$. Если слой диэлектрика достаточно тонкий, то приложенное постоянное напряжение смещения (или большая его часть) оказывается приложенным только к слою полупроводника. В зависимости от полярности приложенного к полупроводнику напряжения, в области полупроводника,

прилегающего к границе раздела полупроводник – диэлектрик, будет наблюдаться обогащение или обеднение концентрации электронов, либо инверсия типа проводимости. Это обусловлено искривлением зон энергии электронов в приграничной области полупроводника под действием приложенного напряжения (см. рис.5.5).

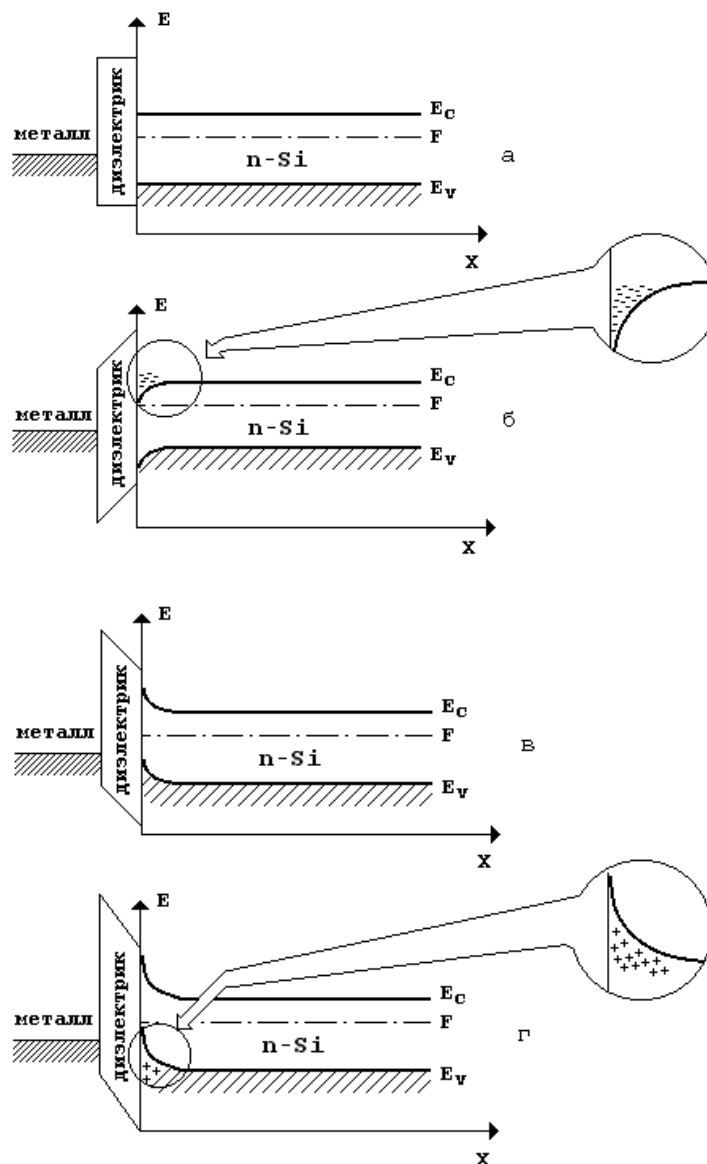


Рис . 5.5. Искривление энергетических зон поверхностной области полупроводника n- типа структуры МДП. а) - при отсутствии внешнего напряжения, б) - при подаче обогащающего напряжения, в) - при подаче обедняющего напряжения, г) -при подаче инверсионного напряжения

При увеличении положительного напряжения, приложенному к металлическому электроду структуры МДП, свободные электроны полупроводника подтягиваются к границе раздела полупроводник –

диэлектрик. Это соответствует режиму обогащения поверхностного слоя полупроводника. Энергетические диаграммы, искривляясь, опускаются в низ (рис.5.5 б). При увеличении отрицательного напряжения, свободные электроны полупроводника, отталкиваются в глубь полупроводника. При этом концентрация подвижных электронов у границы с диэлектриком уменьшается. Такой режим соответствует режиму обеднения (рис.5.5.в). При дальнейшем увеличении отрицательного напряжения, концентрация свободных электронов, в приповерхностной области полупроводника, становится меньше концентрации термически генерированных дырок, которые подтягиваются к границе раздела. Это соответствует изменению типа проводимости полупроводника в приповерхностной области, т.е. инверсии поверхностной проводимости (см. рис. 5.5.г).

Для расчета вольт фарадной – характеристики структуры МДП, рассмотрим зонную диаграмму полупроводника n- типа проводимости МДП структуры, при подаче обедняющего напряжения (рис.6.5).

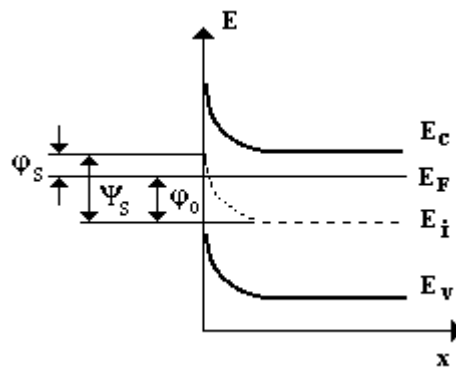


Рис. 6.5. Зонная диаграмма полупроводника n- типа проводимости структуры МДП при подаче обедняющего напряжения.

Плотность объемного заряда в полупроводнике в области, прилегающей к диэлектрику, может быть выражена так:

$$\rho(x) = q[N_d - n(x)] \quad (17.5)$$

Здесь: N_d – концентрация ионизированной донорной примеси, $n(x)$ – концентрация свободных электронов.

Концентрация свободных электронов в полупроводнике может быть выражена следующим образом:

$$n(x) = n_0 \exp \left[\frac{q(\varphi(x) - \varphi_0)}{kT} \right] \quad (18.5)$$

Здесь: n_0 – концентрация свободных электронов в глубине полупроводника, T – температура, k – постоянная Больцмана, φ_0 – энергетический промежуток между уровнем Ферми для электронов и серединой запрещенной зоны полупроводника (см. рис.6.4). Величина φ принимает значение $\varphi = \varphi_s$ на поверхности полупроводника и $\varphi = 0$ в глубине полупроводника.

Используя (17.5) и (18.5), уравнение Пуассона:

$$\frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} = - \frac{\rho(x)}{\varepsilon \varepsilon_0} \quad (19.5)$$

можно записать в следующем виде:

$$\frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} = - \frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} \left[N_d - n_0 \exp \left[\frac{q(\varphi(x) - \varphi_0)}{kT} \right] \right] \quad (20.5)$$

Здесь: ε – диэлектрическая проницаемость полупроводника, ε_0 – электрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Интегрируя уравнение (20.5) по координате x , получим:

$$\frac{d\varphi}{dx} = \left[\frac{2n_0 kT}{\varepsilon \varepsilon_0} \left[\exp \frac{q(\varphi_s - \varphi_0)}{kT} - 1 \right] - \frac{2qN_d}{\varepsilon \varepsilon_0} (\varphi_s - \varphi_0) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (21.5)$$

Используя теорему Гаусса:

$$Q = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{d\varphi}{dx} \quad (22.5)$$

выразим изменение заряда полупроводника в виде:

$$\frac{dQ}{dx} = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{d}{dx} \left(\frac{d\varphi}{dx} \right) = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{d^2 \varphi}{dx^2} \quad \text{и} \quad dQ = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{d^2 \varphi}{dx^2} dx \quad (23.5)$$

дифференциальную емкость полупроводника

$$C_s = \frac{dQ}{d\varphi_s} \quad (24.5)$$

используя выражение (24.5), можно выразить в виде:

$$C_s = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{d^2 \varphi}{dx^2} \frac{dx}{d\varphi_s} \quad (25.5)$$

или в виде:

$$C_s = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \frac{d^2 \varphi}{dx^2}}{\frac{d\varphi_s}{dx}} \quad (26.5)$$

Подставляя в (25.5) выражения (20.5) и (21.5), получим:

$$C_s(\varphi_s) = \frac{-q \left[N_d - n_0 \exp \frac{q(\varphi_s - \varphi_0)}{kT} \right]}{\left[\frac{2n_0 kT}{\varepsilon \varepsilon_0} \exp \left[\frac{q(\varphi_s - \varphi_0)}{kT} - 1 \right] - \frac{2qN_d}{\varepsilon \varepsilon_0} (\varphi_s - \varphi_0) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (27.5)$$

Введя обозначение $\frac{\varphi_s - \varphi_0}{kT} = Y_s$, выражение (27.4) запишем в виде:

$$C_s(Y_s) = \frac{q(N_d - n_0 \exp Y_s)}{\left[\frac{2n_0 kT}{\epsilon \epsilon_0} (\exp Y_s - 1) - \frac{2qN_d kT}{\epsilon \epsilon_0} Y_s \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (28.5)$$

или в более удобном виде:

$$C_s(Y_s) = \frac{qn_0(\exp Y_s - 1)}{\left(\frac{2n_0 kT}{\epsilon \epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}} (\exp Y_s - Y_s - 1)^{\frac{1}{2}}} \quad (29.5)$$

В идеальной структуре металл - диэлектрик - полупроводник поверхностные заряды отсутствуют, следовательно, емкость поверхностных состояний равна нулю. Значит, упрощенную эквивалентную схему структуры МДП можно представить как последовательное соединение емкости слоя диэлектрика (C_0) и емкости полупроводника (C_s). А полную емкость структуры можно выразить при помощи следующего выражения:

$$C = \frac{C_0 C_s}{C_0 + C_s} \quad (30.5)$$

Падение постоянного напряжения (U) на структуре МДП

$$U = U_0 + U_s + U_i \quad (31.5)$$

складывается из падения напряжения на слое диэлектрика (U), падения напряжения на слое полупроводника (U_s) и падения напряжения на заряде инверсионного слоя (U_i). Последний член в уравнении (31.4) имеет место лишь при больших инверсионных напряжениях, приводящих к большим инверсионным изгибам зон ($\varphi_s > 2\varphi_0$).

На рисунке 7.5. показано устройство интегрального конденсатора со структурой металл-диэлектрик-полупроводник. Здесь: 1–исходная

полупроводниковая подложка, имеющая р-тип проводимости, 2 – защитное покрытие, выполняющее функцию диэлектрика конденсатора, 3– алюминиевые контакты, 4– слой полупроводника, имеющего n-тип проводимости. Из рисунка видно, что одна из обкладок конденсатора имеет электрический контакт с полупроводниковым слоем n-тип проводимости, а другая отделена от полупроводника слоем диэлектрика. Отсюда и название конденсатора: конденсатор со структурой металл-диэлектрик-полупроводник (МДП- конденсатор).

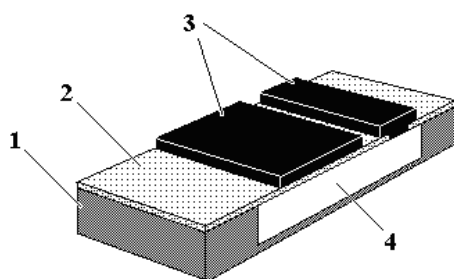


Рис. 7.5. Устройство интегрального конденсатора со структурой металл-диэлектрик-полупроводник

В некоторых случаях, с целью увеличения емкости МДП – конденсатора, уменьшается толщина диэлектрика, расположенного под одной из обкладок. Учитывая, что полная емкость конденсатора со структурой металл-диэлектрик-полупроводник описывается выражением (30.5), где C_s – емкость слоя объемного заряда полупроводника. Эта величина может быть выражена при помощи выражения (9.4) главы 4. Из сопоставления выражений (30.5) и

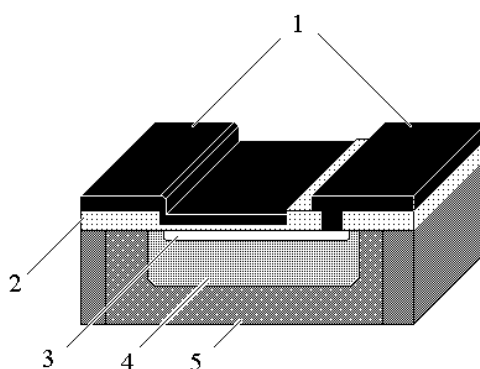


Рис. 8.5. Устройство интегрального конденсатора со структурой металл-диэлектрик-полупроводник, с уменьшенной толщиной диэлектрика

(9.4) видно, что при уменьшении толщины диэлектрика емкость структуры

МДП - возрастает. На рисунке 8.5.показано устройство МДП конденсатора с уменьшенной толщиной диэлектрика под одной из обкладок. Здесь: 1— обкладки конденсатора, 2 — слой диэлектрика, 3 — n^+ полупроводника, 4 — p - слой полупроводника, 5 — исходная полупроводниковая подложка n - типа проводимости. На рисунке 9.5. приведены типичные вольт – фарадные характеристики конденсатора со структурой МДП. Здесь: 1— высокочастотная C - V зависимость, 2— низкочастотная C - V зависимость. Высокочастотная зависимость соответствует частотам >150 кГц (при комнатной температуре, для МДП конденсаторов, изготовленных на основе системы $Al - SiO_2 - Si$). Низкочастотная зависимость соответствует более низким частотам для этой же системы.

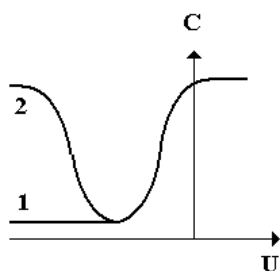


Рис.9.5. Типичные вольт – фарадные характеристики конденсатора со структурой МДП:

1— Высокочастотная (>150 кГц)

2— Низкочастотная (<150 кГц)

Контрольные вопросы.

1. Принцип работы резистора со структурой металл-диэлектрик-полупроводник?
2. Чем характеризуется слой объемного заряда полупроводника МДП структуры?
3. В чем заключается основной недостаток интегральных резисторов со структурой МДП?
4. Какое напряжение называется инверсионным напряжением структуры металл– диэлектрик– полупроводник?
5. Чему равна емкость поверхностных состояний в идеальной структуре металл – диэлектрик – полупроводник?
6. Сколько обкладок МДП конденсатора имеют электрический контакт с полупроводниковым слоем?
7. Чему равна емкость МДП конденсатора, при приложении к нему обогащающего напряжения?
8. Что представляет собой упрощенная эквивалентная схема структуры МДП?
9. Какими основными характеристиками обладают МДП конденсаторы?

ГЛАВА VI

Датчики Холла

1.6. Эффект Холла

Если полупроводник, по которому протекает электрический ток, поместить в магнитное поле, в нем возникает ряд эффектов, один из которых называется эффектом Холла. Рассмотрим этот эффект более подробно.

Пусть к полупроводнику, имеющего вид параллелепипеда (рисунок 1.6) с геометрическими размерами abl , приложено электрическое поле в направлении оси x . Под действием сил электрического поля, свободные носители заряда приобретают скорость направленного движения - \mathbf{v} , в направлении оси x (для дырок) и в противоположном направлении, (для электронов). В этом случае вектор плотности тока совпадает по направлению

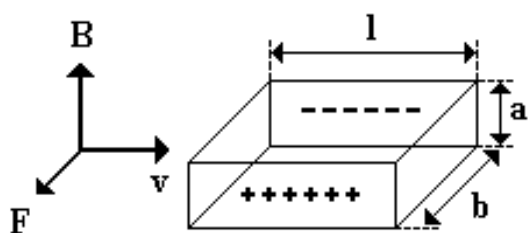


Рис. 1.6.

с вектором напряженности электрического поля. Если полупроводник однороден, то эквипотенциальная поверхность расположена перпендикулярно направлению электрического поля и, следовательно, перпендикулярно

вектору плотности тока. Поэтому разность потенциалов между крайними точками плоскости ab , и между крайними точками любой другой плоскости, параллельной плоскости ab будет равна нулю. Поместим теперь полупроводник в магнитное поле, вектор индукции (\mathbf{B}) которого перпендикулярен вектору плотности тока и направлен по оси z . На движущийся в постоянном магнитном поле со скоростью \mathbf{v} электрон (или дырку) действует сила Лоренца \mathbf{F} :

$$\mathbf{F} = q_{\text{хх}} [\mathbf{v} \cdot \mathbf{H}] = q [\mathbf{v} \cdot \mathbf{B}] \quad (1.6)$$

Здесь: $B = \mu\mu_0 H$ – магнитная индукция, μ – относительная магнитная проницаемость вещества, μ_0 – магнитная постоянная.

Эта сила действует в направлении перпендикулярном скорости движения электрона (или дырки) v и индукции магнитного поля B . Под действием этой силы заряженная частица приобретает ускорение a :

$$a = \frac{q[vB]}{m} \quad (2.6)$$

здесь m – эффективная масса заряженной частицы, учитывающая влияние на ее движение периодического поля кристаллической решетки.

В общем случае при любой ориентации скорости v и индукции магнитного поля B , скорость движения заряженной частицы можно разложить на две составляющие: параллельную (v_1) и перпендикулярную (v_2) вектору магнитной индукции B :

$$v = v_1 + v_2 \quad (3.6)$$

при этом сила, действующая на заряженную частицу со стороны магнитного поля:

$$F = qv_2B \quad (4.6)$$

Эта сила все время изменяет направление скорости v_2 , тогда как v_1 остается постоянной. Изменение направления скорости приводит к тому, что частица начинает двигаться по винтовой линии вдоль магнитного поля. Из выражений (1.6) видно, что величина силы Лоренца зависит от индукции магнитного поля B . При изучении эффекта Холла, различают слабые и сильные магнитные поля. Слабыми называются такие магнитные поля, в которых радиус кривизны траектории движения заряда много больше его средней длины свободного пробега. При этих условиях действие магнитного поля будет относительно не большим. Оно сводится к тому, что траектория движения заряженной частицы отклоняется от первоначального направления.

Между вектором напряженности электрического поля и вектором плотности тока образуется угол – называемый углом Холла (см. рисунок 2.6). Следует отметить, что отклонение траектории заряженной частицы происходит в направлении перпендикулярном как \mathbf{v} так и \mathbf{B} . В результате этого возникает пространственное разделение зарядов и появляется электрическое поле (см. рисунок 1.6). Теперь напряженность электрического поля не будет совпадать с направлением вектора плотности тока и эквипотенциальные поверхности не будут параллельны плоскости ab . В результате между боковыми гранями

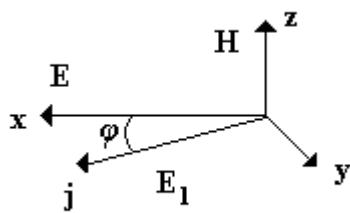


Рис. 2.6.

полупроводника возникает поперечная разность потенциалов, называемая – напряжением Холла. Под действием силы Лоренца дырки, в полупроводнике p - типа проводимости, и электроны в полупроводнике n - типа проводимости будут отклоняться к противоположным граням. Этот процесс будет продолжаться до тех пор пока, возникшее за счет разделения зарядов, поперечное электрическое поле не уравновесит силу Лоренца. В стационарном состоянии сила действующая на электрон со стороны поперечного электрического поля и сила Лоренца равны и могут быть выражены так:

$$-qE_1 = qvB \quad (5.6)$$

Если ширина образца равна d , то напряжение Холла (U_x) между противоположными гранями полупроводника равно

$$U_x = E_1 \cdot d = -v \cdot B \cdot d \quad (6.6)$$

Используя понятие плотности тока, выражение (6) можно записать так:

$$j = qnv, \quad v = j / qn, \quad U_x = \frac{1}{qn} j B d = R j B d \quad (7.6)$$

Величина R , входящая в уравнение (7.6), называется коэффициент Холла. В случае полупроводника n - типа проводимости коэффициент Холла равен

$$R = \frac{1}{qn} \quad (8.6)$$

В случае полупроводника p -типа проводимости коэффициент Холла равен

$$R = \frac{1}{qp} \quad (9.6)$$

Из выражений (8.6) и (9.6) видно, что измеряя коэффициент Холла, можно определить знак и концентрацию носителей заряда в полупроводнике.

Рассмотрим особенности эффекта Холла в полупроводнике со смешанным типом проводимости для слабого магнитного поля. Будем считать, что движение носителей заряда (как электронов, так и дырок) определяется только внешними полями, т.е. после каждого соударения носители заряда приходят в состояние равновесия. Под действием сил электрического поля носители заряда будут ускоряться. По мере увеличения скорости на них будет действовать сила Лоренца. Траектория движения заряда будет искривляться до тех пор, пока он не испытает столкновения с неоднородностью кристаллической решетки, после чего процесс начинается сначала. В результате поток дырок отклоняется от направления электрического поля на угол φ_p . Электроны под действием сил магнитного поля отклоняются в ту же сторону, что и дырки. Но электронный ток (см. рис. 3.6) отклоняется от направления электрического поля в противоположную сторону на угол φ_n . В результате появятся токи плотности $j_p = \sigma E$ и $j_n = \sigma E$, которые будут направлены, как показано на рисунке 3.6. При этом суммарная плотность тока равна $j = j_p + j_n$. Поскольку магнитное поле слабое, то углы Холла для электронов (φ_n) и для дырок (φ_p) малы и могут быть записаны в виде:

$$\varphi_n = -\mu_n B \quad \text{и} \quad \varphi_p = \mu_p B \quad (10.6)$$

Результирующий угол Холла (как видно из рисунка 2.6) будет равен:

$$\operatorname{tg} \varphi \approx \varphi = \frac{-j_y}{i_x} \quad (11.6)$$

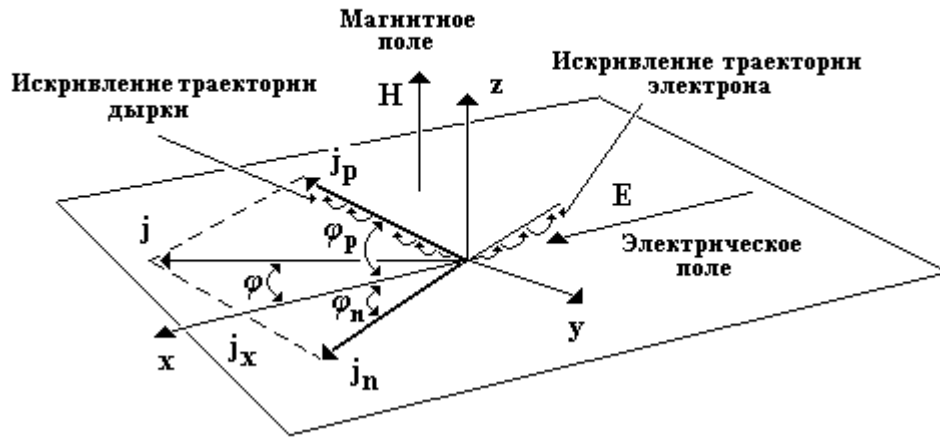


Рис. 3.6 . Эффект Холла в полупроводнике со смешанным типом проводимости

Учитывая (см. рисунок 3.6), что

$$j_x = j_p \cos \varphi_p + j_n \cos \varphi_n = q(p\mu_p + n\mu_n)E = \sigma E \quad (12.6)$$

где $\cos \varphi_p = \cos \varphi_n = 1$ из-за малости углов φ_p и φ_n ; $\sigma_p = qp\mu_p$ и $\sigma_n = qn\mu_n$ — проводимость, обусловленная дырками и электронами соответственно;
 $\sigma = \sigma_p + \sigma_n$ — суммарная проводимость

$$\begin{aligned} j_y &= j_p \sin \varphi_p + j_n \sin \varphi_n = j_p \varphi_p + j_n \varphi_n = -(\sigma_p \mu_p - \sigma_n \mu_n)EB = \\ &= -q(p\mu_p^2 - n\mu_n^2)EB \end{aligned} \quad (13.6)$$

где $\sin \varphi_p \approx \varphi_p$ и $\sin \varphi_n \approx \varphi_n$ из-за малости напряженности магнитного поля.

Используя (11.6), (12.6) и (13.6), получим угол Холла для полупроводника со смешанным типом проводимости:

$$\varphi = \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{p\mu_p + n\mu_n} B \quad (14.6)$$

А коэффициент Холла в этом случае принимает вид:

$$R = \frac{\varphi}{\sigma B} = \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{(p\mu_p + n\mu_n)^2} \quad (15.6)$$

Как следует из выражения (15.6) в случае смешанной проводимости знак коэффициента Холла определяется соотношением концентраций и подвижностей электронов и дырок. Холловская подвижность в полупроводнике со смешанным типом проводимости имеет вид:

$$\mu_H = R\sigma = \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{p\mu_p + n\mu_n} \quad (16.6)$$

В проведенном упрощенном рассмотрении эффекта Холла не принималось во внимание распределение носителей заряда по скоростям. При учете такого распределения, за счет различных механизмов рассеяния носителей заряда, выражение для коэффициента Холла может быть записано в виде:

$$|R| = r \frac{1}{qn}$$

Причем для атомных полупроводников, при рассеянии носителей на акустических колебаниях кристаллической решетки коэффициент пропорциональности равен

$$r = 0,38\pi$$

В случае рассеяния на ионах примеси этот коэффициент принимает вид:

$$r = 1,93$$

а в случае рассеяния на нейтральных примесных центрах:

$$r = 1$$

2.6. Параметры и характеристики датчиков Холла

Датчик Холла (более правильное название: датчик э.д.с. Холла), представляет устройство, состоящее из полупроводниковой пластины с четырьмя омическими контактами. Контакты расположены на каждой из противоположных сторон пластины (рис. 4.6). В качестве исходной подложки обычно используется полупроводник n-типа проводимости с защитным диэлектрическим покрытием. Металлические контакты (как правило, из алюминия) управляющих электродов используются для пропускания тока I через полупроводниковую пластину. Металлические контакты (как правило, из алюминия) с двух других противоположных сторон пластины используются для измерения напряжения Холла.

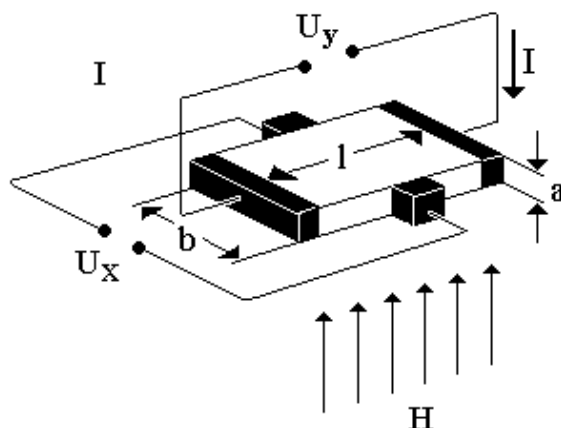


Рис. 4.6. Принцип работы датчика Холла

Напряжение, подаваемое на управляющие электроды U_y , называется входным напряжением датчика Холла, а сопротивление R_1 между этими электродами называется входным сопротивлением. Величина входного сопротивления датчика Холла, при отсутствии магнитного поля определяется по формуле

$$R_1 = \frac{\rho l}{ab} \quad (17.6)$$

Здесь: ρ – удельное сопротивление полупроводниковой пластины, a – толщина пластины, b – ширина пластины, l – длина пластины (расстояние между управляющими электродами).

Ток I , который протекает между управляющими электродами, называется входным током.

С ростом напряженности магнитного поля, в которое помещается датчик, входное сопротивление датчика Холла увеличивается.

Напряжение между двумя другими (холловскими) контактами называется выходным и обозначается U_x (рис. 4.6). Сопротивление между холловскими электродами называется выходным и обозначается R_2 . Величина его при отсутствии магнитного поля определяется выражением

$$R_2 = \frac{\rho b}{al} \quad (18.6)$$

Здесь: ρ – удельное сопротивление полупроводниковой пластины, a – толщина пластины, l – ширина пластины, b – расстояние между холловскими электродами. Выходное сопротивление, так же как и входное, с увеличением магнитного поля растет. При выводе соотношения (17.6) не учтена неравномерность распределения тока по сечению датчика.

Следует отметить, что выражение (7.6) верно для бесконечно длинного проводника. Для датчика Холла, выполненного в виде прямоугольной пластины, имеющей конечные размеры, выражение для электро движущей силы (э.д.с.) Холла следует записать в виде

$$U_x = R \frac{IB}{d} 10^{-8} \varphi \left(\frac{l}{b} \right) \quad (19.6)$$

Функция $\varphi(l/b)$ характеризует относительное уменьшение э.д.с. Холла при уменьшении l/b . На практике обычно отношение l/b выбирают в пределах (1-3), при этом значение э.д.с. Холла отличается не более чем на 5%. Поэтому членом $\varphi(l/b)$ в формуле (19.6) обычно пренебрегают.

На рисунке 5.6 приведено семейство вольт-амперных характеристик датчика для одного значения входного тока, но для разных значений индукции магнитного поля. Из рисунка видно, что с ростом индукции магнитного поля крутизна зависимости $I(U_x)$ возрастает. Рост этой зависимости происходит вследствие возрастания выходного сопротивления датчика R_2 .

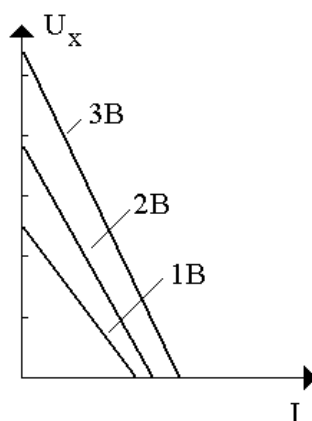


Рис. 5.6. Вольт-амперные характеристики датчика Холла

Одной из основных характеристик датчика, позволяющей оценить его эффективность, является коэффициент передачи K . Он определяется как отношение выходного напряжения к входному напряжению, при заданном значении управляющего магнитного поля:

$$K = U_x / U_y \quad (20.6)$$

Коэффициент передачи величина безразмерная и с увеличением индукции магнитного поля возрастает.

Чувствительность датчика Холла. Чувствительностью датчика Холла называется величина равная отношению э.д.с., возникающей на холловских контактах (э.д.с. Холла), к произведению магнитной индукции (B) и управляющего тока (I):

$$\gamma = \frac{U_x}{BI} \quad (21.6)$$

Важным параметром датчика Холла является магнитная чувствительность. Магнитная чувствительность (γ_H) – это отношение, характеризующее э.д.с. Холла, приходящуюся на единицу магнитной индукции:

$$\gamma_H = \frac{U_x}{B} \quad (22.6)$$

На практике, как управляющие, так и холловские металлические электроды наносят не на торцевые поверхности полупроводниковой пластины, а на одну верхнюю её поверхность, т.е. используется планарная технология. Использование планарной технологии обусловлено ее простотой и технологичностью. На рисунке 6.6 показано устройство датчика Холла, изготовленного по планарной технологии. Здесь: 1– исходная пластина

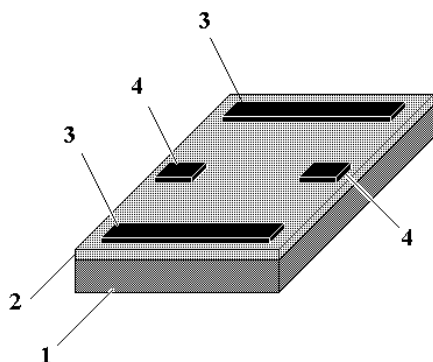


Рис. 6.6. Устройство датчика Холла, изготовленного по планарной технологии

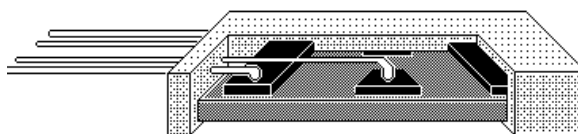


Рис. 7.6. Конструкция датчика Холла

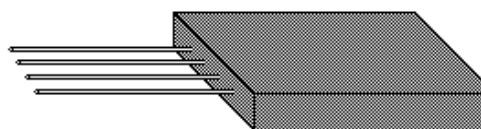


Рис. 8.6. Внешний вид одного из датчиков Холла

полупроводника, 2 – защитное диэлектрическое покрытие (обычно используется слой SiO_2), 3 – управляющие электроды, 4– холловские контакты. На рисунке 7.6. показана конструкция наиболее распространенного датчика Холла, с пластмассовой герметизацией. А на рисунке 8.6. показан внешний вид одного из таких типов датчиков Холла.

В настоящее время, для изготовления датчиков Холла, используется различные полупроводниковые материалы, но наибольшее распространение получили монокристаллический германий и кремний, легированные мышьяком, фосфором и сурьмой. Датчики, изготовленные из этих материалов, имеют достаточно высокую величину постоянной Холла и низкий температурный коэффициент (особенно датчики Холла изготовленные из кремния). Максимальная величина э.д.с. Холла, для датчиков, изготовленных из этих материалов, достигает величины 1-1.5 В. Однако как к германию, так и к кремнию очень трудно создать безинжекционные, невыпрямляющие контакты.

В некоторых случаях, для повышения чувствительности к магнитному полю, при изготовлении датчиков Холла используются полупроводниковые материалы с высокой подвижностью носителей заряда. К таким материалам относятся сурьмянистый индий, мышьяковистый индий, а также сплав сурьмянистого индия и сурьмянистого галлия. Подвижность электронов в InSb составляет $7700 \text{ см}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$, а подвижность электронов в GaAs равна $8500 \text{ см}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$, в то время как подвижность электронов в Ge равна $3800 \text{ см}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$. Однако датчики, изготовленные из этих материалов, имеют сильную зависимость сопротивления и коэффициента Холла от температуры и величины магнитного поля. Это ограничивает их применение.

Из выражения (18.6) видно, что э.д. с. Холла будет тем выше, чем тоньше образец полупроводника. Поэтому датчики э.д. с. Холла изготавливают в виде пластинок или тонких пленок.

Для получения высокого коэффициента передачи геометрические размеры наносимых пленок целесообразно выбирать в соотношении сторон l / b (длины к ширине) 2-3.

Пленочные датчики Холла изготавливаются при помощи нанесения тонких пленок на диэлектрическую подложку. Здесь используются методы термического испарения исходного материала в вакууме или ионно -

плазменное осаждение. Материалом подложки может служить слюда, керамика, стекло или другие диэлектрические материалы. Требование к используемым диэлектрическим материалам подложки заключаются в следующем. Материал подложки должен иметь хорошую адгезию напыляемого материала иметь с ним близкое значение величины температурного коэффициента линейного расширения.

В ряде случаев датчики Холла должны работать в условиях изменения температуры в интервале от -70 до $+70^{\circ}\text{C}$. Поэтому большое значение имеет температурная стабильность свойств используемых пленочных материалов. Температурные изменения свойств могут быть обратимыми и необратимыми. Обратимые изменения свойств, зависящие от температуры, связаны с изменением физических параметров, таких как концентрация носителей заряда, удельное сопротивление, механизм переноса тока т.д. Необратимые изменения свойств вызываются в основном процессами, приводящими к изменению структуры материала.

В таблице 4 приведены сравнительные характеристики датчиков Холла, изготовленных из различных материалов.

Таблица 4.

Материал	Размеры, мм	Коэффициент Холла, Cm^3/C	ρ , Ом·см	Входное сопротивление, Ом	Выходное сопротивление, Ом	Магнитная чувствительность, В/кГс	Э.Д.С. Холла при заданной магнитной индукции, мВ
Si	5x2x0,5	10	35	1200	1000	10	203
Ge	5x3x0,5	35000	1,5	2400	1500	10	360
InSb	6x3x0,35	480	0,2	1,2	1,3	10	150
InAs	5x2x0,3	$8 \cdot 10^3$	0,01	0,7	0,65	11	185

Контрольные вопросы.

1. В чем заключается эффект Холла?

2. Какая сила называется силой Лоренца?
3. В чем заключается разница между слабыми и сильными магнитными полями при изучении эффекта Холла?
4. Что называется коэффициентом Холла?
5. Что показывает коэффициент передачи датчика Холла?
6. Как определяется чувствительность датчика Холла?
7. Какие полупроводниковые материалы используются для изготовления датчиков Холла?
8. Какие материалы используются в качестве подложки пленочных датчиков Холла?
9. Какая величина называется магнитной чувствительностью датчика Холла?
10. Для измерения каких полей служат датчики Холла?

ГЛАВА VII

Терморезисторы

1.7. Принцип работы и основные характеристики терморезисторов

Практически все параметры полупроводникового материала зависят от температуры. В частности, электропроводность полупроводников, так же является функцией температуры. При повышении температуры на 10-11⁰С электрическая проводимость полупроводникового материала увеличивается примерно на 60-70%. Действительно, электронная проводимость полупроводникового материала может быть описана при помощи следующего соотношения:

$$\sigma = en\mu \quad (1.7)$$

Здесь: e – заряд электрона; n – концентрация электронов в полупроводнике; μ – подвижность электронов.

Концентрация электронов в полупроводнике описывается так:

$$n = N_c \exp \frac{F}{kT} = \frac{2}{h^3} \left(\frac{mkT}{2\pi} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \frac{F}{kT} \quad (2.7)$$

Здесь: N_C – эффективная плотность состояний; F – уровень Ферми; k – постоянная Больцмана; T – температура; m – масса электрона; \hbar – постоянная Планка.

Подставив выражение (2.7) в (1.7), увидим, что электрическая проводимость полупроводника электронного типа описывается экспоненциальной функцией температуры. Следовательно, измеряя сопротивление полупроводника, можно судить о его температуре, т. е. применять его в качестве датчика температуры. Такие датчики температуры (термометры сопротивления или терморезисторы) нашли широкое применение в технике. На рисунке 1.7.приведены, для сравнения, температурные зависимости сопротивления полупроводникового (1) и металлического (2) материалов. Видно, что изменение сопротивления у полупроводникового материала значительно больше. Более того, сопротивление металла с ростом температуры увеличивается по линейному закону, а сопротивление полупроводника уменьшается по экспоненциальному закону.

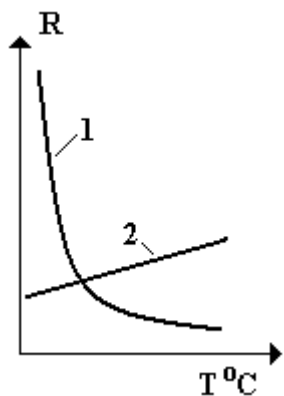


Рис. 1.7. Зависимости электрического сопротивления от температуры полупроводникового (1) и металлического (2) материала

Наиболее широкое распространение получили терморезисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), т. е. у которых при увеличении температуры сопротивление уменьшается. Однако в настоящее время уже разработаны и широко используются высокочувствительные терморезисторы имеющие положительный температурный коэффициент.

Среди них особое место занимают так называемые позисторы. В определенном интервале температур позистор имеет очень высокий температурный коэффициент сопротивления, что позволяет их широко использовать в различных схемах.

Терморезисторы с

отрицательным ТКС изготавливают из легированных полупроводников, таких как Si и Ge, из полупроводников типа $A^{III} B^V$, из смеси поликристаллических оксидов различных металлов, например, двуокиси титана с окисью магния, закись никеля с окисью лития, окись никеля с окисью кобальта, стеклообразных полупроводников и других материалов. Основными параметрами терморезисторов являются следующие. Наиболее широкое распространение получили терморезисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), т. е. у которых при увеличении температуры сопротивление уменьшается. Однако в настоящее время уже разработаны и широко используются высокочувствительные терморезисторы имеющие положительный температурный коэффициент. Среди них особое место занимают так называемые позисторы. В определенном интервале температур позистор имеет очень высокий температурный коэффициент сопротивления, что позволяет их широко использовать в различных схемах. Терморезисторы с отрицательным ТКС изготавливают из легированных полупроводников, таких как Si и Ge, из полупроводников типа $A^{III} B^V$, из смеси поликристаллических оксидов различных металлов, например, двуокиси титана с окисью магния, закись никеля с окисью лития, окись никеля с окисью кобальта, стеклообразных полупроводников и других материалов.

Основными параметрами терморезисторов являются следующие. *Номинальное сопротивление.* Это сопротивление, (R_H) измеряется на постоянном токе, при температуре $+20^\circ C$. Температурная чувствительность. Температурная чувствительность терморезистора, с физической точки зрения, показывает энергию активации электрона, необходимую для перевода его в зону проводимости. На практике температурная чувствительность выражается при помощи следующего выражения:

$$B = \frac{T_0 T}{T_0 + T} \ln \frac{R_0}{R_T} \quad (3.7)$$

Здесь: T_0 , T – начальная и конечная температура в измеряемом диапазоне температур; R_0 , R_T – начальное и конечное значение величин сопротивлений терморезистора.

Температурный коэффициент сопротивления (ТКС). Температурный коэффициент сопротивления показывает относительное изменение сопротивления терморезистора (dR_T) на 1° изменения температуры (dT):

$$TKC = \frac{1}{R_T} \frac{dR_T}{dT} \quad (4.7)$$

Используя понятие температурной чувствительности (B), температурный коэффициент сопротивления можно выразить так:

$$TKC = - \frac{B}{T^2} \quad (5.7)$$

Максимальная рабочая температура (T_{max}). Этот параметр показывает величину температуры, при которой терморезистор сохраняет свои характеристики.

Максимально допустимая мощность (P_{max}). Максимально допустимая мощность рассеиваемая терморезистором – это мощность при которой может быть обеспечена его стабильная работа. Максимально допустимая мощность может быть определена при помощи следующего выражения:

$$P_{max} = \frac{T_{max} - T_0}{R_T} \quad (6.7)$$

Коэффициент рассеяния (H). Коэффициент рассеяния определяется как мощность рассеяния, вызвавшая нагрев терморезистора на $1^\circ C$ по сравнению с температурой окружающей среды. На рисунке 2.7 приведены вольт-амперные характеристики терморезистора, снятые при различных температурах. Из приведенных зависимостей видно, что на начальном

участке вольт – амперной характеристики, на котором $dI/dU > 0$, зависимость $I(U)$ линейная. Это обусловлено тем, что при малых токах, протекающих через терморезистор, выделяемая мощность мала и объем материала резистора не нагревается. На этом участке соблюдается закон Ома. При увеличении величины тока, протекающего через терморезистор, возрастает выделяемая мощность, что приводит к нагреву объема полупроводника, увеличению числа термо генерированных электронов и, как следствие, к уменьшению сопротивления. При некотором значении тока, равном I_{Π} , относительное увеличение тока становится равным вызванному им относительному понижению сопротивления. В результате, напряжение на терморезисторе остается постоянным, равным своему максимальному значению U_{Π} . При дальнейшем увеличении тока, протекающего через терморезистор, его сопротивление понижается сильнее, чем увеличивается ток, и напряжение на нем уменьшается. Такая положительная обратная связь по току приводит к его лавинообразному возрастанию и к возникновению участка с отрицательным сопротивлением. На этом участке $dI/dU < 0$, т.е. дифференциальное сопротивление отрицательно.

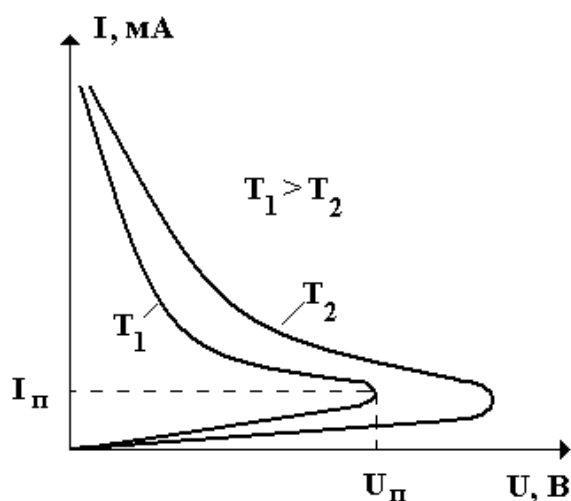


Рис. 2.7. Вольт-амперная характеристика терморезистора при различных температурах

Режим работы терморезисторов зависит от того, на каком участке статической вольт-амперной характеристики (ВАХ) выбрана рабочая точка. Терморезисторы с рабочей точкой на начальном (линейном) участке ВАХ используются для измерения и контроля температуры и компенсации температурных изменений параметров электрической цепей и электронных приборов. Терморезисторы с рабочей точкой на нисходящем участке ВАХ (с отрицательным сопротивлением) применяются в качестве пусковых реле, реле времени, стабилизаторов температуры и напряжения. Режим работы терморезистора, при котором рабочая точка находится также на ниспадающем участке ВАХ (при этом используется зависимость сопротивления терморезистора от температуры и теплопроводности окружающей среды), характерен для терморезисторов, применяемых в системах теплового контроля и пожарной сигнализации, регулирования уровня жидких и сыпучих сред. Действие таких терморезисторов основано на возникновении релейного эффекта в цепи с терморезистором при изменении температуры окружающей среды или условий теплообмена терморезистора со средой. Различают терморезисторы низкотемпературные (рассчитанные на работу при температурах окружающей среды ниже 170 К), среднетемпературные (170 - 510 К) и высокотемпературные (выше 570 К). Кроме того, существуют терморезисторы, предназначенные для работы при 4,2 К и ниже и при 900-1300 К. Наиболее широко используются среднетемпературные терморезисторы с ТКС от $-2,4$ до $-8,4$ % / К и номинальным сопротивлением $1-10^6$ Ом. В качестве примера приведем данные о терморезисторах, изготовленных на основе кремния. В качестве исходного материала использовался кремний n-типа проводимости с удельным сопротивлением 1 Ом·см. Терморезисторы, изготовленные на основе этого материала, в зависимости от своих геометрических размеров, обладают номинальными сопротивлениями 50-500 Ом и практически линейной зависимостью ТКС ($0,7-1\%$ на 1°C). На рисунке 3.7. показано

устройство интегрального терморезистора с отрицательным ТКС, изготовленном на основе кремния. Здесь: 1 – полупроводниковая подложка, 2 – омические контакты. На рисунке 4.7. показано устройство дискретного терморезистора, помещенного в пластмассовый корпус.

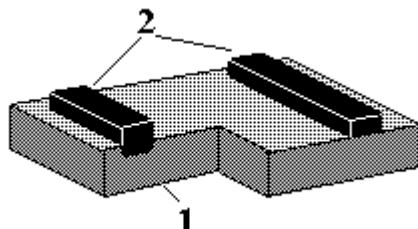


Рис. 3.7. Устройство интегрального терморезистора, изготовленного на основе кремния

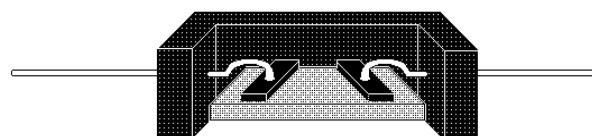


Рис. 4.7. Устройство дискретного терморезистора.

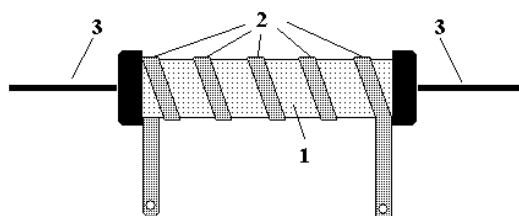


Рис. 5.7. Устройство терморезистора с косвенным подогревом

В дискретном исполнении изготавливаются также терморезисторы специальной конструкции – с косвенным подогревом. В таких терморезисторах имеется дополнительный элемент: подогреватель, или нагревательная обмотка. Подогреватель электрически изолирован от полупроводникового резистивного элемента. Если мощность, выделяющаяся в резистивном элементе, мала, то тепловой режим терморезистора определяется температурой подогревателя, то есть током в нём. Таким

образом, появляется возможность изменять состояние терморезистора, не меняя ток через него. Такой терморезистор используется в качестве переменного резистора, управляемого током, протекающим через нагреватель. На рисунке 5.7 показано устройство терморезистора с косвенным подогревом. Здесь: 1- стержень из полупроводникового материала; 2- нагревательная обмотка; 3 - внешние выводы. Дискретные терморезисторы изготавливают в виде стержней, трубок, дисков, шайб, бусинок и тонких пластинок. Терморезисторы с косвенным подогревом изготавливаются, как правило, в виде стержней. Размеры дискретных терморезисторов могут варьироваться в пределах от 1-10 мкм до 1-2 см. На рисунке 6.7. показан внешний вид некоторых терморезисторов, изготовленных в дискретном варианте.

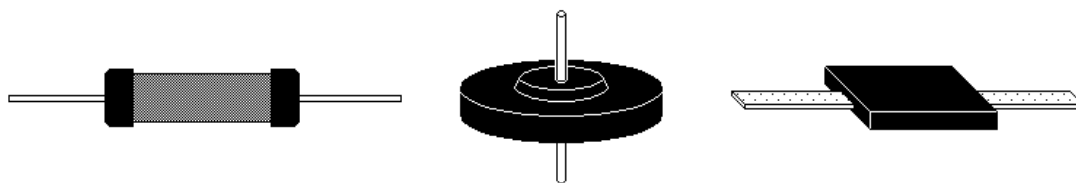


Рис. 6.7. Внешний вид дискретных терморезисторов

2.7. Принцип работы и основные характеристики позисторов

Терморезисторы имеющие положительный температурный коэффициент сопротивления, называются – позисторы. Позисторы изготавливаются из титанобариевой керамики с примесями редкоземельных элементов. Наиболее широкое применение получили такие элементы, как лантан и церий. Изменяя процентное содержание редкоземельных элементов, можно изменять диапазон сильного изменения температурной зависимости ТКС терморезисторов и, следовательно, изменять их рабочие характеристики. В настоящее время большое распространение получили терморезисторы, изготовленные из твёрдых растворов на основе BaTiO_3 .

Титанат бария - диэлектрик. При низких температурах в нем очень высока спонтанная (самопроизвольная) поляризация, высота барьеров между зернами мала, диэлектрическая проницаемость $\epsilon > 1000$. Он является сегнетоэлектриком. При нагреве до температуры, соответствующей точке Кюри (для титаната бария 125°C) и выше, спонтанная поляризация пропадает, происходит фазовое превращение титаната бария в параэлектрик, диэлектрическая проницаемость ϵ резко уменьшается до единиц, растет высота потенциальных барьеров на границах зерен и сопротивление позистора многократно возрастает. Следствие такого фазового перехода – позисторный эффект (увеличение электрического сопротивления материала на несколько порядков в узком температурном интервале). Изменение температуры перехода обеспечивается введением добавок, образующих с материалом основы твердые растворы ($-\text{BaTiO}_3$ - PbTiO_3 , $-\text{CaTiO}_3$, $-\text{SrTiO}_3$, $-\text{BaSnO}_3$ и др.) и смещающих его температуру Кюри. Например, частичное замещение ионов бария ионами свинца повышает температуру Кюри, а замещение бария ионами стронция – понижает ее. Значительный интерес представляет зависимость ТКС позистора от температуры. На рисунке 7.7 приведена температурная зависимость терморезисторов с отрицательным (кривая 1) и с положительным (кривая 2) ТКС. Из рисунка видно, что позисторы имеют резкое изменение ТКС при увеличении температуры, в узком интервале температуры. Так увеличение ТКС почти в шесть раз происходит в интервале температуры 50 градусов.

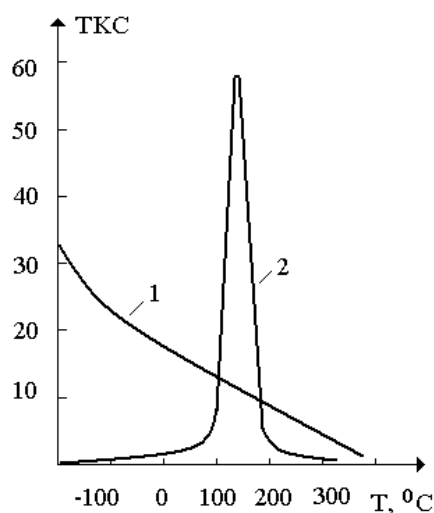


Рис. 7.7. Температурная зависимость ТКС терморезисторов с отрицательным (1) и положительным (2) ТКС

Разработаны позисторы с небольшим положительным температурным коэффициентом ($0,5\text{--}0,7\text{ \%/K}$), выполненные на основе кремния с электронным типом проводимости. Сопротивление таких позисторов изменяется с температурой примерно по линейному закону. Статическая вольтамперная характеристика позистора - это зависимость падения напряжения на позисторе от проходящего через него тока в условиях теплового равновесия терморезистора с окружающей средой. Статическая Вольтамперная характеристика одного из типов позисторов приведена на рисунке 8.7.

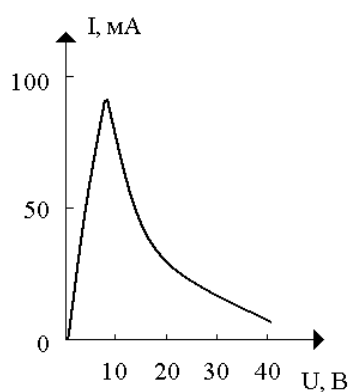
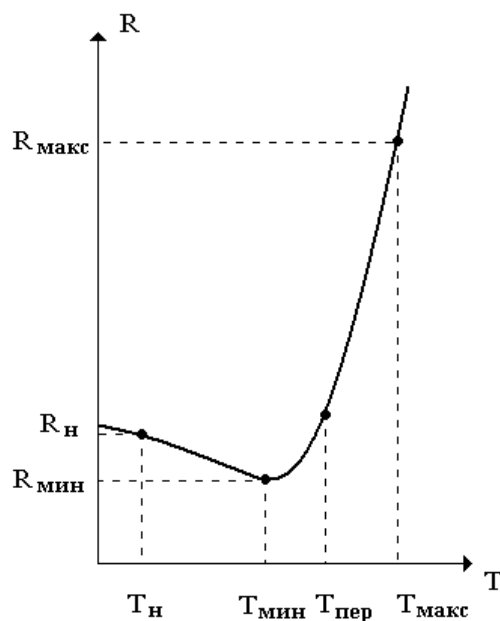


Рис. 8.7. Статическая вольт — амперная характеристика позистора

Из сравнения вольт-амперных характеристик термисторов (рис. 2.7.) и позистора (рис. 7.7.) видно, что начальные участки ВАХ и термисторов, и позисторов практически линейны. При дальнейшем увеличении тока подводимая мощность возрастает, происходит саморазогрев терморезисторов и подводимое напряжение у термисторов уменьшается из-за уменьшения их сопротивления. У позисторов, при увеличении тока подводимая мощность возрастает, происходит разогрев от подводимой мощности до температуры, соответствующей точке Кюри, и при дальнейшем увеличении подводимого напряжения (>10 В для позистора, ВАХ которого показана на рисунке 8.7), ток резко уменьшается за счет увеличения сопротивления материала позистора. Основная характеристика позистора - температурная зависимость сопротивления определяемая при мощности, не вызывающей дополнительного разогрева прибора.

Температурная зависимость сопротивления позистора приведена на рисунке 9.7. Выделенные на этом рисунке точки показывают основные параметры позистора. R_n - номинальное сопротивление при определенной температуре окружающей среды. T_n - номинальная температура окружающей среды (обычно - это 25°C или 20°C). $R_{\text{мин}}$ - минимальное сопротивление позистора. $R_{\text{макс}}$ - максимальное сопротивление позистора. $T_{\text{пер}}$ - температура переключения, соответствующая началу области положительного ТКС; ее определяют как температуру, при которой сопротивление увеличивается в 2 раза по отношению к R_n или $R_{\text{мин}}$. $T_{\text{макс}}$ - максимальная температура, соответствующая точке в верхней части области резкого увеличения сопротивления.



**Рис. 9.7. Температурная
зависимость сопротивления
позистора**

$T_{\text{мин}}$ – минимально допустимая температура. Имеются терморезисторы с величинами $T_{\text{мин}}$ в пределах от -196°C до 0°C и $T_{\text{макс}}$ в пределах от 50°C до 300°C . $T_{\text{пер}}$ – температура переключения, соответствующая началу области положительного ТКС (ее определяют как температуру, при которой сопротивление позистора увеличивается в два раза по отношению к $R_{\text{н}}$ или $R_{\text{мин}}$). Важное значение имеют и такие параметры, как кратность изменения сопротивления $K = R(T_{\text{макс}})/R_{\text{н}}$ и температурный коэффициент сопротивления. Температурный коэффициент сопротивления ТКС – это изменение сопротивления позистора, в % при изменении его температуры на 1°C .

$$\text{ТКС} = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} 100, \%/\text{град} \quad (7.7)$$

Коэффициент температурной чувствительности В:

$$B = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_1}{R_2}, \text{ К} \quad (8.7)$$

Здесь: R_1 и R_2 – сопротивления позистора при температурах соответственно T_1 и T_2 (в градусах по шкале Кельвина).

Максимальная рассеиваемая мощность $P_{\text{макс}}$ [мВт] – это максимально допустимая мощность, которую позистор может рассеивать при непрерывной электрической нагрузке и заданной температуре окружающей среды, сохраняя параметры в пределах норм. $P_{\text{макс}}$ обычно задается для 2-х температур – комнатной (20°C) и максимальной. С ростом температуры окружающей среды $P_{\text{макс}}$ уменьшается в десятки и сотни раз. Максимальное напряжение ($U_{\text{макс}}$) – напряжение, которое может быть приложено к позистору длительное время. $I_{\text{опр}}$ – ток опрокидывания позисторов это минимальный ток через терморезистор, при котором электрическая мощность достаточна для разогрева терморезистора до температуры переключения $T_{\text{пер}}$. $I_{\text{сраб}}$ – ток срабатывания, $I_{\text{сраб}} > I_{\text{опр}}$ и обычно $I_{\text{сраб}} \sim 1,4 \cdot I_{\text{опр}}$; при токах $I \geq I_{\text{сраб}}$ позистор находится в области резкого роста сопротивления с температурой. Максимальный пусковой ток ($I_{\text{макс}}$) – максимально допустимый пусковой ток, при превышении которого может произойти разрушение позистора. Номинальный ток ($I_{\text{ном}}$) – максимальный ток через терморезистор, при котором температура разогрева терморезистора не превышает температуру переключения $T_{\text{пер}}$, $I_{\text{ном}} < I_{\text{опр}}$, обычно $I_{\text{ном}} = (0,5 \dots 0,65) I_{\text{опр}}$.

В таблице приведены сравнительные параметры двух позисторов.

Таблица 5

Тип	R_n , Ом	$T_{\text{пер}}, ^\circ\text{C}$	Темпера- турный коэфф. сопротив- ления, %/°C	Макси- мальное напря- жение, В	Ток опроки- дыва- ния, мА	Номи- нальный ток, мА	Ток сраба- тыва- ния, мА	Макси- мальное пуско- вое ток, А
-----	---------------	----------------------------------	---	--	---------------------------------------	--------------------------------	--------------------------------------	--

ТПР-19	270-1500	60±10	12	300	10-30	5-15	14-42	0,1
ТПР-27	10...1500	120±10	12-13	60-300	26-300	15-180	20-250	0,1-0,6

На рисунке 10.7. показан внешний вид некоторых позисторов, изготовленных в дискретном варианте.

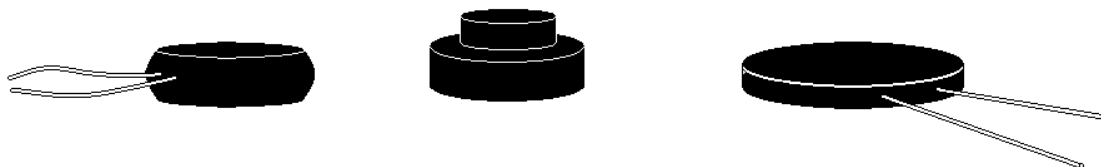


Рис. 10.7. внешний вид некоторых позисторов, изготовленных в дискретном варианте

Контрольные вопросы.

1. Какой прибор называется терморезистором?
2. Какой прибор называется позистором?
3. Из каких материалов изготавливают терморезисторы с отрицательным ТКС?
4. Чем объясняется температурная зависимость проводимости полупроводниковых материалов?
5. Что показывает номинальное сопротивление терморезистора?
6. Что показывает температурная чувствительность терморезистора?
7. Какова причина увеличения сопротивления материала позистора при увеличении его температуры?
8. Что показывает статическая вольт-амперная характеристика позистора?
9. Что показывает температурный коэффициент сопротивления позистора?
10. Что показывает максимальное напряжение позистора?
11. Какой прибор называется «терморезистор с косвенным подогревом»?
12. В чем заключается различие между низкотемпературными и высокотемпературными терморезисторами?

ГЛАВА VIII

Варисторы

1.8. Принцип работы и основные характеристики варисторов

Варистор (переменный резистор) – полупроводниковый резистор, электрическое сопротивление которого нелинейно зависит от приложенного напряжения. Варисторы обладают нелинейной симметричной вольт-амперной характеристикой. Вольт-амперная характеристика одного из типов варисторов приведена на рисунке 1.8. Из рисунка видно, что при любой полярности прикладываемого напряжения, закономерность изменения тока сохраняется. Симметричность вольт-амперной характеристики объясняется следующими причинами. Изготавливают варисторы спеканием при температуре около 1700 °С полупроводника преимущественно порошкообразного карбида кремния SiC или оксида цинка ZnO (с размерами зерен порошка 20 - 180 мкм) и связующего вещества (глина, жидкое стекло, лаки, смолы и др.).

В результате варистор представляет собой объемную структуру, состоящую из конгломерата зерен с самой разной величиной зазоров и площадей соприкосновения. При приложении малых напряжений к такой структуре, напряженность поля в объеме варистора мала, ток будет протекать только через места непосредственного соприкосновения кристаллических зерен. При этом, протекающий ток будет мал и прямо пропорционален напряжению (начальный участок вольт-амперной характеристики, показанный на рисунке 1.8, практически линеен). С ростом напряжения (участок вольт-амперной характеристики при напряжениях превышающих 6 вольт) общее сопротивление варистора уменьшается, а протекающий ток возрастает за счет действия нескольких явлений, происходящих на точечных контактах и поверхности кристаллов SiC (или ZnO). К таким явлениям, в первую очередь, относятся: тепловой эффект – нагрев точечных контактов кристаллов SiC, ведущий к уменьшению сопротивления между ними; туннелирование носителей заряда между гранями кристаллов; пробой оксидных пленок, образующихся на поверхности кристаллов.

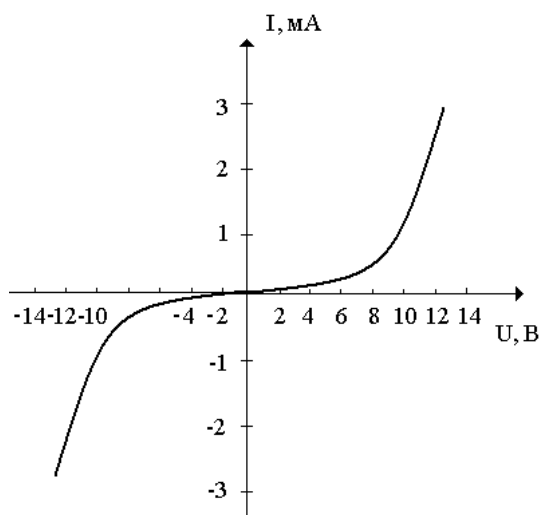
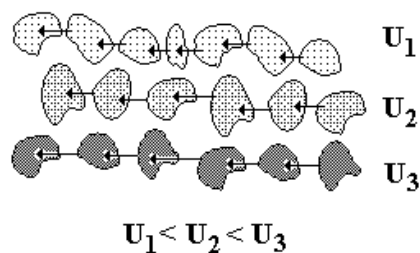


Рис. 1.8. Вольт-амперная характеристика варистора

Чем выше прикладываемое напряжение, тем большее число участков с зазорами между кристаллами начинают участвовать в проводимости и ток увеличивается. Практически все напряжение, приложенное к варистору, падает на участках между зазорами. При мелкозернистой структуре эти механизмы практически не зависят от полярности приложенного напряжения - соответственно ВАХ варистора получается симметричной.

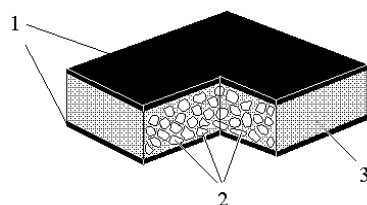
На рисунке 2.8. условно показана зависимость тока, протекающего через межкристаллические зазоры структуры варистора от величины прикладываемого напряжения. Видно, что с увеличением напряжения, ток начинает протекать через участки с большими расстояниями между отдельными кристаллами. Таким образом, при малых напряжениях на варисторе нелинейность ВАХ связана с зависимостью проводимости поверхностных потенциальных барьеров от величины напряжения. При больших напряжениях на варисторе и соответственно, при больших токах, проходящих через варистор, плотность тока в точечных контактах оказывается очень большой. Все напряжение, приложенное к варистору, падает на точечных контактах. Поэтому мощность в единице объема,



**Рис. 2.8. зависимость тока, протекающего через
межкристаллические зазоры структуры варистора
от величины прикладываемого напряжения**

выделяющаяся в точечных контактах приводит к уменьшению общего сопротивления варистора и нелинейности его вольт-амперной характеристики. Однако, в первую очередь, нелинейность характеристик варисторов обусловлена локальным нагревом соприкасающихся граней многочисленных кристаллов карбида кремния (или иного полупроводника). При локальном повышении температуры на границах кристаллов сопротивление последних существенно снижается, что приводит к уменьшению общего сопротивления варисторов.

Конструктивно варисторы выполняются обычно в виде параллелепипедов, дисков, таблеток, стержней; существуют бусиновые и плёночные варисторы. В качестве примера на рисунке 3.8. показано устройство варистора выполненного в виде параллелепипеда. Здесь: 1 — металлические контакты; 2 — кристаллы карбида кремния; 3 — полупроводниковая подложка из порошкообразного карбида кремния или оксида цинка и связующего вещества.



**Рис. 3.8. Устройство варистора, изготовленного
на основе карбида кремния**

На рисунке 4.8. приведены несколько прямых ветвей вольт-амперных характеристик варисторов, изготовленных на основе SiC и ZnO.

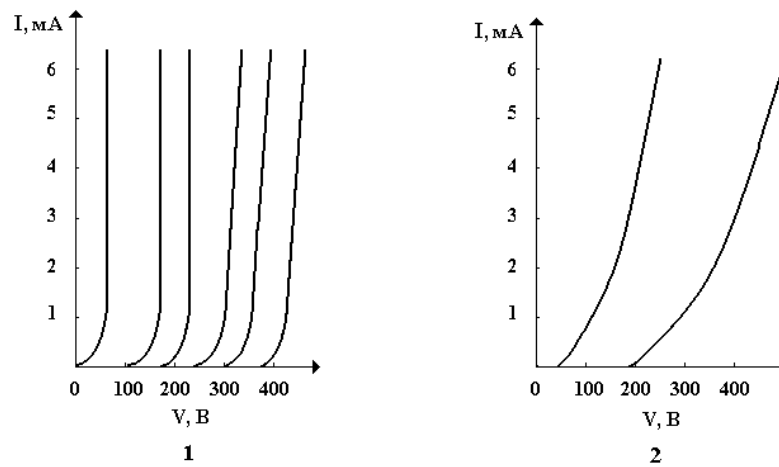


Рис. 4.8. Вольт-амперные характеристики различных варисторов. 1 – изготовленных на основе ZnO, 2 – изготовленных на основе SiC

2.8. Основные параметры варисторов

Классификационный ток. Классификационный ток $I_{\text{кл}}$ – это величина тока, при котором определяются основные параметры варистора. Для большинства варисторов $I_{\text{кл}}$ лежит в пределах 2 - 20 мА, у высоковольтных варисторов этот ток равен 0,05 мА. *Классификационное напряжение.* Классификационное напряжение $U_{\text{кл}}$ – это напряжение на варисторе, соответствующее классификационному току $I_{\text{кл}}$. Диапазон классификационного напряжения для различных варисторов лежит в пределах от 5 В до 25 кВ. *Статическое сопротивление.* Статическое сопротивление R – значение сопротивления варистора в заданном режиме при постоянных величинах тока и напряжения. *Динамическое сопротивление.* Динамическое сопротивление r – значение сопротивления варистора малому переменному току.

$$r = \frac{dU}{dI} \quad (1.8)$$

Динамическое сопротивление r может быть определено по наклону вольт-амперной характеристики варистора в рассматриваемой рабочей точке.

На рисунке 5.8. показана зависимость статического R сопротивления варистора от величины приложенного к нему напряжения.

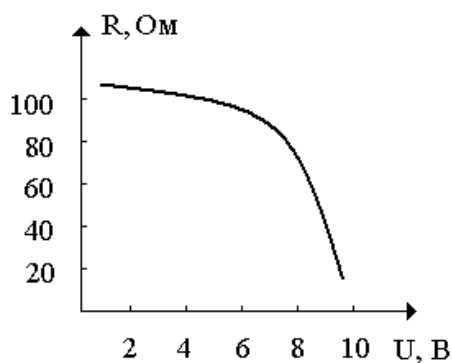


Рис. 5.8. Зависимость статического сопротивления варистора от напряжения

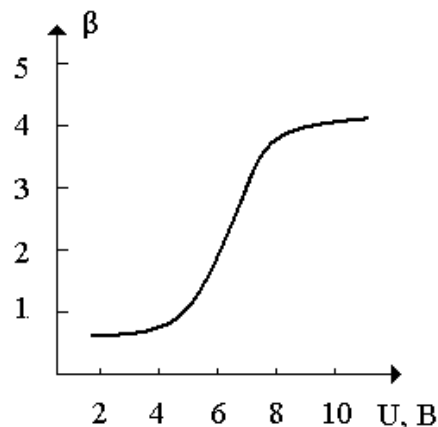


Рис. 6.8. Зависимость коэффициента нелинейности варистора от напряжения

Коэффициент нелинейности β – это отношение статического сопротивления к динамическому в рабочем режиме:

$$\beta = \frac{R}{r} \quad (2.8)$$

В рабочей области напряжений у варисторов из карбида кремния $\beta = 3 - 6$, но имеются варисторы с $\beta \geq 2$ (низковольтные) и с $\beta = 5 - 10$ (высоковольтные).

В рабочей области напряжений коэффициент нелинейности у варисторов на основе SiC лежит в пределах 2-10, у варисторов на основе ZnO эта величина составляет 20-100. На рисунке 6.8. показана зависимость коэффициента нелинейности варистора, изготовленного на основе карбида кремния, от напряжения. *Диапазон рабочих температур.* Диапазон рабочих температур варисторов лежит в пределах от $T_{\min} = -(40 - 60)^{\circ}\text{C}$ до $T_{\max} = +(70 - 125)^{\circ}\text{C}$.

Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) – изменение сопротивления варистора, в % при изменении его температуры на 1°C .

$$TKC = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} 100, \%/\text{град} \quad (3.8)$$

Температурный коэффициент сопротивления варистора величина отрицательная и для большинства варисторов лежит в диапазоне 0 - 0,7%/град. Допустимая рассеиваемая мощность $P_{\text{доп}}$ – это максимально допустимая мощность, которую варистор может рассеивать при непрерывной электрической нагрузке и заданной температуре окружающей среды, сохраняя параметры в пределах норм. В настоящее время промышленностью различных стран выпускаются варисторы с допустимой мощностью рассеивания от 10 мВт до 15 Вт.

Низковольтные варисторы изготавливают на рабочее напряжение лежащее в пределах от 3 до 200 В и ток от 0,1 мА до 1 А; высоковольтные варисторы – на рабочее напряжение до 20 кВ.

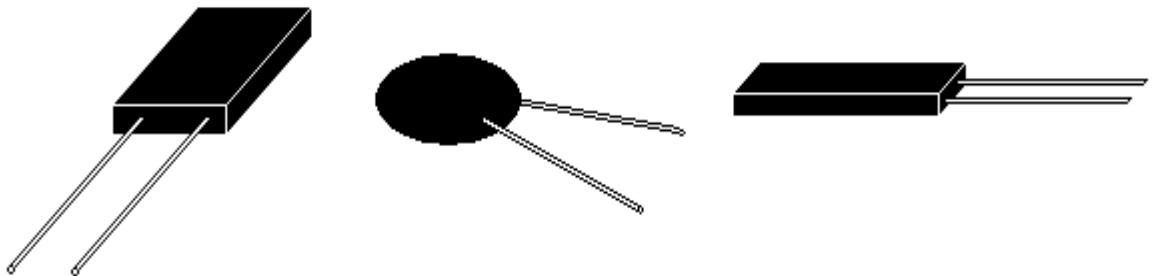


Рис. 7.8 Внешний вид дискретных варисторов

Контрольные вопросы.

1. Что такое варистор?
2. Из каких материалов изготавливают варисторы?
3. Что характерно для внутреннего строения варисторов?
4. Какими параметрами характеризуется варистор?
5. Что такое коэффициент нелинейности варистора?
6. Чем обусловлена симметрия вольт-амперной характеристики варисторов?

7. Что показывает температурный коэффициент сопротивления варистора?
8. Что такое динамическое сопротивление варистора?
9. Как определить динамическое сопротивление варистора?
10. В чем различие между низковольтными и высоковольтными варисторами?

ГЛАВА IX

Элементы Пельтье

1.9. Эффект Пельтье

Элемент Пельтье – это термоэлектрический преобразователь, принцип действия которого базируется на эффекте Пельтье. Эффект Пельтье заключается в том, что при прохождении электрического тока через контакт двух веществ на контакте, кроме тепла Джоуля, в зависимости от направления тока, выделяется или поглощается тепло.

Причина возникновения явления Пельтье заключается в следующем. На контакте двух веществ имеется контактная разность потенциалов, которая создаёт внутреннее контактное поле. Если через контакт протекает электрический ток, то это поле будет, либо способствовать прохождению носителей заряда через контакт, либо препятствовать. Если ток идёт против контактного поля, то внешний источник должен затратить дополнительную энергию, которая выделяется в контакте, что приводит к его нагреву. Если же ток идёт по направлению контактного поля, то он может поддерживаться этим полем, которое и совершает работу по перемещению носителей заряда. Необходимая для этого энергия отбирается у вещества, что приводит к охлаждению контакта. В качестве примера рассмотрим тепловые явления, возникающие при прохождении тока через контакт металл–полупроводник.

На рисунке 1.9. показана зонная энергетическая диаграмма контакта металл-полупроводник. Пусть при приложении внешнего напряжения к контакту электроны перемещаются из полупроводника в металл. Как видно

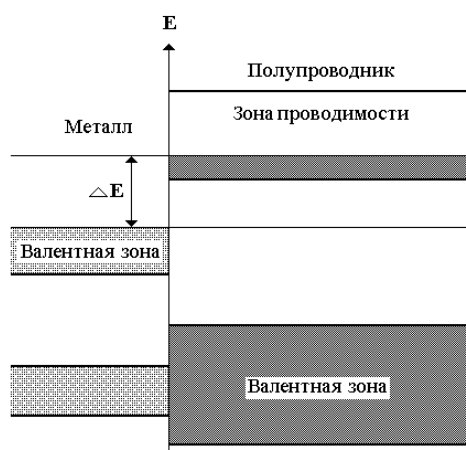


Рис. 1.9. Зонная энергетическая диаграмма контакта металл-полупроводник

из рисунка, средняя энергия электронов больше средней энергии в металле

кинетическая в полупроводнике кинетической на величину ΔE .

Следовательно, переходящий из металла, отдает свою избыточную энергию атомам металла, которая выделяется в виде тепла вблизи контакта. При приложении внешнего напряжения в обратном направлении, электроны будут перемещаться из металла в полупроводник. При этом, чтобы перейти из металла в полупроводник, электрон должен обладать энергией на величину ΔE большей чем средняя кинетическая энергия электронов в металле. Это означает, что каждый электрон, переходящий из металла в полупроводник отбирает у металла энергию равную ΔE . Эта энергия не передается материалу полупроводника, так как электроны, перешедшие в полупроводник, будут находиться в состоянии термодинамического равновесия с электронами, имеющимися в полупроводнике. Это количество энергии поглощается в при контактной области металла, в следствии чего, контакт охлаждается. Для поддержания процесса охлаждения металл должен

непрерывно снабжать энергией электроны, чтобы восстановить ее распределение, нарушенное переходом электронов с более высокой энергией в полупроводник. Эта энергию электроны приобретают за счет взаимодействия с решеткой металла. Тепло, отбираемое у металла в при контактной области, передается другим его участкам.

Количественное выражение степени охлаждения или нагрева можно представить отношением поглощенного или выделившегося тепла к прошедшему через контакт заряду:

$$\Pi = \pm \frac{\Delta E}{e} = \alpha T \quad (1.9)$$

Здесь: α – коэффициент термо электро движущей силы (э.д.с.).

Количество тепла, которое выделяется или поглощается на контакте , может быть выражено при помощи следующего выражения:

$$Q = \Pi It \quad (2.9)$$

Здесь: Π – коэффициент Пельтье; J – плотность протекающего тока; t – время, в течении которого протекает ток.

Из приведенных соотношений видно, что количество выделяемого тепла, значительно больше у полупроводниковых материалов, чем у металлов, т.к. коэффициент термо э.д.с. у полупроводников значительно выше. Поэтому, на практике используются контакт двух полупроводников.

Рассмотрим контакт двух полупроводниковых материалов одинакового типа проводимости с разными уровнями энергии электронов в зоне проводимости (материалы 1 и 2 на рисунке 2.9) . При протекании тока через контакт таких материалов, электрон должен приобрести дополнительную энергию ΔE , чтобы перейти в более высокоэнергетическую зону проводимости другого полупроводника (в направлении из 2 в 1). При поглощении этой энергии происходит охлаждение места контакта полупроводников. При протекании тока в обратном направлении (в направлении из 1 в 2) происходит нагревание контакта полупроводников, за счет выделения энергии ΔE , дополнительно к

обычному тепловому эффекту. Количество выделяемого, или поглощаемого тепла на контакте пропорционально плотности тока и времени его

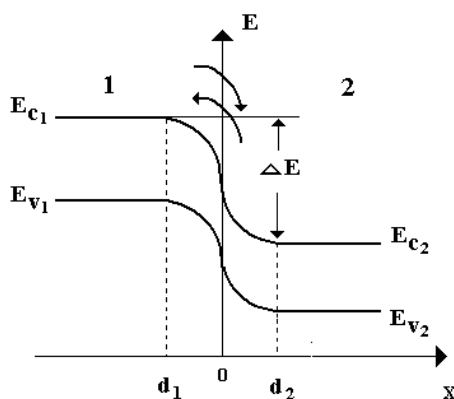


Рис. 2.9. Эффект Пельтье на контакте двух полупроводниковых материалов одинакового типа проводимости

протекания. Из сказанного следует, что причина возникновения эффекта Пельтье на контакте полупроводников с одинаковым видом носителей тока (два полупроводника n-типа или два полупроводника p-типа) такая же, как и в случае контакта двух металлических проводников. Носители заряда (электроны или дырки) по разные стороны контакта имеют различную среднюю кинетическую энергию. Если носители заряда, пройдя через контакт, попадают в область с меньшей энергией, они передают избыток энергии кристаллической решетке, в результате чего вблизи контакта происходит выделение теплоты Пельтье ($Q > 0$) и температура контакта повышается. При этом на другом спале носители, переходя в область с большей энергией, заимствуют недостающую энергию от решетки, происходит поглощение теплоты Пельтье ($Q < 0$) и понижение температуры.

Эффект Пельтье, как и все термоэлектрические явления, наиболее сильно проявляется в контактах, созданных на основе электронных (n - типа) и дырочных (p - типа) полупроводников. В этом случае эффект Пельтье имеет другое объяснение. Рассмотрим ситуацию, когда при приложении внешнего напряжения к p- n переходу в прямом направлении, ток через

переход идет от дырочного полупроводника к электронному. Основными носителями заряда в полупроводнике p - типа проводимости являются дырки. Поступая в полупроводник n - типа проводимости дырки рекомбинируют с основными носителями заряда в этой области перехода – с электронами. В результате рекомбинации освобождается энергия, которая выделяется в виде тепла. Следовательно, при контактная область полупроводника n - типа проводимости разогревается.

При приложении внешнего напряжения к p - n переходу в обратном направлении, ширина области объемного заряда увеличивается, т.к. электроны в электронном и дырки в дырочном полупроводниках, под действием электрического поля, уходят от границы раздела. Уменьшение числа подвижных носителей заряда в пограничных областях p - n перехода восполняется за счет процесса термической генерации: попарного рождения электронов и дырок. На образование таких пар требуется энергия, которая поставляется тепловыми колебаниями атомов решетки. Термически генерированные электроны и дырки увлекаются электрическим полем в противоположные стороны. Поэтому пока через контакт идет ток, непрерывно происходит рождение новых пар. В результате при контактная область p - n перехода поглощает тепло и охлаждается.

2.9. Устройство и основные характеристик элементов Пельтье

Элемент Пельтье состоит из одной или более пар небольших полупроводниковых параллелепипедов. Один из параллелепипедов изготавливается из полупроводника n -типа проводимости, а другой из полупроводника p -типа проводимости. Обычно в качестве полупроводника n -типа проводимости, используется теллурид висмута (Bi_2Te_3), а в качестве полупроводника p -типа проводимости – германид кремния. Параллелепипеды из указанных материалов соединены попарно при

помощи металлических перемычек. На рисунке 3.9. показано устройство одного из типов элементов Пельтье. Здесь: 1– металлические контакты; 2 – полупроводник n-типа проводимости; 3– полупроводник p-типа проводимости. Пары параллелепипедов соединяются таким образом, что образуется последовательное соединение многих пар полупроводников с разным типом проводимости, так чтобы сверху были одни последовательности соединений ($n \rightarrow p$), а снизу противоположные ($p \rightarrow n$). Электрический ток протекает последовательно через все параллелепипеды. В зависимости от направления тока верхние (рис.3.9) контакты охлаждаются, а нижние нагреваются или наоборот. Таким образом, электрический ток способствует переносу тепла с одной стороны элемента Пельтье на противоположную и создаёт разность температур.

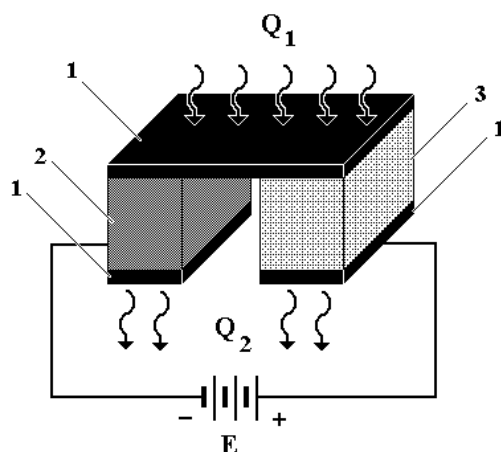


Рис. 3.9. Устройство элемента Пельтье

Если охлаждать нагревающуюся сторону элемента Пельтье, например при помощи радиатора и вентилятора, то температура холодной стороны становится ещё ниже. В одноступенчатых элементах, в зависимости от типа элемента и величины тока, разность температур может достигать приблизительно 70 К.

Для элемента Пельтье, показанного на рисунке 3.9, при прохождении тока контакты, расположенные в нижней части, выделяют тепло, а контакты,

расположенные с верху поглощают тепло. В результате между контактами образуется некоторая разность температур.

Количество теплоты, поглощаемого на нагреваемом контакте, в самом общем виде можно выразить при помощи следующего выражения:

$$Q_1 = \alpha T_1 I t \quad (3.9)$$

Здесь: α – коэффициент термо электродвижущей силы (термо э.д.с.), знак которого зависит от направления тока; T_1 – температура нагреваемого контакта; I – ток, протекающий через контакт, t – время протекания тока.

Количество теплоты, отбираемое от охлаждаемого контакта, можно выразить при помощи следующего выражения:

$$Q_2 = \alpha T_2 I t \quad (4.9)$$

Здесь: T_2 – температура охлаждаемого контакта.

Если температуру нагреваемого контакта поддерживать постоянной, например, за счет тепло отвода, то между контактами возникает стационарная разность температур:

$$\Delta T = T_1 - T_2 \quad (5.9)$$

При этом отношение выделяемого и поглощаемого тепла

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (6.9)$$

Возникающая разность тепловых энергий компенсируется за счет электрической энергии

$$Q_2 - Q_1 = E \quad (7.9)$$

Отношение затрачиваемой электроэнергии к выделяемой тепловой энергии можно выразить следующим образом:

$$\frac{E}{Q_1} = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \quad (8.9)$$

Здесь необходимо отметить, что наряду с эффектом Пельтье (выделение или поглощение теплоты, при протекании тока через контакт) имеет место выделение теплоты за счет нагревания объема материала полупроводника $Q = 0,5 I^2 R$ (Эффект Джоуля). При больших величинах протекающего тока, выделяемое количество теплоты за счет эффекта Джоуля может превышать количество теплоты поглощаемого за счет эффекта Пельтье. В этом случае оба контакта будут разогреваться. Для нахождения оптимальной величины протекающего через контакт тока выразим сумму поглощаемого и выделяемого на контакте тепла в единицу времени:

$$Q_1 = 0,5 I^2 R - \Pi \quad (9.9)$$

$$I_{\text{оп}} = \frac{\Pi}{R} \quad (10.9)$$

Далее, подставив (10.9) в (9.9), найдем выражение для наибольшего охлаждения:

$$Q_{\text{min}} = - \frac{\Pi^2}{2R} \quad (11.9)$$

Из выражения (10.9) следует, что для получения наибольшего охлаждения, т.е. для достижения наибольшей эффективности термоэлемента, целесообразно использовать полупроводники с малыми значениями сопротивлений.

Основными характеристиками элементов Пельтье являются:

$U_{\text{макс}}$ - максимальное напряжение – напряжение, которое может быть приложено к элементу длительное время.

$I_{\text{макс}}$ - максимальный ток – максимально допустимый ток, при превышении которого может произойти разрушение элемента.

Максимальная рассеиваемая мощность $P_{\text{макс}}$ – это максимально допустимая мощность, которую элемент Пельтье может рассеивать при непрерывной электрической нагрузке.

К одним из наиболее важных параметров элементов Пельтье относится холодильный коэффициент. Холодильный коэффициент – это отношение количества отведенного элементом тепла к затраченной электрической мощности в единицу времени.

Так же важным параметром элемента Пельтье является его эффективность:

$$Z = \frac{\alpha^2}{R \lambda}$$

Здесь: λ – теплопроводность материала.

К достоинствам элемента Пельтье относятся его небольшие размеры, отсутствие движущихся частей, газов и жидкостей. При изменении направления тока, протекающего через элемент, возможно как охлаждение, так и нагревание. К недостаткам элемента Пельтье относится низкий коэффициент полезного действия, что требует большой потребляемой мощности для достижения заметной разности температур. Несмотря на это, элементы Пельтье нашли широкое применение, так как без каких-либо дополнительных устройств можно реализовать температуры ниже 0 °С.

На рисунке 4.9. показано последовательное соединение элементов Пельтье в батарею. Такая батарея позволяет создавать эффективные охлаждающие устройства.

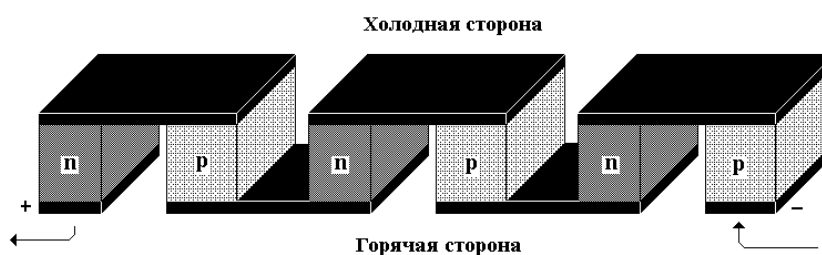


Рис. 4.9. Последовательное соединение элементов Пельтье

Объединение большого количества пар полупроводников р и n типа в батареи позволяет создавать охлаждающие элементы – модули Пельтье сравнительно большой мощности. Модуль Пельтье, представляет собой термоэлектрический холодильник, состоящий из последовательно

соединенных полупроводников р и n типа проводимости, образующих р-n и n-p переходы. Каждый из таких переходов имеет тепловой контакт с двумя металлическими перемычками, выполняющих роль радиаторов. В результате прохождения электрического тока определенной полярности образуется перепад температур между металлическими контактами – радиаторами модуля Пельтье: один радиатор работает как холодильник, другой радиатор нагревается и служит для отвода тепла.

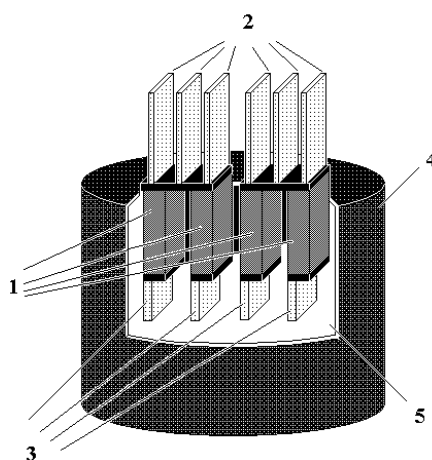
Устройство полупроводникового холодильника малой мощности показано на рисунке 5.9. Здесь: 1– пары р-n переходов, соединенные металлическими перемычками; 2 – пластины металлических радиаторов, обеспечивающие отвод выделяемого тепла от нагреваемых контактов; 3– пластины металлических радиаторов, обеспечивающие отбор тепла из охлаждаемого рабочего объема и передачу его охлаждаемым контактам; 4– теплоизолирующий корпус; 5 – охлаждаемый объем. В полупроводниковых холодильниках малой мощности охлаждаемый объем лежит в пределах от 5 см^3 до 50 см^3 . При этом температура в охлаждаемом объеме может опускаться до -80°C .

В настоящее время элементы Пельтье применяются в случаях, когда необходимо охлаждение с небольшой разницей температур, или энергетическая эффективность охладителя не важна. Например, элементы Пельтье применяются для охлаждения приборов с зарядовой связью в цифровых фотокамерах. За счёт этого достигается заметное уменьшение теплового шума при длительных экспозициях (например в астрофотографии). Многоступенчатые элементы Пельтье применяются для охлаждения инфракрасных приёмников излучения. Также элементы Пельтье часто применяются для охлаждения и термостатирования диодных лазеров с тем, чтобы стабилизировать длину волны излучения.

В последнее время элементы Пельтье нашли широкое применение для охлаждения процессоров практически всех компьютеров. Устройства

охлаждения на основе модулей Пельтье часто называют активными термоэлектрическими кулерами. Такой кулер обычно состоит из термоэлектрического модуля, выполняющего функции теплового насоса, и понижающих температуру горячей стороны радиатора и охлаждающего вентилятора. Использование термоэлектрических модулей Пельтье в активных кулерах делает их более эффективными по сравнению со стандартными кулерами на основе традиционных радиаторов и вентиляторов. Это обусловлено тем, что при соответствующем принудительном охлаждении нагревающегося радиатора, второй радиатор – холодильник, позволяет достичь отрицательных значений температур.

Структура полупроводникового термоэлектрического модуля Пельтье представлена на рис. 6.9. Здесь: 1– пары p-n переходов, соединенные металлическими перемычками – 2; 3 – охлаждаемая поверхность; 4 – нагреваемая поверхность; 5 – внешние выводы.



**Рис. 5.9. Устройство
полупроводникового холодильника
малой мощности**

На рис. 7.9. показан внешний вид модуля Пельтье типа MT2-1.6-1275. Этот модуль обладает следующими характеристиками: $U_{\text{макс}} = 14,8\text{В}$; $I_{\text{макс}} = 6\text{А}$; максимально достигаемый перепад температур 70°C ; геометрические

размеры 40×40 мм. Последовательное (двухстадийное) охлаждение, при последовательном соединении модулей, позволяет опускать температуру до -120°C .

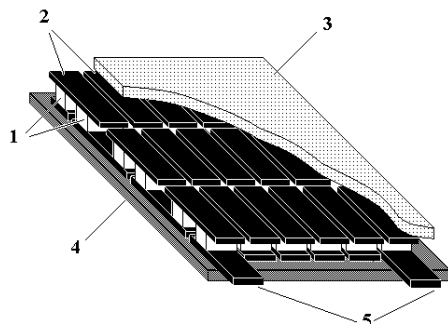


Рис. 6.9. Структура полупроводникового термоэлектрического модуля Пельтье

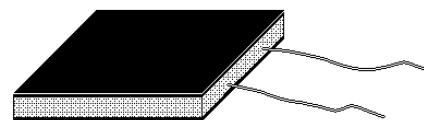


Рис. 7.9. Внешний вид модуля Пельтье

Контрольные вопросы.

3. В чем заключается эффект Пельтье?
4. Какова природа возникновения явления Пельтье на контакте двух полупроводников одинакового типа проводимости?
5. Какова природа возникновения явления Пельтье на контакте двух полупроводников различного типа проводимости?
6. Каково устройство элемента Пельтье ?
7. Что показывает холодильный коэффициент элемента Пельтье?
8. Что показывает эффективность элемента Пельтье?
9. Что такое модуль Пельтье?
8. В чем заключаются достоинства элемента Пельтье ?
9. В чем заключаются основные недостатки элементов Пельтье ?
10. Для чего элементы Пельтье соединяются в батарею?

ГЛАВА X

Запоминающие устройства

1.10. Полупроводниковые запоминающие устройства

Полупроводниковые запоминающие устройства – это электронные устройства для записи, хранения и воспроизведения информации. К полупроводниковым запоминающим устройствам относятся оперативные запоминающие устройства (ОЗУ), постоянные запоминающие устройства (ПЗУ), программируемые постоянные запоминающие устройства (ППЗУ) и перепрограммируемые постоянные запоминающие устройства (РПЗУ).

Носителем информации в таких устройствах, как правило, является электрический заряд.

В конструктивном отношении полупроводниковые элементы памяти представляют собой последовательность чередующихся слоев различной толщины полупроводников, диэлектриков и металлов. Рассмотрим элемент памяти полупроводникового запоминающего устройства, изготовленного на основе структуры металл - диэлектрик - диэлектрик - полупроводник (МДДП). На рисунке 1.10. показано устройство такого элемента памяти.

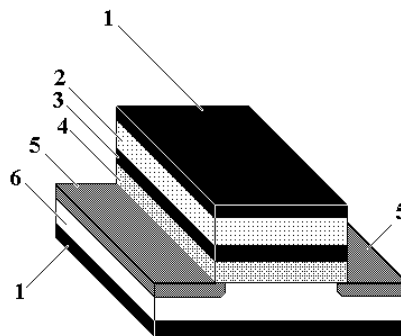


Рис. 1.10. Устройство элемента памяти, изготовленного на основе структуры металл - диэлектрик - диэлектрик - полупроводник

Здесь: 1 – металлические контакты, 2 – слой диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ϵ_2 , имеющий толщину d_2 , (в качестве материала этого слоя, как правило, используется SiO_2), 3 – металлический электрод,

расположенный между двумя диэлектрическими слоями, называемый - плавающим затвором, 4 – слой диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 имеющий толщину d_1 (в качестве материала этого слоя могут использоваться ZrO_2 или Si_3N_4), 5 – слой полупроводника типа p^+ - проводимости, 6 – исходная полупроводниковая подложка n - типа проводимости (как правило используется Si). Толщина слоев диэлектриков различна: $d_2 < d_1$. Видно, что по своей структуре этот элемент памяти мало чем отличается от структуры униполярного транзистора с изолированным затвором.

Принцип действия униполярных транзисторов с изолированным затвором заключается в создании в слое диэлектрика объемного заряда, изменяющего пороговое напряжение. Этот заряд в диэлектрике может достаточно долго храниться при отсутствии на электродах транзистора напряжения. Для локализации заряда в структуре может быть использована граница раздела двух диэлектриков или созданный в диэлектрике специальный плавающий затвор. При приложении внешнего напряжения к металлическим электродам (1,1 на рисунке 1.10) происходит инжекция электронов из полупроводника через тонкий, с толщиной d_2 равной 50-100 ангстрем, слой диэлектрика (слой 2 на рисунке 1.10).

Инжектированные электроны локализуются на металлическом слое плавающего затвора или на границе раздела со вторым диэлектриком. Заряд, создаваемый электронами, локализованными на металлическом электроде плавающего затвора, увеличивает пороговое напряжение всей структуры. Для перевода структуры в исходное состояние, т.е. для «стирания» записанной информации необходимо поменять полярность прикладываемого к внешним металлическим электродам. На рисунке 2.10. показаны зонные энергетические диаграммы элемента памяти полупроводникового запоминающего устройства с плавающим затвором. Энергетические диаграммы, показанные на рисунке 2.10.а соответствуют режиму записи

информации, диаграммы, показанные на рисунке 2.10.b соответствуют режиму хранения записанного заряда, а диаграммы рисунка 2.10. c соответствуют режиму стирания или удаления информационного заряда.

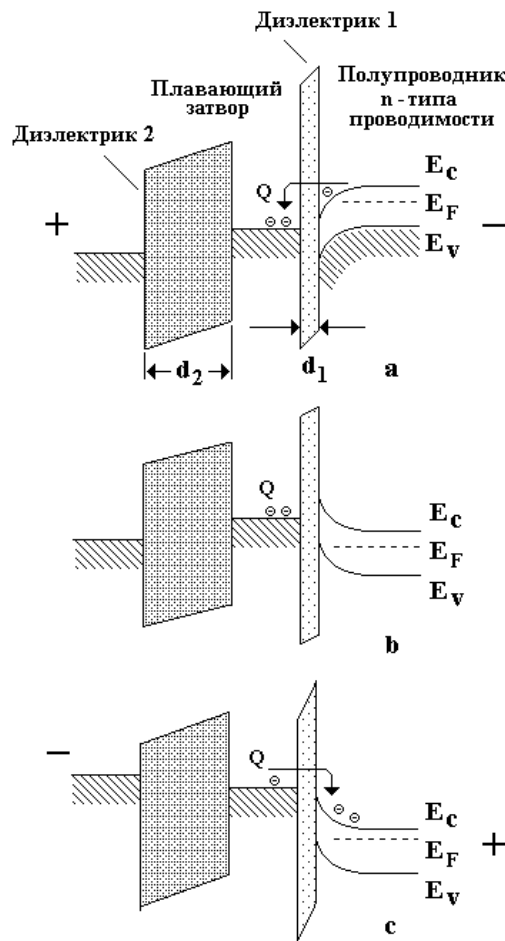


Рис. 2.10. Зонные диаграммы элемента памяти полупроводникового запоминающего устройства с плавающим затвором

Внешнее напряжение, прикладываемое к металлическим электродам (1и 1на рисунке 1.10), распределяется между обоими слоями диэлектриков:

$$U = U_1 + U_2 = d_1 E_1 + d_2 E_2 \quad (1.10)$$

Здесь: d_1 , d_2 – толщины диэлектрических слоев; E_1 E_2 – напряженность электрического поля в этих слоях.

Учитывая теорему Гаусса:

$$\varepsilon_1 E_1 = \varepsilon_2 E_2 + Q \quad (2.10)$$

где: $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – диэлектрические проницаемости слоев, Q – величина заряда, локализованного на плавающем затворе, величину напряженности электрического поля в каждом из слоев (например, в первом слое) можно выразить при помощи следующего выражения:

$$E_1 = \frac{U}{d_1 + d_2 \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right)} + \frac{Q}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)} \quad (3.10)$$

Если токи, протекающие через оба диэлектрических слоя $J_1(E)$, $J_2(E)$, не равны друг другу, то заряд плавающего затвора изменяется во времени:

$$Q(t) = \int_0^t [J_1(E_1) - J_2(E_2)] dt \quad (4.10)$$

Токи, протекающие через различные диэлектрики, имеют различную зависимость от величины напряженности электрического поля. При тунелировании через тонкий слой диэлектрика зависимость тока от напряженности электрического поля описывается при помощи выражения Фаулера - Нордгейма:

$$J(E) = C_1 E^2 \exp \left(- \frac{E_0}{E} \right) \quad (5.10)$$

Здесь: E – напряженность электрического поля в рассматриваемом диэлектрике; C_1 и E_0 – постоянные, зависящие от эффективной массы носителей заряда и от высоты потенциального барьера. Такой механизм переноса тока через диэлектрик является основным механизмом в тонких слоях SiO_2 и Al_2O_3 .

Если перенос тока через диэлектрик осуществляется по механизму Пуля - Френкеля (понижение высоты локальных потенциальных барьеров под действием напряженности электрического поля), то зависимость тока от величины напряженности электрического поля описывается при помощи следующего выражения:

$$J(E) = C_2 E \exp \left[-q \frac{\left(\varphi - \sqrt{\frac{qE}{\pi\epsilon}} \right)}{kT} \right] \quad (6.10)$$

Здесь: E – напряженность электрического поля в диэлектрике; C_2 – постоянная пропорциональная плотности центров захвата носителей заряда в диэлектрике; φ – энергетическое положение центра захвата; ϵ – диэлектрическая проницаемость диэлектрика. Такой механизм переноса тока через диэлектрик является основным механизмом в достаточно толстых слоях Si_3N_4 .

В результате различия токов, протекающих через диэлектрические слои, за время действия напряжения положительной полярности, приложенного к внешнему затвору, в плавающем затворе накапливается заряд Q . Наличие заряда на плавающем затворе сдвигает пороговое напряжение всей структуры на величину

$$\Delta U = - \frac{d_1}{\epsilon_2} Q \quad (7.10)$$

На рисунке 3.10. показана зависимость проводимости проводящего канала от напряжения на внешнем затворе для двух значений величин заряда ($Q=0$ и $Q=Q_1$) на плавающем затворе. Здесь зависимость 0 соответствует отсутствию заряда на плавающем затворе, а зависимость 1 соответствует наличию этого заряда. Из приведенных зависимостей видно, что появление отрицательного заряда, обусловленного локализацией электронов на плавающем затворе, сдвигает рассматриваемую зависимость вправо на величину ΔU . Основным недостатком рассмотренного элемента памяти является технологическая сложность нанесения диэлектрического слоя на металлический электрод плавающего затвора. В некоторых случаях в качестве материала плавающего затвора используется сильнолегированный поликристаллический кремний.

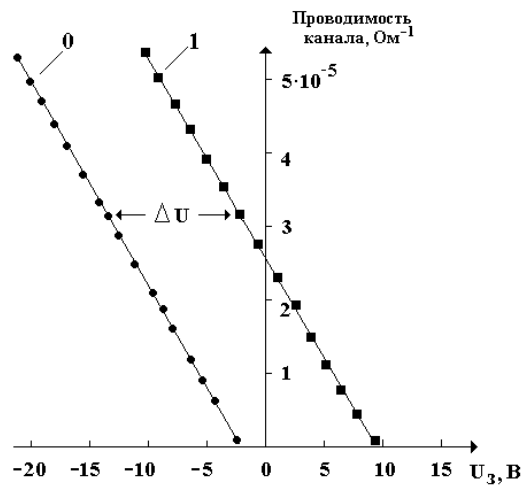


Рис. 3.10. Проводимость канала до (зависимость - 0) и после (зависимость -1) введения заряда в плавающий затвор элемента памяти

В последнее время получил широкое распространение элемент памяти для работы которого не требуется наличия плавающего затвора. В качестве элемента, запоминающего информацию, в этих устройствах служит граница раздела двух различных по своей природе слоев диэлектриков. На рисунке 4.10. показано устройство элемента памяти содержащего два различных слоя диэлектриков.

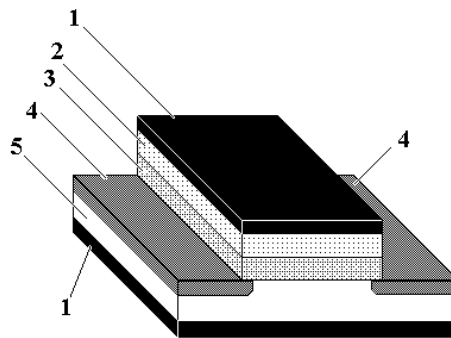


Рис. 4.10. Устройство элемента памяти, изготовленного на основе структуры металл - диэлектрик - диэлектрик - полупроводник

Здесь: 1– металлические контакты, 2 – слой диэлектрика с диэлектрической

проницаемостью ε_1 имеющий толщину d_1 , (в качестве материала этого слоя, как правило, используется SiO_2), 3 – слой диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ε_2 имеющий толщину d_2 , (в качестве материала этого слоя как правило, используется Si_3N_4), 4 – слой полупроводника типа p^+ - проводимости, 5 – исходная полупроводниковая подложка n - типа проводимости (как правило используется Si n -типа проводимости). Толщина слоев диэлектриков различна: $d_1 < d_2$. Видно, что по своей структуре этот элемент памяти мало чем отличается от структуры элемента памяти, показанного на рисунке 1.10., различие заключается лишь в отсутствии металлического электрода плавающего затвора. При приложении внешнего напряжения к металлическим электродам (1 и 1 на рисунке 4.10) происходит инжекция электронов из полупроводника через тонкий, с толщиной d_1

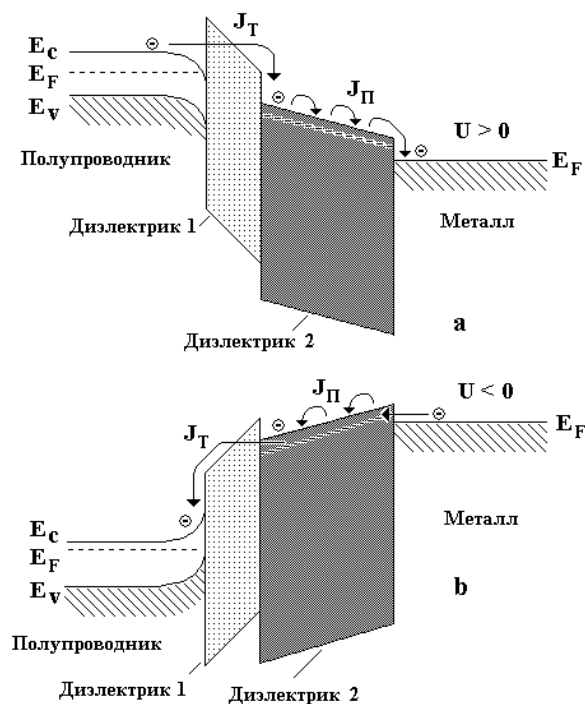


Рис. 5.10. Зонные диаграммы элемента памяти полупроводникового запоминающего устройства со структурой $\text{Al} - \text{Si}_3\text{N}_4 - \text{SiO}_2 - \text{Si}$

на рисунке 5.10. показаны зонные энергетические диаграммы элемента памяти полупроводникового запоминающего устройства со структурой $\text{Al} - \text{Si}_3\text{N}_4 -$

равной 50-100 ангстрем, слой SiO_2 (слой 2 на рисунке 4.10). Инжектированные электроны локализуются на границе раздела со вторым диэлектриком. Заряд, создаваемый электронами, локализованными на границе раздела $\text{SiO}_2 - \text{Si}_3\text{N}_4$, увеличивает пороговое напряжение всей структуры. Для перевода структуры в исходное состояние, т.е. для «стирания» записанной информации необходимо поменять полярность прикладываемого к внешним металлическим электродам. На

SiO_2 - Si. Энергетические диаграммы, показанные на рисунке 5.10.a соответствуют режиму записи информации; диаграммы, показанные на рисунке 5.10.b соответствуют режиму стирания или удаления информационного заряда. Здесь, так же как и в элементе памяти, зонные диаграммы которого показаны на рисунке 2.10., ток протекающий через диэлектрик 1, обусловлен туннелированием по механизму Фаулера - Нордгейма, а ток протекающий через диэлектрик 2 обусловлен механизмом Пуля-Френкеля. Основные соотношения, описывающие процесс локализации заряда на границе раздела двух диэлектриков, являются практически аналогичными соотношениям (1.10-7.10). С физической точки зрения, основное различие в механизмах переноса электронов заключается в следующем: центры захвата электронов, имеющиеся в Si_3N_4 на границе раздела с SiO_2 , имеют непрерывное распределение по энергиям и по толщине приграничного слоя. Других принципиальных различий нет.

Работа рассмотренных элементов памяти основана на сохранении введенного заряда либо на плавающем затворе, либо на границе раздела двух диэлектриков. Так как введенный заряд сохраняется в указанных областях и при отключении напряжения, то эти элементы памяти являются энерго не зависимыми, т.е их состояние не зависит от наличия или от отсутствия напряжения. На сегодняшний день промышленностью различных стран мира выпускаются запоминающие устройства указанного типа емкостью 1 Мбит состоящие из элементов памяти площадью 10 - 20 мкм^2 .

Особым классом запоминающих устройств со структурой металл - диэлектрик - полупроводник являются приборы с зарядовой связью (ПЗС). Приборы с зарядовой связью представляют собой совокупность взаимодействующих структур металл - диэлектрик - полупроводник. Взаимодействие между отдельными структурами обеспечивается общностью полупроводникового слоя и малым (<1 мкм) расстоянием между структурами. Работа таких запоминающих устройств основана на хранении

заряда неосновных носителей в потенциальных ямах, создаваемых внешним электрическим полем у поверхности полупроводника, и движения этого заряда вдоль поверхности полупроводника при движении потенциальных ям. В разделе 3.5., главы 5 рассмотрен принцип работы конденсаторов со структурой металл-диэлектрик-полупроводник и приведены основные соотношения, описывающие его работу.

Рассмотрим основные особенности работы прибора с зарядовой связью на следующем примере. На рисунке 6.10. изображена цепочка МДП - конденсаторов, конструктивно реализованная в виде прибора с зарядовой связью. Здесь: 1– исходная подложка полупроводника (обычно используется Si-n типа проводимости); 2 – слой диэлектрика (обычно используется SiO_2); 3– металлические электроды из Al. Металлические электроды конденсаторов (эти электроды принято называть затворами) отделены от полупроводника

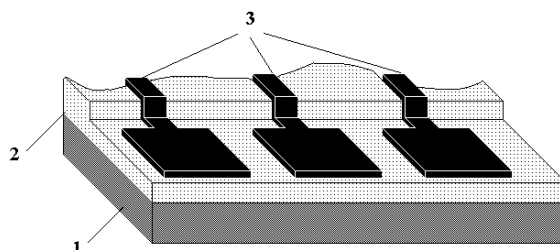


Рис. 6.10. Основная ячейка прибора с зарядовой связью

слоем диэлектрика. Если на один из электродов такого МДП - конденсатора подать обедняющее напряжение, то основные носители заряда (электроны в рассматриваемом случае) уйдут от границы раздела полупроводник-диэлектрик в объем полупроводника, образуя под электродом область, обедненную основными носителями. Если теперь в эту область, обедненную основными носителями зарядов, ввести какое-либо число не основных носителей заряда (дырок, в рассматриваемом случае), то они, некоторое время, будут здесь сохраняться, т.к. область полупроводника, обедненная основными носителями заряда, является потенциальной ямой для не

основных носителей заряда. Ввод не основных носителей заряда в образованную потенциальную яму можно осуществить инжекцией через расположенный рядом р-п переход, либо при помощи освещения. При приложении к следующему затвору обедняющего напряжения, большего, чем было проложено на первый затвор, не основные носители заряда переходят в более глубокую потенциальную яму, расположенную под вторым затвором. Если теперь убрать обедняющее напряжение с первого затвора, неосновные носители заряда, локализованные под вторым затвором, будут здесь сохраняться какое - то время. На рисунке 7.10. показан процесс переноса и сохранения заряда в ячейке памяти, прибора с переносом заряда.

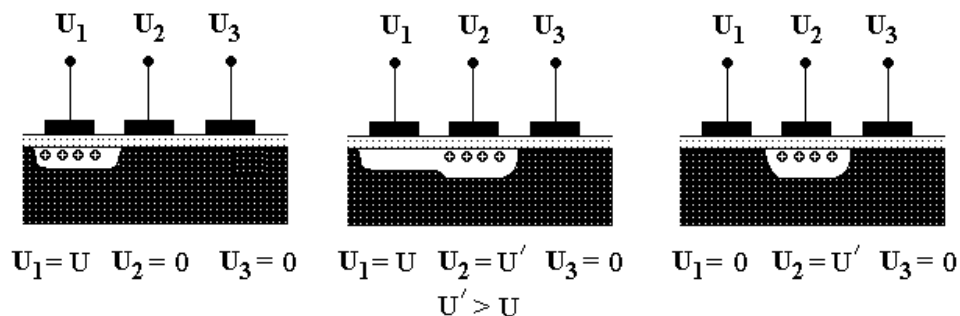


Рис. 7.10. Перенос и сохранение заряда в структуре ПЗС

Для нормальной работы всей структуры расстояние между затворами должно быть меньше ширины области обедненной основными носителями заряда.

Величина максимального заряда, который может быть введен в потенциальную яму под какой либо из затворов, определяется из следующего соотношения:

$$Q_{\max} = C_3 \cdot U_3 \quad (8.10)$$

Здесь: C_3 – электрическая емкость структуры металл-диэлектрик-полупроводник, которая зависит от геометрических размеров (площадь) металлического электрода затвора и от типа и толщины используемого диэлектрика (см. выражения 29.5 и 30.5, главы 5); U_3 – напряжение, прикладываемое к затвору.

Перенос заряда из под одного затвора под другой, в ПЗС структуре, определяется тремя основными физическими механизмами. Это диффузия, индуцированный дрейф и дрейф в краевом электрическом поле. Для относительно малой величины заряда, находящегося под затвором, основным механизмом переноса является диффузия. В этом случае величина заряда, с момента приложения напряжения к следующему затвору, экспоненциально уменьшается во времени. Скорость диффузионного переноса характеризуется постоянно времени τ :

$$\tau = \frac{4L^2}{\pi^2 D_p} \quad (9.10)$$

Здесь: L –длина затвора, D_p – коэффициент диффузии дырок.

При переносе заряда из одной потенциальной ямы в другую происходит частичная потеря заряда. Эти потери обусловлены различными скоростями движения зарядов, что требует определенного времени для переноса всего заряда и захватом части заряда на ловушки, локализованные на границе раздела полупроводник - диэлектрик.

Потери заряда, как правило, характеризуются эффективностью переноса. Эффективность переноса η – отношение величины заряда Q_t , который за время t действия напряжения, приложенного к затвору 2, перешел под затвор 2, к величине заряда Q_0 , находившегося под затвором 1.

$$\eta = 1 - \frac{Q_t}{Q_0} \quad (10.10)$$

На рисунке 8.10. показана структура запоминающего устройства на основе ПЗС с элементами ввода и вывода не основных носителей заряда. Здесь: D_1 – обратно смещенный р-п переход, служащий для инжекции не основных носителей заряда, Z_1 – входной затвор, служащий для ввода инжектированного заряда под первый затвор. U_1, U_2, U_3 – управляющие затворы, Z_2 – выходной диод, обеспечивающий экстракцию выходного

заряда, D_2 – выходной диод, обеспечивающий детектирование выходного заряда.

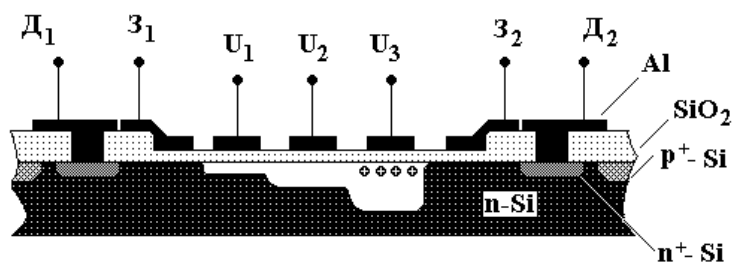


Рис. 8.10. Структура запоминающего устройства на основе ПЗС

Характерной особенностью элементов памяти на основе приборов с переносом заряда ПЗС, является их работа только в нестационарном состоянии потенциальных ям, поэтому запоминающие устройства на их основе относятся к устройствам динамического типа.

Одним из основных недостатков рассмотренных запоминающих устройств является малое время хранения информационного заряда. Это время ограничено процессами термической генерации носителей, что приводит к потере заряда. Однако, в последнее время были разработаны элементы памяти на основе ПЗС структур, в которых в качестве подзатворного диэлектрика используется диэлектрики с большой поляризуемостью. Электрическое поле сильно поляризованного диэлектрика удерживает заряд неосновных носителей и при отсутствии напряжения на

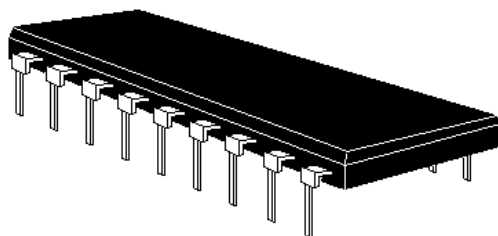


Рис. 9.10. Внешний вид микросхемы памяти на основе ПЗС

нем. Использование таких диэлектриков позволило создать запоминающие устройства с большим временем хранения заряда. На рисунке 9.10. показан

внешний вид микросхемы памяти на основе ПЗС с поляризуемым диэлектриком.

Запоминающие устройства занимают значительное место в структуре современных цифровых вычислительных систем. Особую роль при этом играют полупроводниковые запоминающие устройства, предназначенные для построения внутренней памяти ЭВМ. Основными характеристиками запоминающих устройств являются информационная ёмкость, быстродействие и надёжность. Информационная ёмкость запоминающего устройства определяется количеством двоичных единиц информации (бит), которые могут в нём храниться (иногда ёмкость выражается в байтах, при этом один байт равен восьми битам). Быстродействие запоминающего устройства характеризуется его временными характеристиками, к которым относятся: время обращения к запоминающему устройству при записи и считывании информации, время записи информации, время считывания или выборки информации. Время обращения (время цикла) характеризует максимальную частоту обращения к данному устройству при считывании или записи информации. Время считывания или выборки информации – интервал времени обращения к запоминающему устройству до получения выходного сигнала от подачи сигнала считывания. Время записи информации – интервал времени от момента подачи сигнала обращения к запоминающему устройству до момента готовности информации к считыванию.

2.10. Магнитные запоминающие устройства

Принцип действия магнитных элементов памяти основан на эффекте сохранения намагниченности материала носителя после выключения внешнего магнитного поля. В настоящее время наиболее широкое распространение получили элементы памяти на цилиндрических магнитных доменах. В основе элементов памяти на цилиндрических магнитных

доменах лежит следующий физический эффект: в некоторых магнитных материалах при воздействии внешнего магнитного поля образуются локальные области, отличающиеся от остального материала направлением намагниченности. Эти области получили название доменов. Под действием внешнего магнитного поля области, с противоположным направлением намагниченности – домены – могут перемещаться в исходном материале по заданным направлениям с высокой скоростью. Это способность перемещения доменов и дала возможность создания запоминающих устройств. Домены могут иметь различную геометрическую форму: полосковую, кольцевую, цилиндрическую. При создании магнитных элементов памяти в основном используются домены цилиндрической формы, хотя существуют и магнитные пленки с плоскими магнитными доменами. Цилиндрические магнитные домены - изолированные однородно намагниченные подвижные области ферро - или ферримагнетика, имеющие форму цилиндров и направление намагниченности, противоположное направлению намагниченности остального материала.

Для формирования цилиндрических магнитных доменов используются тонкие магнитные пленки феррит-гранатов и ортоферритов. Эти пленки, толщиной до 10 мкм, напыляются на подложку из немагнитного материала. При отсутствии внешнего магнитного поля в пленке существуют полосовые домены произвольной формы (см. рисунок 3.1). Если подложку поместить во внешнее импульсное магнитное поле, то произойдет смещение доменных стенок. При этом данный полосовой домен распадается на отдельные цилиндрические домены кругового сечения (см. рисунок 3.2). Благодаря магнито дипольному взаимодействию сформированные цилиндрические домены отходят друг от друга и равномерно распределяются по всей пленке. Плотность распределения доменов зависит от величины индукции магнитного поля. Эти домены и используются в качестве элементов памяти магнитных запоминающих устройств. По существу, речь идет уже не об

отдельных магнитных элементах, а о физически однородной информационной среде, в которой переработка и хранение информации осуществляется в результате видоизменения свойств этой среды.

Носителями информации в такой информационной среде служат изолированные намагниченные участки магнитных пленок. Размер отдельного участка - домена составляет от 0,01 до 0,1 мм, поэтому на одном квадратном сантиметре материала можно разместить несколько миллионов доменов. Магнитные домены можно генерировать или уничтожать, их перемещение позволяет создавать логические операции, потому что наличие или отсутствие домена в определенной точке магнитного кристалла можно считать за 1 или 0. Важным является то, что при отключении внешнего напряжения домены сохраняются. Время сохранения информации в магнитных элементах памяти определяется процессом естественного размагничивания носителя. Для носителей различного типа это время составляет от 1 до 10 лет.

Генерация доменов производится путем непосредственного зарождения доменов в той или иной точке пленки. Генерация доменов производится токопроводящей петлей из пермаллоевой пленки. При появлении тока в такой петле, создается локальное магнитное поле. Под действием этого поля в области, ограниченной контуром петли, зарождается домен, который затем под действием поля постоянного смещения принимает цилиндрическую форму. Если к пленке, содержащей цилиндрические домены, приложить смещающее магнитное поле, не однородное в плоскости пленки, домены будут перемещаться в область с меньшей напряженностью этого поля. Скорость перемещения доменов ограничена силой вязкого трения и наличием дефектов структуры самой пленки.

Считывание информации происходит с помощью магниторезистивных пермаллоевых датчиков или датчиков Холла. Под действием магнитного

поля домена в пермаллоевой пленке происходит изменение электрического сопротивления или же в полупроводниковом датчике под действием домена возникает электродвижущая сила. На рисунке 10.10. показано устройство одного из элементов памяти на цилиндрических магнитных доменах. Здесь: 1– диэлектрическая подложка; 2 – магнитная пленка; 3– цилиндрический

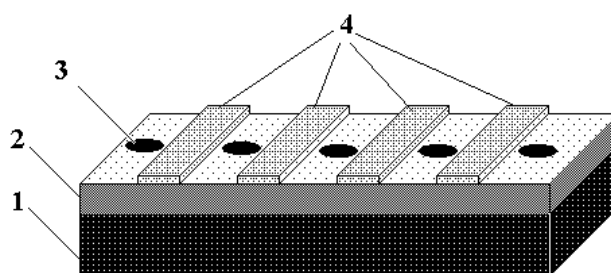


Рис. 10.10. Устройство одного из элементов памяти на цилиндрических магнитных доменах

магнитный домен; 4 – коммутирующие проводники. В этой конструкции перемещение доменов, от области их генерации до области считывания, осуществляется при приложении продольного поля. Это продольное поле создается соответствующей коммутацией системы проводников, расположенных на подложке.

Для создания магнитных элементов памяти на цилиндрических магнитных доменах наиболее широкое распространения получили доменопередвигающие элементы (аппликации), нанесенные на поверхность доменосодержащей пленки. Такие аппликации, выполненные из магнитомягкого материала (обычно используется пермаллой – сплав состоящего из никеля и железа), наносятся на поверхность пленки при помощи фотолитографии или при использовании методов ионной имплантации. Пермалловые аппликации должны иметь определенную конфигурацию. Наиболее часто используется аппликации в виде Т-И элементов. На рисунке 11.10. показано устройство доменопередвигающей структуры Т-И пермалловых элементов, с указанием направлений смещающего ($H_{см}$) и управляющего ($H_{упр}$) магнитных полей. Здесь: 1–тонкая пленка, содержащая

цилиндрические магнитные домены; 2– защитный диэлектрический слой; 3– пермалловые Т и I аппликации; 4 – d - диаметр цилиндрического магнитного домена.

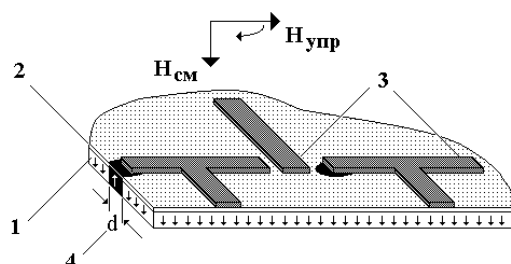


Рис. 11.10. Доменопередвигающая структура пермалловых аппликаций типа Т-І

При намагничивании пермалловых аппликаций, например, с помощью управляющего магнитного поля, ориентированном в плоскости доменосодержащей пленки, на их краях образуются магнитные полюса.

Цилиндрические магнитные домены, под действием сил магнитного поля

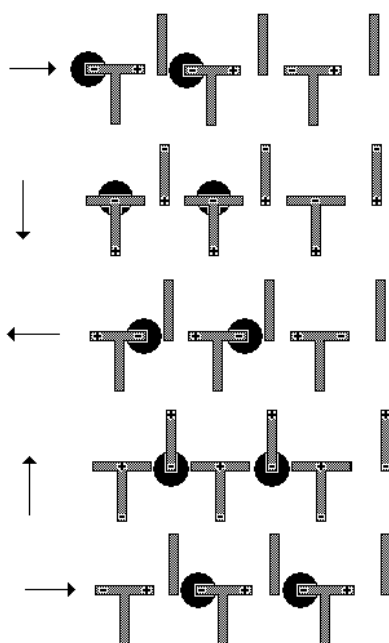


Рис. 12.10. Перемещение цилиндрических магнитных доменов

притягиваются к отрицательным полюсам аппликаций и удерживаются в этой потенциальной яме. При вращении управляющего магнитного поля в плоскости пленки, содержащей домены, потенциальные ямы, созданные магнитным полем перемещаются вместе с локализованными в них доменами. При достижении узкого зазора между аппликациями цилиндрические магнитные домены захватываются потенциальной ямой соседней аппликации и продолжают движение по периметру этой аппликации. За один полный поворот управляющего магнитного поля, совершаемый в плоскости пленки, происходит

перемещение цилиндрического магнитного домена на один период

доменопередвигающей структуры. Один полный поворот управляющего поля (частота вращения), в структурах рассмотренного типа, составляет $2\text{--}3 \cdot 10^6$ Гц. Для исключения возможности взаимодействия между отдельными доменами величина периода доменопередвигающей структуры должна быть, по крайней мере, в четыре раза больше размера самих доменов. Это и определяет плотность записи информации в рассмотренных запоминающих устройствах. На сегодняшний день плотность записи составляет $6\text{--}8 \cdot 10^7$ бит/см², при $d = 1$ мкм. На рисунке 12.10. показан механизм перемещения доменов при помощи структуры пермалловых аппликаций, стрелами показано направление управляющего магнитного поля.

Динамические свойства цилиндрических магнитных доменов, возможности управления их движением, определяется, в основном, структурой доменных границ. Исследования доменных границ материалов с цилиндрическими магнитными доменами привели к открытию структурных элементов этих доменных границ: вертикальных и горизонтальных блоховских линий и к установлению их влияния на динамику доменных границ. Было показано, что на доменных границах происходит поворот намагниченности от одного вида направления в домене к другому в соседнем домене. Этот поворот может происходить как по часовой стрелке, так и против нее. Если на доменной границе имеются оба разворота, то промежуточная область, которая отделяет два данных противоположных вращения намагниченности, и называется блоховской линией. Блоховские линии имеют меньшие размеры, чем сами цилиндрические магнитные домены, так как они находятся в доменных границах самих доменов. Поэтому использование блоховских линий в качестве носителей информации позволит резко повысить плотность записи информации. В последнее время также обсуждается возможность создания устройств с объемной записью информации, в которых носителями информации были бы точки пересечения двух различных блоховских линий – блоховские точки.

Это, в свою очередь, привело к идее использования для кодировки информации не цилиндрических магнитных доменов, а находящиеся внутри доменных границ гораздо меньшие микрообъекты - вертикальные блоховские линии. Это дает реальную возможность повышения емкости доменных запоминающих устройств на несколько порядков.

Контрольные вопросы.

1. Что называется полупроводниковыми, запоминающими устройствами?
2. Как устроен элемент памяти полупроводникового запоминающего устройства с плавающим затвором?
3. Какие приборы называются приборами с зарядовой связью?
4. Как обеспечивается взаимодействие между отдельными элементами приборов с зарядовой связью?
5. Что называют цилиндрическими магнитными доменами?
6. Какими физическими процессами обуславливается перемещение доменов в доменосодержащей магнитной пленке?
7. Какими физическими причинами ограничивается скорость перемещения доменов?
8. Как осуществляется считывание информации с элемента памяти на цилиндрических доменах?
9. Какова величина средней плотности записи в элементах памяти на цилиндрических доменах при размере доменов $d = 1$ мкм?
10. Чем определяются динамические свойства цилиндрических магнитных доменов?

ГЛАВА XI

Влияние деформации на электрические параметры полупроводников.

1.11. Тензорезистивный эффект

Известно, что механическое воздействие на кристаллическую решетку полупроводников приводит к изменению расстояния между атомами, что оказывает влияние на структуру энергетических зон. При этом физическая причина изменений свойств полупроводников, при механическом воздействии, обусловлена смещением энергетических уровней полупроводника при его деформации и связанное с этим изменение спектра распределения носителей заряда – электронов и дырок. Изменение спектра распределения носителей заряда приводит к зависимости сопротивления полупроводника от величины прикладываемой деформации, т.е. возникает тензорезистивный эффект. Величина тензорезистивного эффекта является различной в зависимости от того, как изменяется симметрия кристаллической решетки полупроводникового материала. Действительно, для кристаллов любой симметрии, в самом общем случае, закон Ома можно выразить при помощи тензора сопротивления в следующем виде:

$$E_i = \sum_k \rho_{ik} j_k \quad (1.11)$$

Здесь: E_i – напряженность электрического поля; ρ_{ik} – тензор сопротивления; j_k – плотность тока.

Относительное изменение электрического сопротивления в кристалле, подвергнутом воздействию давления, можно представить в виде:

$$\left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right)_{ik} = \sum_{lm} \Pi_{iklm} X_{lm} \quad (2.11)$$

Здесь: Π_{iklm} – тензор пьезосопротивления четвертого ранга; X_{lm} – тензор напряжения второго ранга.

Тензор сопротивления ρ_{ik} является симметричным и содержит не более шести компонент различного направления, также как и тензор напряжений X_{lm} . Воспользовавшись обозначениями $\Pi_{1111} \equiv \Pi_{11}$; $\Pi_{1122} \equiv \Pi_{12}$; $\Pi_{1212} \equiv \Pi_{44}$, выражение (2.11) можно записать в следующем виде:

$$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right)_i = \sum_{k=1}^6 m_{ik} X_k \quad (3.11)$$

Учитывая тот факт, что тензор напряжения $X_{lm} \equiv X_i$, используем понятие упругих постоянных кристалла c_{ik} и связь их с тензором деформации:

$$X_i = \sum_k c_{ik} u_k \quad (4.11)$$

Выражение (3.11) можно записать непосредственно через тензор деформации:

$$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right)_i = \sum_{k=1}^6 \Pi_{ik} X_k = \sum_{k=1}^6 m_{ik} u_k \quad (5.11)$$

$$m_{ik} = \sum_l \Pi_{il} c_{lk} \quad (6.11)$$

Здесь: Π_{ik} и m_{ik} – коэффициенты пьезосопротивления и упругорезистивные коэффициенты соответственно.

В общем случае всестороннее сжатие или растяжение не изменяет симметрию кристаллической решетки, следовательно, любая компонента сопротивления, равная нулю по соображениям симметрии в недеформированном кристалле, не изменится при всестороннем сжатии или при всестороннем растяжении. Однако уменьшение межатомного расстояния приводит к увеличению степени перекрытия волновых функций, вследствие чего приводит изменение потенциальной энергии взаимодействия. Изменение потенциальной энергии взаимодействия приводит к изменению энергии запрещенных и разрешенных зон энергии.

Если через α обозначить коэффициент изменения ширины запрещенной зоны dE_g полупроводника, обусловленного изменением давления dP , то:

$$\alpha = - \frac{1}{dE_g} \frac{dE_g}{dP} \quad (1.11)$$

Величина коэффициента барического изменения ширины запрещенной зоны dE_g / dP для различных полупроводниковых материалов различна: для Si эта величина составляет $-1,5 \cdot 10^{-11}$ эВ / Па; для GaAs – $12 \cdot 10^{-11}$ эВ / Па; для GaP – $1,7 \cdot 10^{-11}$ эВ / Па; для GaSb – $14 \cdot 10^{-11}$ эВ / Па; для Ge – $5 \cdot 10^{-11}$ эВ / Па; для InSb – $15 \cdot 10^{-11}$ эВ / Па.

Изменение ширины запрещенной зоны полупроводника под воздействием давления обусловлено тем, что смещение дна зоны проводимости и потолка валентной зоны являются различными. Изменение ширины запрещенной зоны dE_g зависит от вида деформации полупроводника. Если электропроводность полупроводника определяется примесями, то ее зависимость от величины приложенного давления может быть обусловлена как изменением концентрации носителей заряда, так и изменением их подвижности. Так, изменение концентрации носителей заряда в деформированном полупроводнике можно выразить при помощи следующего выражения:

$$(n_i^p)^2 = N_C N_V \exp \left(- \frac{E_g}{kT} \right) \exp \left(- \frac{dE_g}{kT} \right) \quad (2.11)$$

Здесь: N_C , N_V – эффективные плотности состояний в зоне проводимости и в валентной зоне соответственно.

Из приведенного выражения видно, что с увеличением изменения ширины запрещенной зоны полупроводника, концентрация носителей заряда изменяется.

Барическая зависимость подвижности носителей заряда обусловлена перераспределением носителей заряда между различными энергетическими

минимумами. Так, в случае полупроводника типа проводимости происходит перераспределение электронов между двумя различными энергетическими минимумами зоны проводимости. При наличии двух минимумов в зоне проводимости (как показано на рисунке 1.11) электропроводность полупроводника можно выразить следующим образом:

$$\sigma = q(n_1\mu_1 + n_2\mu_2) = qn_0\mu_{\text{эфф}} \quad (3.11)$$

Здесь индекс 1 соответствует значениям концентрации и подвижности, относящимся к первому минимуму энергии, а индекс 2 соответствует значениям концентрации и подвижности, относящимся ко второму минимуму.

Эффективная подвижность электронов может быть определена из выражения (3.11):

$$\mu_{\text{эфф}} = \frac{(n_1\mu_1 + n_2\mu_2)}{n_0} \quad (4.11)$$

Здесь концентрация электронов в недеформированном полупроводнике. На рисунке 1.11. показано изменение положения энергетических минимумов в зоне проводимости при наличии деформации. Из приведенного рисунка видно, что при отсутствии какой - либо деформации (рисунок 1.11.а) энергетическое положение двух минимумов в зоне проводимости полупроводника n- типа совпадает. Однако, при наличии деформации, приложенной к полупроводнику (рисунок 1.11.б), один из минимумов может сместиться в низ, а другой минимум может подняться вверх. В этом случае часть подвижных электронов из более высокого энергетического минимума перейдет на более низкий энергетический минимум. При этом концентрация электронов, локализованных на минимуме 1– увеличится, концентрация электронов на минимуме 3 – уменьшится. Это обусловлено тем, что общее число подвижных электронов в полупроводнике не изменяется ($n_1+n_2=n_0$). Если подвижность электронов, находящихся на минимуме 1, больше

подвижности электронов, находящихся на минимуме 2, т.е. выполняется условие $\mu_1 > \mu_2$, то это приводит к увеличению эффективной подвижности

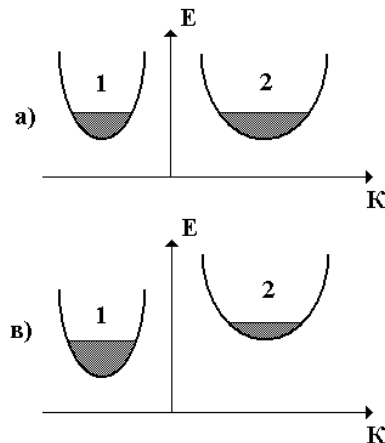


Рис. 1.11. Изменение положения энергетических минимумов в зоне проводимости при наличии деформации

$\mu_{\text{эфф}}$ с увеличением величины прикладываемого давления. Если выполняется $\mu_{\text{эфф}}$ с увеличением величины прикладываемого давления. Если выполняется обратное условие $\mu_1 < \mu_2$, то $\mu_{\text{эфф}}$ с увеличением величины давления уменьшается. На рисунке 2.11 приведена экспериментально полученная зависимость от давления отношения эффективной подвижности электронов μ при изменении давления, к эффективной подвижности

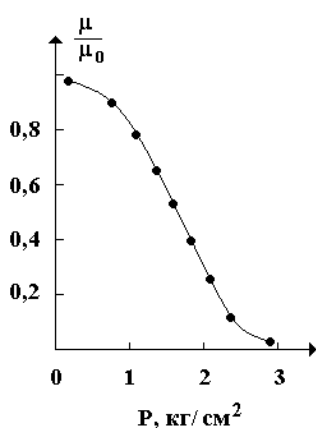


Рис. 2.11. Зависимость от давления отношения

μ к μ_0

электронов μ_0 в не деформированном германии типа проводимости при $T = 349^\circ\text{K}$. Из приведенной зависимости видно, что с увеличением давления отношение μ к μ_0 уменьшается, что подтверждает наличие зависимости подвижности носителей заряда от величины деформации полупроводника. Суммируя все выше изложенное, можно прийти к следующему заключению. Зависимость электрических параметров полупроводниковых материалов от давления

обусловлена барическим изменением ширины запрещенной зоны, изменением концентрации носителей заряда и изменением подвижности.

2.11. Тензодатчики

Основными материалами для изготовления полупроводниковых датчиков давления, в настоящее время, являются кремний и германий, причем кремний, вследствие его меньшей чувствительности к температуре, получил большее распространение. Применяются также полупроводниковые соединения, например арсенид галлия GaAs и др. В зависимости от используемых при изготовлении материалов, полупроводниковые датчики давления можно разделить на две группы: монокристаллические и поликристаллические. К монокристаллическим тензодатчикам относятся датчики, полученные вырезанием из монокристалла; игольчатые кристаллы, полученные выращиванием из газовой фазы; эпитаксиальные пленки и дендриты. К поликристаллическим тензодатчикам относятся тензолиты, представляющие собой искусственные смеси, например, угля (или сажи) и бакелитового лака. Наиболее простым монокристаллическим датчиком давления является пластинка полупроводника с омическими контактами на ее концах. Один из концов пластины (левый конец пластины показанной на рисунке 3.11) закрепляется не подвижно, а на другой конец оказывается механическое воздействие силой F . Через пластину, при помощи омических

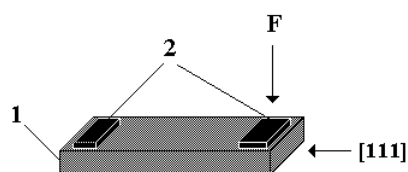


Рис. 3.11. Устройство наиболее простого полупроводникового тензодатчика

контактов, пропускается ток, величина которого будет изменяться при изменении механического воздействия. Основной характеристикой, показывающей изменение сопротивления полупроводника при воздействии деформации, является коэффициент тензочувствительности:

$$m = \frac{\Delta R}{R} / \frac{\Delta l}{l} \quad (5.11)$$

Коэффициент тензочувствительности – это отношение относительного изменения сопротивления полупроводника к величине относительной деформации в заданном направлении. В приведенной на рисунке конструкции датчика, при его изгибе несколько изменяется и длина самой пластины, что приводит к некоторому увеличению тензочувствительности. Коэффициент тензочувствительности для таких полупроводников как кремний и германий составляет величину 140-180. Этот коэффициент зависит от типа проводимости и от направления приложенной деформации. Например, для кремния р- типа проводимости $m < 0$ и достигает максимального значения для деформации, прикладываемой в направлении [111], то же время для деформации, прикладываемой в направлении [100], коэффициент тензочувствительности минимален. Для кремния п - типа проводимости $m > 0$ и достигает максимального значения для деформации, прикладываемой в направлении [100]. Для датчиков давления, изготавливаемых на основе кристаллического германия, коэффициент тензочувствительности имеет достаточно большую величину, при использовании направления [111], как для материала п - типа, так и для материала р- типа. При этом в германии п - типа проводимости $m < 0$, а в германии р- типа проводимости $m > 0$. Для уменьшения влияния изменения температуры на величину изменения электрического сопротивления датчиков давления при изготовлении датчиков используются примесные полупроводники. Причем концентрация основных носителей заряда должна быть равной концентрации. На рисунке 4.11. показано устройство

диффузионного тенздатчика. Этот датчик изготавливается при помощи диффузии в подложку кремния n -типа проводимости (1), примеси, создающей p -тип проводимости (3), к которой создаются металлические контакты из алюминия (2).

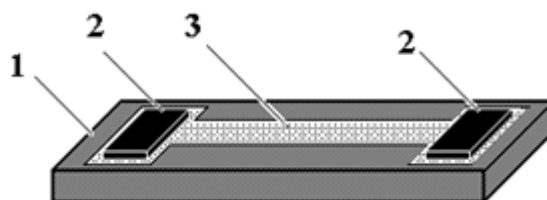


Рис. 4.11. Устройство диффузионного тенздатчика

В ряде случаев при изготовлении датчиков давления в качестве подложки используется не полупроводниковый, а диэлектрический материал. Причем для реализации всех возможностей датчиков, используется материал обладающей хорошей гибкостью (поливинилхлорид, лавсан, фторопласт). На рисунке 5.11. показано устройство датчика давления на основе фторопласта. Здесь: 1 – исходное фторопластовое основание; 2 – слой полупроводника n -типа проводимости; 3 – металлические токосъемные контакты из алюминия. Для увеличения коэффициента тензочувствительности датчика, полупроводниковый слой может быть нанесен на диэлектрическое основание в виде резистора зигзагообразной конфигурации (см. главу 2). На рисунке 6.11. показано устройство такого

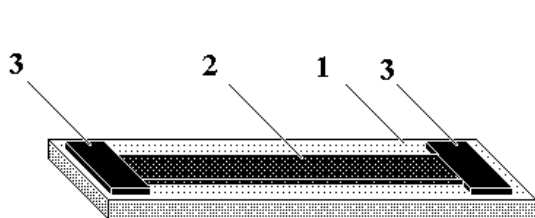


Рис. 5.11. Устройство датчика давления с гибким основанием

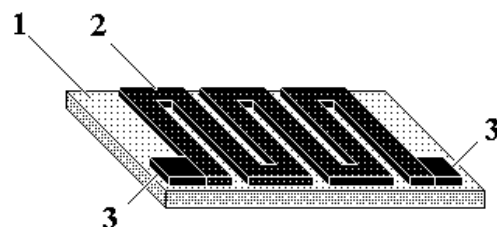


Рис. 6.11. Устройство датчика давления с полупроводниковым слоем зигзагообразной конфигурации

датчика. Здесь, так же как и на рисунке 5.11.: 1 – исходное гибкое диэлектрическое основание; 2 – слой полупроводника n- типа проводимости; 3- металлические токосъемные контакты из алюминия.

На рисунке 7.11. показана возможность использования датчиков давления с гибким диэлектрическим основанием для измерения знакопеременных деформаций. Видно, что при изменении направления деформации, величина тока протекающего через датчик изменяет свое направление.

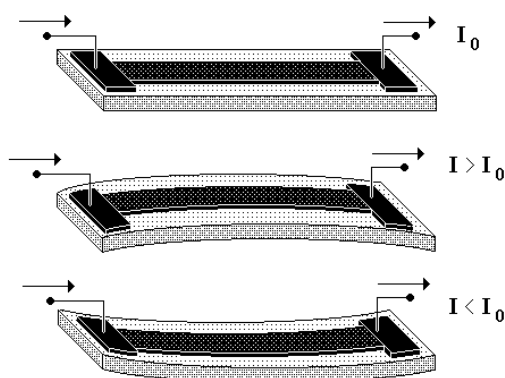


Рис. 7.11. Использование датчиков давления с гибким диэлектрическим основанием для измерения знакопеременных деформаций

С целью уменьшения влияние температура на параметры тензодатчиков часто используется мостовая измерительная схема. В такой схеме включения в измерительном мосте используются два тензорезистора с одинаковыми температурными коэффициентами. При этом в качестве тензодатчика используется только один резистор, а второй служит только для компенсации температурных изменений первого. Наибольшая тензочувствительность таких устройств достигается, если все четыре сопротивления измерительного моста являются тензорезисторами. При этом у двух используемых тензорезисторов коэффициент тензочувствительности $m > 0$, а двух других – коэффициент тензочувствительности $m < 0$. Все четыре тензорезистора изготавливаются на одной кремниевой подложке n - типа проводимости при помощи локальной диффузии примеси, создающей

проводимость р- типа (например, диффузией бора). Диффузионные тензорезисторы расположены по краям пластины таким образом, что при воздействии давления на одну из сторон пластины, у двух резисторов, расположенных на оси с кристаллографической ориентацией $[110]$, $m < 0$, а двух других $m > 0$. В мостовой схеме измерения падения напряжения на всех четырех тензорезисторах суммируется. Учитывая, что все четыре резистора изготовлены из одинакового материала, в едином технологическом цикле, становится очевидным и обеспечение высокой термической стабильности всего датчика. На рисунке 8.11. показано устройство такого датчика, изготовленного на основе пластины кристаллического кремния п - типа

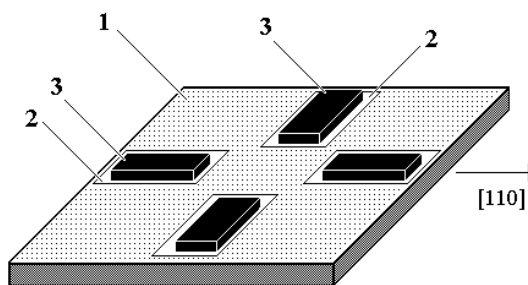


Рис. 8.11. Устройство датчика с четырьмя тензорезисторами

проводимости, с кристаллографической ориентацией $[001]$. Здесь: 1— исходная полупроводниковая пластина п- типа проводимости; 2— диффузионные участки типа проводимости; 3— металлические контакты из алюминия. А на рисунке 9.11. показан внешний вид этого датчика давления.

Достаточно широкое распространение получили полупроводниковые тензодатчики, изготовленные из дендридной ленты германия с удельным сопротивлением $\rho = 1 \pm 0,2 \text{ ом} \cdot \text{см}$. Дендриды - древовидные, игольчатые или пластинчатые кристаллы германия, имеющие сложное двойниковое строение. Дендриды образуются при кристаллизации переохлажденного расплава германия или при кристаллизации из пересыщенной газовой фазы германия. К основным достоинствам дендридных тензорезисторов из

германия относится их простота изготовления. К недостаткам относится пониженная механическая прочность (по сравнению с тензорезисторами, полученными из монокристаллического слитка) и сильная зависимость параметров от температуры. На рисунке 10.11. показан внешний вид одного из датчиков давления, изготовленного на основе дендридной ленты германия.

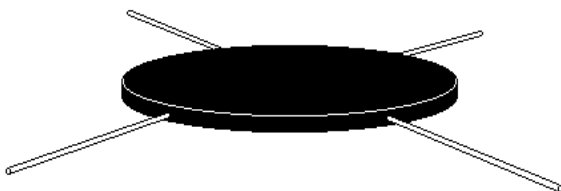


Рис. 9.11. Внешний вид датчика давления с четырьмя тензорезисторами

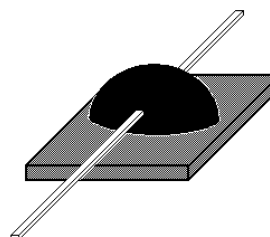


Рис. 10.11. Внешний вид датчика давления, изготовленного из дендридной ленты германия

В целом датчикам изготовленным на основе полупроводниковых элементов, присущи следующие недостатки: наличие в структуре датчика p-n переходов не позволяет использовать датчики при температурах больших 120°C ; использование гибких диэлектрических подложек ограничивает функциональные свойства датчиков; дендридные тензорезисторы обладают пониженной механической прочностью и имеют сильную зависимость параметров от температуры. В последнее время появились тензодатчики, в какой-то мере свободные от вышеперечисленных недостатков. К таким тензодатчикам относятся датчики, тензорезистивный полупроводниковый элемент в которых изолирован от исходной подложки слоем диэлектрика. На рисунке 11.11. показан элемент конструкции такого тензодатчика. На этом рисунке: 1 – полупроводниковая подложка из Si n - типа проводимости; 2 – слой диэлектрика (в основном используется SiO_2); 3 – тензорезистивный слой p-Si зигзагообразной конфигурации; 4 – омические контакты из Al.

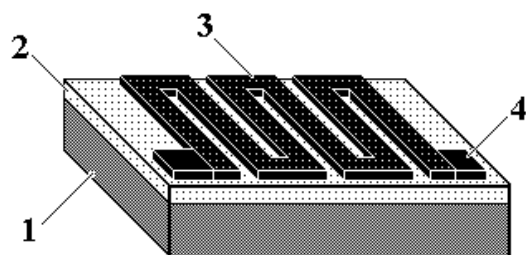


Рис. 11.11. Устройство тензодатчика с изолирующим диэлектрическим слоем

Однако традиционные полупроводниковые материалы наряду с высокой чувствительностью имеют ряд недостатков, затрудняющих их использование в тензометрии. Главные из таких недостатков – нелинейность характеристик и большой температурный коэффициент сопротивления (ТКС).

В последнее время при изготовлении полупроводниковых датчиков давления стали использоваться новые материалы. К таким материалам относится сульфид самария. Использование сульфида самария (SmS) позволило значительно улучшить параметры тензодатчиков и избавиться от недостатков датчиков давления, изготовленных на основе традиционных полупроводников. Это обусловлено следующими причинами: материалы, изготовленные на его основе, устойчивы к окислению, механически прочны (предел прочности порядка 40 кг/мм^2), обладают высокой радиационной устойчивостью, могут работать при больших напряжениях магнитного поля, имеют линейную зависимость относительного изменения сопротивления от величины прикладываемой деформации. Коэффициент тензочувствительности монокристаллов SmS достигает значения 200, коэффициент тензочувствительности поликристаллического SmS- 60, более того тензорезистивный эффект в поликристаллических пленках SmS обладает большой изотропностью. Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) различных материалов на основе SmS находится в пределах $-3 \pm +2,5 \cdot 10^{-3}$, что дает возможность изготовления тензорезисторов с различными знаками ТКС. Сульфид самария обладает физическими

свойствами, не встречающимися у традиционных полупроводниковых материалах. К таким свойствам относится низкотемпературный фазовый переход первого рода полупроводник-металл. Наличие такого перехода у SmS дает возможность, при помощи полировки его поверхности или при воздействии давления, переводить часть полупроводниковой пленки в металлическую фазу. Образовавшаяся металлическая фаза, в дальнейшем сохраняет свои параметры. Такое свойство сульфида самария дает возможность изменения таких важных параметров, как электрическое сопротивление, коэффициент тензочувствительности и температурный коэффициент сопротивления, в практически готовых тензодатчиках. Это обеспечивает получение прецизионных параметров.

По диапазону измеряемых давлений все датчики, выпускаемые промышленностью различных стран, можно разделить на три большие группы. Датчики малых давлений – 0-250 Па, датчики средних давлений – 0-1 кПа и датчики высоких давлений – 0-4700 кПа. Диапазон измеряемых давлений определяет конструкцию самого датчика. Датчики малых и средних давлений, как правило, выполнены в пластмассовых или в полиамидных корпусах. Датчики высоких давлений изготавливаются в корпусах из нержавеющей стали или латуни. Свойства и температура среды, давление которой измеряется, также предъявляют определенные требования к конструкции датчика давления. Средой могут являться сухой или влажный газ, различные эксплуатационные жидкости, в том числе и агрессивные. Практически все датчики, помещенные в пластмассовые корпуса, предназначены для измерения давления сухих и влажных неагрессивных газов. Чувствительный элемент у них защищен от окружающей среды различными типами силиконовых гелей. В большинстве случаев это фторосиликон. Если же датчик предназначен для работы в условиях высокой влажности и загрязненности, то его чувствительный элемент защищается этилпропилдиеновым мономером. Этот материал обладает чрезвычайной

гибкостью, большой прочностью, высокой влагостойкостью и отличными температурными свойствами в диапазоне $-60...+150^{\circ}\text{C}$. Практически у всех металлических датчиков чувствительный элемент защищен дополнительной металлической мембраной из латуни или нержавеющей стали.

Таблица 6.

Основные параметры полупроводниковых тензорезисторов						
Параметр	Материал тензорезистора					
	p-Si	n-Si	p-Ge дендрид	n-Ge дендрид	n-Ge	Производство США и стран СНГ
Удельное сопротивление, Ом·см	0,02	0,35	1	0,25	0,8	
Геометрические размеры, мм						
длина....	5	5	10	10	3,5	
толщина....	0,03	0,1	0,2	0,2	0,5	
ширина....	0,3	0,8	0,8	0,8	0,2	
Номинальное сопротивление при 20°C , Ом	100-200	150-400	50-500	50-200	360	
Температурный коэффициент сопротивления при 20°C	$13 \cdot 10^{-4}$	$60 \cdot 10^{-4}$	$50 \cdot 10^{-4}$	$15 \cdot 10^{-4}$		
Температурный коэффициент тензочувствительности при 20°C	$20 \cdot 10^{-4}$	$30 \cdot 10^{-4}$	$40 \cdot 10^{-4}$	$30 \cdot 10^{-4}$		
Рабочий ток, мА	20-40	10-20	10-25	20-35	5	
Диапазон относительных деформаций	$\pm 10^{-3}$	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	
Предельная деформация	$\pm 5 \cdot 10^{-3}$	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	
Максимальная рабочая температура, $^{\circ}\text{C}$	120	120	50	60	80	

Передача давления в этом случае осуществляется при помощи слоя силиконового геля, заполняющего пространство между защитной мембраной и сенсором. Эта 100-процентная изоляция, с одной стороны, позволяет прибору работать с множеством агрессивных газов и жидкостей. В таблице 6 приведены основные параметры, наиболее широко используемых в настоящее время, тензодатчиков.

Контрольные вопросы.

1. В чем заключается тензорезистивный эффект?
2. Чем обусловлена барическая зависимость подвижности носителей заряда?
3. Какие материалы используются для изготовления полупроводниковых датчиков давления?
4. Что показывает коэффициент тензочувствительности датчиков давления?
5. Чем диффузионный датчик давления отличается от датчика давления с гибким основанием?
6. В чем заключается преимущество датчика давления с четырьмя тензорезисторами?
7. Каково устройство тензодатчика с изолирующим диэлектрическим слоем?
8. В чем преимущество датчиков давления на основе сульфида самария?
9. На какие группы, по диапазону измеряемых давлений, можно разделить существующие датчики давления?
10. Как измерительные элементы датчиков давления изолируются от воздействий агрессивных сред?

ГЛАВА XII

Пьезодатчики

1.12. Пьезоэлектрический эффект.

Пьезоэлектрический эффект – возникновение электрических зарядов на поверхности вещества при его механической деформации. Пьезоэлектриками называют диэлектрики, в которых под действием механических напряжений появляется электрическая поляризация, а под действием электрического поля пьезоэлектрики упруго деформируются. Таким образом, пьезоэлектрики можно рассматривать как электромеханические преобразователи, преобразующими механическую энергию в электрическую и обратно.

Пьезоэлектрический эффект наблюдается в кристаллах, не имеющих центра симметрии, у которых при деформации элементарной структурной ячейки происходит появление электрического момента. Наиболее хорошо пьезоэлектрический эффект проявляется при приложении механической деформации к кристаллам природного кварца. Природные кристаллы кварца принадлежат к гексагональной кристаллографической системе и имеют форму, близкую к шестигранной призме, ограниченной двумя пирамидами. При приложении механической деформации сжатия или растяжения к кристаллу кварца в направлении перпендикулярном оси **c**, на поверхности кристалла образуются электрические заряды. На рисунке 1.12. показан кристалл кварца с указанием его осей симметрии. А на рисунке 2.12. показана кварцевая пластинка, вырезанная из кристалла кварца, перпендикулярно оси **a**. При воздействии давления в направлении оси **a**, приводящем к деформации сжатия или растяжения на гранях 1234 и 5678 появляются электрические заряды разноименных знаков. Поверхностная плотность появившихся зарядов, в пределах упругих воздействий, пропорциональна величине прикладываемых деформаций. Причина возникновения поверхностных зарядов при приложении механической

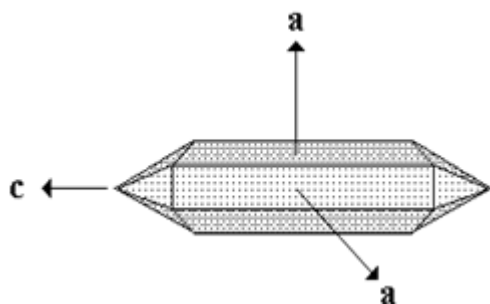


Рис. 1.12. Кристалл кварца с указанием его осей симметрии

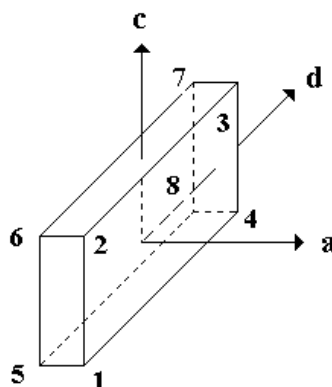


Рис. 2.12. Кварцевая пластинка, вырезанная из кристалла кварца, перпендикулярно оси a

деформации к кристаллу кварца заключается в следующем. По электрической структуре все диэлектрики можно разделить на полярные и неполярные. У полярных диэлектриков структурные единицы вещества имеют собственный дипольный момент. У неполярных диэлектриков в отсутствии внешних воздействий дипольного момента нет. При помещении диэлектрика в электрическое поле диполи в полярных диэлектриках поворачиваются по полю. В неполярных диэлектриках внешнее механическое воздействие или электрическое поле приводит к смещению зарядов внутри электрически нейтральных молекул, что также приводит к появлению электрических диполей.

По механизму смещения заряженных частиц различают электронную, ионную и дипольную поляризацию. По характеру смещения заряженных частиц поляризация может быть упругой и релаксационной. В качестве примера возникновения упругой поляризации, обусловленной смещением зарядов под воздействием механического напряжения, рассмотрим рисунок 3.12. На этом рисунке показана структура элементарных ячеек кварца, состоящая из трех молекул диоксида кремния – SiO_2 . При отсутствии механической деформации центры положительных (Si) и отрицательных (O) ионов совпадают (рис 3.12.a). При воздействии механической деформации, приводящей к сжатию кристалла в вертикальном направлении,

положительные ионы смещаются на некоторое расстояние в низ, а отрицательные ионы – вверх (рис.3.12.б). В результате такого смещения центры положительных и отрицательных ионов теперь не совпадают. В результате этого на поверхности кристалла появляются электрические заряды и возникает разность потенциалов. При деформации, приводящей к сжатию кристалла в горизонтальном направлении, знак возникающей разности потенциалов меняется.

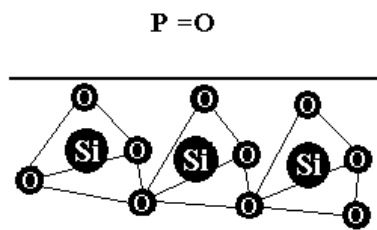


Рис. 3.12.а. При отсутствии механической деформации центры положительных (Si) и отрицательных (O) ионов совпадают

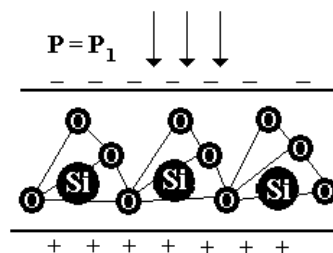


Рис. 3.12.б. При воздействии механической деформации, положительные и отрицательные ионы смещаются

На рисунке 4.12. условно показано смещение центров положительных и отрицательных ионов, при воздействии деформации сжатия в вертикальном направлении. Видно, что компенсация отрицательных и положительных

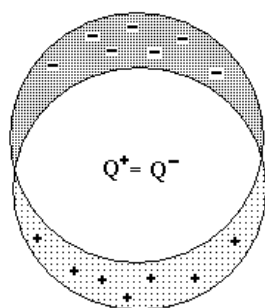


Рис. 4.12. Смещение центров положительных и отрицательных ионов

зарядов имеет место только в области их взаимного перекрытия. Вне этой области образуется не скомпенсированные отрицательные (в верхней части) и положительные (в нижней части) заряды. В общем случае при механической деформации кристаллов в структуре его решетки происходят изменения двух типов. Во-первых, деформируется каждая элементарная ячейка. Так, при одностороннем сжатии кристалла с кубической симметрией его элементарная ячейка превращается из куба в параллелепипед. Во - вторых, при деформации кристалла может происходить

сдвиг элементарных ячеек друг относительно друга. Однако этот сдвиг может происходить только в кристаллах, не имеющих центра симметрии. Поэтому хорошими пьезоэлектрическими свойствами обладают только те кристаллы, которые имеют низкую степень симметрии.

Как указывалось выше, по механизму смещения заряженных частиц различают электронную, ионную и дипольную поляризацию. Поляризация – направленное перемещение в веществе большого количества связанного заряда на ничтожно малые расстояния, соизмеримые, или меньшей, чем межатомные расстояния.

Электронная поляризация. Представляет собой упругое смещение и деформацию электронных оболочек атомов и ионов. Центр орбиты электрона смещается на расстояние, которое зависит от условий внешнего воздействия от и резонансной частоты атома. Время установления электронной поляризации ничтожно мало (около 10^{-15} с), поэтому электронную поляризацию условно называют мгновенной. Электронная поляризация происходит без потерь энергии (как бы упругая деформация). Степень поляризуемости частиц при электронной поляризации не зависит от температуры, а диэлектрическая проницаемость уменьшается с повышением температуры в связи с тепловым расширением диэлектрика и уменьшением числа частиц в единице объема.

Ионная поляризация. Этот вид поляризации характерен для твердых тел с ионным строением и обусловлен смещением упруго связанных ионов на расстояния в пределах кристаллической решетки. Ионная поляризация наблюдается в твердых телах с ионной кристаллической решеткой. Смещению ионов под действием поля препятствуют упругие силы химической связи. Смещение двух разноименно заряженных ионов приводит к появлению элементарного электрического момента. Сумма таких элементарных моментов, приходящихся на единицу объема, определяет ионный вклад в поляризованность диэлектрика. С повышением температуры

расстояния между ионами вследствие теплового расширения материала увеличиваются. В большинстве случаев это сопровождается ослаблением сил упругой связи и возрастание поляризованности диэлектрика. Время установления ионной поляризации – порядка 10^{-13} с.

Ионно-релаксационная поляризация. Этот вид поляризации наблюдается в ионных диэлектриках с неплотной упаковкой ионов, например, в неорганических стеклах и в некоторых кристаллических веществах. Ионно-релаксационная поляризация это перенос в твердом диэлектрике на другое место слабо закрепленных в решетке ионов. Это происходит при достаточной тепловой подвижности ионов, когда они отрываются от своего места в решетке и закрепляются в другом, недалеко от своего места. После снятия электрического поля ионы постепенно возвращаются к центрам равновесия, т.е. этот механизм можно отнести к релаксационной поляризации, при которой имеет место необратимое рассеяние энергии. Свойства ионно-релаксационной поляризации близки к свойствам дипольной поляризации.

Дипольная поляризация. Этот вид поляризации отличается от электронной и ионной тем, что дипольные молекулы, находящиеся в хаотическом тепловом движении, частично ориентируются под действием поля, что и является причиной поляризации. Дипольная поляризация имеет место, если молекулярные силы не мешают диполям ориентироваться вдоль электрического поля, созданного внешним воздействием. С увеличением температуры молекулярные силы ослабляются, что должно усиливать поляризацию, однако в то же время возрастает энергия теплового движения молекул, что уменьшает ориентирующее влияние поля. Поэтому температурное изменение диэлектрической проницаемости при дипольно-релаксационной поляризации характеризуется наличием максимума.

Заряды Q , возникающие на поверхности пластин из пьезокристаллов, пропорциональны, в пределах упругих деформаций, приложенным силам:

$$Q = d_{ik} F_i \quad (1.12)$$

Здесь: F_i – сила, действующая вдоль i – кристаллографической оси; d_{ik} – пьезоэлектрический модуль – величина заряда, возникающего под действием единичной силы по направлению i на поверхности, перпендикулярной направлению k .

На рисунке 5.12. показано устройство датчика акустического давления, изготовленного на основе кристаллического кварца. Здесь: 1 – кварцевая пластинка; 2 – металлические электроды, предназначенные для снятия поляризационного напряжения, возникающего при деформации кварцевой пластинки.

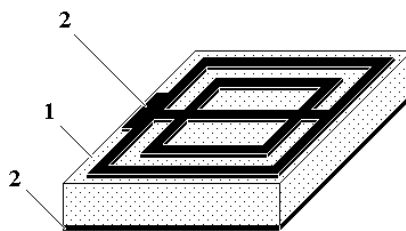


Рис. 5.12. Устройство датчика акустического давления

Пьезоэлектрическими свойствами обладают многие кристаллы, лишенные центра симметрии: кварц, турмалин, сегнетова соль и др. Наиболее сильно пьезоэлектрические свойства выражены у сегнетовой соли $\text{KOO}(\text{CHON})_2\text{COONa} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Однако сегнетова соль очень хрупкая и имеет низкую температуру плавления ($+63^\circ\text{C}$), что ограничивает ее использование. Лантан-галлиевый танталат ($\text{La}_3\text{Ga}_{5,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_{14}$) – кристалл, который так же обладает пьезоэлектрическими свойствами и имеет ряд преимуществ по сравнению с другими пьезоэлектрическими кристаллами. К этим преимуществам относятся: отсутствие фазовых переходов до температуры плавления (1450°C); отсутствие гистерезиса; высокое удельное сопротивление ($\rho \geq 10^7 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, при температуре 450°C).

Часто используется сегнетокерамика. Обычная сегнетокерамика, как изотропная среда, не обладает пьезоэффектом. Это обусловлено тем, что этот материал состоит из областей (доменов) с различными направлениями поляризации. При отсутствии внешних воздействий суммарный электрический дипольный момент равен нулю. Число различных доменов и их взаимная ориентация определяется симметрией кристалла. Для придания пьезоэлектрических свойств ее подвергают поляризации: выдерживают в сильном электрическом поле при температуре 100-150°C в течение длительного времени. Поляризованность доменов получает преимущественную ориентацию в направлении поля. После снятия внешнего поля в керамике сохраняется устойчивая остаточная поляризация; из изотропного тела керамика превращается в анизотропное – текстуру. По своим свойствам поляризованный сегнетокерамический образец близок к однодоменному кристаллу. Поляризованную сегнетокерамику, предназначенную для использования ее пьезоэффекта, называют пьезокерамикой. Из пьезокерамики можно изготовить активный элемент практически любого размера и любой формы. Пьезокерамика используется для создания ультразвуковых излучателей, элементов преобразования электрических сигналов в звуковые и обратно, датчиков давления, деформаций, ускорений и вибраций, пьезорезонансных фильтров электрических сигналов и линий задержки. На рисунке 6.12. показано

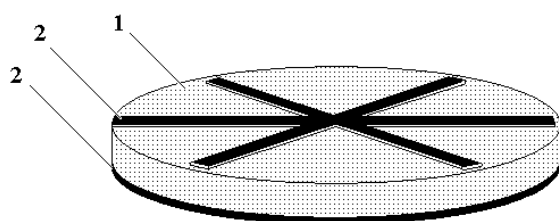


Рис. 6.12. Устройство сегнетокерамического датчика акустического давления

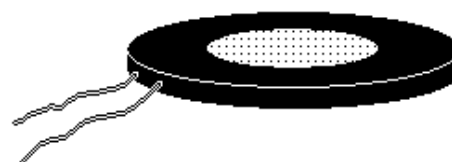


Рис. 7.12. Внешний вид сегнетокерамического датчика акустического давления

устройство датчика акустического давления, изготовленного на основе поляризованной сегнетокерамики. Здесь: 1—пластина сегнетокерамики, подвергнутая поляризации во внешнем электрическом поле; 2—металлические электроды, предназначенные для снятия поляризационного напряжения, возникающего при деформации кварцевой пластинки, вызванного воздействием акустического давления. На рисунке 7.12. показан внешний вид этого датчика акустического давления. В последнее время основным материалом для изготовления пьезокерамических элементов являются твердые растворы PbZrO_3 - PbTiO_3 (цирконат - титанат свинца).

В настоящее время промышленностью различных стран выпускаются высокочувствительные пьезоэлектрические датчики акустического давления предназначенные для работы в различных средах. Такие датчики имеют следующие характеристики: рабочий диапазон давлений до 186 Дб; рабочие частоты: 6,5 Гц - 140 кГц; рабочий диапазон температур: от -54°C до $+121^{\circ}\text{C}$. Однако, ввиду высоких значений тангенса угла диэлектрических потерь, пьезокерамику трудно использовать на частотах свыше 20МГц. На более высоких частотах применяются монокристаллические пьезоэлектрики.

Явление возникновения электрических зарядов на поверхности вещества при его механической деформации, называют прямым пьезоэлектрическим эффектом. Существует и обратный пьезоэлектрический эффект, когда под действием приложенного напряжения и в зависимости от его полярности пьезокристалл (кварц, сегнетова соль, турмалин и др.) поляризуется и изменяет свои геометрические размеры. Это обусловлено тем, что электрическое поле, действуя на простые ионные решетки кристалла вызывает их относительное смещение. Если к такому пьезокристаллу приложить переменное электрическое напряжение, то в нем возбуждаются механические колебания определенной частоты, зависящей от размеров кристалла. Следовательно, плоскопараллельную полированную пластинку из

пьезоэлектрического материала (например, из кварца) с токосъемным металлическим электродом можно использовать в качестве резонатора. Другими словами, такая пластинка является колебательным контуром с определенной частотой колебаний. Частота колебаний определяется толщиной самой пластины и направлением кристаллографического среза. На рисунке 8.12. показано устройство пьезоэлектрического резонатора. Здесь: 1 – пластина из пьезоэлектрического материала; 2 – механический держатель;

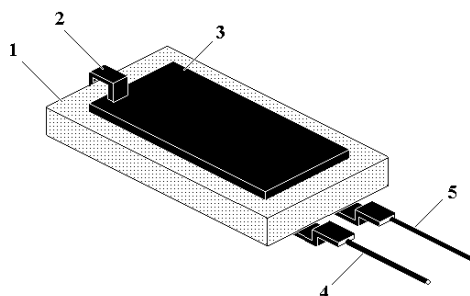


Рис. 8.12. устройство пьезоэлектрического резонатора

3 – металлические электроды, расположенные на двух противоположных поверхностях пластины; 4,5 – внешние выводы.

Основным преимуществом пьезоэлектрических резонаторов являются высокая механическая добротность ($Q_m = 10^4 - 10^8$) и температурная стабильность параметров. Благодаря высокой добротности кварцевые резонаторы используются в качестве фильтров с высокой избирательной способностью, а также для стабилизации и эталонирования частоты генераторов. Одно из главных требований к таким пьезоэлектрикам является нулевой или минимальный уход частоты механических колебаний в возможно более широком интервале температур. Этому требованию в значительной мере удовлетворяют резонаторы, изготовленные на основе природных и синтетических кварцах.

Ниобат и танталат лития, обладающие более высокими, по сравнению с кварцем пьезомодулями и коэффициентами электромеханической связи, во

многих случаях вытесняют кварц. Фильтры на их основе обладают большей широкополосностью при меньших габаритах, более низким сопротивлением в полосе прозрачности, большей изоляцией от паразитных колебаний. Механическая добротность ниобата и танталата лития сохраняет высокое значение ($10^5 - 10^6$) до СВЧ-диапазона, тогда как у кварца она максимальна при частоте 1 МГц, а выше 100 МГц снижается до значений меньших 10^5 . Эти материалы применяют в линиях задержки и фильтрах как объемных, так и поверхностных волн и других устройствах, использующих поверхностные акустические волны. Полупроводниковые соединения, обладающими пьезоэлектрическими свойствами, такие как: CdS, ZnS, ZnO используют в основном для пленочных преобразователей электромагнитных колебаний в акустические на высоких и сверхвысоких частотах (до 40 ГГц) и в акустических усилителях. На рисунке 10.12. показан внешний вид некоторых пьезоэлектрических резонаторов, выпускаемых промышленностью.



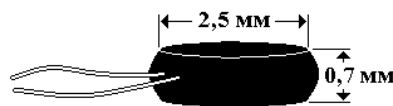
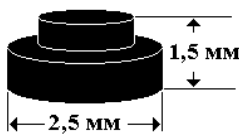
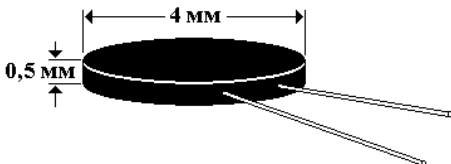
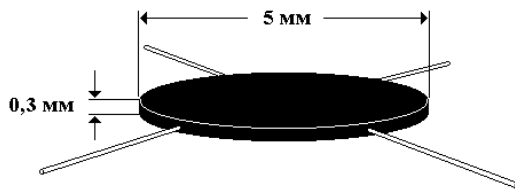
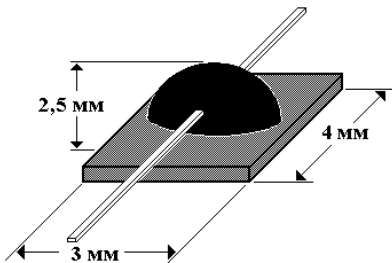
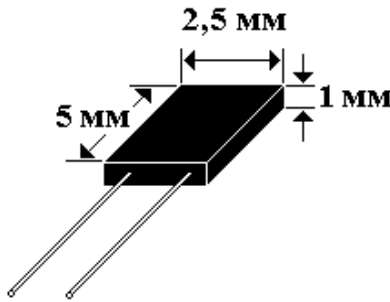
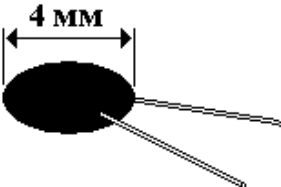
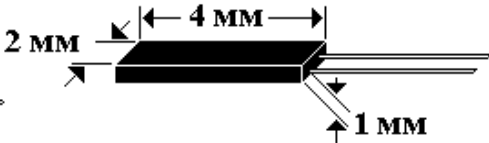
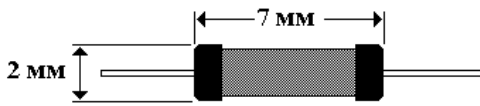
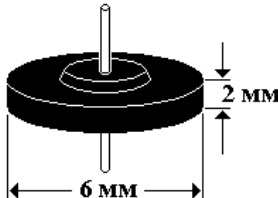
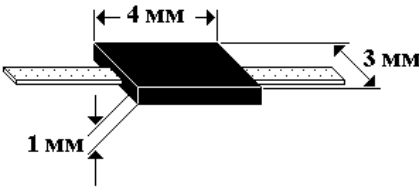
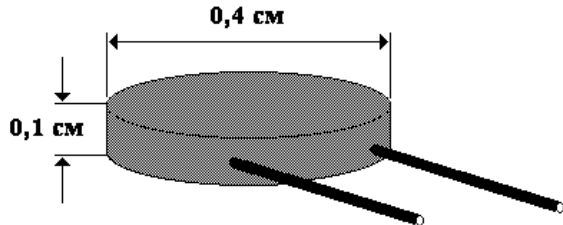
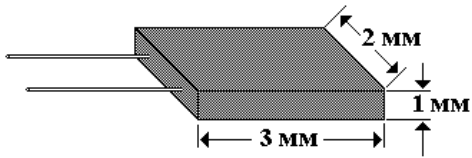
Рис. 9.12. Внешний вид некоторых пьезоэлектрических резонаторов

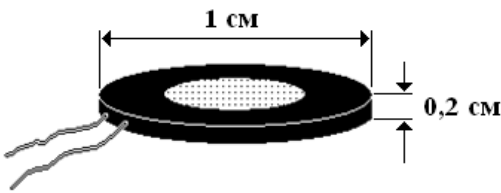
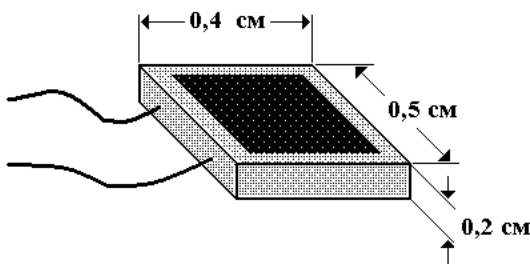
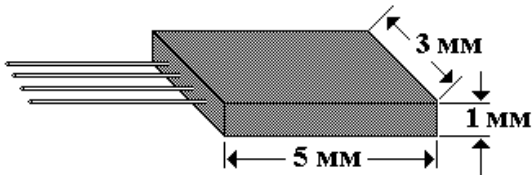
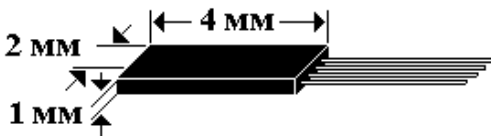
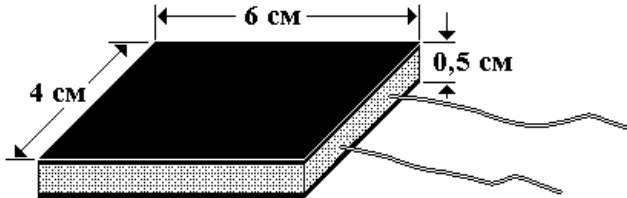
Контрольные вопросы.

1. В чем заключается пьезоэлектрический эффект?
2. Чем обусловлено появление электрических зарядов на поверхности некоторых диэлектриков при их механической деформации?
3. Какие материалы называют пьезоэлектриками?
4. В каких кристаллах наблюдается пьезоэлектрический эффект?
5. Что называется поляризацией диэлектрика?
6. Какие виды поляризации имеют место в диэлектриках?
7. Для чего используется пьезокерамика?
8. Какой эффект называется обратным пьезоэлектрическим эффектом?
9. Что называется пьезоэлектрическим резонатором?

Приложение 1

Ориентировочные размеры дискретных полупроводниковых приборов.

Позисторы		
		
Тензодатчики		
		
Варисторы		
		
Терморезисторы		
		
Варакторы		
		

Пьезодатчики	
	
Датчики Холла	
	
Модуль Пельтье	
	

Рекомендуемая литература

Власов С.И. Физика полупроводниковых приборов, Ташкент, «Университет», 2007 г.

Власов С.И. Электрические методы измерения параметров полупроводниковых структур, Ташкент, «Университет», 2007 г.

Гуляев М.Л. Металловедение, Москва, «Металлургия», 1986 г.

Курносков А.И. Материалы полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, Москва, «Высшая школа», 2001 г.

Суриков В.С. Основы электродинамики, Москва, «Протон», 2000 г.

Рычина Т.А., Зеленский А.В. Устройства функциональной электроники

и электрорадиоэлементы, Москва, «Радио и связь», 1999 г.

Нефедцев Е. В. Радиоматериалы и радиокомпоненты, Томск, 2000 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
ГЛАВА I. Пассивные элементы электронных схем.....	4
1.1. Пленочные структуры.....	5
ГЛАВА II. Пленочные пассивные элементы.....	19
1.2. Пленочные интегральные резисторы.....	19
2.2. Пленочные конденсаторы.....	25
3.2. Пленочные катушки индуктивности.....	33
ГЛАВА III. Полупроводниковые пассивные элементы.....	36
1.3. Полупроводниковые диффузионные резисторы.....	37
2.3. Полупроводниковые ионно - легированные резисторы.....	41
ГЛАВА IV. Пассивные элементы на основе контактов металл полупроводники на основе р - n переходов.....	43
1.4. Интегральные конденсаторы основе контактов металл - полупроводник.....	43
2.4. Интегральные конденсаторы на основе р - n переходов.....	48
3.4. Варакторы.....	59
ГЛАВА V. Пассивные элементы со структурой метал - диэлектрик- полупроводник.....	64
1.5. Резисторы со структурой метал - диэлектрик - полупроводник.....	64
2.5. Вольтамперные характеристики резисторов со структурой метал - диэлектрик- полупроводник.....	65
3.5. Конденсаторы со структурой метал - диэлектрик -полупроводник..	70
ГЛАВА VI. Датчики Холла.....	78
1.6. Эффект Холла.....	78
2.6. Параметры и характеристики датчиков Холла.....	84
ГЛАВА VII. Терморезисторы.....	90
1.7. Принцип работы и основные характеристики терморезисторов.....	90
2.7. Принцип работы и основные характеристики позисторов.....	97
ГЛАВА VIII. Варисторы.....	103
1.8. Принцип работы и основные характеристики варисторов.....	103

2.8. Основные параметры варисторов.....	106
ГЛАВА IX. Элементы Пельтье.....	109
1.9. Эффект Пельтье.....	109
2.9. Устройство и основные характеристики элементов Пельтье.....	113
ГЛАВА X. Запоминающие устройства.....	121
1.10. Полупроводниковые запоминающие устройства.....	121
2.10. Магнитные запоминающие устройства.....	133
ГЛАВА XI. Влияние деформации на электрические параметры полупроводников.....	140
1.11. Тензорезистивный эффект.....	140
2.11. Тензодатчики.....	145
ГЛАВА XII. Пьезодатчики.....	155
1.12. Пьезоэлектрический эффект.....	155
Приложение.....	165
Рекомендуемая литература.....	166
Содержание.....	167

**Власов Сергей Игоревич
Толипов Дамир Абидович**

**Пассивные твердотельные приборы
(Учебное пособие)**

Редактор С. Курбанов

Подписано в печать 12.12.2012 . Формат 60x84 1/16. Учет. изд. листов 9,8.
Условно печат. лист. 14,7 . Тираж 100 экз. Цена договорная.
Заказ № 20.

Издательство «Университет» Ташкент 100174.
Вуз городок. НУУзб.им. М. Улугбека. Административное здание.

Отпечатано в типографии НУУз им. М. Улугбека.