

Приложение
ОПОП-ППССЗ по специальности
11.02.06 Техническая эксплуатация
транспортного радиоэлектронного
оборудования(по видам транспорта)

КУРС ЛЕКЦИЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ОП.12. Материаловедение

для специальности

11.02.06 Техническая эксплуатация транспортного радиоэлектронного оборудования (по
видам транспорта)

Саратов 2021

Содержание

Лекция 1. Строение и классификация материалов.	4
Лекция 2. Свойства материалов.	13
Лекция 3. Классификация и свойства диэлектриков.	20
Лекция 4. Твердые органические диэлектрики.	30
Лекция 5. Электроизоляционные лаки и эмали, компаунды; волокнистые электроизоляционные материалы.	42
Лекция 6. Твердые неорганические диэлектрики	49
Лекция 7. Жидкие и газообразные диэлектрики. Активные диэлектрики.	67
Лекция 8. Проводниковые материалы.	78
Лекция 9. Полупроводниковые материалы.	94
Лекция 10. Магнитные материалы.	100
Лекция 11. Резисторы.	111
Лекция 12. Конденсаторы.	125
Лекция 13. Полупроводниковые приборы	139
Лекция 14. Интегральные микросхемы.	146
Список использованных источников.	161

Лекция 1

Строение и классификация материалов.

Назначение и основные свойства радиоматериалов.

Радиоэлектротехника относится к одной из наиболее быстро развивающихся областей техники, требующих большого разнообразия новых электрорадиоматериалов. Применение этих материалов позволяет получать изделия с высокой надежностью, быстродействием, устойчивостью к воздействиям окружающей среды, магнитных полей и т.д. Под электрорадиоматериалами понимают применяемые радио электротехнике материалы, у которых первостепенное значение имеют их свойства и характеристики в электрических и магнитных полях.

В отличие от конструкционных и вспомогательных материалов радио материалы в радиоаппаратах и радиоустройствах находятся под действием электромагнитных полей. Некоторые из радиоматериалов могут одновременно находиться под действием высокого электрического напряжения постоянного и переменного токов. Это вызывает в материале особое напряженное состояние. Выход из строя даже одного из диэлектриков часто влечет за собой выход из работы радиодеталей, а иногда и всего радиоаппарата.

Развитие всех областей радиотехники тесно связаны с развитием технологии и разработкой новых радиоматериалов. Ранее применявшиеся металлические магнитные материалы на высоких частотах теряют свои магнитные свойства. В этих материалах возникают большие потери энергии, приводящие к выходу их из нормального режима работы. Для сердечников, могущих работать в магнитных полях высокой частоты, потребовалось создать принципиально новые магнитные материалы, обладающие стабильностью магнитных свойств в широком диапазоне частот и малыми потерями энергии.

Очень сложной задачей является правильный выбор материала для тех или иных целей, определяемый в первую очередь совокупностью его электрических, механических, магнитных, тепловых и физикотехнических свойств.

Несмотря на то, что многие технологические процессы изготовления приборов и радиоэлектронных устройств автоматизированы, механизированы или выполняются с использованием групповых методов обработки, сборочно-монтажные операции продолжают оставаться наиболее трудоемкими, и выполняются с применением ручного труда. Это объясняется наличием большого числа соединений и сложностью выполнения сборочно-монтажных работ вследствие малых размеров контактных соединений и высокой плотности упаковки.

Монтажник должен обладать не только соответствующей технической подготовкой, но и знаниями свойств используемых электрорадиоматериалов, без чего невозможно понять практические вопросы современного производства. Согласно электрическим и магнитным характеристикам все радиоматериалы можно разделить на четыре основные группы: проводники, полупроводники, диэлектрики, магнитные материалы.

Проводники - это материалы, обладающие высокой электропроводностью, которая обусловлена наличием у них большого количества свободных электронов.

Полупроводники обладают меньшей электропроводностью, чем проводники, так как у них значительно меньше свободных электронов. Электропроводность полупроводников резко возрастает при нагреве, облучении и др.

Диэлектрики - вещества, обладающие незначительной электропроводностью, так как у них очень мало свободных заряженных частиц. Различают газообразные, жидкие и твердые диэлектрики.

Магнитные материалы - вещества, которые под действием внешнего магнитного поля способны намагничиваться, т.е. приобретать магнитные свойства, что обусловлено

строением этих веществ. Магнитные материалы способны концентрировать магнитную энергию. К этим материалам относят некоторые металлы, их сплавы, а также ферриты.

Общие сведения о строении вещества.

Электрорадиоматериалы обладают большим разнообразием свойств, благодаря которым их применяют в изделиях радиоэлектронной аппаратуры. От этих свойств зависят такие процессы в элементах радиоприборов, как передача, генерация, выпрямление или модуляция электрического тока, преобразование электрических сигналов в звуковые или световые и т.д. Эти свойства позволяют изготавливать такие разные по функциональному назначению, конструктивному исполнению и размерам изделия, как провода, волноводы, трансформаторы, магниты, электронные лампы. Лазеры и мазеры, приёмники света, полупроводниковые интегральные схемы и т.д. Для правильного выбора и эффективного использования этих материалов необходимо знание не только проявления их свойств, но и причин их разнообразия, которые связаны со строением вещества.

Виды связи.

Все вещества состоят из атомов. Атом представляет собой систему, состоящую из положительно заряженного ядра, вокруг которого вращаются отрицательно заряженные электроны. Электроны притягиваются к ядру и отталкиваются друг от друга. Расположенные ближе к ядру электроны подвержены большему напряжению, они ослабляют притяжение внешних электронов, которые находятся на большем расстоянии от ядра. Внешние электроны могут отрываться от одного атома и присоединяться к другому атому, изменяя числа его внешних электронов. Такие электроны называются валентными. Атом, потерявший один или несколько электронов, становится положительно заряженным. Атом который присоединил к себе свободные электроны, становится отрицательно заряженным. Образовавшиеся таким образом положительные и отрицательные частицы называются ионами.

Из атомов строятся молекулы. Связи, благодаря которым происходит объединение атомов в молекулы, называются химическими.

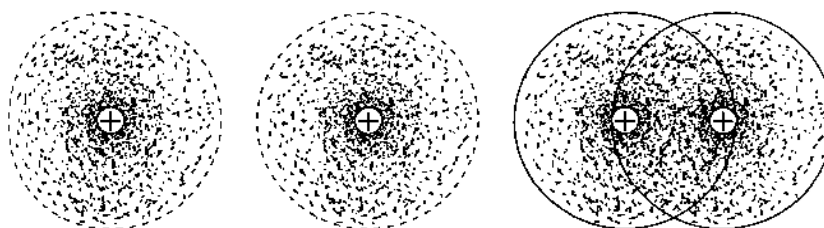


Рис. 1.1. Ковалентная (атомная) связь в молекуле водорода:
а - изолированные атомы; б - молекула с ковалентной связью

Способность атомов вступать в соединения с атомами других веществ и образовывать молекулы определяет химические свойства вещества. Молекула является наименьшей частицей вещества, которая сохраняет его химические свойства. Химические связи между атомами вещества делят на ковалентные (атомные), ионные, металлические и молекулярные.

Ковалентные связи возникают между атомами за счет образования устойчивых пар валентных электронов разных атомов (рис. 1.1).

Эти пары являются общими для атомов, которые входят в молекулу. Если двухатомная молекула состоит из атомов одного элемента (H_2 , C_{12} , N_2), то электронная пара в одинаковой степени принадлежит обоим атомам. В таком случае молекулу и ковалентную связь называют неполярными и (или) нейтральными. В неполярных молекулах центры положительных и отрицательных зарядов совпадают.

Если двухатомная молекула состоит из атомов различных элементов, то электронная пара может быть смещена к одному из атомов. В этом случае ковалентную связь называют полярной, а молекулы с полярной связью, у которых центры положительных зарядов не совпадают, - полярными или дипольными. Дипольная молекула характеризуется электрическим дипольным моментом.

$$\mu = gl,$$

где g - абсолютное значение заряда, Кл; l - расстояние между центрами положительного и отрицательного зарядов, м.

В отличие от ионной атомная связь имеет направленный характер. Эта связь образуется в направлении наибольшей плотности объединенных электронов. Поэтому вещества с ковалентными связями обычно характеризуются твердостью, хрупкостью, тугоплавкостью и химической инертностью. К ним относятся кристаллы германия, кремния, алмаза, соединения элементов из средних групп таблицы Д.И.Менделеева - SiC, BN. Атомные связи характерны для таких газов, как H_2 , O_2 , N_2 . Молекулы некоторых органических соединений: полиэтилена $(C_2H_4)_n$, политетрафторэтилена $(C_2F_4)_n$ - имеют ковалентную связь, при этом между отдельными молекулами в этих материалах образуются молекулярные связи.

Разновидностью ковалентной связи является донорно-акцепторная связь, которая возникает между атомом, способным отдать электрон (донор), и атомом, способным принять этот электрон (акцептор). Примером таких материалов являются соединения мышьяка - арсениды галлия GaAs и индия InAs.

Ионные связи обусловлены силами электростатического притяжения между положительными и отрицательными ионами.

Молекулы вещества с полярной связью полярны. Соединения с ионной связью обладают разными свойствами, которые характерны для типичных металлов и неметаллов. Такие связи наиболее характерны для неорганических диэлектриков, которые имеют в своём составе ионы противоположных знаков (большинство солей и некоторые оксиды, например, ZnO, CdO, NiO, CuO₂).

Металлические связи образуются в металлах и обусловлены особенностями поведения внешних (валентных) электронов. Атомы металлов обладают способностью отдавать внешние (валентные) электроны, превращаясь в положительный ион, или присоединять их вновь, превращаясь снова в нейтральный атом. Внешние электроны, которые покидают атомы, становясь свободными, называются коллективизированными. В результате металл представляет собой систему, состоящую из положительных ионов, которые находятся в среде коллективизированных электронов. В этой системе одновременно имеют место притяжение между ионами и свободными электронами и ковалентная связь между нейтральными молекулами. Наличие этих связей определяет монолитность и прочность металлов. Благодаря наличию свободных электронов металлы обладают высокой электро- и теплопроводностью. Металлическая связь в отличие от ковалентной не имеет направленного характера, что придает металлам высокую пластичность. Большинство металлов имеют высокие температуры плавления и кипения.

Молекулярные связи образуются между отдельными молекулами в результате электростатического притяжения между зарядами противоположных знаков, которые имеются в молекулах. Такое электростатическое притяжение называют силами Ван-дер-Ваальса. С помощью таких сил образуются молекулы в твердом водороде H_2 , азоте N_2 , углекислом газе CO_2 и других органических соединениях - полиэтилене, фторопласте и др.

Особым видом молекулярной связи является водородная связь, которая образуется через ион водорода (протон), расположенный между двумя ионами соседних молекул. Водородной связью соединяются молекулы воды и некоторых органических соединений.

В твердых веществах атомы и молекулы располагаются в строгом порядке и хаотично. Вещества с закономерным упорядоченным расположением атомов или молекул в пространстве называют кристаллическими, а вещества с беспорядочным расположением атомов или молекул - аморфными.

КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА

К кристаллическим веществам относятся все металлы и металлические сплавы. Кристалл состоит из множества сопряженных друг с другом элементарных кристаллических ячеек. В элементарной кристаллической ячейке содержится наименьшее число атомов.

Для описания структуры кристаллических тел пользуются

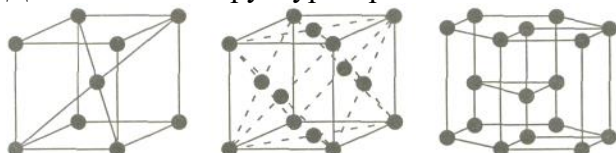


Рис. 1.2. Основные типы кристаллических решеток металлов:

а - кубическая объемно центрированная; б - кубическая гранецентрированная; в – гексагональная

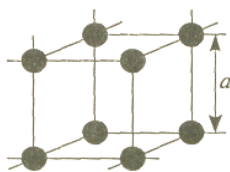
понятием пространственной кристаллической решетки, которая представляет собой пространственную сетку, в узлах которой располагаются частицы, образующие твердое тело.

В узлах ионных решеток располагаются чередуясь положительные и отрицательные ионы, которые связаны друг с другом ионно связью.

В узлах металлических решеток расположены положительные ионы, в промежутках между которыми находятся свободные электроны. Они образуют решетку с помощью металлических связей.

В узлах молекулярных решеток находятся молекулы. Такие решетки образуются за счет ковалентной и ионной связей.

Простейшим типом элементарной кристаллической ячейки является простая кубическая решетка. Размеры кристаллической решетки характеризуются ее параметрами. Под параметром решетки понимают расстояние между ближайшими параллельными атомными плоскостями, образующими элементарную ячейку. Эти расстояния очень малы и их измеряют в нанометрах или ангстремах ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{ м}$). Параметр кубической решетки (рис. 1.4) обозначается буквой a и находится в пределах $0,28...0,6\text{ нм}$. Параметр решетки хрома равен $2,9\text{ \AA}$, алюминия - $4,04\text{ \AA}$. Следовательно, в кристаллическом веществе на 1 мм размещаются десятки миллионов атомов.



Упорядоченное расположение атомов в кристаллах приводит к различному расположению и плотности атомов в разных направлениях. Этим обусловлено различие свойств металлов в разных направлениях. Изменение свойств кристаллов (металлов) в зависимости от направления называют анизотропией. Степень анизотропности свойств металлов может быть значительной. Например, предел прочности на растяжение у меди изменяется от 120 до 360 МПа , а относительное удлинение при растяжении ($A_{l/l} = 10$) - до 55% .

Учитывая анизотропию свойств кристаллов в разных направлениях, применяют количественную индексацию плоскостей и направлений в кристаллических решетках (индексы Миллера). Кристаллографические плоскости и их индексация представлены на рис. 1.4.

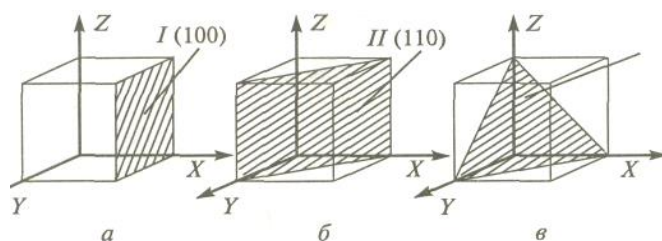


Рис. 1.4. Кристаллографические плоскости в кубических кристаллах

Плоскость I (рис. 1.4, а) отсекает от оси X отрезок, равный длине a ребра куба, и проходит параллельно осям Y и Z, т. е. пересекается с ними в бесконечности. Индексами выбирают отношения длины этого отрезка к длине ребра куба. Индексы записывают в круглых скобках.

Индексы плоскости I определяются следующим образом: по оси X $a/a = 1$, по оси Y $a/\infty = 0$, по оси Z $a/\infty = 0$. Следовательно, плоскость I имеет индексы (100) .

Плоскость II отсекает по осям X и Y отрезки, равные a , и пересекается в бесконечности с осью Z (рис. 1.4, б). Индексы этой плоскости следующие: по оси X $a/a = 1$, по оси Y $a/a = 1$, по оси Z $a/\infty = 0$. Следовательно, плоскость II имеет индексы (110).

Плоскость III (рис.1.4,в) имеет индексы (111).

Все кристаллические вещества при нагревании сохраняют твердое состояние до определенной температуры. Атомы, находящиеся в узлах кристаллической решетки, совершают непрерывные колебательные движения. Чем выше температура вещества, тем больше амплитуда этих колебаний. При достижении определенной температуры амплитуда колебаний атомов настолько увеличивается, что происходит разрушение кристаллической решетки. Атомы переходят в хаотическое состояние, а вещество превращается из твердого в жидкое. Температура, при которой происходит фазовое превращение твердого вещества в жидкое, называется температурой плавления $T_{пл}$.

Обратный переход кристаллических веществ из жидкого состояния в твердое называется кристаллизацией. Температура, при которой происходит фазовое превращение жидких веществ в кристаллические, называется температурой кристаллизации $T_{кр}$.

Строение металлов, когда атомы образуют геометрически правильную кристаллическую структуру, может быть только в идеальном случае. В реальных условиях кристаллы имеют большое число дефектов, наличие которых оказывает существенное влияние на свойства металлов и сплавов.

Основными дефектами кристаллических решеток являются точечные, линейные, поверхностные и объемные (трехмерные) несовершенства.

Точечные несовершенства появляются в результате образования вакансий (атомных дырок) или внедрения атомов в междоузлие (рис. 1.5).

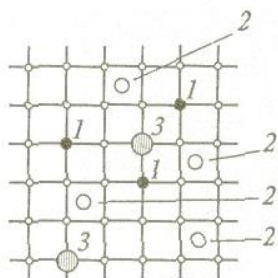


Рис. 1.5. Условное изображение точечных несовершенств: 1-вакансия; 2 –дислоцированный атом, 3 – примесный атом

Атомы металлов находятся в колебательном движении относительно положения равновесия. При нагревании амплитуда колебаний атомов возрастает. Большинство атомов данной кристаллической решетки обладает одинаковой средней энергией, поэтому амплитуда их колебаний при данной температуре одинакова, но отдельные атомы имеют энергию, значительно превышающую среднюю, и амплитуда колебаний их также больше среднего значения. Такие атомы могут перемещаться из одного места в другое и выходить из узла в междоузлие. Атомы, вышедшие из узла

решетки, называются дислоцированными, а места, где находились атомы, остаются в решетке незаполненными и называются вакансиями.

Линейные несовершенства представляют собой изменения структуры, протяженность которых в одном измерении гораздо больше, чем в двух других. Такие несовершенства называют дислокациями. Появление дислокации вызвано воздействиями на металл напряжений разного происхождения. При воздействии сосредоточенной нагрузки на некоторый участок происходит перераспределение напряжений в образце. Этот процесс сопровождается медленным сдвигом атомов.

Граница между сдвинутыми участками и сохранившейся без изменения областью является дислокацией (рис. 1,6).

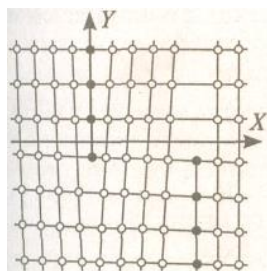


рис.1.6. Линейные дислокации
Дислокации бывают краевыми, винтовыми и смешанными.

Поверхностные несовершенства характеризуются значительными изменениями в двух измерениях. Примером поверхностного несовершенства является граница между кристаллами в реальных сплавах.

Кристалл состоит из блоков, которые по-разному ориентируются в пределах этого кристалла, образуя мозаичную структуру. На границах повернутых друг относительно друга блоков возникают напряжения, приводящие к искажению кристаллической решетки (рис. 1.7).

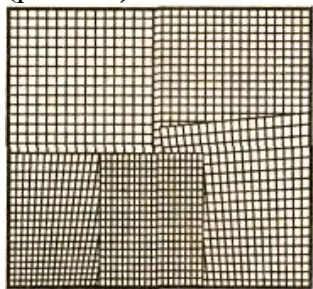


Рис. 1.7. Поверхностные несовершенства (мозаичная структура кристалла)

Объемные несовершенства кристалла имеют существенные размеры во всех трех измерениях. К объемным дефектам относятся пустоты, включения отдельных кристаллических зерен или кристаллической модификации.

По структуре кристаллические материалы бывают монокристаллическими и поликристаллическими.

Монокристаллические материалы - это однородные анизотропные тела, у которых атомы расположены по всему объему в правильном порядке. При этом сами атомы состоят из периодически повторяющихся одинаковых кристаллических ячеек.

Поликристаллические материалы состоят из большого числа сросшихся между собой мелких кристаллических зерен (кристаллитов), которые хаотически ориентированы в разных направлениях. За счет усреднения свойств отдельных кристаллов свойства тела в целом не зависят от направления, и поликристаллические материалы обычно изотропны. Однако с помощью специальной обработки (холодная прокатка с последующим отжигом, намагничивание, поляризация и т.д.) материал становится анизотропным. Материалы с искусственно созданной анизотропией называют текстурами.

К поликристаллическим материалам относятся металлы и многие керамические материалы.

АМОΡФНЫЕ И АМОΡФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА

Аморфные вещества. В аморфных веществах атомы и молекулы расположены беспорядочно. В отличие от кристаллических аморфные вещества не имеют строго определенной температуры перехода из твердого состояния в жидкое. Этот переход осуществляется в некотором диапазоне температур. При понижении температуры у аморфных материалов, находящихся в жидком состоянии, происходит быстрое повышение вязкости, которое затрудняет перемещение молекул, необходимое для формирования и роста кристаллов.

Свойства аморфных тел не зависят от выбранного направления, так как аморфные тела изотропны. Например, при охлаждении расплавленного кристалла кварца образуется так называемый плавленый кварц, свойства которого одинаковы по всем направлениям и при этом не отличаются от свойств кристаллического кварца.

Аморфные вещества делятся на две группы:

простые аморфные, к которым относятся низкомолекулярные жидкости, неорганические стекла, плавленый кварц и др.;

высокополимерные соединения, к которым относятся каучуки, резины, органические стекла, смолы.

Аморфно-кристаллические вещества. Некоторые вещества могут находиться в кристаллическом и аморфном состояниях. Аморфное состояние вещества менее устойчиво, чем кристаллическое, поэтому возможен самопроизвольный переход вещества из аморфного состояния в кристаллическое. Примером такого превращения служит расстекловывание, в процессе которого происходит самопроизвольная кристаллизация стекла при повышенных температурах или давлении. В связи с образованием мелких кристаллов стекло меняет свои оптические свойства и превращается в аморфно-кристаллический материал, называемый ситаллом.

Аморфно-кристаллическое состояние свойственно оксиду кремния, который встречается в природе в виде кристаллов кварца, а также в аморфном состоянии в виде минерала опал. В определенном интервале температур в термодинамически устойчивом состоянии, которое характерно для аморфно-кристаллических веществ, находятся жидкие кристаллы.

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАТЕРИАЛОВ

По назначению материалы, используемые в различных областях электроники, условно подразделяют на конструкционные и электротехнические.

Конструкционные материалы применяют для изготовления несущих конструкций, а также вспомогательных деталей и элементов радиоприборов, работающих в условиях воздействия механических нагрузок.

Электротехнические материалы, которые находят применение в радиоэлектронике, называют электрорадиоматериалами. Применение этих материалов в радиоэлектронике обусловлено, прежде всего их электрическими и магнитными свойствами.

КЛАССИФИКАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ

В процессе изготовления и в различных условиях эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры на электрорадиоматериалы воздействуют электрическое и магнитное поля в отдельности и совместно. По поведению в электрическом поле эти материалы подразделяют на проводниковые, полупроводниковые и диэлектрические.

Классификация электроматериалов по электрическим свойствам основана на представлениях зонной теории электропроводности твердых тел. Сущность этой теории состоит в следующем.

В изолированном атоме электроны вращаются вокруг ядра на определенных орбитах. Согласно принципу Паули на каждой орбите может находиться не более двух электронов.

Каждой орбите соответствует строго определенное значение энергии, которой может обладать электрон, т. е. каждая орбита представляет собой определенный энергетический уровень. Под воздействием притяжения положительно заряженного атомного ядра электроны стремятся занять ближайшие к ядру уровни с минимальным значением энергии. Поэтому нижние энергетические уровни оказываются заполненными электронами, а верхние уровни - свободными. Электрон может скачкообразно перейти с нижнего энергетического уровня W_1 на другой свободный уровень W_2 , (рис. 2.1). Для этого электрону необходимо сообщить дополнительную энергию $\Delta W = W_2 - W_1$. Если свободных уровней в атоме нет, то электрон не может изменить свою энергию, поэтому не участвует в создании электропроводности.

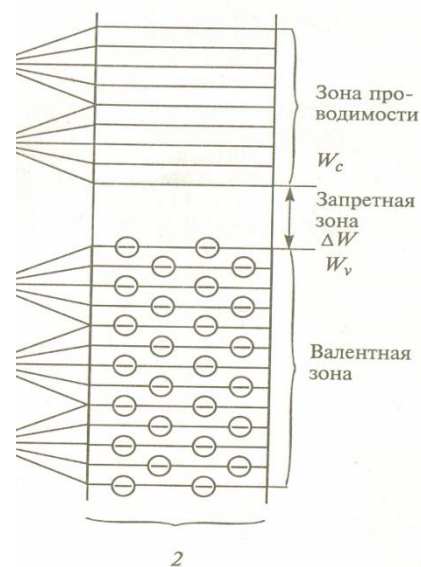


Рис. 2.1. Диаграмма энергетических уровней
изолированного атома (7) и твердого тела (2)

В кристаллической решетке, состоящей из нескольких атомов, отдельные энергетические уровни расщепляются на подуровни, которые образуют энергетические зоны (см. рис. 2.1). При этом расщепляются свободные и заполненные энергетические уровни. Зона, заполненная электронами, называется валентной. Верхний уровень валентной зоны обозначается W_v . Свободная зона называется зоной проводимости. Нижний уровень зоны проводимости обозначается W_c . Промежуток между валентной зоной и зоной проводимости называют запретной зоной ΔW . Значение запретной зоны существенно влияет на свойства материалов.

Если ΔW равна или близка к нулю, то электроны могут перейти на свободные уровни благодаря собственной тепловой энергии и увеличить проводимость вещества. Вещества с такой структурой энергетических зон относят к проводникам. Типичными проводниками являются металлы.

Если значение запретной зоны превышает несколько электрон-вольт (1 эВ - энергия электрона, полученная им при перемещении между двумя точками электрического поля с разностью потенциалов 1В), то для перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости требуется значительная энергия. Такие вещества относят к диэлектрикам. Диэлектрики имеют высокое удельное электрическое сопротивление. Если значение запретной зоны составляет 0,1...0,3 эВ, то электроны легко переходят из валентной зоны в зону проводимости благодаря внешней энергии. Вещества с управляемой проводимостью относят к полупроводникам.

Проводниковые материалы служат для проведения электрического тока. В зависимости от структуры и внешних условий материалы могут переходить из одного класса в другой.

Например, твердые и жидкие металлы - проводники, а пары металлов - диэлектрики; типичные при нормальных условиях полупроводники германий и кремний при воздействии высоких гидростатических давлений становятся проводниками; углерод в модификации алмаза - диэлектрик, а в модификации графита - проводник.

Основным свойством вещества по отношению к электрическому полю является электропроводность, характеризующая способность материала проводить электрический ток под воздействием постоянного электрического поля, т.е. поля, напряжение которого не меняется во времени.

Электропроводность характеризуется удельной электрической проводимостью γ и удельным электрическим сопротивлением ρ :

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E} = \mathbf{E} / \rho$$

где $\mathbf{J}$ - плотность тока; γ - удельная электрическая проводимость, См/м; E - напряженность электрического поля, В/м; $\rho = 1 / \gamma$ - удельное электрическое сопротивление, Ом*м.

Значения удельной электрической проводимости γ и удельного электрического сопротивления ρ у разных материалов существенно различаются. В сверхпроводящем состоянии удельное электрическое сопротивление материалов равно нулю, а у разреженных газов стремится к бесконечности.

Лекция 2

Свойства материалов.

СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛА

Основные структурные характеристики материала, во многом определяющие его технические свойства,— это плотность и пористость.

Плотность — физическая величина, определяемая массой вещества (или материала) в единице объема.

В зависимости от того, берется ли в расчет объем только самого вещества, из которого состоит материал, или весь объем материала с порами и пустотами, различают истинную и среднюю плотность.

Истинная плотность $\rho_{ист}$ (кг/м³) — масса единицы объема материала, когда в расчет берется только объем твердого вещества $V_{тв.в}$ (м³):

$$\rho_{ист} = m/V_{тв.в},$$

Таким образом, истинная плотность характеризует не материал, а вещество, из которого состоит материал,— это физическая константа вещества.

Значения истинной плотности вещества зависят в основном от его химического состава, и у материалов с близким химическим составом они различаются незначительно.

У каменных материалов как природных (песок, гранит, известняк), так и искусственных (кирпич, бетон, стекло), состоящих в основном из оксидов кремния, алюминия и кальция, истинная плотность колеблется в пределах 2500...3000 кг/м³.

Истинная плотность органических материалов, состоящих в основном из углерода, водорода и кислорода (битум, полимеры, масла), составляет 800... 1200 кг/м³.

Относительно высокая истинная плотность у древесины — около 1500 кг/м³.

Большие различия в истинной плотности наблюдаются лишь у металлов (кг/м³): алюминий — 2700, сталь—7850, свинец—11 300. Плотность воды — 1000 кг/м³.

Средняя плотность материала $\rho_{ср}$ (кг/м³) (далее мы будем называть ее просто плотностью) — физическая величина, определяемая отношением массы m (кг) материала ко всему занимаемому им объему $V_{сст}$ (м³), включая имеющиеся в нем поры и пустоты:

$$\rho_{ср} = m/V_{сст},$$

Следовательно, плотность материала меняется в зависимости от его структуры. Поэтому искусственные материалы (бетоны, керамику и т. п.) можно получать с заданной (требуемой) плотностью. Например, меняя пористость бетона, можно получить как тяжелый бетон плотностью до 2500 кг/м³, так и особо легкий — плотностью менее 500 кг/м³.

Пористость — степень заполнения объема материала порами, %

$$P = [(V_{сст} - V_{тв.в}) / V_{сст}] 100.$$

Обычно пористость рассчитывают исходя из средней и истинной плотности материала:

$$P = [\rho_{ист} - \rho_{ср} / \rho_{ист}] 100$$

Пористость строительных материалов колеблется в пределах от 0 до 90...98% .

Пористость материала характеризуют не только с количественной стороны, но и по характеру пор: замкнутые и открытые, мелкие (размером в сотые и тысячные доли миллиметра) и крупные (от десятых долей миллиметра до 2...5 мм). Характер пор важен, например, при оценке способности материала поглощать воду. Так, полистирольный пенопласт, пористость которого достигает 93 %, имеет замкнутые поры и практически не поглощает воду. В то же время керамический кирпич, имеющий пористость в три раза меньшую (около 30 %), благодаря открытому характеру пор (большинство пор представляет собой сообщающиеся капилляры) активно поглощает воду.

Пористость является основной структурной характеристикой, определяющей такие свойства материала, как водопоглощение, теплопроводность, акустические свойства, морозостойкость, прочность и др.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Механические свойства характеризуют способность материала сопротивляться действию внешних сил или иных факторов (например, температурных), вызывающих в нем внутренние напряжения сжатия, растяжения или сдвига. Основные механические свойства строительных материалов: прочность, твердость, износостойкость, деформативность (упругость, пластичность).

Прочность — свойство материала в определенных условиях и пределах воспринимать нагрузки или другие воздействия, вызывающие в нем внутренние напряжения, без разрушения.

Частицы, из которых состоит твердый материал, удерживаются в равновесии силами взаимного сцепления. Если к какому-либо образцу материала приложить внешнюю силу F , например растягивающую (рис. 2.2), то ее действие равномерно распределится на все частицы материала: материал окажется в *напряженном состоянии*. Напряжение вызовет изменение расстояний между частицами — материал начнет деформироваться (в нашем случае — растягиваться).

Для определения значения напряжений σ (МПа), т. е. внутренних сил, приходящихся на единицу площади поперечного сечения материала, возникающих в материале при приложении к нему внешней силы F (кН), мысленно делают поперечный разрез образца ($a — a$). Чтобы образовавшиеся половинки образца (I и II) остались в равновесии, внешней силе F должна противодействовать равная ей внутренняя сила σA , где A (m^2) — площадь поперечного сечения образца материала, откуда

$$\sigma = F/A.$$

Для твердых и упругих тел с увеличением напряжений σ пропорционально возрастают его относительные деформации ε

$$\sigma = E\varepsilon,$$

где E — модуль упругости, МПа, характеризующий жесткость материала.

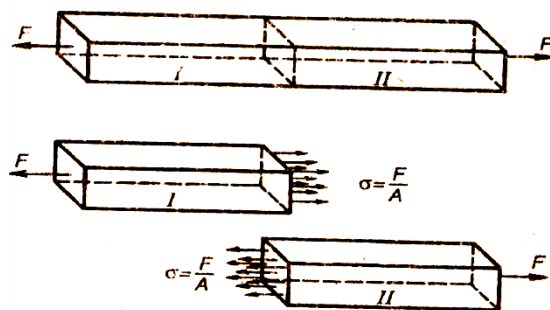
Чем выше модуль упругости, тем меньше материал деформируется. Так, модуль упругости каучука 10...20 МПа, а стали — 200 000 МПа, это значит, что под действием одной и той же силы деформация стали будет в 10 000 раз меньше, чем каучука при прочих равных условиях.

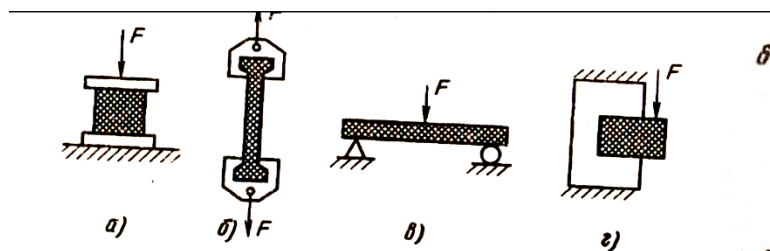
При увеличении действующей силы напряжения в материале возрастают и могут превысить силу сцепления частиц — материал разрушится.

На практике разрушение материала начинается значительно раньше того момента, когда напряжения в нем достигнут теоретического предельного значения. Это объясняется тем, что в реальных материалах много дефектов самого различного уровня (начиная от молекулярного и кончая макродефектами, например трещинами).

Прочность материала характеризуется значением предела прочности R — напряжением в испытуемом образце материала в момент его разрушения.

В зависимости от характера приложения нагрузки F и вида возникающих напряжений различают прочность при сжатии, растяжении, изгибе, скалывании (срезе) (рис. 2.3).





Р и с . 2.3. Схема нагружения образца при определении пределов прочности материала на сжатие (а), растяжение (б), изгиб (в) и срез (г)

Предел прочности материала определяют на образцах, форму и размеры которых устанавливают стандарты на этот материал. Так, для оценки прочности бетона приняты образцы-кубы размером 150 x 150 x 150 мм.

Предел прочности бетона при сжатии $R_{сж}$ обычно 10...50 МПа. Чтобы разрушить бетонный куб размером 150 x 150 x 150 мм с $R_{сж} = 10$ МПа, надо приложить усилие $F = R_{сж} \cdot A = 10(0,15 \times 0,15) = 225$ кН (22,5 т). Поэтому для испытания материалов применяют специальные машины, снабженные механизмом для силового воздействия на образец и измерительными устройствами. Так, предел прочности при сжатии определяют с помощью гидравлических прессов, развивающих усилие до 10^3 кН (100 т) и более (рис. 2.4).

Для испытания на прочность образец 4 устанавливают на нижнюю плиту 3 пресса, зажимают верхней плитой 5 и включают масляный насос 8. За повышением давления масла наблюдают по манометру 7, фиксируя давление, при котором начинается разрушение материала. Разрушающее усилие $F_{разр}$ равно произведению значений зафиксированного давления и площади поршня пресса. Предел прочности при сжатии

$$R_{сж} = F_{разр} / S,$$

где S — площадь поперечного сечения образца, $м^2$.

Аналогично определяют пределы прочности при растяжении, изгибе, скалывании. Однако расчетные формулы при изгибе и скалывании имеют другой вид.

Прочность при сжатии, растяжении и изгибе у одного и того же материала может сильно различаться.

У природных и искусственных каменных материалов прочность при сжатии в 5... 15 раз выше, чем при изгибе и растяжении. У древесины, наоборот, прочность при изгибе выше прочности при сжатии (в 1,5...2 раза).

Прочность древесины при сжатии вдоль волокон близка к прочности бетона, а при изгибе она прочнее бетона более чем в 10 раз.

Водостойкость. Увлажнение многих материалов снижает их прочность. Степень понижения прочности материала, насыщенного водой, характеризуется *коэффициентом размягчения*

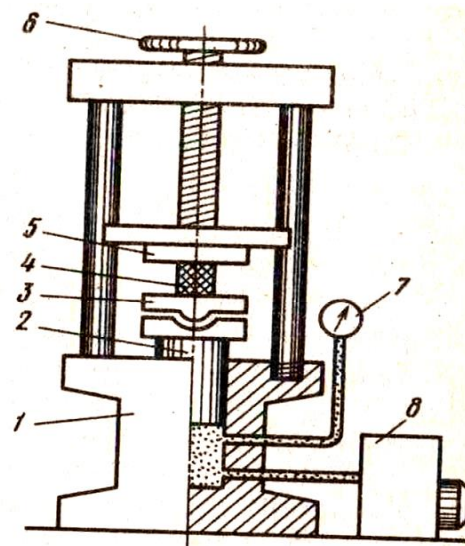
$$K_p = R_{нас} / R_{сух}$$

где $R_{нас}$ — прочность материала в насыщенном водой состоянии, МПа;

$R_{сух}$ — то же, в сухом состоянии, МПа.

Значение K_p для разных материалов колеблется от 0 (необожженная глина) до 1 (стекло, сталь, битум).

Упругость и пластичность. Если взять два шарика — резиновый и глиняный — и начать их сжимать, то они оба под действием приложенной силы деформируются. Как только прекращается действие силы, резиновый шарик восстанавливает свою форму, а глиняный останется деформированным.



Р и с . 2.4. Схема гидравлического пресса для испытания на сжатие:

1 — станина; 2 — поршень; 3, 5 — нижняя и верхняя опорная плиты; 4 — испытуемый образец; 5 — маховик для ручного подъема верхней плиты; 7 — манометр; 8 — масляный насос

Материалы, ведущие себя подобно резиновому шарик, т. е. восстанавливающие свою форму и размеры после снятия нагрузки, называются *упругими*. Количественной мерой упругости служит модуль упругости E , рассмотренный ранее.

Материалы, ведущие себя подобно глине, т. е. сохраняющие деформации после снятия нагрузки, называются *пластичными*. Соответственно обратимые деформации называются упругими деформациями, а необратимые — пластическими.

К упругим материалам относятся природные и искусственные каменные материалы, стекло, сталь; к пластичным — битумы (при положительных температурах), некоторые виды пластмасс, свинец, бетонные и растворимые смеси до затвердевания.

Твердость — способность материалов сопротивляться проникновению в них других материалов. Твердость — величина относительная, так как твердость одного материала оценивается по отношению к другому. Самый простой метод определения твердости — по шкале твердости. В эту шкалу входят 10 минералов, расположенных по возрастающей твердости, начиная от талька (твердость 1) и кончая алмазом (твердость 10). Твердость исследуемого материала определяют, последовательно царапая его входящими в шкалу твердости минералами.

Обычно твердость определяют на специальных приборах. Так, для оценки твердости металлов и других твердых материалов применяют методы Бринелля или Роквелла, основанные на вдавливании под определенной нагрузкой в испытуемый образец шарика из закаленной стали или алмазного конуса. По диаметру отпечатка рассчитывают число твердости НВ (по Бринеллю) или НР (по Роквеллу).

Высокая прочность материала не всегда говорит о его твердости. Так, древесина по прочности при сжатии равна бетону, а при изгибе и растяжении во много раз превосходит его, но значительно уступает бетону в твердости.

Износостойкость — способность материала противостоять воздействию на него сил трения и ударных воздействий от движущихся предметов. Определяют ее на специальных приборах, снабженных абразивными насадками и моделирующих реальный процесс изнашивания. Износостойкость — важное свойство материалов, используемых для покрытий полов, дорог и т. п.

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Физические свойства материала характеризуют его поведение под воздействием физических факторов, моделирующих воздействие внешней среды и условия работы материала (действие воды, высоких и низких температур и т. п.).

Гидрофизические свойства. Строительные материалы в процессе их эксплуатации и хранения могут поглощать влагу. При этом их свойства существенно изменяются. Так, при увлажнении материала повышается его теплопроводность, изменяются средняя плотность, прочность и другие свойства.

Влажность — содержание влаги в материале в данный момент, отнесенное к единице массы материала в сухом состоянии. Влажность $W(\%)$ определяют по формуле

$$W = ((m_{\text{ест}} - m_{\text{сух}}) / m_{\text{сух}}) * 100,$$

где $m_{\text{ест}}$ — масса материала в естественно влажном состоянии, г;

$m_{\text{сух}}$ — масса материала, высушенного до постоянной массы, г.

Водопоглощение — способность материала поглощать влагу и удерживать ее в своих порах. Водопоглощение характеризуется максимальным количеством воды, поглощаемым образцом материала при выдерживании его в воде, отнесенным к массе сухого образца (водопоглощение по массе W_m) или к его объему (объемное водопоглощение W_o)

Водопоглощение W_m и W_o (%) определяют по формулам:

$$W_m = [(m_{\text{вод}} - m_{\text{сух}}) / m_{\text{сух}}] * 100;$$

$$W_o = V_{\text{H}_2\text{O}} / V_{\text{ест}} = (m_{\text{вод}} - m_{\text{сух}}) * \rho_{\text{ср}} / \rho_{\text{H}_2\text{O}} \quad m_{\text{сух}} = W_m * \rho_{\text{ср}} / \rho_{\text{H}_2\text{O}}$$

где $m_{\text{вод}}$ — масса материала в насыщенном водой состоянии, г;

$m_{\text{сух}}$ — масса сухого материала, г;
 $V_{\text{ест}}$ — объем материала в сухом состоянии, см³;
 $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ — плотность воды, равная 1 г/см³.

Гигроскопичность — способность материалов поглощать водяные пары из воздуха. Гигроскопичность зависит от химического состава материала и характера его пористости. К гигроскопичным материалам относятся древесина и гипс. Характерные для древесины усушка и набухание, сопровождающиеся короблением и возникающие даже без непосредственного контакта с водой, являются следствием ее гигроскопичности. Снизить гигроскопичность можно, покрывая поверхность материала гидрофобными (водоотталкивающими) веществами. Например, древесину покрывают водостойкими лаками и красками.

При увлажнении материала изменяются его свойства — возрастает плотность, теплопроводность и обычно снижается прочность. Поэтому при всех расчетах необходимо учитывать как влажность материала, так и его способность к поглощению влаги (водопоглощение и гигроскопичность). Во всех случаях при применении и хранении пористые строительные материалы предохраняют от увлажнения.

Влагоотдача — способность материала терять находящуюся в его порах воду. Влагоотдачу определяют количеством воды, испаряющейся из образца материала в течение суток при температуре воздуха 20° С и относительной влажности 60 %. Влагоотдачу учитывают, например, при сушке стен зданий и уходе за твердеющим бетоном. В первом случае желательна быстрая влагоотдача, а во втором, наоборот, замедленная.

Морозостойкость — способность материала в насыщенном водой состоянии выдерживать многократное попеременное замораживание и оттаивание без признаков разрушения.

Вода, находящаяся в порах материала, при замерзании увеличивается в объеме почти на 10 %. В результате стенки некоторых пор разрушаются и при повторном увлажнении вода проникает глубже в материал. Такие циклически повторяющиеся замораживания и оттаивания с увлажнением постепенно разрушают материал.

Морозостойкость материала зависит от его пористости и водопоглощения.

Плотные материалы (без пор), а также материалы с замкнутыми порами, т. е. с небольшим водопоглощением, обладают высокой морозостойкостью. Материалы с открытой пористостью обладают, как правило, невысокой морозостойкостью, и требуются обязательные лабораторные испытания для ее оценки.

Морозостойкость материала характеризуется числом циклов замораживания (при температуре не выше — 18° С) и оттаивания (в воде), которое он выдерживает без снижения прочности и потери массы или появления внешних повреждений, указанных в ГОСТе на соответствующий материал. Так, для бетона допускается потеря прочности не более 5 %, а для растворов не более 25 % от первоначальных значений этих величин.

По морозостойкости материалы подразделяют на марки: 15; 25; 35; 50; 100 и т. д. Например, марка по морозостойкости кирпича F15 означает, что образцы, отобранные от партии кирпича, выдерживают не менее 15 циклов «замораживания — оттаивания» без появления внешних повреждений (отколов, шелушения поверхности и т. п.).

Теплофизические свойства. Теплопроводность — способность материала передавать теплоту сквозь свою толщину от одной своей поверхности к другой в случае, если температура этих поверхностей разная. Теплопроводность материала характеризуется количеством теплоты (в джоулях), которое способен передать материал через 1 м² поверхности при толщине 1 м и разности температур на поверхностях 1 К в течение 1 с.

$$\lambda = Qh / (S(T_2 - T_1) \cdot \tau), \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

Теплопроводность твердого вещества зависит от его химического состава и молекулярного строения, но во всех случаях она во много раз превышает

теплопроводность воздуха — 0,023 Вт/(м *К). Поэтому, чем больше в материале пор (т. е. чем больше в нем воздуха), тем ниже будет его теплопроводность.

Так как средняя плотность материала так же, как и теплопроводность, обратно пропорциональна пористости, то она может служить характеристикой теплопроводности материала и использоваться в качестве основной характеристики (марки) теплопроводности материала.

Если материал влажный, т. е. воздух в порах частично замещен водой, то теплопроводность материала резко возрастает. Причина этого в том, что теплопроводность воды в 25 раз выше, чем воздуха.

При замерзании воды в порах материала его теплопроводность повышается еще в большей степени, так как теплопроводность льда в 4 раза выше теплопроводности воды.

Теплоемкость — способность материала поглощать при нагревании теплоту.

Показателем теплоемкости служит *удельная теплоемкость*, равная количеству теплоты, необходимой для нагревания единицы массы материала на 1 К. Удельная теплоемкость большинства природных и искусственных каменных материалов находится в пределах (0,7...1)10 Дж/кгК). Поэтому количество теплоты, нужное для нагрева той или иной строительной конструкции до одной и той же температуры, зависит в основном не от вида материала, а от массы конструкции.

Тепловое расширение — свойство материала расширяться при нагревании и сжиматься при охлаждении — характеризуется температурными коэффициентами объемного и линейного расширения. В строительстве чаще используют коэффициент линейного температурного расширения, показывающий, на какую долю первоначальной длины увеличится размер материала в рассматриваемом направлении при повышении температуры на 1 С.

Коэффициенты линейного температурного расширения (КЛТР) у разных материалов значительно отличаются. Например, КЛТР пластмасс в 5... 10 раз выше, чем бетона. Поэтому в конструкциях, объединяющих несколько материалов, необходимо учитывать тепловое расширение каждого. При жестком соединении материалов с разными КЛТР в конструкциях могут возникнуть большие напряжения и как результат — коробление и растрескивание материала.

Эффект теплового расширения материалов можно наблюдать, например, в изменении размеров шва между железобетонными панелями. Так, при изменении температуры от — 20 до + 30° С размер железобетонной панели длиной 6 м увеличивается на 3 мм, при этом на столько же уменьшается ширина шва между панелями.

Огнестойкость — способность материала выдерживать без разрушения воздействие огня и воды в условиях пожара. Разрушение материала в таких условиях может произойти из-за того, что он сгорит, растрескается, полностью потеряет прочность. По степени огнестойкости различают негорючие, трудногорючие и горючие материалы.

Негорючие материалы под действием огня или высокой температуры не горят и не обугливаются. К таким материалам относятся бетон, кирпич и др. Однако некоторые негорючие материалы (стекло, асбестоцемент, мрамор) при резком нагревании разрушаются, а остальные конструкции при сильном нагревании теряют прочность и деформируются.

Трудногорючие материалы под действием огня медленно воспламеняются и после удаления огня их горение и тление прекращаются. К этим материалам относятся фибролит, пропитанная антипиренами древесина, асфальтобетон.

Горючие материалы под действием огня или высокой температуры горят и продолжают гореть после удаления источника огня.

Для повышения огнестойкости горючих материалов используют *антипирены* — вещества, которыми пропитывают или покрывают материал. Антипирены выделяют газы,

не поддерживающие горения, или под действием высокой температуры образуют пористый защитный слой на материале, чем замедляют его нагрев.

Огнеупорность — способность материала длительно работать в условиях высоких температур без деформаций и размягчения.

Примером огнеупорных материалов может служить огнеупорный кирпич, используемый для кладки внутренних объемов доменных и сталеплавильных печей, топок ТЭС и т. п.

ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Химические свойства материала характеризуют его способность к химическим превращениям под влиянием веществ, с которыми он находится в соприкосновении, а также некоторых физических (например, нагревание, облучение, электрический ток) и биологических (микроорганизмы, грибки и др.) воздействий. Из химических свойств материалов для строителя главные — коррозионная стойкость материалов в строительных конструкциях и их химическая активность. Последнее свойство важно для материалов, используемых как связующее (например, цемент, синтетические смолы).

Коррозия — разрушение твердых тел, которое вызывается химическими и электрохимическими процессами, протекающими в них при взаимодействии с внешней средой. Коррозионному разрушению подвергаются не только металлы, но и каменные материалы, бетон, пластмассы, древесина.

Основные агрессивные агенты, вызывающие коррозию строительных материалов, следующие: пресная и соленая вода, минерализованные почвенные воды, растворенные в дождевой воде газы (SO_2 , SO_3 , NO_2) от предприятий и автомашин. На промышленных предприятиях коррозию строительных материалов часто вызывают более сильные агенты: растворы кислот и щелочей, расплавленные материалы и горячие газы.

Особый вид коррозии — *биокоррозия* — разрушение материала под действием живых организмов (например, грибов, микробов). Биокоррозия — это не только гниение органических материалов (древесины, битума и др.), но и разрушение бетона и металла продуктами жизнедеятельности поселившихся на них микроорганизмов.

Изменение структуры и химического состава пластмасс под влиянием внешней среды называется *старением*. Наиболее вредные воздействия на пластмассы оказывают солнечное облучение, кислород воздуха и повышенные температуры.

Коррозия строительных материалов опасна не столько химическими изменениями в материале, сколько связанными с ними изменениями физико-механических характеристик материалов.

Химическая активность таких строительных материалов, как вяжущие вещества или минеральные добавки, зависит от их состава и строения (т. е. от активности составляющих их молекул), а также от тонкости измельчения. Причина последнего в том, что химические процессы протекают либо при непосредственном контакте этих веществ друг с другом (т. е. на их поверхности), либо при растворении веществ (растворение происходит также с поверхности). Таким образом, чем больше поверхность вещества, тем оно активнее в химическом отношении. Поверхность сильно возрастает при увеличении степени измельчения его частиц. Степень измельчения вещества характеризуется величиной называемой удельной поверхностью. *Удельная поверхность* — суммарная поверхность всех частиц единицы массы вещества ($\text{см}^2/\text{г}$). Удельная поверхность тонкомолотых материалов достигает больших значений ($\text{см}^2/\text{Д}$): обычного портландцемента — 2000...2500, а тонкомолотого быстротвердеющего — 3000...4000. Чем больше удельная поверхность, тем быстрее частицы цемента взаимодействуют с водой и соответственно быстрее твердеет цемент.

Лекция 3

Классификация и свойства диэлектриков.

Согласно зонной теории твердого тела диэлектрики - это вещества, у которых запретная зона настолько велика, что в нормальных условиях электропроводность в них отсутствует.

По назначению диэлектрические материалы можно разделить на электроизоляционные материалы и активные диэлектрики.

По агрегатному состоянию диэлектрические материалы подразделяют на твердые, жидкие и газообразные.

Особую группу составляют твердеющие материалы, которые в исходном состоянии являются жидкостями, а в процессе изготовления изоляции утверждаются и в период эксплуатации представляют собой твердые вещества, например компаунды, клеи, лаки и эмали.

По химической основе диэлектрические материалы подразделяют на органические и неорганические.

Для оценки эксплуатационных свойств диэлектриков и возможных областей их применения необходимо изучить физические явления, которые происходят в материалах при воздействии на них электромагнитного поля, и определить основные электрические, механические, тепловые, влажностные и физико-химические свойства.

Электрические свойства

К электрическим свойствам диэлектриков относят поляризацию, электропроводность, диэлектрические потери и пробой.

Поляризация диэлектриков.

Диэлектрик, помещенный между электродами, к которым подводится электрическое напряжение, поляризуется.

Поляризация - это процесс, состоящий в ограниченном смещении или ориентации связанных зарядов в диэлектрике при воздействии на него электрического поля.

В любом веществе, в том числе и в диэлектрике, независимо от наличия или отсутствия в нем свободных электрических зарядов всегда имеются связанные заряды: электроны оболочек атомов, атомные ядра, ионы. Под действием внешнего электрического поля связанные электрические заряды в диэлектрике смещаются со своих равновесных положений: положительные в направлении вектора напряженности поля E (к отрицательному электроду), а отрицательные - в обратном (рис.1). Так как в глубине диэлектрика положительные и отрицательные заряды взаимно компенсируются, некомпенсированные электрические заряды остаются только на поверхности диэлектрика. При этом у внутренней поверхности отрицательного электрода образуются некомпенсированные положительные заряды, а у положительного - отрицательные. У диэлектриков, содержащих дипольные молекулы, при поляризации наблюдается также ориентация диполей в электрическом поле. Поляризация приводит к образованию в каждом элементарном объеме диэлектрика dV индуцированного (наведенного) электрического момента dp .

Образование индуцированного электрического момента в диэлектрике и представляет собой явление поляризации. Интенсивность поляризации диэлектрика определяется поляризованностью P , которая равна отношению индуцированного электрического момента объема диэлектрика к этому объему, когда объем стремится к нулю:

$$P = dp/dV.$$

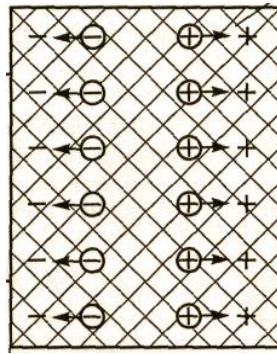


Схема расположения зарядов в поляризованном диэлектрике:

1 - диэлектрик; 2 - обкладки электродов; S - площадь каждой обкладки; h - расстояние между электродами (толщина слоя диэлектрика)

Поляризованность - векторная величина, ее направление совпадает с направлением электрического момента - от отрицательного ряда к положительному.

Степень поляризованности диэлектрика оценивается относительной диэлектрической проницаемостью. Чем выше ее значение, тем сильнее поляризуется диэлектрик.

Относительная диэлектрическая проницаемость представляет собой отношение заряда Q конденсатора с данным диэлектриком к заряду Q_0 вакуумного конденсатора тех же размеров, той же конфигурации электродов, при том же напряжении:

$$\varepsilon = Q/Q_0,$$

где $Q = Q_0 + Q_d$ - заряд конденсатора, когда между обкладками находится диэлектрик; Q_0 - заряд конденсатора, в котором диэлектриком является вакуум; Q_d - заряд, обусловленный поляризацией.

Таким образом

$$\varepsilon = (Q_0 + Q_d) / Q_0 = 1 + Q_d / Q_0.$$

Диэлектрическая проницаемость является количественной характеристикой, она всегда больше единицы.

Когда между обкладками конденсатора находится вакуум,

$$Q_d = 0 \text{ и } \varepsilon = \varepsilon_0 = 1,$$

где ε_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума.

Емкость конденсатора, в котором диэлектриком является вакуум, C_0 определяется по следующей формуле:

$$C_0 = Q_0 / \varepsilon_0 h$$

Емкость конденсатора тех же размеров с диэлектриком

$$C_d = Q_0 / \varepsilon h$$

где h - толщина диэлектрика, м.

Отсюда относительная диэлектрическая проницаемость:

$$\varepsilon = C_d / C_0.$$

Увеличение диэлектрической проницаемости свидетельствует о том, что емкость конденсатора с данным диэлектриком увеличивается по сравнению с емкостью конденсатора, между обкладками которого находится вакуум.

В зависимости от строения диэлектрика и его агрегатного состояния различают электронную, ионную, дипольную, миграционную, спонтанную и резонансную поляризацию.

Электронная поляризация - это смещение электронных орбит относительно положительно заряженного ядра под действием внешнего электрического поля. Она устанавливается за очень короткое время после наложения электрического поля и составляет 10~14...10~15 с. При увеличении размеров атома электронная поляризуемость увеличивается.

Электронная поляризация происходит во всех атомах любого вещества и, следовательно, во всех диэлектриках независимо от наличия в них других видов поляризации. Для веществ ионного строения существенна электронная поляризуемость не атомов, а ионов.

Запаздывание в установлении статического равновесия перемещающихся зарядов по отношению к электрическому полю называется релаксационной поляризацией.

Электронно-релаксационная поляризация проявляется в материалах, имеющих дефекты в электронном строении (например, титаносодержащая керамика); она связана с ориентацией электронов.

Ионная поляризация - это смещение друг относительно друга из положения равновесия разноименно заряженных ионов на расстояние, меньшее постоянной кристаллической решетки, в веществах с ионными связями. Она устанавливается также за малое, но все же большее, чем при электронной поляризации, время 10~13...10~14 с.

Ионная поляризация, как и электронная, не связана с потерями энергии и не зависит от частоты, даже инфракрасного диапазона.

Ионно-релаксационная поляризация присуща ионным диэлектрикам со сравнительно слабым закреплением структурных частиц (изоляторы фарфор, нагревостойкая керамика, щелочные изоляционные стекла). Она сопровождается рассеиванием электрической энергии и зависит от температуры и частоты тока.

Дипольная поляризация заключается в повороте (ориентации) дипольных молекул в направлении внешнего электрического поля.

Более строго дипольную поляризацию можно объяснить не как непосредственный поворот полярных молекул под действием внешнего электрического поля, а как внесение этим полем некоторой упорядоченности в положение полярных молекул, которые непрерывно совершают хаотические тепловые движения. Следовательно, дипольная поляризация связана с тепловыми движениями молекул. Дипольная поляризация проявляется в газах, жидкостях и аморфных веществах; в кристаллах диполи молекул обычно «заморожены», т.е. закреплены на своих местах и не могут ориентироваться.

Поляризованность при дипольной поляризации уменьшается после снятия приложенного напряжения, т.е. имеет место дипольно-релаксационная поляризованность.

Полярно-релаксационная поляризация наблюдается в полярных жидкостях и твердых диэлектриках, которые содержат полярные группы молекул или соответствующие радикалы, способные при

воздействии поля ориентироваться.

Миграционная поляризация обусловлена наличием в технических диэлектриках проводящих и полупроводящих включений и слоев с различной проводимостью.

При внесении неоднородных материалов в электрическое поле свободные электроны и ионы начинают перемещаться (мигрировать) в пределах каждого включения и накапливаться на границах, образуя поляризованные области.

Процесс миграционной поляризации сравнительно медленный; он может продолжаться секунды, минуты и даже часы. Поэтому миграционная поляризация обычно наблюдается лишь на низких частотах.

Спонтанная (самопроизвольная) поляризация наблюдается у диэлектриков с доменным строением, когда до приложения внешнего электрического поля в таких материалах уже имеются небольшие поляризованные области.

Внешнее поле ориентирует домены, векторы электрических моментов которых ориентированы хаотично и скомпенсированы в объеме материала, и диэлектрик поляризуется.

При самопроизвольной поляризации наблюдаются большие диэлектрические потери и резко выраженная зависимость диэлектрической проницаемости от температуры и напряженности электрического поля. Диэлектрическая проницаемость при этом может достигать очень высоких значений (до 100 000).

Материалы, обладающие таким видом поляризации, называются **сегнетодиэлектриками**.

Резонансная поляризация проявляется в области сверхвысоких частот у газов и твердых диэлектриков с дефектами в кристаллической структуре.

В зависимости от механизма поляризации все диэлектрики можно разделить на полярные и неполярные.

Полярные диэлектрики составляют группу материалов, содержащих постоянные электрические диполи, которые способны к переориентации во внешнем электрическом поле.

Неполярные диэлектрики составляют группу материалов, не содержащих диэлектрические диполи, которые способны к переориентации во внешнем электрическом поле.

Электропроводность диэлектриков.

Диэлектрические материалы обладают некоторой электропроводностью, которая связана с направленным перемещением заряженных частиц (электронов, ионов, молионов).

Электроны образуются при ионизации молекул вещества и соударения заряженных частиц с поверхностью анода. Ионы создаются при ионизации нейтральных молекул под воздействием внешних факторов (космических лучей, радиоактивного излучения и др.) и диссоциации основного вещества и примесей. Молионы формируются в коллоидных системах.

Коллоиды (от гр. kolla - клей + eidos - вид) - дисперсные системы, промежуточные между истинными растворами и грубодисперсными системами - суспензиями и эмульсиями.

Электропроводность диэлектриков в большинстве случаев носит ионный характер, т. е. носителями зарядов являются ионы.

Электропроводность диэлектриков оценивается удельным электрическим сопротивлением постоянному току, Ом • м,

$$\rho = 1/\gamma$$

где γ - удельная электрическая проводимость, См/м.

При включении диэлектрика в цепь постоянного напряжения происходит резкий скачок тока, а затем уменьшение его до постоянного значения. Это постоянное значение называется током сквозной проводимости $I_{ск}$.

Спадающий во времени ток, обусловленный перераспределением свободных зарядов, принято называть абсорбционным $I_{аб}$.

Ток, сопутствующий электронной и ионной поляризации, называют током смещения; его мгновенное значение обозначают $I_{см}$.

Таким образом, ток, проходящий через диэлектрик, представляет собой сумму токов смещения $I_{см}$, абсорбции $I_{аб}$ и сквозного $I_{ск}$:

$$I = I_{см} + I_{аб} + I_{ск}.$$

Так как абсорбционный ток быстро затухает, электропроводность изолирующих материалов при постоянном напряжении определяется по сквозному току:

$$\gamma = I_{ск} / U$$

При определении электропроводности диэлектрика необходимо измерять ток, когда $I_{см} + I_{аб} = 0$.

В зависимости от конструкции радиотехнических изделий принято различать удельное объемное электрическое сопротивление ρ_v и удельное поверхностное электрическое сопротивление ρ_s .

Удельное объемное электрическое сопротивление ρ_v определяет свойства изоляции, когда основные утечки тока происходят через объем материала, например в экранированном электрическом проводе.

Удельное объемное электрическое сопротивление ρ_v численно равно сопротивлению образца материалов в виде кубика с ребром единичных размеров, когда напряжение прикладывается к двум его противоположным граням. Для плоских образцов

$$\rho_v = R_v \cdot S / b,$$

где R_v - объемное сопротивление образца постоянному току, Ом; S - площадь электродов, контактирующих с испытуемым образцом, m^2 ; b - толщина образцов, м.

Удельное поверхностное электрическое сопротивление ρ_s является важнейшей характеристикой при оценке изоляционных материалов в таких деталях, как линейные изоляторы.

Удельное поверхностное сопротивление ρ_s численно равно сопротивлению образца материала в виде квадрата со стороной единичных размеров при прохождении тока через две его противоположные стороны:

$$\rho_s = R_s \cdot l / h,$$

где R_s - поверхностное сопротивление материала образца, находящегося между электродами, Ом; l - длина электродов; h - расстояние между электродами, м.

Удельное объемное и поверхностное электрические сопротивления ρ твердых диэлектриков зависят от температуры, влажности и величины приложенного напряжения.

Электропроводность диэлектриков зависит от содержания примесей. Чем выше содержание примесей, тем меньше удельное объемное сопротивление изоляционного материала.

Влияние напряженности внешнего поля влияет на электропроводность диэлектрика только в области полей, близких к пробивным.

Электропроводность многих изоляционных материалов зависит не только от строения и химического состава, но и от технологии их изготовления. Например, проводимость синтетических смол зависит от степени полимеризации каучуков - вулканизации, синтетических смол.

Поверхностная электропроводность твердых диэлектриков определяется наличием в их строении адсорбированных водно-коллоидных плёнок.

По отношению к воде изоляционные материалы делятся на гидрофобные и гидрофильные. К гидрофобным материалам относятся, например, воски, янтарь, полистирол и др. Их поверхностная проводимость мала и не зависит от влажности воздуха. К гидрофильным материалам относятся электроизоляционные стекла, мрамор, бумага, многие виды пластмасс. Электропроводность у них зависит от влажности окружающей среды.

Диэлектрические потери.

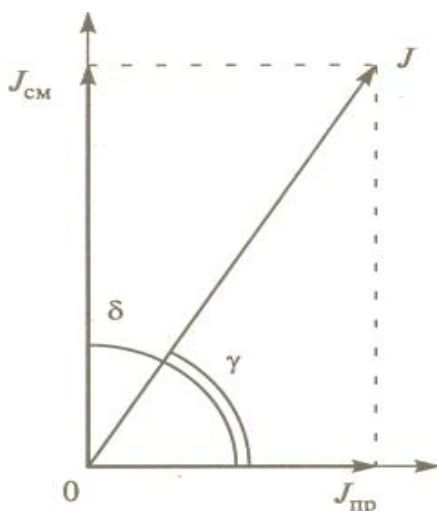
Диэлектрические потери связаны со сложными явлениями, которые происходят в материале при воздействии на него электрического поля. Они проявляются на постоянном и переменном токе. Однако качество диэлектрика на постоянном токе обычно характеризуется не диэлектрическими потерями, а удельным объемным и поверхностным сопротивлениями.

При воздействии электрического поля на любое вещество часть потребляемой им электрической энергии превращается в тепловую и рассеивается.

Рассеянную часть поглощенной диэлектриком электрической энергии называют диэлектрическими потерями.

Векторная диаграмма плотности тока в диэлектрике:

δ - угол сдвига суммарного тока относительно тока идеального диэлектрика; γ - угол сдвига фаз между током и напряжением; $J_{см}$ - плотность тока смещения; $J_{пр}$ - плотность тока проводимости; J - плотность общего тока



В диэлектрике, помещенном в переменное электрическое поле с напряженностью E и угловой частотой ω , возникают ток смещения и ток проводимости (рис.). Угол δ между векторами плотности переменного тока диэлектрика J и тока смещения $J_{см}$ на комплексной плоскости называют углом диэлектрических потерь. Тангенс этого угла является одним из важнейших параметров не только диэлектриков, но также конденсаторов, изоляторов и других электроизоляционных материалов. Тангенс угла диэлектрических потерь определяет активную мощность, которая теряется в диэлектрике, работающем под переменным напряжением. Он выражается отношением плотности тока проводимости $J_{пр}$ к плотности тока смещения $J_{см}$:

$$\operatorname{tg} \delta = J_{пр} / J_{см},$$

Введение безразмерного параметра $\operatorname{tg} \delta$ удобно потому, что он не зависит от формы и размеров участка изоляции, а определяется лишь свойствами диэлектрического материала.

Чем выше тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$, тем больше нагрев диэлектрика в электрическом поле заданной частоты и напряжения.

Пробой.

Явление образования в диэлектрике проводящего канала под действием электрического поля называют пробоем.

Если проводящий канал проходит от одного электрода к другому и замыкает их, происходит полный пробой.

Если проводящий канал не достигает хотя бы одного из электродов, происходит неполный пробой.

При частичном пробое пробивается лишь газовое или жидкое включение твердого диэлектрика.

У твердых диэлектриков кроме пробоя по объему возможен пробой по поверхности, такой пробой называют поверхностным.

Минимальное напряжение, приводящее к пробое диэлектрика, называют пробивным напряжением $U_{\text{пр}}$. Пробивное напряжение $U_{\text{пр}}$ растет с увеличением толщины диэлектрика h . Для характеристики способности материала противостоять разрушению в электрическом поле используют напряженность электрического поля, при которой происходит пробой, мВ/м ,

$$E_{\text{пр}} = U_{\text{пр}} / h,$$

Напряженность однородного электрического поля, приводящую к пробое, называют электрической прочностью.

Механизмы пробоя газообразных, жидких и твердых диэлектриков имеют существенные различия.

Механические свойства

При выборе диэлектрического материала в каждом конкретном случае следует учитывать не только электрические свойства (относительную диэлектрическую проницаемость ϵ , удельное электрическое сопротивление ρ , тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$, электрическую прочность $E_{\text{пр}}$), но и механические свойства.

К основным механическим свойствам относят упругость, прочность и вязкость.

Упругость.

На материалы могут действовать сосредоточенные или распределенные нагрузки, которые вызывают в них механические напряжения σ_j . Под действием механических напряжений σ_j материал деформируется. При небольших механических напряжениях выполняется закон Гука, который устанавливает линейную зависимость между механическими напряжениями σ_j и относительной деформацией χ_i . В этом случае после снятия нагрузок форма образца восстанавливается.

Прочность.

Закон Гука справедлив только до определенного значения σ_j . С некоторого значения механического напряжения σ_j деформация растет быстрее, чем по линейному закону. Происходит холодное пластическое течение материала, и после снятия напряжения форма образца не восстанавливается. Напряжение σ_j называют пределом текучести. Дальнейшее повышение механического напряжения приводит к разрушению образца при напряжении $\sigma_{\text{пр}}$, которое называется пределом прочности. Прочность материалов характеризуют пределами прочности при растяжении σ_r , сжатии $\sigma_{\text{сж}}$ и изгибе $\sigma_{\text{изг}}$. Пределы прочности измеряются в единицах механического напряжения - паскалях (Па).

Предел прочности материала при растяжении (Н/м)

$$\sigma_p = P_p / S_0 ,$$

Предел прочности материала при сжатии (Н/м)

$$\sigma_{сж} = P_{сж} / S_0 ,$$

Предел прочности материала при статическом изгибе (Н/м²)

$$\sigma_{изг} = 1,5 P_{изг} L / bh^2 ,$$

Механическая прочность зависит от типа связей молекул вещества: она максимальна в кристаллах с ковалентной связью и минимальна в кристаллах с молекулярной связью. Для металлов все три предела прочности близки, а для диэлектриков могут сильно отличаться: $\sigma_{сж} \gg \sigma_p, \sigma_{изг}$. Материалы, в которых пластическая деформация не наблюдается и образец разрушается (например, стекло, керамика), называются хрупкими. Для таких материалов справедливо равенство $\sigma_{пр} = \sigma_i$. Хрупкие материалы легко разрушаются под действием вибраций и динамических нагрузок. Материалы, в которых участок пластической деформации $\sigma_{пр} - \sigma_i$ очень широк, называются пластичными.

Вязкость.

Вязкость присуща материалам, которые находятся в жидком агрегатном состоянии; она характеризует сопротивление их течению.

Различают динамическую η_d и кинематическую η_k вязкости. Динамическая вязкость измеряется в паскалях, умноженных на секунду (Па·с). Кинематическая вязкость определяется отношением динамической вязкости к плотности жидкости ρ и измеряется в квадратных метрах на секунду (м²/с).

Вязкость сильно уменьшается с повышением температуры. Это особенно важно для заливочных и пропиточных электроизоляционных материалов. Заливку таких материалов производят в нагретом состоянии, когда они могут быстро заполнить мельчайшие отверстия.

Тепловые свойства

К основным тепловым свойствам диэлектрика относят нагревостойкость, теплопроводность, тепловое расширение и холодостойкость (морозостойкость). Нагревостойкость - это способность диэлектрика функционировать при повышенных температурах или при резкой смене температур без недопустимого ухудшения его свойств.

В зависимости от вида материала и условий его эксплуатации длительное или кратковременное воздействие повышенной температуры вызывает в диэлектрике различные изменения. Например, в зависимости от температуры линейные полимеры могут находиться в стеклообразном, высокоэластичном или вязкотекучем состояниях. В других случаях результатом воздействия повышенной температуры является появление больших остаточных напряжений, которые нарушают форму изделия или ухудшают его механические свойства. У лаковых покрытий, например, при длительном нагревании резко снижается эластичность.

У некоторых материалов при нагревании могут наблюдаться химическое разложение, интенсивное окисление, обугливание и даже горение. Помимо ухудшения качества изоляционных свойств, которые проявляются при кратковременном повышении температуры, при длительном воздействии повышенной температуры могут наблюдаться изменения в результате медленно протекающих химических процессов - тепловое старение изоляции. У трансформаторного масла старение проявляется в образовании продуктов окисления, у лаковых пленок - в повышении хрупкости, образовании трещин и отслаивании от подложки. Тепловое старение ускоряется при освещении образца

ультрафиолетовыми лучами, воздействию электрического поля, механических нагрузок и т. п.

Нагревостойкость определяется той температурой, при которой происходит недопустимое изменение эксплуатационных характеристик диэлектрика.

Одним из наиболее применяемых методов оценки нагревостойкости

электроизоляционных материалов является определение теплостойкости по Мартенсу.

Испытываемые образцы, к которым приложено изгибающее усилие 5 МПа, помещают в термостат и нагревают со скоростью 1 К/с. Температура, при которой образец прогнется на 6 мм от первоначального положения или сломается, представляет собой теплостойкость по Мартенсу.

Теплостойкость по Мартенсу для некоторых диэлектриков следующая: 75...90°C-для полистирола, 80...90°C-для полиэтилена, 150...200°C - для стеклотекстолита.

Для электроизоляционных материалов установлено семь классов нагревостойкости и соответствующая им максимальная рабочая температура.

Классы нагревостойкости электроизоляционных материалов

Большинство диэлектриков имеют значения коэффициента теплопроводности ут намного меньше, чем проводниковые материалы. Близкий к проводниковым материалам коэффициент теплопроводности имеют некоторые оксиды металлов (Al_2O_3 , MgO , BeO). Коэффициент теплопроводности у оксида бериллия выше, чем у металлического бериллия. Наименьшим значением коэффициента теплопроводности обладают пористые диэлектрики с газовыми включениями. Для повышения их теплопроводности применяют пропитку или уплотнение материала под давлением.

Для оценки теплопроводности кроме коэффициента теплопроводности γ_t используют также температуропроводность

$$A = \gamma_t / cD.$$

Тепловое расширение - это свойство диэлектрика изменять свои линейные размеры под действием температуры. Тепловое расширение оценивается температурным коэффициентом линейного расширения TK_l .

Холодостойкость - это способность электрической изоляции работать при низких температурах без недопустимого ухудшения эксплуатационных характеристик.

При понижении температуры электроизоляционные свойства диэлектриков, как правило, повышаются. Однако ряд механических свойств может ухудшаться. Органические диэлектрики в области низких температур растрескиваются, теряют гибкость.

Влажностные свойства.

Все изолирующие материалы поглощают влагу. Размер молекулы воды примерно $2,7 \cdot 10^{-9}$ м, что позволяет ей проникать даже в поры таких диэлектриков, как стекло.

Интенсивность и количество проникающей в материал влаги зависят в основном от состава и строения материала. Чем выше химическое «родство» молекул воды и изоляционного материала, тем сильнее их взаимодействие и выше влагопоглощение.

Влагостойкость – это способность материала сохранять свои эксплуатационные свойства при воздействии влаги.

Влажностные свойства диэлектриков определяются гигроскопичностью (влагопоглощаемостью), водопоглощаемостью и влагопроницаемостью.

Гигроскопичность.

Способность материала поглощать водяные пары из окружающей атмосферы называется гигроскопичностью. Гигроскопичность материалов зависит от их строения и химической природы. Материалы, содержащие капилляры, в которые может проникать влага, более гигроскопичны, чем материалы плотного строения. Лишённые пор материалы, например керамика или стекло, накапливают поглощённую из окружающей среды влагу на своей поверхности в виде тонкой плёнки. Эта влага не проникает в глубь материала, и такие материалы обладают только поверхностной гигроскопичностью.

Повышение влажности, как правило, ухудшает электрические свойства диэлектриков. Одно и то же количество поглощенной влаги по-разному влияет на электроизоляционные свойства разных материалов. Если поглощенная влага способна образовывать внутри изолятора области, которые пронизывают весь промежуток или значительную часть промежутка между электродами, то даже весьма малые количества поглощенной влаги приводят к резкому ухудшению электрических свойств изоляции. Если же влага распределяется по объему электроизоляционного материала в виде отдельных, не соединенных между собой, малых включений, то влияние влаги на электрические свойства материала менее существенно.

Гигроскопичность $W_{\text{г}}$ определяется отношением массы увлажненного образца к его первоначальной массе:

$$W_{\text{г}} = m_2 - m_1 / m_1 * 100\%.$$

Водопоглощаемость.

Иногда электроизоляционные материалы соприкасаются не только с воздухом, содержащим пары воды, но и непосредственно с водой. В таких условиях функционирует изоляция открытых установок, которые подвергаются действию атмосферных осадков; изоляция радиоэлектронной аппаратуры на кораблях или изоляция деталей в насосах. Водопоглощаемость - это способность материала поглощать воду. Водопоглощаемость $W_{\text{в}}$ определяется относительным приращением массы образца после выдержки его в воде в течение 24ч:

$$W_{\text{в}} = m_3 - m_1 / m_1 * 100\%.$$

Где m_3 -масса образца после выдержки его в воде, г; m_1 – масса образца в исходном состоянии.

Влагопроницаемость.

Большое практическое значение при оценке защитных покрытий имеет влагопроницаемость, т.е. способность материала пропускать сквозь себя пары воды. Большинство материалов пропускают воду, только для стекол, хорошо обожженной керамики и металлов Влагопроницаемость равна нулю.

Влагопроницаемость:

$$\Pi = a * (p_2 - p_1) * St / h.$$

Лекция 4

Твердые органические диэлектрики.

К органическим диэлектрикам относятся материалы, в составе которых находится углерод.

В качестве органических диэлектриков в промышленности применяют как природные, так и синтетические полимеры, которые получают методом химического синтеза. Часто их называют смолами.

Открытие синтетических полимеров сыграло большую роль в развитии многих отраслей, в том числе электротехники и радиоэлектроники.

Большинство органических диэлектриков представляют собой высокомолекулярные вещества, которые содержат очень большое число атомов или простейших молекул. Основу многих высокомолекулярных диэлектриков составляют полимерные соединения, которые получают из мономеров (низкомолекулярных соединений) в процессе реакций полимеризации или поликонденсации.

Полимеризация - это процесс соединения большого числа мономеров с образованием нового высокомолекулярного вещества (полимера) без выделения побочных продуктов реакции.

Поликонденсация - это процесс соединения разнородных мономеров с образованием полимера и выделением побочного продукта реакции.

Свойства полимеров определяются химическим составом, взаимным расположением атомов и строением макромолекул. По строению макромолекулы полимеров делятся на линейные (нитевидные) и пространственные (сетчатые).

Линейные полимеры представляют собой сочетание звеньев одной определенной структуры. Сочетание двух или трех химически различных звеньев образуют полимеры, которые называются совмещенными или сополимерами.

Линейные полимеры относят к термопластичным материалам. Они обладают следующими свойствами: температура размягчения 50...120 °С, сравнительно высокий температурный коэффициент объемного расширения ТКР, невысокая теплостойкость, легко деформируется при нагревании и затвердевает при охлаждении, имеют аморфную структуру и при нагревании плавно переходят из твердого состояния в жидкое или текучее.

Электрические свойства линейных полимеров зависят от расположения атомов или определенной группы атомов в цепи макромолекулы.

В пространственных полимерах макромолекулы связаны поперечными химическими связями.

Пространственные полимеры относятся к термореактивным материалам. Они обладают следующими свойствами: большая жесткость, чем у линейных полимеров; при нагревании не размягчаются; не гибкие; не способны образовывать пленки и волокна; не размягчаются в растворителях.

По тепловым свойствам полимеры подразделяются на термопластичные и термореактивные.

Термопластичные материалы (термопласты) характеризуются тем, что нагревание до температуры, соответствующей пластическому состоянию, не вызывает необратимых изменений их свойств. Они тверды при достаточно низких температурах, но при нагревании становятся пластичными и легко деформируются.

В термоактивных (термоотверждающихся) материалах при достаточной выдержке при высокой температуре происходят необратимые процессы, в результате которых они теряют способность плавиться и растворяться, становятся твердыми и механически прочными.

Полимеризационные синтетические полимеры

Полимеризационные синтетические получают в процессе полимеризации под действием теплоты, давления, ультрафиолетовых лучей, а также инициаторов и катализаторов. При полимеризации двойные и тройные связи мономеров разрушаются и молекулы, соединяясь между собой, еще больше удлиняются.

Наибольшее распространение получили блочный, эмульсионный, лаковый и газовый способы полимеризации.

Блочный способ полимеризации состоит в том, что предварительно очищенный от примесей жидкий мономер смешивают с катализатором, заливают в нагретую до определенной температуры форму и выдерживают при этой температуре до полного окончания процесса полимеризации. В результате получают твердые блоки материалов, которые поступают в дальнейшую переработку.

Таким способом получают полистирол, полиметилметакрилат (оргстекло).

Эмульсионный способ полимеризации представляет собой процесс, при котором исходный жидкий мономер с помощью эмульгатора превращают в мельчайшие капельки, взвешенные в другой жидкости, которая не растворяет этот мономер. В полученную эмульсию вводят инициатор и массу нагревают до температуры, при которой начинается химическая реакция. В процессе полимеризации эмульсию постоянно перемешивают. В результате получают порошкообразный полимер, незначительно загрязненный эмульгатором, что снижает диэлектрические свойства. Затем порошок подвергают грануляции.

Таким способом получают поливинилхлорид, нитрон.

Лаковый способ полимеризации осуществляется непосредственно в мономере, который растворяется в определенном растворителе.

Таким способом получают поливинилацетат.

При газовом способе полимеризация осуществляется в газовой фазе в присутствии катализатора при температуре примерно 200⁰С и высоком давлении. Этот способ применяют в том случае, когда мономеры не полимеризуются ни по одному из перечисленных способов.

Таким способом получают полиэтилен высокого давления.

Полимерные углеводороды. К ним относят полистирол, полипропилен, полиэтилен, поливинилхлорид, винипласт, полиметилметакрилат (оргстекло) и др.

Полистирол – твердый прозрачный материал, неполярный диэлектрик с высокими электроизоляционными свойствами. Он является продуктом полимеризации мономерного стирола в присутствии различных инициаторов.

По способу получения полистирол делится на блочный и эмульсионный.

Полистирол обладает следующими свойствами: температура размягчения 110...120⁰С; теплостойкость по Мартенсу 78...80⁰С; низкая гигроскопичность; водостоек; малое значение тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$; устойчив к воздействию нейтронов и у-лучей; не растворяется в спиртах, парафиновых углеводородах; стоек к действию щелочей и ряда кислот.

Недостатки: хрупкость при пониженной температуре; склонность к старению с образованием трещин; растворимость в ароматических углеводородах, хлороформе, концентрированной кислоте; невысокая нагревостойкость.

Полистирол – один из лучших высокочастотных диэлектриков. Он применяется для изготовления каркасов индуктивных катушек, корпусов радиоприемников и телевизоров, для изоляции кабелей и конденсаторов.

Полиэтилен – твердый белый и светло-серый материал без запаха, не полярный диэлектрик, полученный в результате реакции полимеризации газа этилена.

Полиэтилен обладает следующими свойствами: высокая морозостойкость; высокая влагостойкость, не гигроскопичен; устойчив к действию крепких кислот, щелочей и многих растворителей; при комнатной температуре не растворим ни в одном растворителе; стоек к

плесени; газонепроницаем; стоек к истиранию и вибрациям; в пламени горит и оплавляется; предельная рабочая температура 100⁰С.

Недостатки: тепловое старение приводит к образованию трещин на поверхности изделий; при нагревании до температуры 80⁰С и выше растворяется в ароматических и хлорированных углеводородах; под действием концентрированной серной кислоты чернеет, а в концентрированной азотной даже при комнатной температуре набухает, увеличиваясь в массе на 4,6 % в течении 85 суток; под воздействием тепла, ультрафиолетового излучения, кислорода, воздуха стареет; в сильных электрических полях происходят структурные изменения, снижающие качество изоляции.

Полиэтилен применяется как конструкционный материал для изготовления каркасов катушек, деталей, работающих в цепях высокой частоты. Полиэтиленовые пленки применяются при изготовлении кабелей и проводов. В микроэлектронике применяются полиэтиленовые трубы в качестве соединительных шлангов, установках для очистки различных газов, а также трубопроводов для подачи и разлива особо чистой воды, для изготовления посуды, для хранения и транспортировки жидких неорганических химикатов. *Полипропилен* – линейный неполярный полимер, полученный полимеризацией газа, пропилена аналогично полимеризации этилена низкого давления. Он обладает такими же электроизоляционными свойствами, как полиэтилен.

Пропилен применяют как комбинированный бумажно-пленочный диэлектрик в силовых конденсаторах, как пленочный диэлектрик в обмоточных проводах. Полипропилен перерабатывается в изделия теми же способами, что и полиэтилен; его выпускают в виде порошка, гранул, из него могут быть получены пленки, волокна, ткани и фасованные изделия.

Поливинилхлорид (ПВХ) – белый мелкодисперсный порошок. Линейный полярный полимер, полученный в результате полимеризации газообразного мономера винилхлорида в присутствии эмульгаторов (желатина, поливинилового спирта) и инициаторов (перекиси водорода, перекиси ацетилена).

Вследствие полярного строения поливинилхлорид имеет пониженные электрические свойства по сравнению с неполярными, но удельное электрическое сопротивление почти не изменяется при повышении температуры до 90⁰С.

Поливинилхлорид не растворяется в воде, бензине, спирте; растворяется в дихлорэтаноле и метиленхлориде; набухает в ацетоне и бензоле.

При нагревании выше 140⁰С под воздействием света поливинилхлорид разлагается с выделением хлористого водорода. Выделяющийся газ вредно действует на организм человека и вызывает коррозию аппаратуры.

В зависимости от способа полимеризации изготавливают суспензионный и латексный поливинилхлориды.

Суспензионный поливинилхлорид выпускают для кабельного светотермостойкого изоляционного материала, для кабельного пластика и изготовления винипласта.

Винипласт – твердый, не содержащий пластификатора полимер, который получают горячим прессованием порошкообразного или пленочного поливинилхлорида.

Винипласт обладает следующими свойствами: предельная рабочая температура 80⁰С; устойчив к действию бензина, масел, спиртов, фенола; до температуры 40⁰С устойчив к действию концентрированных кислот, щелочей, растворов солей, хлора; высокая прочность на удар; хорошая механическая прочность; низкая гигроскопичность; хорошие электроизоляционные свойства; низкая холодостойкость; низкая теплостойкость.

Пленки из винипласта применяют для изоляции водопогруженных электродвигателей, разделения катодных и анодных пластин, в аккумуляторных батареях и другой электрической аппаратуре, работающей в условиях повышенной влажности и воздействия кислот.

В качестве конструкционного материала винипласт используют для изготовления гальванических ванн, кислотостойкой посуды.

Латексный поливинилхлорид используют для изготовления прочных пластиков, мягкой пленки, технической пасты и изоляционных изделий.

Свойства поливинилхлоридов можно изменять в широких пределах, вводя различные добавки: пластификаторы, стабилизаторы, наполнители, красителями, получая пластикаты. *Полиметилметакрилат* (оргстекло, плексиглас) – прозрачный бесцветный материал, полярный диэлектрик, который получают в результате полимеризации эфиров метакриловой кислоты.

Полиметилметакрилат имеет малую гигроскопичность, высокую химическую стойкость; легко сваривается в специальных устройствах при температуре 140...150⁰С с применением давления на свариваемые поверхности 0,5...1,0 МПа, склеивается полярными растворителями.

Применяют органическое стекло для изготовления корпусов приборов, шкал, линз, а также в качестве дугогасящего материала.

Фторорганические полимеры. Недостатком органических полимеров является пониженная теплостойкость. Для большинства органических полимеров допустимые рабочие температуры от -60 до + 120⁰С. Углерод, составляющий основу органических полимеров, на воздухе, а тем более при нагревании, может окисляться, что приводит к разрушению полимера. Для повышения теплостойкости в качестве основы для органических полимеров используют кроме углерода фтор, кремний, титан и др. наибольшее распространение получили фторорганические (фторопласты) и кремнийорганические полимеры (полисилоксаны).

Фторопласты – кристаллические полимеры фторопроизводных этилена, где атомы водорода замещены фтором. Введение в молекулу полимера фтора, который прочно связывается с углеродом, повышает теплостойкость и химическую стойкость получаемого материала. Их получают в автоклавах полимеризацией газообразных низкокипящих мономеров при повышенном давлении.

В радиоэлектронике наиболее часто используют фторопласт-4 (политетрафторэтилен) и фторопласт-3 (политрифторхлорэтилен).

Фторпласт-4 – белый или сероватый материал с более высокой прочностью, чем у других органических полимеров. Цифра 4 указывает на число атомов фтора в молекуле мономера. Он выпускается также под названием фторлон-4, а за рубежом – под названием тефлон.

Фторпласт-4 обладает следующими свойствами: рабочий диапазон температур от – 250 до + 250⁰С; высокие диэлектрические свойства, мало зависящие от температуры; хорошие вакуумные свойства; наиболее химически стойкий материал из всех известных полимеров; не смачивается водой и не набухает в ней; не растворяется ни в одном растворителе; не горит; по электроизоляционным свойствам принадлежит к лучшим из известных диэлектриков; абсолютно стоек в тропических условиях и не подвержен действию грибов. К недостаткам фторпласт-4 относятся: выделение ядовитого газообразного фтора в результате разложения при температуре выше 400⁰С, низкую радиационную стойкость, сложную технологию переработки, высокую стоимость, сравнительную мягкость и склонность к хладотекучести.

Из фторпласта-4 изготавливают тонкие конденсаторные и электроизоляционные пленки толщиной 5...200мкм. В зависимости от способа изготовления выпускаются ориентированные и неориентированные пленки. В радиоэлектронике из фторопласта изготавливают химическую посуду для выполнения технологических операций в агрессивных средах; в оснастке для температурных испытаний, так как он хорошо переносит резкую смену температур в широком диапазоне; в вакуумных вентилях.

Фторопласт-3 (политрифторхлорэтилен) – полимер трихлорэтилена, в результате замены в элементарном звене одного атома фтора на атом хлора превращается в полярный диэлектрик.

Кремнийорганические полимеры (полисилоксаны) представляют собой материалы, которые являются промежуточным звеном между органическими и неорганическими материалами.

В их состав кроме характерного для органических полимеров углерода входит кремний. Основу строения их молекул образует силоксанная цепь чередующихся атомов кремния и кислорода.

В зависимости от исходных веществ и технологии изготовления получают кремнийорганические пластмассы, клеи, лаки, компаунды.

Поликонденсационные синтетические полимеры

В реакции поликонденсации участвуют не менее двух химических веществ. В результате образуются полимеры пространственной структуры, из которых получают прочные и теплостойкие термореактивные материалы. Продуктами поликонденсации являются: фенолформальдегидные, полиэфирные, эпоксидные и полиамидные смолы.

Фенолформальдегидные смолы получают путем поликонденсации фенола в водном растворе формальдегида при температуре 70...90⁰С в присутствии катализатора (кислоты или щелочи). Они могут быть термореактивными и термопластичными.

Их важнейшей особенностью является способность в сочетании с различными наполнителями образовывать *фенопласты*. Фенопласты обладают высокой прочностью, хорошими электроизоляционными свойствами, способны функционировать длительное время при высоких температурах, способны функционировать в любых климатических условиях.

Фенолформальдегидные смолы способны совмещаться со многими полимерами и образовывать сополимеры, которые обладают свойствами фенопласта и всеми положительными качествами совмещенного с ним компонента.

Эти смолы подразделяют на резольные и новолачные.

Если процесс ведут с избытком формальдегида в присутствии щелочи, то получают *бакелитовую* смолу. Она может находиться в трех стадиях: резол; резитол; резит.

Резольные смолы – термореактивные материалы, полярные диэлектрики. Применяются для изготовления текстолита, гетинакса, композиционных пресс-материалов, трубок, клеев и других материалов.

Если процесс ведут с избытком фенола в присутствии кислых катализаторов, то получают твердые, хрупкие, прозрачные термопластичные смолы, которые называют *новолаками*. Применяют для изготовления корпусов приборов, плат, разъемов, различных кнопок и ручек управления радиоаппаратуры, лака и как заменитель шеллака.

Полиэфирные смолы получают в результате поликонденсации различных многоатомных спиртов и многоосновных органических кислот или ангидридов. По физическим свойствам они близки к природным смолам. Из полиэфирных смол наиболее распространены:

Лавсановую смолу (полиэтилентетрафталат, лавсан) получают поликонденсацией терефталевой кислоты и этиленгликоля.

Применяют для изготовления волокон, пряжи, тканей, тонких электроизоляционных пленок.

Глифталевую смолу получают из простейшего трехатомного спирта глицерина и избыточного количества фталевого ангидрида при температуре 150...200⁰С в алюминиевых котлах

Применяют как основу для клеящих, пропиточных и покрывных лаков; для изготовления лаков, пластмасс, клеев.

Поликарбонаты – это полиэфиры угольной кислоты. Применяют для изготовления слоистых пластиков, компаундов, пленок для изоляции в электрических машинах.

Кремнийорганические смолы с пространственной структурой являются термореактивными. В промышленности применяются для изготовления электроизоляционных материалов.

Эпоксидные смолы получают в результате хлорирования глицеринов с двухатомными или многоатомными фенолами в щелочной среде. Применяются для изготовления лаков, клеев, заливочных компаундов. Эти смолы токсичны.

Полиамиды – термопластичные полярные диэлектрики с линейной структурой. Среди полиамидов наиболее распространены:

Капрон имеет температуру размягчения 215...220⁰С и применяется для получения синтетического волокна, которое по прочности, стойкости к испарению и гигроскопичности значительно превосходит текстильное волокно.

Найлон имеет более высокую температуру размягчения, чем капрон.

Из полиамидов изготавливают также устойчивые к коррозии изолирующие крепежные винты, гайки, шайбы, детали включателей.

Полиимиды органические полимеры, которые обладают высокой нагревостойкостью; очень высокой холодостойкостью; хорошими диэлектрическими свойствами.

Полиимидные пленки применяют в конденсаторах, в нагревостойких кабелях, в качестве подложек в микросхемах; полиимидные лаки используют для эмалирования проводов и пропитки катушек, а также в качестве межслойной изоляции в многокристальных больших интегральных схемах.

Полиуретаны представляют собой линейные термопластичные материалы, которые после отверждения превращаются в термоактивные полимеры.

Применяют для изготовления тканей, пряжи, нитей; для эмалирования проводов; в производстве покрывных лаков, заливочных компаундов; для получения пенопластов, каучуков, клеев, пленок, антикоррозионных покрытий.

Электроизоляционные пластмассы

Пластические массы (пластмассы) представляют собой изделия, получаемые из прессовочных порошков, которые под воздействием температуры и давления размягчаются и приобретают свойства пластического течения. В результате литьем или прессованием могут быть получены пластмассовые изделия различной формы (корпуса и основания, электроизмерительных приборов, электрических аппаратов, кнопки, ручки, крышки и др.).

Пластмассы получают на основе различных натуральных и искусственных смол, они успешно заменяют металлы, фарфор, каучук и другие материалы.

Пластмассы обладают следующими характеристиками:

1. Сравнительно высокие механические свойства.
2. Хорошие электроизоляционные свойства.
3. Высокая стойкость к коррозии.
4. Высокая химическая стойкость.
5. Легкость
6. Широкий диапазон коэффициентов трения и высокое сопротивление испарения.
7. Хорошие оптические свойства и прозрачность.

Пластмассы, как правило, являются многокомпонентными материалами, состоящими из связующего, наполнителей, пластификаторов стабилизаторов, смазывающих веществ, отвердителей красителей, порообразователей и др. Некоторые пластмассы представляют собой чистые полимеры (например, поливинилхлорид, полиэтилены и др.) и называются не наполненными пластмассами.

Связующие вещества— синтетические смолы (резольные, эпоксидные, кремнийорганические и др.), которые пропитывают наполнители и другие компоненты пластмасс, придают им пластичность и обеспечивают монолитность получаемым изделиям.

Связующими могут быть термопластичные или термореактивные вещества. В случае термопластичного связующего (поливинилхлорид и др.) пластмассовое изделие

тоже будет термопластичным, т. е. при нагревании до определенной температуры оно начнет размягчаться. Термореактивные связующие (резольные, кремнийорганические и другие смолы) обеспечивают изделиям термореактивность — неразмягчаемость изделий при нагревании.

В пластмассах неорганического состава (асбестоцемент, микалекс и др.) в качестве связующих применяют портландцемент, стекло и другие неорганические связующие.

Наполнители — порошкообразные или волокнистые вещества, повышающие механическую прочность и уменьшающие объемную усадку изготавливаемых пластмассовых изделий. Волокнистые наполнители (стеклянные, асбестовые и хлопковые волокна) значительно увеличивают механическую прочность пластмасс. Неорганические наполнители (кварцевый и слюдяной порошки, стеклянное волокно) повышают коэффициент теплопроводности пластмасс и увеличивают их нагревостойкость. В пластмассах содержится до 40—60 % наполнителей.

Пластификаторы — густые маслообразные синтетические жидкости, вводимые в пластмассы для понижения их хрупкости и повышения холодостойкости.

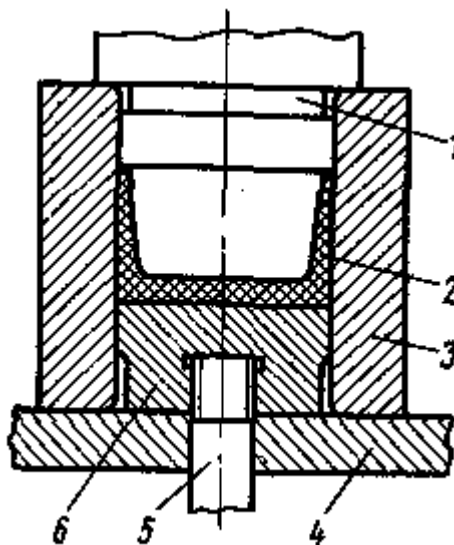
Стабилизаторы — вещества, вводимые в пластмассы для повышения их стойкости к свету и нагреву.

Смазывающие вещества (стеарин, олеиновая кислота) вводят в пластмассы для лучшего от деления отпрессованных изделий от поверхностей стальных пресс-форм.

Отвердители — вещества, вводимые в некоторые пластмассы для ускорения их отвердевания. Основой процесса отвердевания являются реакции полимеризации и поликонденсации.

Рис. 17. Пресс-форма (разрез):

1 — пуансон, 2 — прессуемое изделие, 3 — матрица, 4 — плита, 5 — шток выталкивателя, 6 — выталкиватель



Красители- вещества, придающие пластмассовым изделиям равномерную окраску. Красители вводят как для придания пластмассовым изделиям декоративного вида, так и для повышения их стойкости к свету.

Порообразователи- вещества, которые при нагревании выделяют большое количество газов создающих пор структуру пластмассовых изделий.

Выбирая состав и количество компонентов пластмассы можно получить изделия с теми или иными механическими тепловыми и диэлектрическими свойствами.

Исходными материалами, из которых изготавливают пластмассовые изделия являются прессовочные порошки (пресс-порошки), состоящие из связующего наполнителей и других компонентов, входящих в состав пластмассы. Основной

характеристикой пресс-порошков является текучесть, т. е. их способность растекаться под давлением в стальной пресс-форме, чем больше текучесть пресс-порошка, тем более сложной формы можно получить пластмассовое изделие, чем меньше текучесть пресс-порошка, тем больше должно быть удельное давление при прессовании пластмассовых изделий.

Прессуют пластмассовые изделия в стальных пресс-формах (рис. 17) Пресс-формы для изделий малых габаритов имеют несколько гнезд. Это позволяет за одно прессование получить сразу несколько изделий. Дозировка и засыпка порошка в пресс-форму осуществляются автоматически. Иногда для удобства прессования из пресс-порошка вначале изготавливают заготовки — круглые таблетки, прессуемые при относительно небольших давлениях. Затем их подогревают и закладывают в стальные пресс-формы, в которых окончательно оформляют изделие прессованием.

Большинство пластмассовых изделий электроизоляционного назначения получают горячим прессованием в нагретых до 120—200 °С пресс-формах в зависимости от состава пресс-порошка. Некоторые пластмассовые изделия изготавливают холодным прессованием — при температуре порошка и пресс-формы 20 °С. Для обеспечения высокого уровня электроизоляционных и механических свойств изделия холодного прессования затем подвергают тепловой обработке — нагреванию в течение нескольких часов.

Минимальная толщина стенок пластмассовых изделий горячего прессования 1,5 мм, а холодного — 4–5 мм. Плотность пластмасс 900—2800 кг/м³. Нагревостойкость пластмасс широкого применения (фенопласты, аминопласты) 105—120 °С. Наиболее высокой нагревостойкостью (180—220 °С) обладают пластмассы на основе кремнийорганических связующих веществ и минеральных наполнителей (молотый кварц, стеклянное волокно). Пластмассы на основе кремнийорганических и эпоксидных связующих веществ отличаются стойкостью к грибковой плесени и влагостойкостью.

По сравнению с чистыми полимерами (полиэтилен, поливинилхлорид и др.) пластмассы на их основе обладают несколько по электроизоляционными свойствами. Это вызвано введением в полимеры красителей наполнителей и других веществ для повышения механической прочности и нагревостойкости пластмасс. Электрические Характеристики пластмасс следующие: $\rho_v = 10^8 \div 10^{13}$ Ом* м; $\epsilon_r = 5 \div 8$; $\operatorname{tg} \delta = 0,002 \div 0,08$; $E_{пр} = 5 \div 20$ МВ/м. Лучшими характеристиками обладают пластмассы на основе кремнийорганических связующих.

Слоистые пластики

Слоистые пластмассы — это материалы, состоящие из чередующихся слоев листового наполнителя (бумага, хлопчатобумажная или стеклянная ткань) и связующего вещества. Наиболее широко среди слоистых пластмасс применяются гетинакс, текстолит и стекло текстолит.

Гетинакс — листовой, слоистый материал, в котором наполнителем являются листы пропитанной бумаги толщиной 0,10—0,12 мм. Процесс производства гетинакса заключается в пропитке бумаги бакелитовыми лаками и последующей резке ее на листы определенных размеров.

Листы пропитанной лаком бумаги после сушки собирают в пакеты определенной массы соответственно толщине прессуемого изделия. Собранные пакеты прессуют между нагретыми (до 160 °С) стальными плитами гидравлических прессов. При горячем прессовании расплавленная смола склеивает пропитанные листы бумаги и переходит в неплавкое состояние давление прессования 5—9 МПа; время выдержки от 2 до 5 мин на 1 мм толщины прессуемого листа. По окончании процесса прессования полученные доски и

листы охлаждают. Края вынутых из пресса листов и досок гетинакса обрезают пилой. Ширина листов 450—930 мм; длина 700—2480 мм.

Гетинакс в виде листов и досок толщиной от 0,2 до 50 мм марок I, II, ЛГ и V предназначен для работы в электрооборудовании промышленной частоты (50 Гц), а гетинакс марок VI и VII—для работы на высокой частоте, Гетинакс марки ЛГ изготавливается на основе лавсановой бумаги и эпоксидной смолы.

Гетинакс марок V и ЛГ отличается повышенной электрической прочностью, а гетинакс марок I, II и III обладает повышенной механической прочностью.

Гетинакс используют для изготовления различного рода плоских электроизоляционных деталей и оснований. Следует учитывать, что дугостойкость гетинакса невысока и после нескольких искровых разрядов на его поверхности остается науглероженный след, обладающий большей проводимостью. Гетинакс легко поддается механической обработке — режется, пилится, сверлится, а тонколистовые его сорта хорошо штампуются в подогретом состоянии. Гетинакс можно применять при температуре не выше 120 °С (класс нагревостойкости E); его холодостойкость —65 °С. Гетинакс марок I, II и V может работать в маслonaполненных электрических аппаратах.

Текстолит отличается от гетинакса тем, что наполнителем в нем является хлопчатобумажная ткань. Производство текстолита существенно не отличается от производства гетинакса. Текстолит марок А, б и Г выпускается на основе бязи и миткаля и марки ВЧ (для высоких частот) — на основе шифона.

Электрические характеристики текстолита по сравнению с гетинаксом несколько ниже, однако, он имеет более высокое сопротивление раскалыванию (вдоль слоев) и ударную вязкость, достигающую до 12—18 кДж/м. Кроме того, он легче поддается механической обработке, но значительно дороже гетинакса. Текстолит выпускается в листах толщиной от 0,5 до 50 мм и 0,5—8 мм (марка ВЧ). Ширина листов 450—980 мм и длина 600—1480 мм. Нагревостойкость текстолита 105 °С, холодостойкость —65 °С.

Следует отметить, что текстолит марки ЛТ, изготавливаемый на основе лавсановой ткани и эпоксифенолоформальдегидной смолы обладает высокой влагостойкостью и хорошо штампуются без подогрева (при 20 °С). Текстолиты марок А и Г могут быть использованы в маслonaполненных аппаратах.

Текстолит обладает низкой дугостойкостью, так как его связующее — бакелитовая смола — под действием электрических искр легко науглероживается.

Стеклотекстолит отличается от текстолита тем, что наполнителем в нем является электроизоляционная бесщелочная стеклянная ткань. Он обладает повышенной влагостойкостью и нагревостойкостью и лучшими электрическими и механическими характеристиками, чем текстолит и гетинакс, но хуже обрабатывается. Стекло текстолит изготавливают нескольких марок: СТ — на основе бесщелочных тканей со связующим — феноло-формальдегидной смолой СТЭД и СТЭФ — на эпоксидной смоле СТК и СТБК —, на кремнийорганическом связующем.

Стеклотекстолит выпускается толщиной от 0,5 до 50 мм в листах шириной 450—980 мм и длиной 600—1480 мм. Кроме того, выпускается листовой стеклотекстолит других марок, а также гибкий рулонный толщиной от 0,2 до 0,8 мм. Диапазон рабочих температур стеклотекстолитов на фенолоформальдегидных (бакелитовых) смолах от -65 до 130 °С (марки СТ, СТ-1 и др.), и эпоксидных — от 65 — До 155 °С (марки СТЭД, СТЭФ), на кремнийорганических — от —65 до 180 °С (Марки СТК и СТБК).

Основные характеристики некоторых слоистых изоляционных пластмасс приведены в табл. 9.

Кроме описанных слоистых пластмасс в виде листов и рулонов выпускаются также слоистые намотанные электроизоляционные изделия в виде цилиндров, трубок, прессованных стержней и различных фасонных деталей, для изготовления этих изделий применяют бумагу, покрытую с одной стороны клеящим лаком, а также лакированные хлопчатобумажные и стеклянные ткани.

Намотанные изделия изготавливают в виде цилиндров и трубок намоткой лакированной бумаги или ткани на стальную оправку, диаметр которой соответствует внутреннему диаметру будущего изделия. Оправка лежит на двух нагреваемых валках и прижимается сверху третьим, нагретым прижимным валком. Смола, находящаяся в лаковом слое бумаги или ткани, плавится на нагретой стальной оправке и склеивает листы между собой. Толщина изделий контролируется автоматическими приспособлениями.

Такие цилиндры и трубки называют бумажно-бакелитизированными изделиями и выпускают диаметром от 6 до 1200 мм при толщине стенки от 1,5 до 10 мм и более. После намотки их подвергают тепловой обработке (выпекают) при температуре 130—200 °С в зависимости от состава связующего. Так как давление при намотке меньше давления, применяемого при запрессовке листовых материалов (гетинакс и др.), то цилиндры и трубки получаются менее плотными. Вытченные цилиндры и трубки освобождают от оправок, обрезают с торцов, лакируя места обреза, и повторно запекают изделия. Основная область применения цилиндров и трубок — внутренняя изоляция в трансформаторах и электрических аппаратах.

Механические и электрические характеристики намотанных изделий несколько ниже, чем прессованных пластмасс (гетинакса, текстолита и стеклотекстолита), а интервал рабочих температур (при работе на воздухе) зависит от связующего и наполнителей: бумажно-бакелитовых трубок и цилиндров от —65 до 105 °С; стеклоэпоксиднофенольных от —65 до 155 °С; стеклокремнийорганических от —65 до 180, при использовании в трансформаторном масле при температурах не выше 95 °С.

Все слоистые изоляционные пластмассы обладают значительным водопоглощением: от 2 до 8 % (за 24 ч). Поэтому для придания этим материалам после механической обработки водостойкость вскрытые. Режущим инструментом поверх следует покрывать соответствующим лаком (бакелитовым, эпоксидным и др.) с последующей запечкой при оптимальной температуре.

Пленочные электроизоляционные материалы

Пленочными считаются материалы, у которых толщина значительно меньше длины. Пленки представляют собой ценный диэлектрический материал благодаря повышенной электрической прочности, достаточной механической прочности и малой толщине. Во многих случаях существенное значение имеет высокая влагостойкость.

Неполярные пленки. К основным не полярным пленкам относятся: полистирольная, полиэтиленовая, полипропиленовая, политетрафторэтиленовая.

Полистирольная пленка (ПС) упаковочная выпускается толщиной 0,03 мм и шириной 20...100 мм.

Применяют для изготовления высококачественных конденсаторов и кабелей.

Полиэтиленовую пленку (ПЭ) ориентированную толщиной 0,03...0,2 мм получают выдавливанием с одновременным растягиванием сжатым воздухом.

Полипропиленовая пленка (ПП) выпускается толщиной до 5 мкм, ориентированна в двух направлениях.

Применяют для изготовления высоковольтных конденсаторов в качестве комбинированной бумажной-пленочной изоляции.

Политетрафторэтиленовую пленку (ПТФЭ) или пленку из фторопласта-4 толщиной 0,005...0,2мм получают снятием с заготовки стружки-ленты на токарном станке.

Полярные пленки. Из полярных синтетических электроизоляционных пленок чаще всего применяют полиэтилентерефталатную (лавсановую), поливинилхлоридную, винипластовую, полиамидную, поликарбонатную, пленки из эфиров целлюлозы.

Полиэтилентерефталатная (лавсановая) пленка нашла широкое применение в электротехнике и радиопромышленности благодаря высокой прочности на разрыв и надав, хорошим электрическим свойствам, химической стойкости, устойчивости к действию органических растворителей, повышенной нагревостойкости, влагостойкости.

Применяют для изготовления конденсаторов и кабелей, а также изоляции обмоток низковольтных электрических приборов.

Поливинилхлоридную пленку (ПВХ) получают обычно из хлорированного поливинилхлорида. Она обладает невысокими электрическими свойствами и низкой нагревостойкостью, что ограничивает ее применение.

Винипластовая пленка выпускается толщиной 0,02...1,0мм.

Применяют как влагостойкий и химически стойкий материал для изоляции водопогруженных электродвигателей.

Полиамидную пленку (ПАМ) выпускают толщиной 0,05...0,12мм и шириной 1200...1300м. Применяют как бензо- и маслостойкий герметизирующий материал в основном в кабельной технике для изоляции проводов с наружным покрытием из поливинилхлорида или полиэтилена.

Поликарбонатная пленка (ПК) применяется преимущественно при изготовлении конденсаторов низкого напряжения, а также для высоковольтной изоляции.

Пленка из эфиров целлюлозы является наиболее ранним типом полимерных изоляционных пленок. Ее применяют для изготовления малогабаритных намоточных конденсаторов низкого напряжения.

Электроизоляционные материалы на основе каучуков

Полимеры, которые при нормальной температуре подвержены большим обратным деформациям растяжения, называются эластомерами. Эластомерами являются все каучуки и резины.

Каучуки бывают натуральные и искусственные (синтетические).

Синтетические каучуки подразделяют на каучуки общего назначения (универсальные) и специального назначения (теплостойкие, морозостойкие, маслостойкие, кислотоупорные и др.).

Бутадиеновый каучук (СКБ) получают полимеризацией бутадиена в присутствии катализатора. Он является каучуком общего назначения.

Применяют для изготовления эбонитовых изделий и оболочек кабелей.

Бутадиенстирольный каучук (СКС) получают эмульсионной полимеризацией стирола и бутадиена при температуре 50⁰С

Бутилкаучук получают при совместной полимеризации изобутилена и изопрена. Применяют для изготовления электроизоляционных резин.

Изопреновый каучук (СКИ) получают полимеризацией изопрена в присутствии катализатора. Является заменителем натурального каучука и относится к группе каучуков общего назначения.

Полихлоропреновый каучук применяют для защитных оболочек кабелей, которые по влагостойкости не уступают свинцовым. Получают на основе кремнийорганических соединений.

Для устранения недостатков каучук подвергают вулканизации, которая состоит в нагревании каучука предварительно введенными вулканизирующими веществами.

Резина. Технологический процесс получения резиновых изделий состоит из приготовления сырой резины, вулканизации резины.

Резине свойственны хорошая вибростойкость, высокая эластичность, повышенная химическая стойкость, достаточная механическая прочность, хорошие электроизоляционные характеристики, устойчивость к износу.

Применяется для проводов и кабелей, изготовления прокладок, шайб, изолирующих трубок, диэлектрических перчаток, электроизоляционных ковриков.

Пластмассы на основе каучука. К основным пластмассам на основе каучука относятся эбонит, эскапон, асбодин, хлоркаучук, изомеризованный каучук.

Эбонит – твердая резина, которую получают при вулканизации натурального каучука, синтетического бутадиенового каучука или синтетического бутадиенстирольного каучука, в который добавляют 25...30% серы и наполнители.

Эскапон получают полимеризацией синтетического бутадиенового каучука при повышенном давлении и температуре 250...270⁰С в пресс-формах.

Асбодин представляет собой композицию на основе каучука, асбестового волокна и железного сурика с вулканизирующими добавками.

Применяют в качестве низковольтного изоляционного материала.

Хлоркаучук получают при хлорировании каучука.

Изомеризованный каучук получают при обработке каучука в присутствии кислого катализатора – серной кислоты.

Лекция 5

Электроизоляционные лаки и эмали, компаунды; волокнистые электроизоляционные материалы.

Лаки. Лаки – это коллоидные растворы пленкообразующих веществ соответствующих летучих растворителях.

Основными составляющими лака являются:

пленкообразующие вещества, способные давать пленку (растворительные высыхающие масла, смолы, битумы, эфиры целлюлозы, полиэфирные и кремнийорганические соединения.);

растворители (бензол, толуол, спирт, сероуглерод, ацетон и др.);

пластификаторы – вещества, придающие пленке пластичность (касторовое масло);

сиккативы – вещества, которые вводятся для ускорения высыхания лака;

красители;

разжижжители, добавляемые в лак для получения консистенции в соответствии с требованием технических условий (лаковый керосин, бензин, скипидар).

Лаки *холодной сушки* хорошо высыхают при комнатной температуре 20...25⁰С.

Лаки приобретают оптимальные свойства при температуре сушки выше 70⁰С. Они, как правило, обладают более высокими электрическими и механическими свойствами.

По назначению электроизоляционные лаки делят на пропиточные, покрывные, клеящие.

Пропиточные лаки служат для пропитки пористой и волокнистой изоляции.

Изготавливают пропиточные лаки холодного и горячего отверждения.

Пропиточные лаки должны иметь необходимые изоляционные свойства, хорошую пропитывающую и цементирующую способность, быстро отвердевать и нормально функционировать в диапазоне рабочих температур.

К пропиточным лакам относят кремнийорганические, битумно-масляные, масляно-алкидные, и другие лаки.

Покрывные лаки служат для защиты изделий от воздействия атмосферной влаги и паров агрессивных веществ. К покрывным лакам относят следующие требования:

высокие электроизоляционные свойства;

высокая теплостойкость;

высокая радиационная стойкость;

не должны вызывать дополнительных механических напряжений вследствие разности коэффициентов линейного расширения и усадки при сушке и полимеризации;

высокие гидрофобность и плотность;

хорошая адгезия к покрываемым поверхностям;

процесс нанесения защитного покрытия не должен влиять на электрические характеристики прибора и ухудшать его надежность;

должны улучшать внешний вид и препятствовать загрязнению поверхностей.

К покрывным лакам относят кремний органические лаки, лаки на поливинилацетатной основе, лаки на полиуретановой основе, масляные лаки, полиамидный и полиимидный лаки, целлюлозные лаки.

Эмали. Эмали представляют собой разновидность покрывных лаков, в состав которых вводится неорганический наполнитель – пигмент.

Пигмент повышает твердость, теплопроводность, влагостойкость покрытий и придают им соответствующий цвет. В качестве наполнителя используют железный сурик, оксиды цинка, титана и др.

Эмали используют в основном в качестве защитных покрытий поверхностей защитных деталей и элементов радиоэлектроники и для декоративной отделки корпусов электрорадиотехнических приборов.

Лакокрасочные покрытия. Нанесение жидких лаков, компаундов и эмалей с последующим их отверждением являются одним из первых методов защиты поверхности и относится к наиболее простым и широко распространенным способом защиты при сборке изделий электронной техники.

Технологический процесс получения лакокрасочных покрытий состоит из следующих операций: подготовка поверхности под покрытие, грунтовка, шпаклевка, нанесение основного слоя краски или лака, сушка.

Клеящие лаки применяют для склеивания между собой твердых материалов (фольгированных диэлектриков, листов пакетов трансформаторов, пластинок расщепленной слюды и др.).

К клеящим лакам относят полиуретановые и эпоксидные клеи, клеи на основе фенолформальдегидной смолы, карбонильный клей, глифталевый лак.

Компаунды

Компаунды представляют собой механические смеси из электроизоляционных материалов, не содержащие растворителей.

По сравнению с лаками компаунды обеспечивают лучшую влагостойкость и влагонепроницаемость.

В исходном состоянии компаунды могут быть жидкими и твердыми.

В жидкие компаунды перед употреблением вводят отвердитель, в результате чего они постепенно отвердевают, превращаясь в монолитный твердый диэлектрик.

Твердый компаунд предварительно нагревают при соответствующей температуре для получения массы с определенной вязкостью.

В зависимости от применяемых смол компаунды могут быть термопластичными или термоактивными

Термопластичные компаунды размягчаются при нагревании и отвердевают при охлаждении.

Термореактивные компаунды в исходном состоянии являются жидкостями.

По назначению компаунды разделяют на пропиточные и заливочные.

Пропиточные компаунды, как и аналогичные лаки, служат для пропитки пористых и волокнистых материалов.

Заливочные компаунды служат для заполнения сравнительно больших полостей и промежутков в различных деталях, а также для нанесения сравнительно толстых покрытий на детали, узлы и блоки.

Наибольшее распространение получили синтетические компаунды – эпоксидные, кремнийорганические, полиэфирные.

Эпоксидные компаунды представляют собой модификации эпоксидных смол с отвердителями, пластификаторами и наполнителями.

Применяются в качестве заливочных составов для изготовления трансформаторов, работающих в тяжелых условиях, блоков сопротивления, в производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем для герметизации кристаллов.

Кремнийорганические компаунды представляют собой вязкие жидкости. Которые после полимеризации превращаются в упругие твердые вещества.

Применяются для герметизации полупроводниковых приборов и интегральных схем методом трафаретного прессования и заливки в формы.

Полиэфирные компаунды изготавливают на основе ненасыщенных полиэфиров в сочетании со стиролом, метилметакрилатом и другими мономерами.

Применяют для герметизации оптоэлектронных приборов и интегральных схем.

Флюсы.

Флюсы являются вспомогательными материалами для получения качественной и надежной пайки.

Они должны:

- хорошо смачивать поверхности металла и улучшать растекаемость припоя;
- растворять и удалять окислы загрязнения с поверхности соединяемых деталей;
- защищать в процессе пайки поверхность металла и расплавленный припой от окисления, образуя жидкую или газообразную зону;
- снижать поверхностное напряжение расплавленного припоя для улучшения смачивания им основного металла;
- иметь рабочую температура на 50...100⁰С ниже температуры плавления припоя;
- не вызывать коррозию;
- не изменять своего состава при температуре пайки;
- легко удаляться с поверхности после пайки.

По действию на соединяемые поверхности флюсы делятся на активные (кислотные), бескислотные, активированные, антикоррозионные.

Активные (кислотные) флюсы интенсивно растворяют оксидные пленки на поверхностях соединяемых деталей, обеспечивающих хорошую адгезию и механическую прочность пайки.

Бескислотные флюсы – это канифоль и флюсы, приготовленные на ее основе с добавлением неактивных компонентов (спирта, глицерина).

Активированные флюсы готовят на основе канифоли с добавкой активаторов.

Антикоррозионные флюсы готовят на основе органических кислот, фосфорной кислоты с добавлением различных органических соединений и растворителей. Остатки этих флюсов не вызывают коррозии (например, флюс ВТС).

Бумаги и картоны

Сырьем для изготовления различных электроизоляционных бумаг и картонов является целлюлоза или клетчатка, получаемая химической переработкой древесины хвойных пород (сосна, ель). В состав древесины помимо клетчатки входят лигнин, смолистые и другие вещества, которые, оставаясь в целлюлозе, придают бумаге хрупкость

и снижают ее электроизоляционные свойства. Чем меньше этих примесей в бумагах, тем они прочнее, эластичнее и тем медленнее стареют. Поэтому при химической переработке древесины на целлюлозу, предназначенную для изготовления электроизоляционных бумаг, главной задачей является полное удаление лигнина, смол и других загрязняющих веществ.

Перед химической переработкой из древесины удаляют сучки и поврежденные гнилью места и дробят ее на щепу. Для превращения щепы в целлюлозу ее варят при 150 - 175⁰ С и давлении 0,7 – 0,9 МПа в кислотной или щелочной среде в закрытых котлах (автоклавах). Варку щепы проводят при кислотной варке, в котел вводят раствор бисульфита кальция $\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$ в сернистой кислоте H_2SO_3 , а при щелочной – смесь из едкого натра NaOH и сернистого натрия Na_2S . В результате кислотной варки древесины получают так называемую сульфитную целлюлозу, а в результате щелочной – сульфатную.

Для изготовления электроизоляционных бумаг и картонов используют преимущественно сульфатную целлюлозу, которая придает им лучшие электрические, механические и тепловые свойства.

Полученную после варки целлюлозу промывают водой, а затем подвергают мокрому размолу в специальных ваннах (ролах), снабженных вращающимся барабаном с ножами. Дно ванны имеет выступ в виде горки. Попадая между ножами барабана и острым выступом горки, очищенные варкой волокна разрубаются поперек на мелкие части и расщепляются вдоль на более тонкие волокна. В зависимости от зазора между ножами и выступом горки производится жирный или тощий помол. Для получения целлюлозы жирного помола устанавливают тупые ножи на большом расстоянии от выступа горки на дне ванны. В результате происходит лишь расщепление или расчес волокон на более тонкие, т.е. волокна механически не разрушаются и их капиллярные каналы остаются закрытыми. Для получения целлюлозы тощего помола устанавливают острые ножи ближе к горке. При этом волокна целлюлозы преимущественно рубятся поперёк, в результате чего обнажаются их внутренние каналы.

При жирном помоле волокна длинные и тонкие, поэтому изготовленная бумага обладает большей гибкостью и механической прочностью. Тощий же помол дает короткие толстые волокна, которые обуславливают рыхлость и малую механическую прочность бумаги, а также большую способность впитывать воду и другие жидкости.

Размолотую целлюлозу называют бумажной массой. Для изготовления бумаги массу подают на движущуюся металлическую сетку бумажной машины и прижимают металлическими вальцами. При этом вода отжимается и уходит через сетку, а масса формируется в полотно бумаги, которое затем переходит на суконную ленту. Здесь полотно бумаги сначала обминается холодными вальцами, потом проходит через систему нагретых чугунных валков, а затем обжимается системой холодных вальцов, после чего сматывается в рулон.

Влажность бумаг находится в пределах 5 - 9%.

С увеличением влажности электроизоляционные свойства и механическая прочность бумаги заметно ухудшаются. Важными характеристиками бумаги являются: плотность, разрушающее напряжение при растяжении и воздухопроницаемость.

Воздухопроницаемость – это объем воздуха (в миллилитрах), проходящих за одну минуту через образец бумаги площадью 10 см² при давлении $9 \cdot 10^3$ Па. Ясно, что наиболее плотные бумаги обладают меньшей воздухопроницаемостью, а следовательно, имеют капилляры и поры меньшего размера. Так, воздухопроницаемость конденсаторных бумаг 3 - 9 мл/мин, а кабельных бумаг 25 - 40 мл/мин.

Электроизоляционные бумаги делятся на кабельные, конденсаторные, пропиточные, намоточные, микалентные и крепированные.

Кабельная бумага является основной изоляцией кабелей высокого напряжения. После намотки жилу кабеля пропитывают электроизоляционным маслом. Так как при

намотке на жилы ленты бумаги подвергаются механическому натяжению, кабельная бумага должна обладать достаточно высокой механической прочностью при растяжении. Кроме того, в готовом кабеле в процессе его укладки намотанная бумага может подвергаться изгибам и поэтому должна обладать значительной прочностью на перегибы.

Для обеспечения высоких механических свойств кабельные бумаги вырабатывают из сульфатной целлюлозы преимущественно жирного помола, который, кроме этого, придает бумаге большую плотность и малую пористость. Пропитывающее жидкое вещество (масло или маслоканифольный состав) разбивается бумагой при пропитке на тонкие пленки и каналы, что повышает ее электрическую прочность. Электрическая прочность непропитанной кабельной бумаги 6 - 9 МВ/м, а пропитанной трансформаторным маслом 70 - 80 МВ/м.

Кабельные бумаги выпускаются для изоляции жил силовых кабелей на напряжения 35, 110 и 220 кВ, отличаются друг от друга количеством слоев, толщиной, объемной массой, воздухопроницаемостью и др. кабельные бумаги маркируемые буквами* К(К-0,80; К-120; К-140; К-170), выпускаются однослойными, а буквами КМ (КМ-120; КМ-170), КМП – 120 и КВМ (КВМ-0,80; КВМ-120; КВМ-170) – трех – и четырехслойными. Многослойные бумаги по сравнению с однослойными обладают большей гибкостью, эластичностью и имеют меньшую воздухопроницаемость, а следовательно, и большую электрическую прочность. Плотность кабельных бумаг 720-780 кг/м³.

Кроме того, выпускаются уплотненные стабилизированные кабельные бумаги, маркируемые буквами КВМСУ, толщиной от 0,080 до 0,120 мм (КВМСУ - 0,80 и КВМСУ - 120). Уплотненные бумаги отличаются большой плотностью – 110 кг/м³, малыми отклонениями по толщине и меньшей воздухопроницаемостью, что обеспечивает их высокие механические и электрические характеристики. Многослойные и уплотненные кабельные бумаги применяют для изоляции жил кабелей напряжения от 110 кВ и выше.

Кабельные бумаги являются гигроскопичными материалами и легко увлажняются во влажном воздухе, поэтому все операции по наложению бумажной изоляции следует производить в строго кондиционированных условиях окружающей среды. Перед пропиткой жидкими диэлектрическими жидкостями бумажную изоляцию кабелей подвергают длительной сушке. Влажность бумаг 4 - 8%.

Конденсаторную бумагу, пропитанную жидким диэлектриком, применяют в бумажных конденсаторах и изготавливают из наиболее чистой сульфатной целлюлозы жирного помола. Это самые тонкие бумаги (толщиной от 0,004 до 0,030 мм), однородные по толщине, плотностью 950 - 1350 кг/м³. Воздухопроницаемость их невелика (3 - 9 мл/мин), что указывает на сравнительно высокую электрическую прочность, которая колеблется от 19 до 50 МВ/м соответственно их толщине*.

После пропитки нефтяным конденсаторным маслом электрическая прочность конденсаторных бумаг повышается до 250 – 300 МВ/м. конденсаторные бумаги содержат минимальное количество токопроводящих частиц (неметаллических и др.), что обеспечивает высокий уровень электрических характеристик предел прочности при растяжении конденсаторных бумаг достигает $\delta_p = 10$ МПа. Конденсаторные бумаги выпускаются шириной от 12 до 490 мм, намотанными на бобины.

Пропиточная бумага предназначена для изготовления слоистой электроизоляционной пластмассы – гетинакса, вырабатывается из сульфатной целлюлозы, имеет толщину 0,09; 0,11 и 0,13 мм, плотность 600-800 кг/м³ и $E_{пр} = 5$ МВ/м. поэтому воздухопроницаемость и впитываемость пропиточных бумаг выше, чем других, что необходимо для обеспечения хорошей пропитки при производстве гетинакса.

Намоточная бумага предназначена для изготовления электроизоляционных намоточных изделий (цилиндров и изоляционных трубок для трансформаторов и электрических аппаратов), вырабатывается из небеленой целлюлозы жирного помола, имеет плотность 730 кг/м³, толщину 0,05; 0,007; 0,085 и 0,10 мм и $E_{пр} = 7,5 \div 9,0$ МВ/м.

Бумага для изготовления электроизоляционных цилиндров должна быть покрыта с одной стороны электроизоляционным лаком.

Микалентная бумага предназначена для изготовления гибкой слюдяной ленты. Для этого на полотно микалентной бумаги наклеивают листочки слюды. Эта бумага должна обеспечивать гибкость микаленты, повышать ее механическую прочность на разрыв и одновременно быть тонкой, чтобы обладать большой пористостью. Не снижать электрических характеристик микаленты, а также для хорошей и быстрой пропитки лаками.

Изготавливают микалентную бумагу из длинноволокнистого хлопка с волокнами, ориентированными преимущественно в направлении длины полотна бумаги, что обеспечивает ее большую механическую прочность: в направлении вдоль полотна бумаги 75 МПа, а поперёк 9 МПа. Микалентную бумагу толщиной 18 - 20 мкм (0,018 - 0,020 мм) выпускают в рулонах шириной 450 и 900 мм.

Крепированная бумага предназначена для изолирования отводов и мест соединений обмоток трансформаторов и других маслonaполненных электрических аппаратов. Эта бумага имеет на поверхности креп (гофрировку), нанесенный перпендикулярно направлению её полотна. Благодаря этому крепированная бумага обладает гибкостью и хорошо растягивается в продольном направлении (удлинение 60%), что позволяет надежно изолировать отводы обмоток и сильно изогнутые соединительные провода, например, в трансформаторах.

Крепированную бумагу изготавливают из небеленой сульфатной целлюлозы толщенной 0,17 мм (без крeпа) и 0,5 мм (с крeпом), плотностью 230 кг/м³ и выпускают в рулонах шириной 1000 мм.

Применение крепированной электроизоляционной бумаги в замен дорогостоящих маслостойких лакотканей дает большой экономический эффект без снижения электрической прочности. Изоляции выводов маслonaполненных аппаратов.

Электроизоляционные картоны имеют большую толщину (от 0,1 до 8,0 мм), чем бумаги. Сырьём их изготовления является масса из сульфатной целлюлозы или её смеси с хлопковым волокном (что обеспечивает повышенные механические и электроизоляционные свойства картона). Процесс производства картонов аналогичен процессу производству бумаг, но применяется несколько другое оборудование и вводятся дополнительные технологические операции по оформлению и окончательной отделки полотна картона. Картоны толщенной от 0,1 до 0,5 мм выпускают в рулонах шириной до 1015 мм, 1 мм и больше в листах разных размеров – до 3х4 м.

Так называемые «воздушные» картоны, предназначены для работы на воздухе, изготавливаемые из смеси целлюлозы и хлопкового волокна, проходят дополнительную обработку стальными вальцами для уплотнения и полировки. В некоторые картоны вводят клеящие вещества на основе канифоли и крахмала для уменьшения гигроскопичности и получения более плотной структуры.

Так называемые «масляные» картоны, применяемые в маслonaполненных аппаратах, трансформаторах и др., изготавливаемые из смеси сульфатной целлюлозы и хлопкового волокна без дополнительной обработки на вальцах, имеют несколько рыхлую структуру и поэтому хорошо пропитываются маслом.

Картоны для работы на воздухе выпускают толщенной от 0,1 до 3,0 мм в листах и рулонах шириной 1050 мм. Плотность этих картонов 950 - 1250 кг/м³; разрушающее напряжение при растяжении $\delta_p = 83 \div 127$ МПа*; электрическая прочность в зависимости от толщины от 8 до 13 МВ/м. воздушные картоны применяют для пазовой и межвитковой изоляции в электрических машинах низкого напряжения.

Картоны для работы в масле выпускают толщиной от 0,5 до 3 мм. Их плотность 880-1200 кг/м³, разрушающее напряжение при растяжении $\delta_p = 39 \div 50$ МПа (в поперечном направлении), электрическая прочность в зависимости от толщины в пропитанном виде 20-60 МВ/м.

Картон является гигроскопичным материалом и при нормальных атмосферных условиях содержит 6-8% мас. влаги. С повышением влажности окружающего воздуха влажность картона возрастает, а электрические характеристики снижаются.

Картон, как и бумага, является анизотропным материалом: большая часть его волокон расположена вдоль листа. Поэтому его механические и электрические характеристики (параметры) вдоль листа заметно выше, чем поперёк листа.

Фибра – электроизоляционный и конструкционный материал, получаемый на основе целлюлозы. Фибру изготавливают из непроклеенной бумаги, имеющей в своем составе хлопковое волокно и древесную целлюлозу (по 50%). Бумагу пропускают через ванну с нагретом (до 50⁰С) раствором хлористого цинка, а затем наматывают на стальной барабан до определенной толщины. При обработке бумаги раствором хлористого цинка на её поверхности образуется клейкое вещество, а при намотке на барабан листы бумаги склеиваются друг с другом, образуя плотный материал – фибру, который разрезают на листы и прессуют. Непрореагировавший хлористый цинк удаляют пропусканием фибровых изделий (листы, стержни)

через чаны с растворами хлористого цинка постепенно уменьшающейся концентрации. Окончательно промывают фибру водой.

Плотность фибры $\approx 1150 \text{ кг/м}^3$, разрушающее напряжение при растяжении $\delta_p = 7,0 \div 7,5 \text{ МПа}$ в продольном направлении $\rho_v = 4,5 \text{ МПа}$ в поперечном. Фибра – гигроскопичный материал. При температуре 180 ⁰С и выше она обугливается.

Из фибры изготавливают листы толщиной от 0,6 до 20 мм и более, а также стержни и трубки. Фибра легко поддается механической обработке: пилится, сверлится, строгается и нарезается. Листовая фибра штампуются, а при размачивании водой из неё можно формовать изделия сложного профиля. Недостатки фибры гигроскопичность и набухание во влажной среде. После сушки фибра дает усадку, что затрудняет изготовление из неё точных деталей. Электрические характеристики фибры невелики:

$$\rho_v = 10^6 \div 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{м}; \quad E_{пр} = 5,0 \div 7,0 \text{ МВ/м (при толщине 1-2 мм)}.$$

Фибру марки ФЭ (электротехническая) используют в качестве электроизоляционного материала в электрооборудовании низкого напряжения, например в качестве пазовых клиньев и прокладок в электрических машинах невлагостойкого использования. Фибру применяют также для изготовления разрядников высокого напряжения, в которых стенки фибрового цилиндра под действием электрической дуги интенсивно выделяют газы. В результате возрастающего давления газов внутри трубчатого разрядника дуга прекращает свое горение.

Лекция 6

Твердые неорганические диэлектрики.

Стекла

Стекла – твёрдые неорганические аморфные вещества, представляющие собой сложные системы различных оксидов, атомы которых не могут свободно перемещаться друг относительно друга. Иногда такое состояние вещества называется *стекловидным*.

По положению в структуре стекла и по роли в процессе стеклообразования оксиды делят на оксиды-стеклообразователи, оксиды-модификаторы, промежуточные оксиды.

Оксиды-стеклообразователи способны образовывать стекло в чистом виде. К таким оксидам относятся SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 , GeO_2 и др. По названию стеклообразующих оксидов иногда именуют и сами стекла. Например, стекла на основе оксида SiO_2 называют силикатными.

При варке стекла стеклообразующие оксиды способствуют развитию процессов конденсации, а остальные окислы присоединяются к молекулярным цепочкам и образуют с ними набор элементарных ячеек, придавая изделию определенные физико-механические свойства.

Оксиды-модификаторы вводят в состав стекол по технологическим причинам, например для повышения вязкости, улучшения обрабатываемости, снижения температуры варки и др. К ним относятся щелочные оксиды Na_2O , K_2O , щелочно-земельные оксиды CaO , BaO .

Промежуточные оксиды не образуют стёкол, но могут придавать им различные свойства. Например, некоторые добавки придают стёклам определённую окраску: CoO – синюю, UO_2 жёлтую, Cr_2O_3 – зелёную, что используется при получении цветных стёкол и глазурей. Благодаря содержанию примеси оксидов железа большинство технических стёкол сильно поглощают ультрафиолетовые лучи.

Как и другие аморфные материалы, стекла не имеют резко выраженной температуры плавления. При нагревании вязкость стекла уменьшается и оно постепенно переходит в жидкое состояние. Этот переход происходит в некотором температурном интервале $t_1 \dots t_2$: t_1 – температура, при которой стекло теряет или приобретает свойство хрупкости; t_2 – температура, при которой можно вытягивать нити. Чем больше интервал, тем ниже диэлектрические свойства стекла.

Стекло получается при быстром охлаждении расплавленной смеси оксидов (стекломассы). В этом случае молекулы не успевают образовывать кристаллическую решётку и остаются закреплёнными в случайных положениях в момент повышения вязкости.

Размягчённое в процессе нагревания стекло обрабатывается выдуванием, вытяжкой, прессовкой, литьём. Нагретые до достаточно высокой температуры стеклянные детали могут привариваться друг к другу, а также к деталям из других материалов.

Изделия из стекла подвергаются отжигу для устранения механических напряжений, которые возникают при быстром и неравномерном его остывании. В процессе отжига изделие нагревают до определённой температуры, а затем медленно охлаждают. Свойства стёкол меняются в широких пределах в зависимости от их состава и режима тепловой обработки.

К основным параметрам, характеризующим стекла, относят плотность, механическую прочность, твёрдость, электрические и тепловые свойства, химическую стойкость.

П л о т н о с т ь стёкол колеблется от 2 до 8 г/см³. Плотность обычных силикатных стёкол близка к 2,5 г/см³. Плотность наиболее тяжёлых свинцовых стёкол, содержащих до 80 % оксида свинца PbO , примерно равна плотности железа (примерно 8 г/см³). Кварцевое стекло, состоящее только из окиси кремния SiO_2 , имеет наибольшую плотность (2,3 г/см³).

Механические свойства стёкол определяются пределом прочности при растяжении и сжатии. Предел прочности стекла при растяжении не превышает $83 \cdot 10^6$ Н/м² и увеличивается при повышении содержания в нём кремнезёма SiO_2 и оксида кальция CaO . Щелочные оксиды снижают прочность стекла. Гораздо лучше стекло противостоит сжатию, предел прочности обычного стекла при сжатии равен $90 \cdot 10^7$ Н/м², т.е. более чем в 10 раз больше предела прочности при растяжении. Правильный отжиг повышает прочность стекла на растяжение и сжатие. Прочностные особенности стекла при растяжении и сжатии учитывают при конструировании металlostеклянных спаев.

Твёрдость стекла – это его способность сопротивляться царапанию. Стекло обладает значительной твёрдостью, но плохо переносит ударные нагрузки. Наибольшую твёрдость имеют боросиликатные стёкла, содержащие примерно 15% борного ангидрида B_2O_3 , а самые мягкие – свинцовые стёкла. Твёрдость стекла имеет большое значение при его резании, шлифовке, сверлении и других видах механической обработки.

Стекло относится к очень хрупким материалам. Наименьшей хрупкостью обладают боросиликатные стёкла.

Электрические свойства стёкол зависят от их химического состава и термообработки. При нормальной температуре удельное электрическое сопротивление стёкол изменяется от 10^6 до 10^{15} Ом*м, но у некоторых стёкол может составлять 10^3 Ом*м. Большое содержание оксидов щелочных металлов в составе стекломассы существенно снижает объёмное сопротивление стеклянных деталей. При температуре 200°C оно уменьшается в 10^4 раз по сравнению с удельным электрическим сопротивлением при нормальной температуре. Введение оксидов двухвалентных металлов снижает электропроводность стекла на несколько порядков, и она менее интенсивно изменяется с температурой.

Диэлектрическая проницаемость стёкол ϵ зависит от их состава и температуры. В области температур $20 \dots 60^\circ\text{C}$ её изменение незначительно, а, начиная с температуры 110°C у щелочных стёкол резко возрастает проницаемость. Наименьшую диэлектрическую проницаемость ϵ имеет чистое кварцевое стекло ($\epsilon = 3,7$). Наиболее высокие потери наблюдаются у щелочных стёкол. Содержание щелочных оксидов (Na_2O в большей степени, чем K_2O) повышает диэлектрическую проницаемость силикатных стёкол.

Из тепловых свойств стёкол наибольшее значение имеют температура размягчения $T_{\text{раз}}$, температурный коэффициент линейного расширения TKI , коэффициент термического расширения КТР .

За температуру размягчения стекла принимают температуру, при которой вязкость его составляет $10^7 \dots 10^8$ Па*с. Температуры размягчения большинства стёкол от 350 до 1700°C (при температуре около 1700°C размягчается кварцевое стекло, содержащее 100% SiO_2).

Стекло является плохим проводником тепла. Теплопроводность его изменяется с изменением температуры. При повышении температуры теплопроводность стекла повышается и при температуре размягчения увеличивается примерно в 2 раза по сравнению с теплопроводностью, которой обладает стекло при комнатной температуре.

Температурный коэффициент линейного расширения стёкол TKI изменяется от $5,5 \cdot 10^{-7}$ до $150 \cdot 10^{-7} \text{K}^{-1}$. Этот коэффициент стекла важен для оценки стойкости стёкол к термоударам: чем меньше TKI , тем больше стойкость стекла к термоударам. Значение TKI стёкол учитывают при их соединении с другими материалами. TKI стекла и соединяемых с ним материалов должны быть приблизительно одинаковы.

Принадлежность стёкол к молибденовой или вольфрамовой группе объясняется близостью TKI этих стёкол к TKI молибдена и вольфрама, которые широко применяются в электровакуумных приборах. Коэффициент термического расширения КТР колеблется от $5 \cdot 10^{-8}$ до $8 \cdot 10^{-7} 1/^\circ\text{C}$. Наименьшим КТР обладает кварцевое стекло. Стёкла с небольшим КТР хорошо выдерживают резкие колебания температуры. При введении в стекло

щелочных оксидов его КТР значительно повышается. Увеличение содержания SiO_2 и B_2O_3 до 15% снижает КТР стекла. В электровакуумном и полупроводниковом производстве стекла классифицируют по ТКР.

К твердым или тугоплавким стеклам относят стекла, имеющие КТР не более $55 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Тугоплавкие стекла имеют боросиликатный или алюминиевый состав. Обладают высокими диэлектрическими свойствами, термостойкостью и температурой размягчения, а также механической прочностью.

К мягким или легкоплавким относятся стекла с КТР выше $60 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Легкоплавкие стекла имеют свинцовый, баритовый, магнезиальный состав и используются для изготовления колб, ножек и др.

В марках стекол (С52-1) буква С означает стекло, двузначное число его КТР, а последняя цифра – порядковый номер разработки данной марки стекла. Коэффициент термического расширения стекла ТКР обычно определяют методом двойной нити. В пламени газовой горелки изготавливают спай двух стекол – эталонного и испытываемого, а затем из спая вытягивают нить. При равенстве КТР эталона и образца нить после охлаждения остается прямой, а при разнице – изгибается.

Химическая стойкость стекла также зависит от его состава.

Стекло обладает сравнительно высокой химической стойкостью, но вода щелочи и кислоты постепенно разрушают его поверхность. С повышением температуры воды, щелочей и кислот процесс разрушения стекла усиливается. К действию органических растворителей стекло устойчиво. Стекло хорошо растворяется в плавиковой кислоте, поэтому при травлении полупроводниковых материалов в смеси плавиковой и азотной кислот нельзя использовать стеклянную посуду. По химической стойкости стекла разделяют на пять гидролитических классов.

По химическому составу технические силикатные стекла делят на три группы:

щелочные стекла без тяжелых оксидов или с незначительным их содержанием. К ним относят наиболее распространенные в быту стекла оконные, бутылочные;

щелочные стекла с большим содержанием тяжелых оксидов (BaO , PbO), которые применяют в качестве электроизоляторов;

бесщелочные стекла (кварцевое стекло), а также стекла с очень малым содержанием щелочных оксидов.

По применению в радиоэлектронике различают электровакуумные стекла, изоляторные стекла, стеклоэмали, стекловолокно и стекловоды.

Электровакуумные стекла применяют для изготовления баллонов газоразрядных и электронных ламп, оболочек рентгеновских ламп, кинескопов и др.

Изоляторные стекла используют для герметизации выводов некоторых типов конденсаторов, терморезисторов, для получения металlostеклянных спаев корпусов микросхем. Боросиликатные и алюмосиликатные стекла применяют для изготовления изоляционных подложек, на которые монтируют активные и пассивные элементы микросхем.

Стеклоэмали – это легкоплавкие стекла, которые наносятся на поверхности изделий с целью защиты от коррозии, электрической изоляции, а также для придания эстетичного внешнего вида. Измельченный порошок стекла наносят на поверхность изделия и обжигают. В результате плавления эмаль растрескивается по поверхности изделия и после охлаждения остается на ней в виде тонкого (0,1... 1,0 мм) сплошного стекловидного покрытия.

В качестве электроизоляционного материала стеклоэмали применяют для трубчатых резисторов. На наружную поверхность керамической трубки наносится проволоочная обмотка, которая покрывается слоем эмали. Эмаль создает изоляцию между отдельными витками, между оболочкой и окружающей средой, а также защищает ее от окисления, влаги и т.п.

Стекловолокно получают из расплава стекла, чаще из бесщелочного алюмоборосиликатного. Расплавленная стекломасса проходит через фильеры диаметром 1 мм. Выходящая из фильеры нить наматывается на барабан с большой скоростью (примерно 30 м/с) и в горячем виде вытягивается в тонкое волокно толщиной несколько микрометров. Стекловолокно отличается от органических волокон более высокой нагревостойкостью, повышенной механической прочностью, относительно малой гигроскопичностью, хорошими электроизоляционными свойствами.

Недостатками изоляции из стекловолокна являются относительно высокая хрупкость, низкая стойкость к истиранию и изгибу и малое значение относительного удлинения при разрыве (2...3%).

Из стеклянных нитей изготавливают световоды, изоляцию монтажных, обмоточных и микропроводов, стеклянные ткани, которые используют в производстве нагревостойких стеклолакотканей и стеклотекстолитов. Пресс-порошок из коротких стекловолокон и применяют как наполнитель для пластмасс.

Световоды представляют собой световедущее волокно, состоящее из световедущей жилы с высоким показателем преломления света и изоляционной оболочки с меньшим показателем преломления света. В видимой и ближней инфракрасной области спектра наибольшее распространение получили световодные волокна, изготовленные из оптического стекла. Световоды широко применяют для передачи различной информации в вычислительной технике телевидении, фототелеграфии и т.д. В менее ответственных случаях например для освещения, вместо стеклянных световодных волокон применяют более дешевые пластмассовые волокна из полиметилметакрилата, полистирола и других пластмасс.

Ситаллы

Ситаллы («ситалл» - сокращение от слов «силикат» и «кристалл») - продукт частичной кристаллизации стекломассы, в которую кроме обычных оксидов вводят тонкодисперсные примеси, служащие для образования центров кристаллизации. В различные марки ситаллов входят окислы: кремния - от 30 до 90%, титана - от 10 до 20%, бора - от 15 до 30%, алюминия - от 12 до 28%, магния - от 5 до 20%, калия - от 2 до 4%, лития - от 5 до 10%.

В качестве стимуляторов кристаллизации применяют оксид титана TiO_2 , серное железо FeS , фториды и фосфаты некоторых металлов и другие вещества. От стекол ситаллы отличаются несколько иным химическим составом и строением и занимают промежуточное место между обычными стеклами и керамикой. Они состоят из равномерно распределенных по всему объему мелких кристалликов, сросшихся друг с другом или соединенных тонкими прослойками остаточного стекла. Содержание кристаллической фазы в ситаллах достигает 95%, а размеры оптимально развитых кристалликов 0,01...2 мкм. В отличие от стекол ситаллы непрозрачны, но некоторые из них частично пропускают свет.

Технология изготовления ситаллов состоит из получения изделий из стекломассы специально подобранного состава традиционными способами и их последующей двухступенчатой термообработки. При температуре 500...700°C происходит образование центров кристаллизации, а при температуре 900...1100°C - развитие кристаллической фазы.

В процессе термообработки происходит усадка материала достигающая 2%. Полученные таким способом ситаллы называют термоситаллами.

Формирование кристаллического строения в ситаллах может производиться фотохимическим способом. Под влиянием облучения и последующей низкотемпературной обработки (процесса проявления) из оксидов, входящих в состав стекла, выделяются мельчайшие (коллоидные) частицы металлов (меди, золота серебра, алюминия и др.), которые являются стимуляторами кристаллизации. В процессе

проявления ранее бесцветный материал приобретает определенную окраску (от белого до коричневого цвета). Такие ситаллы получили название фотоситаллов.

Разработаны сегнето- и пьезоситаллы, которые используют в качестве активных диэлектриков.

В зависимости от химического состава исходного стекла и режима термообработки получают ситаллы, обладающие следующими свойствами: высокая механическая прочность, твердость, термическая и химическая стойкость, интервал рабочих температур от -50 до $+700^{\circ}\text{C}$, более высокие электроизоляционные свойства по сравнению со стеклами того же химического состава, невысокая стоимость изделий благодаря доступности сырья и простоты технологии изготовления, малые диэлектрические потери.

Эти свойства ситаллов позволяют применять их для различных приборов электронной техники, работающих в широком диапазоне частот и температур.

Основные характеристики ситаллов приведены в ниже.

Плотность D , кг/м ³	2300...3000
Температура размягчения $T_{\text{раз}}$, $^{\circ}\text{C}$	900...1300
Предел прочности, МПа:	
при изгибе $\sigma_{\text{изг}}$	120...200
при сжатии $\sigma_{\text{сж}}$	500...1200
Температурный коэффициент линейного расширения ТКЛ, K^{-1}	$(0,1...12) \cdot 10^{-6}$
Удельное электрическое сопротивление ρ , Ом*м.....	$10^{10}...10^{12}$
Диэлектрическая проницаемость ϵ	5...7
Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$	
при частоте 1 МГц	$(10...800) \cdot 10^{-4}$
Электрическая прочность $E_{\text{пр}}$, МВ/м.....	20...80

Керамика

Электрокерамические материалы представляют собой твердые камнеподобные вещества, которые можно обрабатывать только абразивами (карборунд и др.) и по значению делят на три группы: изоляторная, конденсаторная и сегнетоэлектрическая керамика. Все электрокерамические материалы негигроскопичны и атмосферостойки.

Электротехнический фарфор является одним из широко применяемых электрокерамических материалов и служит для изготовления различных конструкций изоляторов высокого и низкого напряжения (рис.19, а, б).

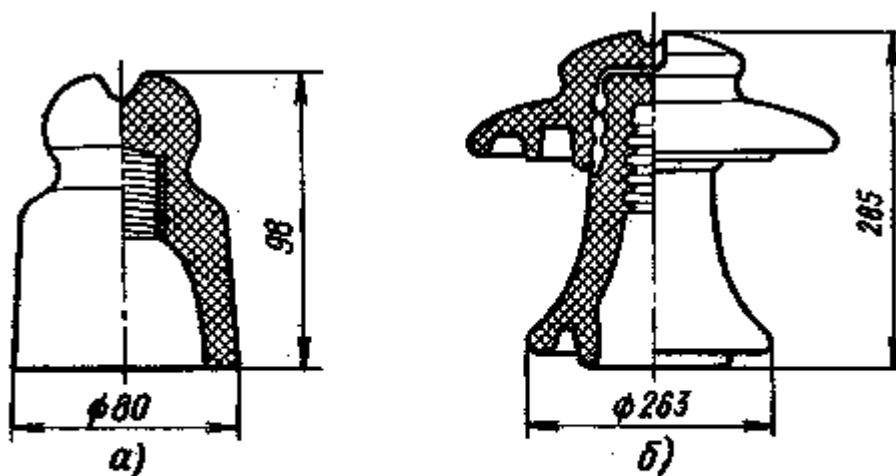


Рис. 19. Штыревые фарфоровые изоляторы:
а — низкого (220 В) напряжения, б — высокого (35 кВ) напряжения

Исходная электрофарфоровая масса состоит из 42—50 % глинистых веществ, 20—25 % кварца, 22—30 % калиевого полевого шпата и 5—8 % измельченных бракованных фарфоровых изделий. Для получения тестообразной массы в измельченные компоненты вводят 20—22 % воды. После этого тестообразную фарфоровую массу подвергают вакуумной обработке для удаления из нее воздушных включений.

Масса, получаемая на вакуум-прессе, представляет собой монолитный цилиндр, который по выходе из мундштука разрезается на куски заданной длины (заготовки), из которых формуют прессованием в гипсовых или стальных формах и другими методами различные типы изоляторов. Извлеченные из форм изоляторы поступают на токарные станки, где им придают окончательные очертания и размеры. Обточенные изоляторы, имеющие влажность 16—18 %, поступают в сушилки, где влажность снижается до 0,1—2 %. В связи с удалением воды происходит воздушная усадка — уменьшение объема изделий.

Высушенные фарфоровые изделия, покрывают жидкой глазурной суспензией (глазурью), состав которой отличается от состава жидкой фарфоровой массы большим содержанием стеклообразующих компонентов (кварца, полевого шпата, доломита и др.). В цветные глазури вводят красители — хромистый железняк, пиролюзит и др.

При обжиге электрофарфоровых изделий слой глазури плавится, создавая на их поверхности ровное стекловидное покрытие. Глазурь повышает механическую прочность изоляторов, делает их стойкими к влаге и атмосферным загрязнениям. Цветные глазури служат также для маркировки изоляторов.

Термическую обработку — обжиг изоляторов производят в туннельных печах непрерывного действия, которые и отличаются высокой производительностью. Высушенные и покрытые глазурной суспензией изоляторы, установленные на специальные вагонетки перемещаются в туннеле печи, последовательно проходят зоны подогрева, обжига и охлаждения с заданными температурами. При выходе из печи они представляют собой готовые электрокерамические изделия. При обжиге электрокерамических изделий пламя и газы не должны непосредственно действовать на них, поэтому изоляторы и другие изделия помещают в огнеупорные капсулы, которые представляют собой круглые коробки из огнеупорной керамической массы.

Полученные после обжига электрокерамические изделия подвергают механическим и электрическим испытаниям, отбраковывая дефектные изделия.

Если рассматривать структуру фарфора под микроскопом, то видно, что фарфор состоит из иглообразных кристаллов муллита $2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$, хаотически расположенных по отношению друг к другу. Промежутки между этими кристаллами заполнены стеклом, в котором частично растворились зерна кварца. Сочетание кристаллической и стекловидной фазы обеспечивает достаточно высокую механическую и электрическую прочность фарфора и отсутствие гигроскопичности.

Основные характеристики электрофарфора приведены в таблице 11.

Материал	Плотность	Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	Разрушающее напряжение при изгибе, МПа	Ударная вязкость, кДж/м ²	Удел. объемное сопротивление, Ом*м	Диэл. проницаемость	tgδ (при 50Гц)	E _{пр} , МВ/м
Электрофарфор	2300-2500	30-50	60-100	1,8-2	10 ¹⁰ -10 ¹²	6-7	0,025-0,03	30-32
Стеатит	2800-3000	50-70	140-170	3-4	10 ¹² -10 ¹⁴	7-8	0,006-0,004	35-40

Стеатит также является электрокерамическим материалом и отличается от электрофарфора повышенной механической прочностью и лучшими электрическими характеристиками. Стеатитовые электроизоляционные изделия могут работать при температурах до 250 °С, существенно не изменяя своих электрических характеристик. У изделий же из электротехнического фарфора наблюдается резкое ухудшение электрических характеристик, начиная от 100 °С и выше.

Стеатит — материал более дорогой, чем электрофарфор, так как для его изготовления используется более дорогое сырье.

Исходные стеатитовые массы изготавливают на основе природного минерала — талька $3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ и углекислого бария BaCO_3 или углекислого кальция CaCO_3 . Для обеспечения пластичности в стеатитовые массы вводят 15—20 % глинистых веществ (бентонитовые и другие глины), для стеатитов применяют наиболее чистые сорта природного талькового камня с содержанием оксидов железа не более 0,5%. Приготовление исходных стеатитовых пластических масс не отличается от приготовления электрофарфоровых.

Из пластичной стеатитовой массы изготавливают стеатитовые изоляторы и электроизоляционные изделия методом прессования в гипсовых формах.

Наиболее широкое распространение имеет метод горячего литья под давлением стеатитовых изделий на парафиновом связующем (парафиновая связка). По этой технологии вначале получают так называемый стеатитовый спек - частицы стеатитовой массы, прошедшие предварительный обжиг на печи, которые затем измельчают.

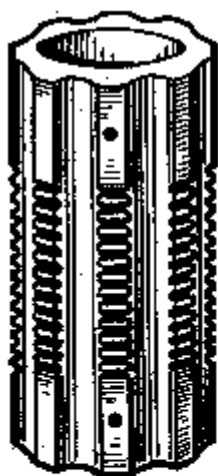


Рис. 20. Каркас катушки трансформатора, полученный литьем стеатитовой литейной массы

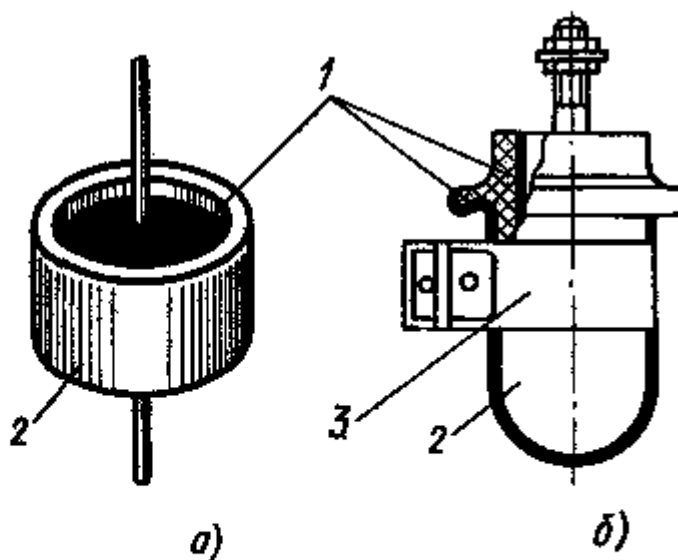


Рис. 21. Боченочный (а) и горшковый (б) керамические конденсаторы: 1 — электроды, 2 — керамическая деталь, 3 — латунная обойма

Очищенный порошок помещают в шаровую мельницу с электрическим обогревом, куда также загружают 8—16 % парафина, 0,6—0,8 % олеиновой кислоты и мелящие тела (стеатитовые шары). Мельницу нагревают до 90 °С и, закрыв люк, пускают. При этом происходит тонкий помол стеатитового порошка и смещение его с расплавленным парафином. Обычно в этой же шаровой мельнице литейная стеатитовая масса для улучшения литейных качеств подвергается вакуумированию. Приготовленная литейная масса поступает в рабочие баки литейных аппаратов, а оттуда под давлением 0,3—0,8 МПа — в стальные формы.

Этим методом изготавливают для электрических аппаратов и приборов изделия сложного профиля (рис.20).

Для удалений из отлитых изделий парафина их помещают в огнеупорные коробки-капсели, заполняя свободное пространство порошком глинозема. Капсели с изделиями плавно нагревают до 800 °С и выдерживают при этой температуре. Парафин, удаляя из отлитых изделий, впитывается порошком глинозема. Затем изделия подвергают обжигу в печах при конечной температуре 280—1350 °С

Стеатитовые изделия, полученные методом горячего литья под давлением, имеют плотную, и гладкую поверхность. Объемной наименьшей усадкой (5 %) обладают изделия, изготавливаемые из литейной массы, в которую предварительно вводят обожженные минералы, составляющие исходную стеатитовую массу (стеатитовый спек). Основу стеатита составляют кристаллы клиноэнстатита ($\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$), которых в нем содержится около 70 %, а остальные 30 % - стекло.

Основные характеристики электростеатита также приведены в таблице 11.

Керамические конденсаторные материалы отличаются от керамических изоляторных материалов большей диэлектрической проницаемостью ($\epsilon_r = 14 \div 250$), что позволяет изготавливать из них керамические конденсаторы большой емкости и сравнительно малых габаритов. Керамические конденсаторы не обладают гигроскопичностью и поэтому не нуждаются в защитных корпусах и оболочках, которые

необходимы для бумажных и слюдяных конденсаторов. Технология производства керамических конденсаторов значительно проще, чем бумажных и слюдяных.

Керамические конденсаторы (рис. 21, а, б) изготавливают методами керамической технологии — литьем в гипсовые или стальные формы, прессованием и другие. Затем обжигают в печах при конечных температурах 1.450—1700 °С. В результате получают неувлажняемые, механически прочные заготовки, на поверхность которых наносят (методом вжигания) сплошные серебряные электроды 1 толщиной 15—20 мкм, припаривают к ним медные выводы. Для защиты электродов от коррозии и исключения возможности замыкания всю поверхность керамических конденсаторов покрывают сплошным слоем влагостойкой эмали.

Так как конденсаторные керамические материалы должны обладать большой диэлектрической проницаемостью. В них должны интенсивно протекать процессы поляризации. Наряду с этим они должны обладать и другими высокими электрическими характеристиками $\rho_v = 10^{12} \div 10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\text{tg}\delta \approx 0,0005$, $E_{\text{пр}} = 20 \div 25 \text{ МВ/м}$. Этому удовлетворяют материалы на основе соединений диоксидов титана TiO_2 , олова SnO_2 и циркония ZrO_2 , а также оксидов щелочных и щелочноземельных металлов (CaO ; MgO ; ZrO и др.). Для получения конденсаторных материалов порошкообразные оксиды смешивают друг с другом в определенном соотношении и тщательно измельчают. Для придания пластичности в некоторые исходные конденсаторные массы вводят небольшое количество глинистых веществ. Это, однако, вызывает ухудшение электрических характеристик керамических конденсаторов.

Керамические конденсаторы материалы на основе диоксидов титана, олова и циркония соответственно называют титанатами (титанат магния MgTiO_3), станнатами (станнат кальция CaSnO) и цирконатами (цирконат бария BaZrO_3).

Значения диэлектрической проницаемости, а также значение и знак температурного коэффициента диэлектрической проницаемости зависят от состава и структуры керамического материала.

Основные характеристики некоторых керамических конденсаторных материалов приведены в табл. 12.

Сегнетокерамические материалы (сегнетокерамика) относятся к группе диэлектриков, называемых сегнетоэлектриками. В отличие от ранее рассмотренных диэлектрических материалов у сегнетоэлектриков наблюдаются аномально большие значения диэлектрической проницаемости, что позволяет применять их в качестве датчиков температуры при измерении ее электрическими методами. Большая диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков позволяет изготавливать из них миниатюрные электрические конденсаторы большой емкости. Диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков значительно возрастает с ростом приложенного к ним напряжения, чего не наблюдается у обычных диэлектриков. Это характерное свойство сегнетоэлектриков используют в диэлектрических усилителях.

Если пластинку сегнетоэлектрика сжимать или растягивать, прикладывая к ее сторонам механические усилия, на ее противоположных поверхностях наводятся электрические заряды разного знака. В результате пластинка сегнетоэлектрика становится источником эдс. Это явление, называемое прямым пьезоэффектом, позволяет применять сегнетоэлектрики в электрических датчиках для измерения давления.

Если же к пластине сегнетоэлектрика приложить переменное напряжение, она начинает вибрировать с той частотой, с какой изменяется переменное напряжение. Это явление называют обратным пьезоэффектом. Изготавливаемые из сегнетоэлектриков пьезоэлементы служат источником высокочастотных колебаний.

До недавнего времени единственным сегнетоэлектриком была сегнетова соль $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ — кристаллическое вещество, растворимое в воде и плавящееся при 55°C , что затрудняло - его использование.

В 1943 г. был синтезирован первый керамический сегнетоэлектрик — титанат бария BaTiO_3 . В Настоящее время создано большое количество керамических сегнетоэлектриков: титана кадмия CdTiO_3 , цирконат свинца PbZrO_3 и др. Керамические сегнетоэлектрики не поглощают :влагу. Не растворяются в воде и могут работать в достаточно широком интервале температур.

Все сегнетоэлектрики обладают характерными сегнетоэлектрическими свойствами только до определенной температуры: титанат бария — до 120°C , а цирконат свинца до 461°C . При превышении этих температур сегнетоэлектрики теряют свои характерные свойства и становятся обычными диэлектриками.

Керамические материалы разнообразны по свойствам и области применения. В зависимости от назначения изготавливают радиотехнические керамические материалы следующих типов: конденсаторная керамика (высокочастотная и низкочастотная), установочная керамика (высокочастотная и низкочастотная)

Каждый тип керамики подразделяют на 10 классов.

Конденсаторная керамика должна иметь высокую диэлектрическую проницаемость, малый тангенс угла диэлектрических потерь, электрическую и механическую прочность, высокую термостабильность и малый температурный коэффициент диэлектрической проницаемости (контурные стабильные конденсаторы), отрицательное значение температурного коэффициента диэлектрической проницаемости (термокомпенсирующие конденсаторы).

Свойства керамических изделий (конденсаторов) можно изменять, меняя состав исходного сырья, технологические режимы изготовления и вводя различные добавки.

Основными компонентами исходного сырья для изготовления конденсаторной керамики являются кристаллообразующие оксиды титана, олова, циркония, стронция, кальция, магния, алюминия и др. Исходное сырье конденсаторной керамики малопластично, поскольку глина в нем отсутствует или содержится в незначительном количестве. Поэтому при изготовлении изделия из него для обеспечения необходимой пластичности часто вводят органическую связку, которая выгорает при обжиге.

Высокочастотная конденсаторная керамика отличается высоким содержанием кристаллической фазы и небольшим содержанием бесщелочной аморфной фазы.

Высокочастотная керамика подразделяется на I, II, III классы.

Керамика I класса получается на основе титаната стронция SrTiO_3 или титаната кальция CaTiO_3 . Керамику I класса применяют для изготовления высокочастотных конденсаторов, к которым не предъявляют требований стабильности емкости.

Керамика II класса получается на основе твердых растворов цирконата кальция CaZrO_3 и титаната кальция CaTiO_3 или нитратов алюминия и кальция. Эта керамика применяется для изготовления термокомпенсирующих и разделительных конденсаторов низкого и высокого напряжения.

Керамика III класса получается на основе кристаллообразующих твердых растворов станата кальция CaSnO_3 , титаната кальция CaTiO_3 , цирконата кальция CaZrO_3 , а также нитратов алюминия и кальция.

Керамика отличается высокой термостабильностью и применяется для контурных конденсаторов высокой стабильности.

Низкочастотная конденсаторная керамика характеризуется высоким значением диэлектрической проницаемости и относительно большим тангенсом угла диэлектрических потерь. Диэлектрическая проницаемость низкочастотной керамики зависит от температуры и напряженности электрического поля. Эта зависимость не

подчиняется линейному закону, поэтому керамику называют нелинейной.

Низкочастотную конденсаторную керамику делят на IV, V классы.

Керамика IV класса получается на основе кристаллообразующих твердых растворов титанатов стронция SrTiO_3 , и висмута $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$. Используют данную керамику для изготовления низкочастотных конденсаторов ($f < 10$ кГц) и однополярных видеоимпульсных конденсаторов.

Керамика V класса получается на основе твердых растворов титаната и цирконата бария, титаната висмута, ниобитов свинца, стронция и кальция. В некоторых случаях используют высокотемпературный сегнетоэлектрик метаниобат свинца PbNb_2O_6 . Керамику этого класса применяют для изготовления разделительных и блокировочных конденсаторов.

Установочная керамика применяется для изготовления изделий, которые подвергаются механической нагрузке (опорные и подвесные изоляторы), или деталей для композитных конструкций.

Высокочастотная установочная керамика используется для изготовления различных установочных деталей радиоэлектронной аппаратуры, которые подвергаются механической нагрузке, работая в поле высокой частоты. Эта керамика характеризуется низким тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ в области высоких частот, малой зависимостью тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ от температуры и частоты, высокой механической прочностью.

Высокочастотную установочную керамику подразделяют на VI, VII, VIII классы.

Керамика VI класса отличается высокой нагревостойкостью и состоит из трех групп.

Основой кристаллообразующей фазы форстеритовой керамики является форстерит $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ который получают после обжига талька, и оксид магния. Для снижения температуры обжига и придания материалу определенных свойств в керамическую массу вводят различные добавки: бораты, углекислый барий и др.

Применяется она для согласованных металлокерамических спаев в радиолампах, а также для изготовления изоляторов корпусов полупроводниковых приборов на основе спаев керамики с металлами, которые обладают повышенным коэффициентом линейного расширения ТКЛ.

Шпинельно-форстеритовая керамика в качестве кристаллической фазы содержит кристаллы форстерита и шпинели $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.

Цельзиановая керамика получила название от цельзиана $\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. В исходный состав сырья кроме цельзиана входят глинезем, аморфный кварц, углекислый барий, коалин, глина.

Виллемитовая керамика производится на основе виллемита $2\text{ZnO} \cdot \text{SiO}_2$.

Из цельзиановой и виллемитовой керамики изготавливают каркасы для катушек со стабильной индуктивностью и конденсаторы малой мощности.

Керамика VII класса изготавливается на основе природного магнезиального (силикатного) сырья, преимущественно талька. Разновидностью этого класса керамик являются стеатитовая керамика. Аморфную фазу стеатитов составляет бесщелочное бариевое стекло. Кроме талька в исходное сырье включают глинистые компоненты, энстатит, серпентин, а также искусственно синтезированный метасиликатный магний. Для снижения усадки керамической массы при сушке и обжиге входящий в её состав тальк предварительно обжигают и измельчают. Введение в исходное сырье обожженного талька снижает пластичность готовых изделий, поэтому для придания стеатитовой керамике необходимой пластичности в исходное сырье добавляют большее количество глинистых компонентов. В зависимости от требуемых свойств и методов формирования изделия содержание глинистых компонентов в стеатите колеблется от 5 до 15%.

В зависимости от состава исходных компонентов и технологии изготовления получают непластичную и пластичную стеатитовую керамику.

Стеатитовую керамику используют для изготовления изолирующих колец, проходных изоляторов, опорных плит и подложек, элементов корпусов полупроводниковых приборов и интегральных схем.

Керамика VIII класса – это глинозёмистая керамика, кристаллообразующую основу которой составляет корунд Al_2O_3 . Глинозёмистая керамика обладает наибольшей механической прочностью, высокой твердостью, высокой химической стойкостью, повышенным значением теплопроводности и высокой электроизоляцией.

Керамику этого класса называют в зависимости от содержания оксида алюминия.

Ультрафарфор – это высококачественный керамический материал, который является усовершенствованным радиофарфором с большим содержанием корунда. Его исходное сырьё состоит из глинозёма, глины, углекислых солей бария и стронция. Чем больше глинозёма в исходном сырьё, тем менее пластична формовочная масса что позволяет изготавливать изделия только небольших размеров.

Ультрафарфор имеет повышенные по сравнению с обычным фарфором механическую прочность и теплопроводность, меньший тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta$ до частот 10^{10} Гц. Он применяется для изготовления ответственных установочных деталей сложной конфигурации, высоковольтных конденсаторов, вакуум-плотных спаев с металлами, плат и радиотехнических подложек.

Алюмооксид (высокоглинозёмистая керамика) – непластичный, очень твердый, обладающий высокой нагревостойкостью (рабочая температура до $1600^\circ C$) материал. Исходное сырьё алюмооксида содержит 95...98% глинозёма и 5...2% минерализаторов (мрамор, глина).

Алюмооксидную керамику получают из предварительно обожженного молотого технического глинозёма или электроплавленного корунда. Общее содержание стекловидной фазы от 8 до 14%.

Диэлектрические свойства алюмооксидной керамики определяются количеством содержащихся в ней примесей и добавок, а также структурой и фазовым составом. Удельное сопротивление керамики с увеличением температуры снижается.

Широкое применение изделий из алюмооксида сдерживается значительной стоимостью и сложностью технологии изготовления. Он используется в качестве изоляции для электронных ламп, изготовления вакуум-плотных переходных изоляторов корпусов полупроводниковых приборов и радиотехнических антенных изоляторов, испытывающих большие механические нагрузки.

Поликор относится к высокоглинозёмистой керамике, его плотность близка к теоретической плотности корунда Al_2O_3 . В отличие от обычной (непрозрачной) корундовой керамики поликор прозрачен.

Поликор используют в качестве подложек для гибридных интегральных микросхем.

Низкочастотная установочная керамика по сравнению с высокочастотной имеет худшие электрические характеристики и, как правило, более низкую механическую прочность, но отличается высокой пластичностью исходного сырья и более простой технологией изготовления изделий.

Низкочастотная установочная керамика включает в себя IX, X классы.

Керамика IX класса – это стеатиты со значительным содержанием глинистых материалов и оксида бария BaO .

Керамика X класса получается при использовании специальных сортов глин и минералов: кварца и полевого шпата.

Фарфор с начала развития электротехники и по настоящее время является одним из основных материалов для производства малоответственных установочных деталей (розеток, патронов электрических ламп и пр.).

Электротехнический фарфор содержит SiO_2 – 70%; Al_2O_3 – 25%; K_2O , Na_2O , Fe_2O_3 и др. – 5%.

При обжиге вследствие потерь составными частями фарфора воды и уплотнения структуры наблюдается усадка – значительное (до 20%) уменьшение размеров изделия. Усадка затрудняет получение обожженных изделий из фарфора с очень малыми допусками по размерам. Операцию обжига часто сочетают с глазуровкой, т.е. покрытием поверхности изделия

стекловидной массой, придающей изделию механическую прочность и влагостойкость, а также красивый внешний вид и требуемую окраску.

Радиофарфор представляет собой фарфор, в стекловидную фазу которого вводят тяжелый оксид бария ВаО.

Радиофарфор применяют для изготовления каркасов катушек индуктивности, ламповых панелей, изоляции статорных пластин воздушных конденсаторов, антенных изоляторов.

Кроме керамических материалов, представляющих собой оксиды или системы нескольких оксидов, существуют безоксидные керамические материалы - нитриды, карбиды, силициды, бориды и их композиции.

В микроэлектронике широко применяют нитрид бора (борозон), который является электроизоляционным материалом высокой нагревостойкости. Он может функционировать при очень высоких температурах, но в нейтральной или восстановительной атмосфере. Кипящая вода и слабые кислоты разрушают его.

Неорганические электроизоляционные пленки

Неорганические электроизоляционные пленки представляют собой химические покрытия, которые получают в процессе создания на поверхности деталей тонких оксидных пленок или пленок труднорастворимых солей с помощью специальных растворов.

Химические покрытия применяют для защиты от коррозии, повышения износостойкости и декоративной отделки различных изделий.

Для изоляции алюминиевых проводов и лент, пленочных электролитических конденсаторов, элементов интегральных схем используют пленки оксидов алюминия, тантала, титана, ниобия, кремния, германия и др. Такие пленки наносят на металлы, полупроводники или другие материалы.

Для оценки способности металла к образованию сплошного оксидного слоя используют объемный коэффициент оксидирования K , который определяется как отношение объема полученного оксида к объему металла, перешедшего в оксид:

$$K = \frac{MD_M}{nAD_o}$$

где M - молекулярная масса оксида; D_M - плотность металла; n - число атомов металла, входящих в молекулу оксида; D_o - плотность оксида.

Если $K > 1$, то на поверхности металла образуется сплошной оксидный слой. Если $K < 1$, то на поверхности такого металла нельзя получить сплошное покрытие. Например, для железа $K < 1$, следовательно, на железе нельзя получить сплошной оксидный слой, а для алюминия $K > 1$, поэтому алюминий даже на воздухе покрыт пленкой оксида Al_2O_3 .

Наибольшее распространение в радиоэлектронике получили оксидирование, фосфатирование и азотирование.

Оксидирование - это процесс получения на поверхности деталей тонких оксидных пленок. Оксидированию подвергают детали из чугуна, стали, цветных металлов и сплавов.

Оксидные покрытия получают химическим и электрохимическим способами.

Химическое оксидирование проводят после подготовки деталей в растворе едкого калия КОН, в котором поверхность приобретает перламутрово-матовый цвет, или в

растворе $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{Na}_2\text{CrO}_4 + \text{NaOH}$, в котором поверхность приобретает цвет от золотистого до темно-зеленого.

Электрохимическое оксидирование (анодирование) проводят в электролитических ваннах в растворе серной кислоты. Деталь при этом является анодом, а в качестве катода используют свинцовые пластины.

Оксидную пленку на поверхности алюминиевых проводов и лент получают анодированием. При использовании в процессе анодирования хромовокислых растворов образуются оксидные пленки светло-серого цвета, а серно-кислых - бесцветные. Для уменьшения пористости полученной пленки применяют дополнительную обработку анодированных деталей горячей водой, водяным паром, пропитывание ланолином, парафином, лаками и т.п.

Процесс изолирования прост и дешев и позволяет получать оксидную изоляцию, обладающую малой толщиной (от 3 до 12 мкм), высокой нагревостойкостью (рабочая температура достигает 600°C); высокой теплопроводностью, высокой химической стойкостью.

К недостатком такой оксидной изоляции относят плохую гибкость и заметную гигроскопичность.

Оксидную изоляцию, полученную анодированием, применяют также в оксидных электролитических, оксидно-полупроводниковых и металло-оксидных конденсаторах. Благодаря малой толщине диэлектрика (до 1 мкм), малым размерам и массе оксидные конденсаторы обладают высокой емкостью и значительной (примерно 10...40) диэлектрической проницаемостью ϵ .

Оксидные пленки на черных металлах получают химическим и электрохимическим способами. При химическом способе деталь нагревают в атмосфере водяного пара или расплавленной селитры. Таким способом получают изоляционные пленки на трансформаторных пластинах.

Качество пленок при химическом и электрохимическом оксидировании стали равноценно. Размеры стальных деталей при оксидировании практически не изменяются. Цвет оксидной пленки на малоуглеродистых сталях черный, на высокоуглеродистых - черный с серым оттенком. Толщина пленок составляет 0,6...0,8 мкм, но может достигать 1,5...3 мкм.

Оксидные пленки на поверхности сталей обладают эластичностью; низкой прочностью, поэтому не могут быть использованы для деталей, работающих в условиях трения; пористостью.

Защитные свойства пористых оксидных пленок на стальных изделиях повышают обработкой смазочными маслами или покрытием лаками.

При оксидировании деталей из меди и ее сплавов для защиты от влаги более качественными получаются оксидные пленки, полученные электрохимическим оксидированием. Толщина плёнки составляет 3...12 мкм. Она обладает твердостью, более высокой, чем у основного металла, износостойкостью и влагоустойчивостью.

Оксидную изоляцию применяют также в оксидных электролитических, оксидно-полупроводниковых и металло-оксидных конденсаторах. В качестве диэлектрика в этих конденсаторах используют оксиды алюминия, титана, ниобия.

Благодаря малой толщине диэлектрика (до 1 мкм), малым размерам и массе оксидные конденсаторы обладают высокой ёмкостью и значительной (примерно 10...40) диэлектрической проницаемостью ϵ .

Тонкопленочный конденсатор конструктивно представляет собой многослойную структуру, в простейшем случае состоящую из двух металлических обкладок, разделенных слоем диэлектрика. Параметры пленочных конденсаторов определяются в основном свойствами диэлектрического слоя, который может быть в виде анодоокисляемых пленок или может наноситься на подложку методом вакуумной технологии.

Пленки окиси титана получают анодным окислением. Они обладают диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 16...25$, малой дефектностью, возможностью строгого контроля толщины пленки в процессе ее получения и хорошей влагостойкостью.

Моноокись кремния получают обычно термическим испарением и используют в качестве защитных слоев при создании пленочных конденсаторов и резисторов. Пленки обладают диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3,5...6,8$, удельной емкостью $C_0 = 104$ пФ/см², малой дефектностью и хорошей влагостойкостью.

Моноокись германия, как и моноокись кремния, получают термическим испарением, но при более низких температурах. Преимуществом монооксида германия является наличие большого количества травителей, что позволяет селективно снимать моноокись германия без влияния на другие ранее изготовленные пленочные элементы микросхемы. Пленки обладают диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 10$, удельной емкостью $C_0 = 150...200$ пФ/см² и влагостойкостью, худшей, чем у монооксида кремния (требует дополнительных мер защиты).

В полупроводниковой технологии для защиты кристаллов с *p-n*-переходами для защиты от воздействий окружающей среды (прежде всего влаги и кислорода) применяют пленки на основе оксидов алюминия, титана, циркония, бериллия и т.п., полученные осаждением в кварцевой трубе. Исходный материал берут в виде порошка, а в качестве несущего агента используют галоген или галогидное соединение водорода. Эти же пленки можно получать вакуумным катодным распылением.

Пленки для защиты полупроводниковых кристаллов с *p-n*-переходами должны обладать малой химической активностью, высокими изоляционными свойствами, хорошей адгезией, низкими механическими напряжениями при резких изменениях температуры, стабильностью защитных свойств в диапазоне температур от -60 до $+400^\circ\text{C}$.

Фосфатирование — это процесс нанесения на поверхность деталей покрытий в виде труднорастворимых солей.

Полученные пленки служат защитным покрытием от коррозии, электроизоляционным слоем и подслоем для последующего лакокрасочного покрытия.

Фосфатирование применяют для защиты от коррозии черных металлов, магния, цинка (трансформаторные, роторные и стартовые пластины); для уменьшения трения при получении изделий вытяжкой (образование пленки производится после вырубки, снятия заусенцев и отжига пластин), а также для изоляции поверхности при лужении, цинковании. Химическое фосфатирование проводится при погружении деталей в ванну, содержащую фосфорно-кислые соли железа и марганца.

Фосфатирование не изменяет размеров детали, поскольку в процессе увеличения толщины оксидной пленки уменьшается толщина металла за счет его растворения. Цвет покрытия светло- или темно-серый. Для повышения коррозионной стойкости фосфатного покрытия применяют дополнительную обработку жировыми пленками, лаками и красками. Толщина пленки при мелкокристаллическом строении составляет $2...4$ мкм, а при крупнокристаллическом — $10...15$ мкм.

Фосфатные пленки обладают хорошей адгезионной способностью, жаростойкостью (примерно 500°C), высоким электрическим сопротивлением (выдерживают напряжение до 1200 В); хорошо удерживают масла, лаки и краски.

Азотирование — это процесс насыщения поверхностного слоя стальных изделий азотом при температуре $500...600^\circ\text{C}$.

Азотирование проводят для придания изделиям большей твердости, износостойкости, повышения предела усталости и коррозионной стойкости.

Слюда и материалы на ее основе

Слюда представляет собой природный кристаллический электроизоляционный материал, который легко расщепляется на тонкие пластинки по параллельным друг к другу плоскостям. Эти плоскости называются плоскостями спайности.

Слюда обладает высокими электроизоляционными свойствами, нагревостойкостью, механической прочностью, гибкостью, прозрачностью (в тонких слоях многих видов слюды), резко выраженной анизотропией (свойства слюды поперек и вдоль плоскости спайности существенно различаются).

Слюда встречается в природе в виде кристаллов, включенных в горные породы, и составляет 3,8% массы земной коры. Однако богатые промышленные месторождения, где добывают слюду высокой чистоты в виде крупных кристаллов, немногочисленны. Первоначальная обработка слюды состоит в ее очистке от посторонних примесей. Очищенную слюду сначала раскалывают на пластины толщиной 0,1... 0,6 мм, обрезают дефектные участки, расщепляют на пластинки толщиной 1...5 мкм и подразделяют на размеры, группы и сорта. Размер определяется величиной прямоугольника, который можно вписать в слюдяную пластинку.

Промышленностью выпускаются пластинки слюды с площадью прямоугольника от 0,5 до 50 см². Группа слюды устанавливается в зависимости от толщины пластинок, а сорт зависит от состояния поверхности пластинки и площади различных включений. Например, слюда первого сорта имеет ровную поверхность и включений не более 10%, а слюда третьего сорта слегка волнистую поверхность и примесей до 50%. Такая слюда называется щипаной.

По химическому составу слюда является водным алюмосиликатом щелочно-земельных металлов. Присутствующая в минерале вода является кристаллизационной водой, входящей в состав кристаллической решетки. Выделяясь при нагревании, кристаллизационная вода вызывает вспучивание слюды и увеличение ее толщины из-за расслаивания по плоскостям спайности. При этом слюда теряет свою прозрачность, резко снижаются ее электрические и механические свойства.

Известно более 30 разновидностей слюды, однако для диэлектрической изоляции применяют только мусковит и флогопит.

Мусковит - это алюмосиликат калия, который можно приближенно выразить формулой $K_2O_5 \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$. Он прозрачен, примеси окрашивают его в светлые тона (зеленый, розовый).

Мусковит имеет хорошие электроизоляционные свойства (лучшие, чем у флогопита), высокую механическую прочность (выше, чем у флогопита), твердость, гибкость, упругость, стабильность свойств во времени, температуру начала обезвоживания и резкого ухудшения свойств 500...600°C.

Из лучших сортов мусковита производят конденсаторную слюду и телевизионную слюду.

Конденсаторную слюду в виде пластинок прямоугольной формы длиной 7...60 мм, шириной 4...50 мм и толщиной 20...55 мкм применяют для изготовления слюдяных конденсаторов постоянной емкости.

Телевизионную слюду применяют в виде диэлектрической основы для фотокатодов и мишеней в передающих телевизионных трубках.

Флогопит - это магнезиальный силикат калия, который можно приближенно выразить формулой $K_2O \cdot 6MgO \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$. Он имеет темный цвет и более высокую нагревостойкость (рабочая температура до 1000°C), но по изоляционным свойствам уступает мусковиту.

Слюду применяют также в виде штампованных фасонных изделий для крепления и электрической изоляции внутренней арматуры в электронных лампах, в качестве тепловой защиты цоколей мощных электрических ламп накаливания, в качестве наполнителя в нагревостойких органических пластмассах.

Кроме минеральной (природной) применяется синтетическая слюда флогопит $KMg_3 \cdot SiAlO_3 \cdot F_2$, в котором атомы воды замещены фтором. Эту слюду получают в результате выращивания кристаллов из расплавленной шихты, содержащей кварцевый песок, оксиды алюминия и магния, фтористые соединения калия и магния. Фторфлогопит

обладает более высокими электрическими параметрами, чем природная слюда, более нагревостоек химически устойчивее обычного флогопита, не вспучивается при нагревании и выдерживает смену температуры от -70 до $+1000^{\circ}\text{C}$.

Из-за сравнительно высокой стоимости синтетическая слюда ограничена в применении. Ее используют для изготовления окон волноводов, счетчиков частиц высокой энергии, конденсаторов с высокой рабочей температурой.

Слюдяные электроизоляционные материалы изготавливают на основе пластинок щипаной природной или синтетической слюды. К ним относятся миканиты, слюдиниты, слюдокерамика, прессмика, микалекс.

Миканиты - это слоистые материалы, в которых отдельные пластинки слюды склеивают между собой лаком или органическим связующим веществом. Иногда эти материалы прессуются.

Коллекторный миканит - это прессованная слюда флогопит с добавкой небольшого количества связующего вещества, в качестве которого используют лак на основе синтетической смолы. Применяется в электрических машинах для изоляции коллекторных пластин.

Прокладочный миканит содержит большее количество связующего вещества по сравнению с коллекторным (15...25%), обладает меньшей плотностью и более широкими допусками по толщине. Применяется в качестве твердых прокладок в электрических машинах.

Формовочный миканит изготавливается в виде листов толщиной 0,1...0,5 мм. Он должен хорошо формоваться при температурных и механических нагрузках в процессе изготовления и сохранять принятую форму после соответствующей термообработки. Применяется для изготовления различных фланцев, каркасов катушек, изолирующих коллекторных пластин.

Гибкий миканит должен формоваться и изгибаться в отличие формовочного при нормальной температуре. Выпускается в рулонах и листах толщиной 0,15... 0,60 мм. Применяется для междувитковой и пазовой изоляции электрических машин.

Жароупорный миканит получают на основе слюды флогопит и нагревостойкого связующего вещества (жидкого стекла, фосфорнокислого аммония). Применяется для изоляции нагревательных приборов.

Микафоллий отличается от гибкого миканита тем, что он приобретает гибкость только в нагретом состоянии. Его получают наклеиванием одного и более слоев слюды на бумагу или стеклоткань. Применяют для изготовления различных изоляционных шпилек и стержней.

Слюдиниты по сравнению с миканитами более монолитны и однородны по толщине, имеют более высокую рабочую температуру и электрическую прочность. Для изготовления слюденитов используют слюденитовую бумагу. Ее получают из отходов слюды мусковит, которые нагревают до температуры 800°C и обрабатывают содой, серной и соляной кислотами. В результате пластинки расслаиваются на более тонкие и образуется пульпа, которая фильтруется и превращается в слюденитовую бумагу на специальных бумагоделательных машинах. Сферы применения те же, что у миканитов.

Слюдокерамика получается в процессе обжига спрессованной мелкокристаллической слюды (мусковита и фторфлогопита) со связующим компонентом. Синтетическую слюду измельчают до получения зерен размером 0,15 мм, хорошо смешивают со связующим компонентом и прессуют в стальных формах. В качестве связующего компонента используют 85%-й раствор ортофосфорной кислоты в количестве от 5 до 15% массы. Готовые изделия сушат и обжигают. Применяют в качестве термостойкой изоляции установочных и вакуумплотных деталей, элементов корпусов полупроводниковых приборов и интегральных схем, изоляторов радиоламп.

Прессмика - плотный материал, который получают горячим прессованием измельченной синтетической смолы без связующего компонента. Применяется для

изготовления проходных и антенных изоляторов, конденсаторов, работающих при температурах до 400°C.

Микалекс - высококачественный изоляционный материал, негидроскопичен, огнестоек, может быть подвержен сложной технологической обработке и запрессовке металлических стержней. Его получают в результате термической обработки и последующего отжига смеси порошкообразной слюды с боратом свинца или легкоплавким борнобариевым стеклом. Применяют для изготовления плат переключателей, панелей малогабаритных воздушных конденсаторов, гребенок катушек индуктивности.

Лекция 7

Жидкие и газообразные диэлектрики. Активные диэлектрики.

Жидкие диэлектрики представляют собой низкомолекулярные вещества органического происхождения, которые бывают *полярными и неполярными*.

Жидкие диэлектрики характеризуются диэлектрической проницаемостью ε , электропроводностью, диэлектрическими потерями (тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta$), электрической прочностью $E_{пр}$.

У полярных жидкостей (совол, гексол, этилен гликоль) диэлектрическая проницаемость определяется одновременно электронной и дипольной поляризациями.

У неполярных жидкостей диэлектрическая проницаемость определяется в основном только электронной поляризацией, не зависит от частоты и уменьшается с ростом температуры, приближаясь к единице. Электропроводность жидких диэлектриков обусловлена перемещением ионов, которые возникают в результате диссоциации самой жидкости и примесей, а также перемещением заряженных частиц примеси – молионов. С повышением температуры возрастает подвижность ионов и степень тепловой диссоциации. Эти факторы увеличивают электропроводность.

Кроме ионной электропроводности у жидких диэлектриков наблюдается молионная электропроводность, когда носители зарядов являются мельчайшие примеси. Такими примесями могут быть вода, различные твердые высокодисперсные частицы, находящиеся во взвешенном состоянии (волокна, пылинки и др.) Эти частицы адсорбируются своей поверхностью ионы и при воздействии электрического поля перемещаются к соответствующим электродам. У технических жидких диэлектриков, содержащих определенную долю примесей, при комнатной температуре преобладает молионная проводимость. Молионная проводимость наблюдается, например, у трансформаторного масла содержащего мельчайшие частицы глины и эмульгированную воду.

Очистка жидких диэлектриков от примесей заметно повышает их удельное сопротивление, однако полностью удалить примеси невозможно.

Преобладание конкретного вида проводимости зависит от энергии диссоциации, т.е. энергии, необходимой для разрушения молекул и образования ионов. Чем выше энергия диссоциации, тем меньше ионная проводимость.

У полярных жидкостей диэлектрические потери состоят из потерь на электропроводность и потерь, связанных с дипольно-релаксационной поляризацией. Они зависят от температуры частоты и вязкости жидкости. Так как поворот диполей в вязкой среде вызывает потери энергии на трении молекул.

Диэлектрические потери у неполярных жидкостей, не содержащих примесей, - это потери, по существу, на электропроводность. Они зависят от частоты и растут с ростом температуры, что объясняется увеличением сквозного тока. Диэлектрические потери этих жидкостей малы, т.к. мала их электропроводность.

Электрическая прочность жидких диэлектриков в основном определяется наличием посторонних примесей, полярностью жидкости, температуры и др. факторами. Присутствующие в жидкости пузырьки газа и ионизируются, выделяя энергию, которая приводит к местному перегреву жидкости. Это ведет к образованию газового канала между электродами и в результате к пробоем жидкости. Кроме газовых включений значительным фактором, снижающим электрическую прочность жидких диэлектриков, является вода.

В качестве жидких электроизоляционных материалов в электротехнических устройствах используются нефтяные масла, синтетические жидкие диэлектрики и растительные масла. К жидким диэлектрикам относят нефтяные электроизоляционные масла, синтетические жидкие диэлектрики.

Нефтяные электроизоляционные масла получают в процессе ступенчатой перегонки нефти и удаления из нефтяного дистиллята нестойких соединений (нефтяных кислот, серы, смолы, кислорода, азота и др.).

Технологическая операция очистки нефтяного дистиллята от посторонних примесей называется *рафинированием*. От качества ее приведения в определенной степени зависят эксплуатационные свойства масла.

Эти масла обладают рядом свойств, которые обеспечили им широкое применение. Они сравнительно дешевы и могут производиться в больших количествах, при хорошей очистке имеют малый тангенс угла диэлектрических потерь, обладают достаточно высокой электрической прочностью.

К недостаткам нефтяных масел относят ограниченный интервал рабочих температур, пожара- и взрывоопасность, склонность к старению. Процесс старения ускоряется при контакте с воздухом, воздействие света, электрического поля, соприкосновение с некоторыми металлами и др. веществами с кристаллическим строением, повышении температуры, контактировании с резинами.

При старении в электрическом поле некоторые сорта масел выделяют газы, что опасно, т. к. пузырьки газов могут стать очагами частных разрядов. Способность масел не выделять газов при старении в электрическом поле называется *газостойкостью масел*.

Для борьбы со старением масел используют следующие средства:

1. вводят антиокислительные присадки;
2. ограничивают рабочую температуру (95°C для трансформаторов с воздушным охлаждением и 85°C – с водяным);
3. производит непрерывную фильтрацию масел через адсорбенты;
4. подвергают состарившееся масло регенерации, т.е. восстановлению его свойств путем очистки и сушки.

Трансформаторное масло - жидкость от почти бесцветного до темно-желтого цвета. По химическому составу представляет собой смесь нафтеновых и парафиновых углеводородов – является неполярным диэлектриком с малой диэлектрической проницаемостью. После рафинирования масла дополнительно очищается. Для этого оно обрабатывается щелочью, промываются водой, и сушится окончательная очистка производится с помощью адсорбентов и фильтр-процессов. Трансформаторное масло обладает свойствами:

1. малая вязкость;
2. температура застывания -70°C ;
3. электрическая прочность $E_{\text{пр}} = 10 \dots 25 \text{ МВ/м}$;
4. теплоемкость и теплопроводность масла увеличивается с ростом температуры.

Основными недостатками трансформаторного масла являются старение, воспламеняемость и горючесть, гигроскопичность.

Применяют трансформаторное масло в качестве изолирующей и охлаждающей среды в силовых и импульсных трансформаторах, реакторах высоковольтных выключателях.

Кабельное масло отличается от трансформаторного повышенной вязкостью, от конденсаторного – пониженными электрическими свойствами. Оно используется как составная часть в масленно-канифольных компаундах для пропитки изоляции силовых кабелей.

Конденсаторное масло – получается из трансформаторного после дополнительной обработки его в вакууме для удаления из него растворенного воздуха, что снижает диэлектрические потери. Его используют для пропитки изоляции в бумажных и пленочных конденсаторах, что позволяет уменьшить габаритные размеры, массу и стоимость конденсаторов.

Синтетические жидкие диэлектрики их применяют в тех случаях, когда они по свойствам превосходят электроизоляционные масла.

Хлорированные углеводороды получают заменой некоторых или даже всех атомов водорода атомами хлора у различных углеводородов. Наиболее часто применяют полярные продукты хлорирования дифенила. Наиболее известными представителями этой группы являются совол и севол-10. Атомы в молекулах этих материалов расположены несимметрично, поэтому совол и севол-10 являются полярными.

Совол и севол-10 мало подвержены старению, не образуют с воздухом взрывчатых смесей, негигроскопичны, токсичны, дорогостоящими.

Совол представляет собой бесцветную вязкую жидкость, полученную хлорированием дифенила. Совол является негорючим веществом, не окисляется, что составляет его главное преимущество перед нефтяными маслами. Его применение ограничивается недостатками: $D=1500...1560$, температура вспышки $T_{всп}=205...230^{\circ}\text{C}$, температура застывания $T_3=+5^{\circ}\text{C}$, электрическая прочность при температуре $T=20^{\circ}\text{C}$ $E_{пр}=14...18\text{МВ/м}$, значительная вязкость в области рабочих температур, что не позволяет использовать его в чистом виде; он примерно в 10 раз дороже трансформаторного масла.

Применяется взамен конденсаторного масла для пропитки низковольтных бумажных конденсаторов с повышенной емкостью.

Севол-10- негорючая, с повышенной температурой застывания жидкость, которую получают, разбавляя совол трихлорбензол.

Применяют вместо трансформаторного масла для взрывоопасных трансформаторов.

Кремнийорганические жидкости- это продукт синтеза кремнистых и углеродистых соединений, свойства которых определяются типом органических радикалов. В соответствии с этим различают полидиметилсилоксановые, полидиэтилсилоксановые и полиметилфенилсилоксановые жидкости.

Эти жидкости характеризуются высокой нагревостойкостью, низкой температурой застывания, T_3 , малым температурным коэффициентом вязкости, химической инертностью, малыми диэлектрическими потерями и низкой гигроскопичностью.

Полиметилсилоксановые жидкости получают гидролизом диметилхлорсиланов с триметилхлорсиланами. Эти жидкости применяют для пропитки бумажных конденсаторов и гидрофобизации изоляционных лент.

Полидиэтилсилоксановые жидкости представляют собой смеси полиэтилсилоксанов. Бесцветны. Применяются для пропитки и заливки конденсаторов, работающих в интервале температур от -60 до $+100^{\circ}\text{C}$.

Полиметилфенилсилоксановые жидкости отличаются более высокой нагревостойкостью и стойкостью к радиационному излучению.

Фторорганические жидкости представляют собой производные углеводородов, у которых атомы водорода замещены фтором. Они обладают малыми диэлектрическими потерями, ничтожно малой гигроскопичностью, высокой нагревостойкостью, высокой теплопроводностью, полной негорючестью.

Фторорганические жидкости применяют для пропитки и заливки конденсаторов и трансформаторов, для испытания элементов радиоэлектроники при низких и высоких температурах.

Газообразные диэлектрики.

Основными характеристиками газообразных диэлектриков являются электропроводность, пробой в однородном электрическом поле, пробой в неоднородном электрическом поле.

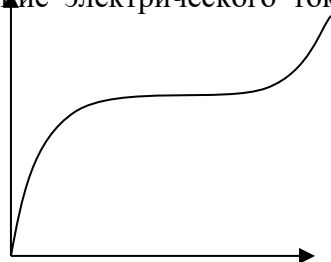
Электропроводность газ . Электропроводность газов связана с наличием в них некоторого числа ионов и электронов, которые образуются под влиянием воздействий и в результате соударений заряженных частиц с молекулами газа. В соответствии с этим в газах возникает несамостоятельная или самостоятельная проводимость. В нормальных условиях

число заряженных частиц в 1 м^2 атмосферного воздуха не превышает нескольких десятков миллионов.

Образование носителей зарядов связано с различными природными факторами: радиоактивное излучение Земли, излучение Солнца, радиация, проникающая из космического пространства, тепловое воздействие, рентгеновские и гамма-лучи, поток нейтронов и т.п.

Проводимость газа повышается, если приложить повышающее напряжение к электродам, между которыми он находится. При поглощении энергии молекула газа теряет электрон и превращается в положительный ион. Электрон, который при этом высвобождается, «прилипает» к нейтральной молекуле и образует отрицательный ион. Не имеющие электрического заряда молекулы газам и заряженные ионы совершают беспорядочные тепловые движения. При встрече положительных и отрицательных ионов происходит их рекомбинация. Когда число ионов не изменяется с течением времени, между процессами генерации и рекомбинации заряженных частиц устанавливается динамическое равновесие.

Изменение электрического тока в газе, который находится между электродами, отображается вольт-амперной характеристикой.



Вольт-амперная характеристика.

На участке 1, который соответствует слабому электрическому полю, носители зарядов образуются под воздействием приложенного к электродам напряжения (несамостоятельная проводимость). Протекающий при этом электрический ток I пропорционален приложенному напряжению U . На этом участке происходит рекомбинация заряженных частиц.

На участке 2 с дальнейшим повышением напряжения скорость движения заряженных частиц увеличивается, и подавляющее их большинство достигают электрода, не успев рекомбинировать. При критическом напряжении $U_{кр}$ энергии заряженных частиц достаточно для совершения ударной ионизации. При этом пропорциональность между током и напряжением нарушается, т.к. все ионы и электроны в газовом промежутке разряжаются на электродах, поэтому ток остается постоянным. Максимальный ток, не зависящий от приложенного напряжения, называется *током насыщения* I_n . При возникновении ударной ионизации число электронов и ионов резко возрастает, появляется *самостоятельная проводимость*, ток вновь начинает увеличиваться с возрастанием напряжения на участке.

Пробой газов в однородном электрическом поле. Однородное поле между электродами одинаковой геометрической формы с большой площадью поверхности, когда их диаметр D в 10 раз больше расстояния между ними h . При увеличении напряженности электрического поля электроны ударяются между собой и приобретают энергию, достаточную для ионизации молекул газа:

$$W = g U = g v E,$$

где g -заряд частиц; v - средняя длина свободного пробега электрона или иона; E - напряженность электрического поля.

Для возникновения ударной ионизации необходимо, чтобы энергия движущихся зарядов была выше энергии ионизации $W_{и}$:

$$g v E > W_{и}.$$

Энергия ионизации $W_{и}$ для различных газов находится в пределах $4...25\text{ эВ}$.

Необходимая для ионизации критическая напряженность электрического поля $E_{кр} = \frac{W_u}{gv}$.

Пробой газа в неоднородном поле. Неоднородное поле образуется между электродами. Пробой газа в неоднородном электрическом поле отличается от пробоя в однородном электрическом поле по величине пробивного напряжения $U_{пр}$ и по характеру развития самого процесса пробоя. Особенностью пробоя газа в неоднородном поле является возникновение частичного заряда в виде «короны», который сопровождается свечением и разрушением молекул. При дальнейшем повышении напряжения корона перерастает в *кистевой разряд*, который затем превращается в *искровой*. При большой мощности разряда образуется *дуговой разряд*, который сопровождается образованием озона и оксидов азота и характерным шипением, потрескиванием и своеобразным свечением. Часто возникает пробой на границе раздела с твердым электриком. Такой пробой в технике называют *поверхностным*. Основным недостатком газообразной электрической изоляции является ее низкая электрическая прочность, однако в ряде случаев этот недостаток не имеет значения. В качестве газообразных диэлектриков применяют воздух, инертные и электроотрицательные газы.

Воздух представляет смесь, которая состоит из азота N_2 (78,03%), кислорода O_2 (20,93%), углекислого газа CO_2 (0,03%), инертных газов (He, Xe, Ar, Ne, Kr) (0,1%). Плотность воздуха 1. Воздух является основным изолирующим материалом, например в воздушных конденсаторах. Чаще всего он является вспомогательным диэлектриком, по причине своей распространенности он входит в состав многих устройств.

Азот N_2 - бесцветный газ, не имеющий запаха. Он бесцветен также в жидком и твердом состоянии. Обладает одинаковой с воздухом электрической проницаемостью. Но менее активен. Основные свойства азота: относительная молекулярная масса (28,016), плотность жидкого азота при температуре, г/см³ (184 °C, 0 °C), температура плавления (210), кипения (196). Молекула газообразного азота двухатомна и не распадется на отдельные атомы даже при высокой температуре. Азот химически инертен, при комнатной температуре не реагирует с металлами, за исключением лития. Получают азот из атмосферного воздуха. В чистом виде азот применяется сравнительно редко.

Кислород газообразный O_2 - бесцветный газ без запаха и вкуса. Основные свойства: относительная молекулярная масса (32), плотность (1,42), температура кипения (182,9). Получают кислород из атмосферного воздуха методом глубокого охлаждения или электролизом воды.

Водород H_2 - бесцветный горючий газ, не имеющий запах; самый легкий газ. Электрическая прочность водорода примерно на 40% ниже воздуха. Основные свойства водорода: относительная молекулярная масса (2,016), плотность (0,018), температура кипения (253 °C). Водород горит несветящимся пламенем. Водород обладает свойствами, особо благоприятными для использования в качестве охлаждающей среды вместо воздуха, т.к. имеет высокую удельную теплопроводность и теплоемкость. Водород используют в качестве восстановительной среды при пайке и термической обработке.

Водород технический получают электролизом воды и хлористых солей или паровой конверсией углеводородных газов. Смеси технического водорода с хлором, кислородом и воздухом взрывоопасны. При работе с водородом необходимо соблюдать осторожность.

Углекислый газ CO_2 - жидкость без запаха и вкуса. Основные св. - ва: температура возгонки (78,5 °C), доля двуокиси углерода в рабочем продукте не менее (98), доля влаги (0,1).

Гелий He- инертный газ, самый легкий из всех инертных газов. Основные св. - ва: относительная атомная масса (4,0026), плотность (1,138), температура кипения °C: 269, а плавления 272. Гелий не горит и не поддерживает горение. Гелий применяют в качестве

низкотемпературного хладагента. В микроэлектронике гелий применяют в качестве индикаторного газа при контроле герметичности микросхем.

Аргон Ar_2 - бесцветный инертный газ, почти в 2 раза тяжелее воздуха. Основные свойства аргона: относительная молекулярная масса (39,94), плотность (1,78), температура кипения (122), температура плавления (189). Применяется в газоразрядных приборах и осветительных лампах, в микроэлектронике в качестве защитного газа при микропайке, микросварке; при сборке и межоперационном хранении приборов в инертной среде; как газ-носитель при производстве полупроводниковых материалов.

Шестифтористая сера-(гексафторид серы SF_6) обладает электрической прочностью примерно в 25 раз большей, чем воздух. Впервые исследовавший этот газообразный диэлектрик ученый Б.М. Гохберг назвал его *элегазом* (сокращенно от слов «электричество» и «газ»). Элегаз не токсичен, химически стоек, не разлагается при нагревании (до температуры $800^\circ C$), может быть сжат (при нормальной температуре) без сжижения до давления 2МПа. Недостаток элегаза относится его относительная высокая стоимость. Применяется в газонаполненных высоковольтных конденсаторах, а также в качестве электроотрицательного газа при контроле герметичности микросхем.

Активные диэлектрики.

Активные диэлектрики отличаются от обычных тем, что их электрическими свойствами можно управлять в широком диапазоне, воздействуя на них электрическим, магнитным, тепловым полями и т.д. активные диэлектрики используют для генерации, усиления, модуляции и преобразования электрических сигналов. К активным диэлектрикам относятся сегнетодиэлектрики, пьезоэлектрики, электреты, диэлектрики для оптической генерации, электрооптические материалы.

Сегнетодиэлектриками называются материалы, которые обладают спонтанной поляризацией в определенном интервале температур.

Спонтанная поляризация – это поляризация, которая возникает в диэлектрике под влиянием внутренних процессов, без внешних воздействий. Объем сегнетодиэлектрика разделен на *домены*, которые представляют собой макроскопические области с различным направлением векторов спонтанной поляризованности P_c . Зависимость поляризации P_c от напряженности внешнего электрического поля E в сегнетодиэлектриках нелинейно при циклическом изменении напряженности поля имеет вид характерной замкнутой кривой, которая называется *петлей гистерезиса*. Напряженность поля, при которой происходит изменение направления спонтанной поляризованности, называют *коэрцитивной силой* H_c .

Сегнетоэлектрическая точка Кюри- температура, при которой возникает или исчезает спонтанная поляризация. Диэлектрическая проницаемость вещества при температуре точки Кюри T_k максимальна. После достижения точки Кюри происходит фазовый переход из сегнетоэлектрического состояния в параэлектрическое, когда $P_c=0$.

Диэлектрическая проницаемость и тангенса угла диэлектрических потерь сильно зависят от частоты, особенно в области высоких частот.

Рассмотренные особенности поляризации были впервые открыты у кристалла сегнетовой соли, а диэлектрики с такими свойствами получили название *сегнетоэлектриков*. Сегнетоэлектрики подразделяются на ионные и дипольные. У ионных сегнетоэлектриков спонтанная поляризация является следствием упорядоченного смещения ионов из положения равновесия. В элементарной ячейке *дипольных сегнетоэлектриков* содержатся атомы или группы атомов с двумя положениями равновесия.

Сегнетова соль обладает следующими свойствами и недостатками:

зависимость от влажности окружающей среды; при нормальной температуре и влажности воздуха более 85% сегнетова соль начинает поглощать пары воды и медленно растворяется; при влажности менее 35% происходит обратный процесс- дегидратация, т.е. выделение входящей в структуру кристаллизационной воды;

низкая нагревостойкость; при повышенной температуре сегнетова соль распадается на тартрат натрия, тартрат калия и их насыщенные растворы с выделением воды; анизотропия, позволяющая вырезать образцы только в определенной плоскости. Эти недостатки ограничивают возможность применения сегнетовой соли в технике.

Сегнетокерамические материалы обладают различными свойствами, на которые оказывают влияние химический состав и концентрация примесей. К конденсаторной сегнетокерамике относятся материалы на основе титаната бария.

Титанат бария обладает следующими свойствами: высокие значения диэлектрической проницаемости и резко выраженная ее зависимость от температуры и напряженности электрического поля; нелинейный характер зависимости диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля, вследствие чего имеет место нелинейная зависимость емкости конденсаторов от напряженности электрического поля; возможность подбирать составы с очень высокими значениями диэлектрической проницаемости и с различной ее зависимостью от температуры и напряженности электрического поля. Конденсаторная сегнетокерамика применяется для изготовления нелинейных конденсаторов.

Нелинейная сегнетокерамика обладает более резко выраженной нелинейной зависимостью диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля, чем у титаната бария. Нелинейные диэлектрические конденсаторы называют *варикондом*. Вариконды выполняют в виде дисковых или пленочных плоских керамических конденсаторов. В зависимости от области применения в варикондах используется два вида диэлектрической нелинейности – эффективная и реверсивная.

Эффективная нелинейность – это изменение емкости от амплитуды приложенного напряжения. Она осуществляется лишь на низких частотах. Эффектную нелинейность используют в стабилизаторах переменного напряжения, в устройствах искрогашения, для повышения контрастности электрических устройств изображения, индикаторов, телевизионных экранов.

Реверсивная нелинейность – это изменение емкости в переменном поле другим, управляющим электрическим полем. Реверсивная нелинейность используется в диэлектрических усилителях, стабилизаторах напряжения, устройствах автоматики, работающих на низких частотах и не критичных к таким недостаткам, как большие потери, гистерезисный характер зависимости диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля и температурной и временной нестабильности.

Терморезистивную сегнетокерамику по характеру электропроводности можно отнести к полупроводникам, однако, благодаря спонтанной поляризации и фазовому переходу в точке Кюри терморезистивная сегнетокерамика обладает рядом свойств, которые не присущи полупроводникам. Например, позисторный эффект, который заключается в резком возрастании удельного электрического сопротивления при повышении температуры вблизи точки Кюри. Позисторы используются для измерения и регулирования температуры, термокомпенсации радиосхем, в малогабаритных термостатах, стабилизаторах тока и др.

Сегнетоэлектрики с прямоугольной петлей гистерезиса применяют в запоминающих устройствах электронно-вычислительных машин. Основным требованием к материалам ЗУ является прямоугольность петли гистерезиса, которую определяют по формуле

$$K_{\text{пр}} = P_c / P_n,$$

где P_n – значение поляризованности в начале участка насыщения петли гистерезиса.

Пьезоэлектрики.

Пьезоэлектриками называют твердые, анизотропные кристаллические вещества, обладающие пьезоэффектом. Пьезоэффект был открыт братьями Кюри в 1880 г. Явление образования электрического заряда на поверхности соответствующих граней диэлектрика при его деформации под действием механических напряжений называют *прямым пьезоэлектрическим эффектом*. Возникающая при этом поляризованность P прямо пропорциональна приложенному механическому напряжению σ :

$$P = d\sigma$$

Где d - коэффициент пропорциональности, называемый *пьезоэлектрическим модулем* или *пьезомодулем*. Пьезомодуль определяет поляризацию кристалла или плотность заряда на его обкладках при заданном приложенном механическом напряжении. Изменение формы диэлектрика при изменении напряженности электрического поля называется *обратным пьезоэлектрическим эффектом*.

Пьезокерамика. Сегнетокерамика является изотропным материалом и не обладает пьезоэффектом. Пьезоэлектрический эффект в сегнетоэлектриках создается в процессе выдержки ее в сильном постоянном электрическом поле при температуре 100...150 °C в течение длительного времени. Для этого на поверхность сегнетокерамики наносят серебряные электроды, к которым прикладывают напряжение из расчета нескольких киловольт на каждый сантиметр толщины образца. Поляризованную сегнетокерамику, предназначенную для использования ее пьзоэффекта, называют *пьезокерамикой*. Пьезокерамика представляет собой поликристаллическое вещество и поэтому результирующий пьезоэффект выражен в ней слабее, чем в монокристалле. Однако применение пьезокерамики обусловлено возможностью изготовления изделий любой формы и размеров, низкой стоимостью по сравнению с монокристаллами. Пьезокерамические материалы подразделяют на четыре класса.

Материалы 1 класса применяют для изготовления высокочувствительных пьезоэлементов, работающих в режиме приема или излучения слабых механических колебаний.

Материалы 2 класса предназначены для пьзоэлементов, которые работают в условиях сильных электрических и механических напряжений. Из них изготавливают мощные источники ультразвука, системы зажигания.

Материалы 3 класса применяют в пьезоэлементах, которые должны обладать повышенной стабильностью частотных характеристик во времени и изменении температуры.

Материалы 4 класса используют в особых случаях, например когда требуется эксплуатация пьезоэлементов в условиях воздействия повышенной температуры.

В качестве пьезокерамических материалов используют Титанат бария и его производные, ниобат бария – свинца, цирконат – Титанат свинца и его производные.

Пьезоэлектрические монокристаллы. Пьезокерамика имеет поликристаллическую структуру, что делает невозможным ее применение на частотах свыше 10 МГц. На высоких частотах и сверхвысоких частотах применяют только монокристаллические природные или синтетические пьезоэлектрики. К ним относятся кварц, ниобит лития, танталит лития, сфалерит, сульфид кадмия, оксид цинка, Титанат бария и др.

Кварц (горный хрусталь)- двуокись кремния SiO_2 , широко распространенный в природе минерал, который обладает: высокими электрическими свойствами; стабильностью частоты собственных колебаний; небольшим значением пьезомодуля; сильной анизотропией; высокой стоимостью. Двуокись кремния представляет собой бесцветные прозрачные кристаллы в виде усеченных шестигранных призм. Кварц применяют для стабилизации частоты генераторов электрических колебаний.

Ниобат лития LiNbO_3 и *танталит лития* LiTaO_3 – синтетические кристаллы, которые часто используют вместо кварца. Они обладают более высокими, чем кварц, пьезоэлектрическими характеристиками, и их применение наиболее перспективно в

диапазоне высоких и сверхвысоких частот. Эти материалы применяются в линиях задержки и фильтрах объемных и поверхностных волн. Использование этих кристаллов вместо кварца позволяет снизить влияние паразитных колебаний, расширить полосу пропускания при меньших размерах, снизить сопротивление в полосе прозрачности.

Электреты.

Электретами называются диэлектрики, которые длительное время создают в окружающем пространстве электрическое поле за счет предварительной электризации или поляризации.

Первые электреты были получены в 20-е годы нашего столетия. Они представляют собой смеси воска и смол, расплав которых охлаждают в постоянном электрическом поле. При застывании поверхность электрета, обращенная к аноду, сохраняет отрицательный, а противоположная – положительный заряд. Таким образом, возникают связанные поверхностные электрические заряды. Электреты разрушаются при плавлении или воздействии сильного переменного электрического поля, ультразвука и поля высокой частоты. Хранят органические электреты в закороченном состоянии, например упакованный в фольгу. В зависимости от способа формирования заряда различают электроэлектреты, термоэлектреты, фотоэлектреты, радиоэлектреты и трибоэлектреты

Электроэлектреты получают воздействием на диэлектрик электрического поля при комнатной температуре.

Термоэлектреты получают при охлаждении нагретого или расплавленного диэлектрика в сильном электрическом поле. После охлаждения подвижность полярных молекул или свободных зарядов резко уменьшается и диэлектрик может сохранять остаточную поляризацию длительное время.

Фотоэлектреты получают при совместном действии электрического поля и световой энергии на материалы, обладающие фотопроводностью. После прекращения воздействия световой энергии носители разноименных зарядов оказываются (замороженными) у противоположных сторон диэлектрика, который превращается в электрет. При условии хранения в темноте фотоэлектрики могут удерживать заряды от нескольких суток до нескольких месяцев.

Радиоэлектреты получают при воздействии на диэлектрик радиоактивного излучения. В результате ударной ионизации поверхностного слоя или внедрения в поверхностный слой диэлектрика ускоренных заряженных частиц на поверхности диэлектрика образуется заряженный слой.

Трибоэлектреты получают при трении двух диэлектриков. При плотном контакте двух диэлектриков электроны диэлектрика с меньшей работой выхода переходят в диэлектрик с большей работой выхода. С течением времени заряда электрета изменяется, что связано с разрушением остаточной поляризации. Время, в течение которого значение стабилизированного заряда уменьшается в 2,72 раза, называют *временем жизни электрета*. Оно может равняться десяткам лет, а для хороших электретов - сотням лет.

Диэлектрики для оптической генерации.

Атомы в молекулах располагаются на разных энергетических уровнях. Если возбужденный атом самопроизвольно переходит с более высокого энергетического уровня на более низкий уровень, он излучает фотон, т.е. частицу света. Такое излучение называют *спонтанным (самопроизвольным)*. При этом энергия атома уменьшается: $W=W_2-W_1$,

Где W – энергия, на которую уменьшилась энергия электрона, перешедшего на более низкий энергетический уровень; W_2 – энергия более высокого энергетического уровня; W_1 – энергия более низкого энергетического уровня.

Разница в энергии W излучается в виде кванта с частотой

$$f=W/h,$$

где h – постоянная Планка.

Если на атом воздействовать фотоном извне, то излучение возбужденного атома называют *индуцированным или стимулированным*. В нормальных условиях большинство частиц находятся на нижнем энергетическом уровне. Случайно возбужденные атомы освобождаются от избыточной энергии спонтанным излучением и переходят на нижний энергетический уровень. Чтобы получить когерентный, т.е. согласованно протекающий во времени, световой поток, необходимо наполнить верхний энергетический уровень избыточным числом частиц. Этот процесс называется *обратной заселенностью или инверсией*. Для создания обратной заселенности в двухуровневой системе в нее подают электромагнитное поле от внешнего источника с резонансной частотой. Т.к. в исходном состоянии большинство частиц находилось на нижнем основном уровне¹, то под действием электромагнитного поля происходит их частичное переселение на верхний уровень² и выравнивание числа частиц на уровнях¹ и ². процесс возбуждения частиц их переселением на более высокие энергетические уровни под воздействием внешнего поля называется *накачкой*, а внешнее поле – *полем накачки*. После выключения внешнего поля накачки на верхнем уровне образуется избыточное число частиц по сравнению с равновесным, и система становится подготовленной к стимулированному излучению. Время, за которое система снова вернется в равновесное состояние, называется *временем релаксации*.

Материалы для твердотельных лазеров. В качестве активного элемента твердотельных лазеров используются кристаллические диэлектрики, к которым относятся высокотемпературные монокристаллы окислов ZnO, Al₂O₃, TiO₂, SiO₂, вольфраматы, молибдаты, ниобаты и др.кислородные соединения; монокристаллы фторидов CaF₂, BaF₂, LaF₃, MnF₂, а также стекла на основе кислородных соединений и фторидов. Наибольшее применение из монокристаллов получили рубин, гранат и флюорит.

Рубин представляет собой кристалл бледно-розового цвета, в котором часть ионов алюминия замещена ионами хрома. Активированный рубин обладает высоким квантовым выходом, большой механической прочностью, высокой теплопроводностью, стойкостью к воздействию мощного излучения, химической стойкостью, возможностью получать сравнительно большие оптически однородные монокристаллы.

Иттрийалюминиевый гранат легированный неодимом, имеет длину волны излучения 1,06 мкм, высокую механическую прочность, хорошую теплопроводность, низкую пороговую энергию возбуждения. Благодаря этим свойствам гранат используется в лазерах, работающих в режиме непрерывной генерации с выходной мощностью в несколько сот ватт, а также в частотном режиме с частотой повторения импульсов от 5 кГц до единиц гигагерц и в режиме одиночных импульсов с импульсной мощностью в десятки мегаватт.

Флюорит кальция обычно активируют ураном. При концентрации примерно 0,05% длина волны излучения составляет 2,5мкм.

Специальные стекла активируют ионами редкоземельных металлов. Активированные стекла изготавливают из силикатных, фосфатных, боратных, фтористых, теллурических, германиевых и др. стекол. Активированное стекло – один из самых дешевых лазерных материалов. Стекла обладают некоторыми недостатками: низкая теплопроводность, высокий температурный коэффициент линейного расширения, слабая фотохимическая устойчивость, ограниченная область прозрачности, большая ширина спектра излучения.

Материалы для жидких лазеров. Эти материалы обладают следующими преимуществами по сравнению с лазерными кристаллами и стеклами: лазерные кристаллы и стекла изготавливаются при высокой температуре, поэтому в них содержатся «замороженные» дефекты структуры, снижающие степень их оптического совершенства. Жидкости свободны от таких дефектов; Жидкости позволяют создавать любой объем активной среды; Жидкие активные среды обладают постоянными оптическими характеристиками; Материалы для жидких оптических квантовых генераторов дешевле твердотельных и просты в изготовлении.

Материалы для газовых лазеров. Эти материалы обладают наибольшим оптическим совершенством, т.к. молекулы газа значительно слабее взаимодействуя друг с другом, чем в жидкостях или твердых телах. Газовые лазеры имеют преимущества по сравнению с твердотельными и жидкими лазерами:

Для активирования газа используют электрическую накачку; малая плотность газовой среды, вследствие чего энергетические уровни в спектре газов очень узкие; малая плотность газовой среды обеспечивает высокую оптическую однородность, пучок света в газе практически не рассеивается. Поэтому излучение газовых лазеров характеризуется высокой монохроматичностью и направленностью. К недостаткам газовых лазеров относят невозможность получения больших мощностей излучения из-за малой плотности газовой активной среды.

Электрооптические материалы.

Для эффективного использования оптического излучения лазеров и др. генераторов света необходимо управлять этим излучением. Для изменения основных параметров излучения используют специальные устройства-модуляторы лазерного излучения, которые изготавливают из материалов, обладающих электрооптическим эффектом.

Электрооптический эффект заключается в изменении показателей преломления диэлектрика под воздействием электрического поля.

Материалы с линейным электрооптическим эффектом. Линейным электрооптическим эффектом обладают кристаллы, не имеющие центра симметрии. Кристаллы, используемые в качестве модуляторного лазерного излучения, должны удовлетворять следующим требованиям: оптическая однородность, особенно в рабочем диапазоне температур; малое полуволновое напряжение; хорошие электрические характеристики в рабочем интервале частот и температур; устойчивость к действию лазерного излучения и факторов окружающей среды; технологичность

Материалы с квадратичным электрооптическим эффектом. Квадратическим электрооптическим эффектом обладают кристаллы, имеющие центр симметрии, и изотропные среды. К таким материалам относятся кристаллы перовскитов. К жидкостям с квадратичным электрооптическим эффектом относятся нитробензол, сероуглерод и др.

Материалы с динамическим электрооптическим эффектом рассеяния света. Динамическим эффектом рассеяния света обладают материалы, у которых под воздействием внешнего электрического поля непрерывно хаотично изменяется показатель преломления диэлектрика. Эти материалы составляют особый класс электрооптических материалов, жидкокристаллическое состояние которых было открыто в 1888 г.

Жидкокристаллическое состояние- это термодинамически устойчивое агрегатное состояние, при котором вещество находится в промежуточном состоянии между твердым кристаллом и жидкостью и сохраняет анизотропию физических свойств твердых кристаллов и текучесть жидкостей. Жидкокристаллическое состояние существует лишь в определенном интервале температур между точкой кристаллизации и точкой превращения вещества в изотропную жидкость.

Лекция 8

Проводниковые материалы

Медь и её сплавы

Медь и её сплавы находят широкое применение в электротехнике, электронике, приборостроении, литейном производстве, двигателестроении.

Так, 50% полученной меди потребляется электротехнической и электронной отраслями промышленности. Она стоит на 2ом месте (в след за алюминием) по объёму производств цветных металлов.

Она обладает ценными техническими и технологическими свойствами: высокими электро – и теплопроводностью, достаточной коррозионной стойкостью, хорошо обрабатывается давлением, сваривается всеми видами сварки, легко поддаётся пайке, прекрасно полируется. У чистой меди небольшая прочность и высокая пластичность.

Недостатками меди являются её высокая стойкость, значительная плотность, большая усадка при литье, горячеломкость, сложность обработке резанием.

Температура плавления меди 1083 градусов по Цельсию, плотность 8,94 Мг/м³. Она обладает ГЦК решёткой, диамагнитна и не имеет полиморфизма. Удельное электрическое сопротивление меди равно 0,0178 мкОм*м. Нашей промышленностью производится 11 марок меди с различным содержанием примесей. В электротехнике применяют бескислородную медь марок МООб (99,99%Cu) и МОб(99,97% Cu), в электротехнике и металлургии МО(99,95% Cu), М1(99,9% Cu), М2 (99,7% Cu) и другое.

По характеру взаимодействия с медью легирующие элементы и примеси разделяют на три группы:

1. Элементы (Ag, Al, As, Au, Cd, Fe, Ni, Pt, P, Sb, Sn, Zn), взаимодействие с медью с образованием твёрдых растворов. Они повышают её прочность, но при этом существенно уменьшаются значения (в первую очередь из-за присутствия сурьмы и мышьяка) тепло- и электропроводности.
2. Элементы (Bi, Pb), практически не растворимы в меди в твёрдом состоянии и образующие с ней легкоплавкие эвтектик. Возникновение эвтектик по границам зёрен приводит к разрушению слитков меди в процессе их горячей прокатки (явление красноломкости). Повышенное (более 0,005%) содержание висмута вызывает хладноломкость меди.
3. Элементы (Se, S, O, Te и др.), образующие с медью хрупкие химические соединения (например, Cu₂O, Cu₂S). Увеличение содержания серы в меди, с одной стороны, обеспечивает повышение качества её механической обработки (резанием), с другой стороны, вызывает хладноломкость меди. Присутствие кислорода в меди является причиной её «Водородной болезни», проявляющейся в образовании микротрещин и разрушений при отжиге ($t > 400$ градусов) в водород содержащей среде. В данном случае водород, активно диффундирующий в металл, отнимает кислород у окиси меди Cu₂O с образованием паров воды. В металле возникают области с высоким давлением, вызывающим разрушение материала. Сплавы меди с цинком называют латунями, томпаками (до 10% Zn) или полутомпаками (10-20% Zn); за исключением сплавов с никелем, все другие её сплавы называют бронзами.

Алюминий благодаря его сравнительно большой проводимости и стойкости к атмосферной коррозии является вторым после меди проводниковым материалом. Алюминий относится к группе легких металлов, поскольку его плотность равна 2700 кг/м³ т.е. он в 3,3 раза легче меди. Алюминий метал серебристо-белого цвета, имеет температуру плавления 658 °С, малую твердость и сравнительно небольшую механическую прочность при растяжении $\sigma_p = 90/147$ МПа. Кроме того, обладает более высоким, чем медь, увеличенным коэффициентом температурного расширения ($24 \cdot 10^{-6}$ °С), что является его недостатком.

На воздухе алюминий очень быстро покрывается тонкой пленкой оксида (Al_2O_3), которая надежно защищает его от проникновения кислорода воздуха. Так как эта пленка обладает значительным электрическим сопротивлением, то в плохо зачищенных местах соединений алюминиевых проводов могут быть большие переходные сопротивления.

При увлажнении мест соединений алюминиевых проводов с проводами из других металлов могут образовываться гальванические пары. При этом алюминиевые провода разрушаются возникающими местными гальваническими токами. Чтобы избежать образования гальванических пар, места соединений тщательно зачищают от влаги. Чем выше химическая чистота алюминия, тем лучше он сопротивляется коррозии.

Отечественной промышленностью выпускается проводниковый алюминий различной степени чистоты 13 марок. В марках алюминия высокой чистоты примесей содержится не более 0,005%. Из такого алюминия изготавливают электроды электролитических конденсаторов, а также алюминиевую фольгу. Проволоку для проводов изготавливают из алюминия, содержащего не более 0,3 и 0,5%. Алюминиевые провода и токопроводящие детали можно соединять друг с другом горячей или холодной сваркой, а также пайкой, но с применением специальных припоев и флюсов. Холодную сварку производят в специальных устройствах, в которых защищенные поверхности алюминиевых деталей соприкасаются друг с другом при давлении примерно 1000 МПа. При этом происходит диффузия кристаллов одной из соединяемых деталей в другую, в результате чего они надежно соединяются. Листовой алюминий широко применяют для экранов.

Длительно допустимая температура проводникового алюминия при использовании его на воздухе не должна превышать 300 °С.

Серебро относится к группе благородных металлов, не окисляющихся на воздухе при комнатной температуре. Интенсивное окисление серебра начинается при температуре выше 200 °С. Как и все благородные металлы, серебро отличается высокой пластичностью, позволяющей получать фольгу и проволоку диаметром до 0,01 мм. Кроме того, серебро обладает наивысшей проводимостью.

Основные характеристики проводникового серебра следующие: плотность 10500 кг/м³, температура плавления 960,5 °С, КТР=19,3·10⁻⁶ 1/°С; изделия из мягкого серебра- σ_p =150/180 МПа.

По сравнению с медью и алюминием серебро применяют ограниченно в сплавах с медью, никелем или кадмием- для контактов в реле и в других приборах на небольшие токи, а также в припоях ПСр 10, ПСр 25 и др.

Вольфрам относится к группе тугоплавких металлов и широко применяется в электротехническом производстве в качестве износостойкого материала для электрических контактов и деталей в электровакуумных приборах.

Вольфрам- металл серого цвета, обладающий очень высокой температурой плавления и большой твердостью, получают методом порошковой металлургии. Для этого из частиц вольфрама прессованием в стальных пресс-формах получают заготовки- стержни, которые подвергают спеканию при 1300 °С.

Спеченные вольфрамовые стержни имеют еще зернистое строение и хрупки, поэтому их нагревают до 3000 °С. Для получения механически прочного металла стержни подвергают многократной ковке и волочению с перемежающимися периодами обжига. В результате такой обработки вольфрам приобретает волокнистое строение, обеспечивающее ему высокую механическую прочность и пластичность.

Из вольфрама изготавливают проволоку диаметром до 0,01 мм. Окисление вольфрама на воздухе начинается при температуре от 400 °С и выше. В вакууме вольфрамовые детали могут работать при температуре до 2000 °С.

Основные характеристики вольфрама следующие: плотность 19300 кг/м³, температура плавления 3380 °С; изделий из отожженного вольфрама- σ_p =380/500 МПа. Температурный коэффициент сопротивления = 0,0046 1/°С.

Проводниковые материалы высокого сопротивления.

Проводниковые материалы высокого сопротивления представляют собой сплавы металлов, обладающих большим удельным сопротивлением и малым температурным коэффициентом удельного сопротивления; что позволяет создавать из них термостабильные резисторы и другие изделия, электрическое сопротивление которых практически не зависит от температуры.

Таковыми сплавами являются твердые растворы металлов с неупорядоченной структурой. Основные представители этой группы проводниковых материалов - сплавы меди с никелем, известные под названиями манганин и константан.

Манганин- сплав 84-86 % меди, 2-3% никеля и марганца 12-13%. Цвет манганина светло-оранжевый, плотностью 8400 кг/м^3 , температура плавления 960°C .

Основные характеристики мягких изделий из манганина: $\sigma_p=450/550 \text{ МПа}$. Для увеличения удельного электрического сопротивления манганина до $1,5\text{-}2 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ в его состав вводят повышенные количества марганца и никеля, уменьшая содержания меди.

Достоинством манганиновых изделий является то, что их электрическое сопротивление очень мало зависит от температуры, а также весьма малая термо-ЭДС в контакте с медью.

Для стабилизации электрических характеристик манганиновых изделий их подвергают тепловой обработке в вакууме при 400°C и последующей длительной выдержке при комнатной температуре. Это повышает однородность сплава и стабилизирует его свойства.

Наибольшая допустимая температура для изделий из стабилизированных сортов манганина 200°C , из нестабилизированных - 60°C . При повышении этих температур происходит необратимое изменение свойств манганиновых изделий.

Из манганина изготавливают мягкие и твердотянутые проволоки диаметром $0,02\text{-}6 \text{ мм}$ и ленты толщиной до $0,08 \text{ мм}$ и шириной до 270 мм . Кроме того, выпускают манганиновые обмоточные провода с эмалевой изоляцией, с изоляцией из натурального шелка, а также изолированные эмалью и одним слоем натурального шелка. Манганиновые изделия применяют в производстве резисторов и потенциометров высоких классов точности.

Константан- сплав 58-60% меди, 32-40 % никеля и 1-2 % марганца. Цвет константана серебристо-желтый, плотностью 8900 кг/м^3 , температура плавления 1260°C , $\text{КТР}=1,4\cdot 10^5 \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Температурный коэффициент удельного сопротивления изделий из константана $(0/6)\cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, т.е. электрическое сопротивление многих составов константана при изменении температуры не изменяется.

Из константана изготавливают мягкие и твердые изделия: проволоку диаметром от $0,03$ до 5 мм и ленту толщиной до $0,1 \text{ мм}$. Изолированную константановую проволоку в паре с медной применяют для изготовления термопар. Константановые изделия могут использоваться при температурах не выше 500°C .

Жаростойкие проводниковые материалы.

Жаростойкими проводниковыми материалами являются сплавы на основе никеля, хрома и некоторых других компонентов. Жаростойкость, т.е. неокисляемость этих сплавов при высоких температурах, обусловлена образованием на их поверхности оксидной пленки большой плотности, исключающей дальнейший доступ кислорода. Основой жаростойких оксидных пленок являются оксид хрома Cr_2O_3 и закись никеля NiO , которые при высоких температурах не испаряются с поверхности сплава. Жаростойкие проводниковые материалы на основе никеля, хрома и алюминия, соответственно называемые нихромами, представляют собой твердые растворы металлов с неупорядоченной структурой и поэтому обладают большими удельными сопротивлениями и малыми температурными коэффициентами сопротивления.

В марках сплавов буквы обозначают главные части сплава: (Х), никель (Н), алюминий (Ю) и титан (Т). Цифра, стоящая за буквой, указывает среднее количество этого металла в сплаве. Так, в нихроме марки Х20Н80 содержится 20 % хрома и 80 % никеля (по массе).

Состав и основные характеристики некоторых широко применяемых жаростойких сплавов приведены в таблице 15.

Кроме основных компонентов, приведенных в табл. 15, в состав жаростойких сплавов входят примеси, которые вызывают некоторую хрупкость проволоки и лент, изготовленных из этих сплавов. При производстве проводниковых сплавов содержание примесей стараются свести к минимуму.

Основные области применения изделий из жаростойких сплавов (проволока и ленты) – электронагревательные приборы, реостаты и резисторы.

Металлокерамические материалы и изделия.

Материалы, получаемые прессованием из металлических порошков с последующим спеканием их при высоких температурах (1000-1400 °С), называют металлокерамическими.

Исходные порошкообразные массы состоят из двух или более порошков различных металлов, из которых один должен обладать более высокой температурой плавления. При высокотемпературной обработке – спекание изделий из порошкообразной массы – более легкоплавкие порошки плавятся и заполняют поры между частицами тугоплавкого металла. В результате получают монолитные металлокерамические изделия.

В других случаях, наоборот, нужно получить пористые металлокерамические изделия, например подшипники, фильтры и т.д. Для этого применяют твердофазное спекание частиц порошков металла, обладающих примерно одинаковой температурой плавления металлографитных щеток для электрических машин, электрических контактов и других деталей.

Описанные способы получения изделий из спрессованных порошкообразных масс с последующим спеканием их частиц при высоких температурах относятся к порошковой металлургии. Методом порошковой металлургии применяют в тех случаях, когда нельзя получить изделия из сплавов особо чистых металлов или когда необходимо получить изделия из сплава металлов с неметаллами. Кроме того методы порошковой металлургии позволяют получить изделия точно заданных размеров без последующей механической обработки, что резко снижает потери в виде отходов металла.

В электротехническом производстве методы порошковой металлургии широко применяются для изготовления электроугольных изделий, некоторых видов магнитных материалов и сильно точных электрических контактов.

По сравнению с металлическими контактами из серебра, меди, вольфрама и сплавов металлов металлокерамических контактов обладают большой износостойкостью, допускают большие силы сжатия и стойки к эрозии. В электрических аппаратах низкое напряжение широко применяют контакты из металлокерамического материала на основе порошков серебра и оксидов кадмия, обладающие характерными свойствами металлокерамических изделий. Кроме того, они могут надежно работать в условиях тропического климата.

В качестве силовых дугоразмыкающих контактов используют металлокерамические детали, изготавливаемые из порошков серебра, вольфрама (40-50%) и никеля (2-3%), обладающие пластичностью и допускающие все виды механической обработки.

Металлокерамические контакты, изготавливаемые из порошков меди и графита, отличаются высокой устойчивостью к свариванию при размыкании больших токов (30000-100000 А). Это зависит не только от состава и структуры металлокерамического материала на основе порошков меди и графита (3-5%), но и наличия в нем 10-15% пор. При производстве металлокерамических изделий количеством пор в них можно изменять в широких пределах. Пористость металлокерамических контактов на небольшие токи не должна превышать 2-5%. Это достигается повторным прессованием металлокерамических изделий с последующей тепловой обработкой – отжигом.

Электроугольные изделия

К электроугольным изделиям относят щетки для электрических машин, контактные детали, электроосветительные угли и др.

Электроугольные изделия изготавливают методами порошковой технологии из смеси углеродистых материалов: графита, кокса, сажи, антрацита. В исходный состав некоторых электроугольных изделий входят также металлические порошки. Кроме того, в производстве электроугольных изделий применяют связующие вещества – каменноугольные, бакелитовые, кремнийорганические и другие смолы.

Углеродистые материалы, за исключением графита и сажи, прокаливают при 1200-1300⁰С для удаления летучих веществ и уменьшения объемной усадки получаемых электроугольных изделий. Затем углеродистые материалы измельчают в дробилках до порошкообразного состояния. Взятые в определенном соотношении исходные порошкообразные материалы тщательно смешивают, вводят в них связующие вещества, перемешивают и при 110-230 ⁰С пропускают через специальные смесители.

Полученную исходную электроугольную массу сушат, а затем размалывают и просеивают через сито, получая прессовочный порошок. Прессованием в стальных пресс-формах из этого порошка изготавливают различные электроугольные изделия или заготовки, из которых распиливанием и шлифованием получают электрощетки и другие изделия. Электроугольные изделия прессуют при комнатной температуре или при 180-210⁰С. Применяя связующее, размягчающееся или полимеризующееся при повышенных температурах, прессованием производят при повышенных температурах. Прессуют электроугольные изделия при давлениях от 100 до 300 МПа.

Изделия большой длины изготавливают выдавливанием нагретой исходной пластичной массы через стальной мундштук винтового пресса. Полученные изделия или их заготовки подвергают высокотемпературному обжигу в специальных печах в интервале температур от комнатной до 1200 – 1300 ⁰С. При обжиге происходит спекание – соединение частиц исходных материалов и цементация их коксом, образующимся из связующих органических веществ.

В результате обжига электроугольные изделия приобретают механическую прочность и способность к механической обработке, но уменьшается их удельное электрическое сопротивление. Электроугольные изделия, содержащие сажу, кокс и другие неграфитовые компоненты, после обжига подвергают дополнительной термической обработке (2400 – 2800 ⁰С), называемой графитизацией. При этом неграфитовые компоненты в изделиях превращаются в графит, а большинство примесей испаряется. В результате графитизации электрощетки (группы ЭГ) и другие изделия приобретают некоторую мягкость, уменьшается их коэффициент трения и резко снижается удельное электрическое сопротивление.

Полученные после графитизации и механической обработки электроугольные изделия обладают значительной пористостью (до 30%), поэтому их пропитывают лаками или воскообразными веществами, а в некоторых случаях – расплавленными металлами (олово, свинец и т.д.). Пропитку производят при 80 – 200 ⁰С и выше жидким пропитывающим веществом. Пропитка устраняет пористость и уменьшает гигроскопичность электроугольных изделий, а иногда позволяет ввести в них смазочные вещества. Пропитка металлами резко увеличивает механическую прочность электроугольных изделий и повышает их проводимость.

Электроугольные изделия подвергают механической обработке для придания им окончательной формы и необходимой шероховатости поверхности. Заготовки электрощеток и других изделий разрезают на мелкие части фрезами или тонкими карборундовыми кругами на специальных станках. Затем в изделиях сверлят отверстия под гибкие соединительные провода.

Некоторые типы электрощеток и осветительных углей после механической обработки меднят, покрывая часть их поверхности тонким слоем меди для создания надежного электрического контакта между телом электрощетки и щеткодержателем в электрической машине. Слой меди имеет толщину 10 – 15 мкм. Гибкие провода крепят в теле электрощеток развальцовкой, пайкой или запрессовкой. Затем проверяют размеры, твердость и механическую прочность и удельное электрическое сопротивление электрощеток, падение напряжения между щеткой и коллектором, коэффициент трения, переходное сопротивление между токоподводящим проводом и электрощеткой и др. Наибольшее применение среди электроугольных изделий имеют щетки для электрических машин и контактные детали. Различают следующие виды щеток: графитные, угольно – графитные, металлографитные и электрографитированные.

Графитные щетки, изготавливаемые из натурального графита, отличаются мягкостью, не вызывают шума при работе и применяются при окружных скоростях от 20 до 35 м/с. Их удельное электрическое сопротивление 70 – 170 мкОм * м.

Угольно – графитные щетки, изготавливаемые из графита, сажи, кокса и связующих смол, обладают повышенной твердостью, механической прочностью, а также абразивностью и поэтому могут очищать оксидные пленки на коллекторах и кольцах электрических машин. Эти щетки применяют при окружных скоростях от 10 до 30 м/с. Их удельное сопротивление 100 – 3000 мкОм * м.

Металлографитные щетки, изготавливаемые из порошков графита и меди, обладают малым удельным электрическим сопротивлением 0,04 – 0,3 мкОм * м, щетки с пониженным содержанием меди имеют удельное сопротивление 5 – 28 мкОм * м. Эти щетки применяются при окружных скоростях 30 – 40 м/с.

Электрографитированные щетки изготавливают из графита, кокса, сажи и связующих смол. После прессования и обжига в печах щетки поступают в электрические печи для графитизации при 2500 °С. Состав щеток при этом обогащается графитом, что обеспечивает их повышенную механическую прочность и возможность использования при повышенных окружных скоростях (40 – 90 м/с). Удельное электрическое сопротивление щеток 12 – 75 мкОм * м. Такие щетки применяют в электрических машинах с тяжелыми условиями коммутации.

Электроугольные электроды, отличающиеся стойкостью к электрической дуге, очень медленно окисляются, не горят, не плавятся до температуры 3800 °С и широко применяются в электрических аппаратах большой мощности.

Контактные детали, применяемые в электровозах, троллейбусах и других токосъемных устройствах, изготавливают из электроугольных и медно – графитных масс. Эти изделия имеют очень малое удельное электрическое сопротивление 0,02 – 0,05 мкОм * м.

Сверхпроводники и криопроводники

Основные свойства и применение сверхпроводников:

Как уже указывалось, электрическое сопротивление любого металлического проводника с понижением температуры уменьшается. У некоторых металлов и сплавов помимо такого нормального уменьшения электрического сопротивления при охлаждении наблюдается новое свойство: при температуре от 10 К (-263 °С) и ниже электрическое сопротивление резко падает до нуля. Это явление называют *сверхпроводимостью*, а материалы, у которых оно наблюдается, – *сверхпроводниками*. Температура, при которой совершается переход материала в сверхпроводящее состояние, называют *критической температурой* $T_{кр}$ сверхпроводникового перехода.

Явление сверхпроводимостью было открыто в 1911 г. Галанским ученым Камерлинг-Оннесом, который исследовал электрическое сопротивление ртути при низких температурах. При этом было установлено, что при температуре 4,2 К* (-268,8 °С) электрическое сопротивление ртути низко снизилось практически до нуля и его невозможно было измерить. Если взять замкнутую цепь (кольцо) из металла в

сверхпроводящем состоянии при критической температуре $T_{кр.}$ и возбудить в этой цепи ток, то он будет циркулировать в ней очень долго.

К настоящему времени обнаружено 27 суперпроводников в виде чистых металлов (алюминий, свинец, теллур, ниобий, цинк, молибден и др.) и более тысячи сплавов металлов. Основные сверхпроводниковые материалы представлены в таблице 24.

Таблица 24 Основные свойства некоторых сверхпроводников

Материалы	$T_{кр.}, K$	$B_{кр.}$
Алюминий	1,19	0,0099
Ванадий	5,3	0,1370
Галлий	1,09	0,0051
Иридий	0,14	0,0020
Кадмий	0,56	0,0030
Ниобий	9,22	0,1944
Олово- α	3,72	0,0309
Рений	1,7	0,0198
Титан	0,4	0,0100
Цинк	0,91	0,0053
Цирконий	0,55	0,0047
Сплав 44% ниобий и 56% титан	8,7	-----
Сплав 50% ниобий и 50% циркония	9,5	-----
Сплав ниобий, алюминия и германия	20,7	-----

*4,2 К- температура кипения жидкого гелия (гелиевая температура)

Следует отметить, что такие проводники электрического тока, как серебро, медь и золото, свойством сверхпроводимости не обладают. Свойством сверхпроводимости не обладают также ферромагнетики: железо, никель, кобальт и их сплавы.

Как следует из таблицы 24 , самую высокую критическую температуру среди чистых металлов имеет ниобий (9,22 К), а самую низкую иридий (0,14 К).

Критическая температура сверхпроводников зависит от их химического состава, кристаллической структуры и других факторов.

Характерным свойством сверхпроводников является то, что в эти материалы, когда они находятся в состоянии сверхпроводимости , внешнее магнитное поле не проникает* . Следовательно, являясь материалами парамагнитными ($\mu=1$) , сверхпроводники становятся материалами диамагнитными, у которых $\mu=0$ и магнитная индукция внутри сверхпроводника тоже становится равной нулю ($B=0$). Таким образом, в момент перехода сверхпроводника в сверхпроводящее состояние внешнее магнитное поле вытолкнется из него.

При этом магнитная индукция в сверхпроводнике равно нулю.

Исследования показали, что при воздействии на сверхпроводники даже слабого внешнего магнитного поля их сверхпроводимость исчезает. Такие сверхпроводники называют *сверхпроводниками первого рода*. К ним относятся все сверхпроводящие чистые металлы, за исключением ниобия Nb , ванадия V , технеция Tc. В таблице 24 приведены критические значения магнитной индукции $B_{кр.}$ при $T=0$ К чистых металлов. По достижении этих значений магнитной индукции сверхпроводимость этих металлов исчезает и они ведут себя как обычные проводники. Это ограничивает их применение. второго рода. Наряду со сверхпроводниками первого рода были открыты сверхпроводники второго рода. К ним относятся все сверхпроводящие сплавы и некоторые чистые металлы: ниобий, ванадий, технеций. Сверхпроводники второго рода отличаются от сверхпроводников первого рода более высокими значениями критической

температуры $T_{кр}$ и магнитной индукции $B_{кр}$. Кроме того, критический ток в сверхпроводниках второго рода можно увеличить с помощью примесей, вызывающих изменение их структуры. Недостатком сверхпроводников второго рода является то, что они теряют свойство сверхпроводимости в определенном интервале напряженностей магнитного поля ($H_{кр1}$, $H_{кр2}$).

Этого недостатка лишены сверхпроводники третьего рода, отличающиеся от сверхпроводников второго рода составом и неоднородностью структуры. Это позволяет получать очень большие критические токи (плотность тока выше 10^5 А/см²) в сильных магнитных полях, индукция которых составляет от 10 до 50 Тл и открывает возможность практического применения сверхпроводников третьего рода в электротехнике. К сверхпроводникам третьего рода относятся соединения ниобия с оловом ($NbSn_3$), с титаном ($NbTi$), а также цирконием и титаном ($NbZrTi$) и др.

Одно из основных применений сверхпроводников - создание на их основе мощных сверхпроводящих соленоидов, позволяющих получать магнитные поля, индукция которых равна 20 Тл и более. На охлаждение такого соленоида до температуры 4,2 К необходимо в 1000 раз меньше энергии, чем для питания током обычного электромагнита той же мощности.

Применение сверхпроводящих обмоток в электрических машинах и трансформаторах позволяет изготавливать их без стальных магнитопроводов и сердечников, так как индукция магнитных полей, создаваемых сверхпроводящими обмотками, значительно превышает индукцию, создаваемую сердечниками из ферромагнитных материалов. Наряду с этим при наличии сверхпроводящих обмоток полностью возмещает тепловые потери. Все это существенно уменьшает габариты и массу электрических машин и трансформаторов. Явление отталкивания двух сверхпроводников друг от друга (вследствие отталкивания двух магнитных полей) позволяет создать опоры без трения, следовательно, без потерь – в электрических машинах и в других механизмах.

Разработаны первые конструкции сверхпроводящих кабелей, которые позволяют в значительной степени увеличить передаваемые без потерь энергии. Особенно большие работы проведены по разработке сверхпроводящих обмоточных проводов. И изготавливают из сплавов типа твердых растворов на основе ниобия и циркония $NbZr$, ниобия и титана $NbTi$, или трехкомпонентного сплава ниобия-титана-циркония $NbTiZr$ -наиболее технологичного. Из сверхпроводящих сплавов можно получить провода диаметром 0,2-0,4 мм и более.

Перечисленные сверхпроводящие материалы позволяют получать легко деформируемые провода. Наряду с перечисленными сплавами, представляющими собой твердые растворы металлов, находят также применение сплавы, представляющие собой интерметаллические соединения. Они отличаются высокими характеристиками, т. е. более высокой критической температурой (18,2-20,2 К), большими критической индукцией магнитного поля (24,5 Тл при 4,2 К) и допустимой плотностью тока (до $2 \cdot 10^6$ А/см²). Из этих сплавов нашли применение станиид ниобий $NbSn_3$ и германид ванадия V_3Ge .

Недостатком этих и других интерметаллических соединений и хрупкость и трудность получения из них проводов. Изготовленные из этих проводов обмотки не допускают дальнейших деформаций.

Обмоточные провода из сверхпроводящих сплавов выпускают эмаль-лаковой изоляцией на основе полиамидов, с изоляцией в виде монолитного слоя фторопласта, а также с изоляцией из нитей и пленок лавсана и других полимеров.

Основные свойства криопроводников и их применение.

Криопроводники, или гиперпроводники, - это металлы, обладающие низким электрическим сопротивлением при низких температурах, но выше критических температур сверхпроводников. Это температуры жидкого водорода (20,4 К), жидкого неона (27,3 К) и жидкого азота (77,4 К), при которых электрическое сопротивление

криопроводников резко уменьшается. Объясняется это резким снижением интенсивности колебания кристаллической решетки, что уменьшает рассеяние электронов, составляющий ток в металлических проводниках.

Степень рассеяния электронов в этом случае будет определяться только частицами примесей, содержащихся в металлическом криопроводнике. Поэтому в качестве криопроводников применяют проводниковые металлы высокой химической чистоты: особо чистые медь ($\text{Cu} \geq 99,99\%$), алюминий ($\text{Al} \leq 99,999\%$), серебро ($\text{Ag} \leq 99,99\%$), бериллий ($\text{Be} \leq 99,95\%$). Эти криопроводники применяют в отожженном (мягком) состоянии, что повышает их проводимость.

Обмотки электрических машин, трансформаторов и электрических аппаратов, изготовленные из криопроводников и работающих при криогенных температурах, допускают большие плотности тока и обладают малыми потерями. Это позволяет значительно уменьшить габариты и массу электрических машин и аппаратов (в криогенном исполнении) и существенно повысить их КПД.

Припой и флюсы.

повышенной механической прочностью и стойкости к атмосферной коррозии и применяются для пайки алюминиевых проводов, а также для других деталей из алюминия и его сплавов. Медно-цинковые припои обладают хрупкостью, не стойки к вибрациям и ударным нагрузкам, но электрическое сопротивление получаемых на их основе швов очень мало. Эти припои используют для пайки деталей из меди, латуни, бронзы и стали. Металлы или сплавы, применяемые в качестве связующего вещества при пайке металлических частей, называют припоем. Припой должны иметь температуру плавления значительно ниже, чем соединяемые им металлические части. Припои делятся на легкоплавкие и тугоплавкие. Легкоплавкие, или мягкие, припои имеют температуру плавления ниже 500°C , а тугоплавкие, или твердые, - выше 500°C .

В марках припоев буквы обозначают: П (на первом месте) – припой, О- олово, Су- сурьма, С- свинец, А- алюминий, Ср- серебро, М- медь, Кр- кремний, Ви- висмут, Зл- золото, К- кадмий. Цифры расположенные за буквами, указывают процент содержания массы основного металла в припое. Например, ПОС-90- припой оловянно-свинцовый с содержанием олова 90% (по массе), ПОСК 50-18 содержит олова 50%, кадмия 18%, остальное свинец.

Наиболее широко применяют оловянно-свинцовые припои, которые обладают большой жидкотекучестью и легко проникают в самые тонкие швы, хорошо схватываются с большинством металлов (медью, латунью, сталями, цинком) и обеспечивают достаточно высокую прочность паяных швов. Припои с содержанием олова менее 15% применяют для пайки деталей, когда не требуется большая механическая прочность. Оловянно-свинцовые припои с большим содержанием висмута (50-57%) обладают наиболее низкой температурой плавления (79-95%), но паяные им швы хрупки.

Тугоплавкими припоями являются медно-цинковые (ПМЦ-54, ПМЦ-48 и др.) и медно-серебряные (ПСр-72, ПСр-70, ПСр-50 и др.) сплавы, а также сплавы алюминия с медью, цинком и кремнием. Наиболее широко применяют медно-серебряные припои, которые обладают малым удельным электрическим сопротивлением и поэтому используются для пайки токопроводящих частей из черных и цветных металлов, которые ими хорошо смачиваются. При этом образуются механически прочные и коррозионно-стойкие паяные швы. Припой на алюминиевой основе с добавками меди, кремния и олова отличаются

При пайки кроме припоя необходимы флюсующие вещества – флюсы, назначение которых – очистка соединяемых поверхностей от оксидов и других загрязнений и их предохранения от окисления в процессе пайки. Флюсы могут представлять собой твердые порошкообразные вещества (бура, бурная кислота, канифоль и др.) или жидкости (водный раствор хлористого цинка, спиртовой раствор канифоли и др.). Иногда применяют полужидкие флюсы- пасты.

При пайки меди , латуни и бронз легкоплавкими припоями на свинцовой основе применяют флюсы, не вызывающие коррозии паяных швов,- канифоль, ее раствор в этиловом спирте и другие составы на основе канифоли. Так как канифоль является слабоактивным флюсом , соединяемые поверхности перед нанесением канифольного флюса должны быть тщательно защищены.

При пайки тугоплавкими припоями, плавящимися выше 500°C , канифоль и другие легко распадающиеся при высокой температуре флюсы применять нельзя. При высокотемпературной пайки стали , меди и медных сплавов (латуни, бронзы и др.) в качестве флюсов чаще всего используют буру $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ или ее смеси с борной кислотой H_3BO_3 и другими солями. Для пайки алюминия , легко окисляющегося на воздухе, применяют особо активные флюсы, способные растворять плотную пленку его оксидов, например состав из хлористого лития, фтористого натрия, фтористого цинка, хлористого цинка и хлористого калия.

При выборе флюса надо иметь в виду, что температура плавления твердого флюса должна быть ниже температуры плавления припоя, а температура пайки- ниже температуры термического разложения флюса. Во избежание коррозии швов, паяных твердыми припоями , остатки флюса должны быть удалены промывкой горячей воды с помощью щетки.

Клеи и вяжущие составы.

Клеи и вяжущие составы широко применяются в производстве электрических аппаратов, приборов и других видов электрооборудования. От клеев и вяжущих составов не всегда требуются хорошие электроизоляционные свойства. Эти материалы в первую очередь должны обладать свойством склеивания- прилипания к металлическим и неметаллическим материалом (адгезией).

Склеивание каких-либо двух материалов происходит в результате сцепления пленки клея с соединяемыми поверхностями. В результате химических реакций, протекающих в пленке клея, она превращается в твердое вещество, прочно соединяющие склеенные части. Сцепления пленки клея с поверхности склеивания материалов возникает не только в следствие химических реакций, но также в результате появления межмолекулярных и электростатических сил.

На прочность клеевого шва оказывает влияние толщина и сплошность клеевой пленки , ее объемная усадка склеивания , состав и структура склеиваемых материалов , а также подготовка их поверхностей. Клей должен целиком заполнять зазор между склеиваемыми частями без воздушных включений. Толщина клеевой пленки не должна быть очень большой, но должна обеспечиваться непрерывность клеевого слоя на всей площадке склеивания.

Чтобы обеспечить сплошную клеевую пленку оптимальной толщины и проникновения клея в поры материала, склеиваемые поверхности нужно предварительно подогнать друг к другу и тщательно очистить от загрязнений растворителем. Для лучшего склеивания многие материалы (металлы , пластмасса) подвергают пескоструйной обработке или ошкуриванию, что создает некоторую шероховатость склеиваемых поверхностей и обеспечивает повышения прочности клеевого шва. С этой же целью склеиваемые детали необходимо сжать с определенным давлением. Очень многие клеи отвердевают при нагреве до температуры $90-180^{\circ}\text{C}$ и выше.

Клеи составляют большую группу веществ. В электротехническом производстве применяют клеи на основе синтетических смол, отличающихся наибольшей клеящей способностью. Многие из этих клеев обладают хорошими электроизоляционными свойствами. Такими клеями являются глифталевые клеящие лаки, широко используемые для склеивания листочков в производстве слюдяной слоистой изоляции. Сюда же относятся бакелитовые лаки, широко применяемые в производстве слоистых электроизоляционных пластмасс (гетинакс, текстолит и др.).

Большое распространение имеют клеи БФ, представляющие собой спиртовые растворы бутварно-фенольных смол. Эти клеи выпускаются тех марок : БФ-2, БФ- 4, БФ-6, отличаются составом и имеют особенности, которые обуславливают их области применения. Так, клеи БФ-2 и БФ-4 обеспечивает высокую сопротивляемость клеевого шва вибрациям. Клей БФ-6 образует эластичный клеевой шов и поэтому рекомендуется для склеивания резин и тканей друг с другом и для приклеивания их к металлам и пластмассам.

Клеи БФ наносят в два три слоя на склеиваемые поверхности. Время сушки каждого слоя при температуре 1 ч . Склеиваемые детали соединяют друг другом , слегка притирают и помещают под пресс или в струбцину, чтобы обеспечить давление 0,4-2,0 МПа.

Отверждение клея происходит при 140-170⁰С (БФ-2 и БФ-4) и 90-100⁰С (БФ-6) в течение 1-3 ч. Увеличение время нагрева повышает прочность клеевого шва. Для выдержки клеевого шва при повышенных температурах склеиваемые помещают в термостат или применяют пресс с обогреваемыми плитами. Образующиеся при прессовании Соединяемых деталей подтеки клея удаляют.

В электротехническом производстве и при монтажных работах кроме клеев широко применяют вяжущие составы , которые представляют собой текучие массы, затвердевающие со временем . Они используются для склеивания.

При твердении портландцемента в воде его объемная усадка ничтожно мала, так как создаются хорошие условия для протекания под действием воды химических процессов (гидролиза и гидратации) между веществами, входящими в состав цемента. , непрерывное уплотнение образовавшегося цементного камня и его механическая прочность возрастает.

Цементно-песчаные составы должны равномерным изменением объема. В случае применения цемента, неравномерно изменяющегося в объеме в течение времени, в особенности при поглощении влаги из воздуха, может разрушиться как сам цементный слой, так и арматура изолятора. Поэтому испытание цемента на равномерность изменения объема обязательно.

Недостаток портландцемента- выделение из него в течение времени растворимой в воде свободной извести. Это может привести к нарушению связи цементной заделки с электрокерамическим материалом и арматурой, т. е. к разрушению изолятора.

Для защиты цементных заделок от выщелачивания водой (свободной извести) цементные швы с наружи покрывают водостойкими лаками и эмалями. Это необходимо также для того , чтобы предотвратить проникновение влаги внутри цементных заделок и замешивание компенсационных заделок, что снижает электрическую стойкость изоляторов.

Контактолы

Для получения электрических контактов в радиоэлектронике применяют токопроводящие пасты, клеи, эмали, объединяемые общим названием - *контактолы*. Они представляют собой композиции на основе эпоксидных и кремнийорганических смол с добавлением порошков металлов с высокой теплоэлектропроводностью. Скорость полимеризации контактолов зависит от состава и количества растворителя. Приготовленный состав хранится при температуре ниже нуля в парах растворителя. Контактолы обладают следующими свойствами; высокая прочность и эластичность; хорошие антикоррозионные свойства; низкая плотность ; удельное электрическое сопротивление в 5... 100 раз выше,

Чем у мягких припоев (удельное электрическое сопротивление ρ находится в пределах $1 \cdot 10^{-2} \dots 6 \cdot 10^{-4}$ Ом * см) . В зависимости от типа металлического наполнителя выделяют контактолы, содержащие серебро, никель, палладий, золото, посеребренный никель и др.

Серебросодержащие контактолы- пасты обладают следующими свойствами; высокое удельное электрическое сопротивление ($\rho = 1 \dots$

$6 \text{ мк Ом} \cdot \text{м}$), высокая стабильность свойств при климатических и механических воздействиях, хорошая адгезия к различным материалам (предел прочности при сдвиге $2,5 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$).

Токопроводящий клей АС-40В-пастообразная жидкость стального цвета, которая обладает следующими свойствами; удельное электрическое сопротивление $\rho = 0,01 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Токопроводящий клей ЭВТ- пастообразная однородная масса серого цвета, которая обладает следующими свойствами; удельное электрическое сопротивление $\rho = 0,005 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Никельсодержащие контактолы обладают; более низким удельным электрическим сопротивлением, чем серебросодержащие клеящие композиции;

хорошей адгезией к различным материалам (предел прочности при сдвиге $2 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$); низкой жизнеспособностью;

высокой стабильностью свойств при климатических и механических воздействиях.

Токопроводящий клей КН-1 - жидкая однородная масса черного цвета, которая обладает следующими свойствами; удельное электрическое сопротивление $\rho = 0,01 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Палладий содержащие контактолы- пасты, которые обладают высоким удельным электрическим сопротивлением $\rho = 10 \dots 20 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$; высокой стабильностью контактных соединений; хорошей адгезией ко всем металлам и ряду полупроводниковых материалов ($4 \dots 10 \text{ Н/м}^2$).

Материалы для подвижных контактов.

Все контактные материалы при работе подвергаются износу (разрушению). Принято различать механический,

химический и электрический износы.

Механический износ связан с истиранием и деформированием материалов контактирующих поверхностей

вследствие приложения определенной силы при ударе контактов и последующего контактного нажатия. Он зависит от свойств материала и конструкции контактного устройства.

Химический износ (коррозия) обусловлен химическим взаимодействием контактных материалов с окружающей средой, т.е. с появлением на их поверхности оксидных, сульфидных, карбонатных и других пленок с плохой электропроводностью.

Электрический износ(электрическая эрозия или обгорание) наблюдается только в разрывных и частично скользящих контактах.

К контактным материалам предъявляются следующие требования:

низкое переходное электрическое сопротивление (сопротивление в месте соприкосновения контактных поверхностей);

стойкость к износу;

постоянство переходного сопротивления в процессе работы.

Материалы для скользящих контактов.

Материалы для пружинных скользящих контактов

должны обладать следующими свойствами: высокая прочность и твердость, высокая упругость, низкое удельное электрическое сопротивление, малое падение напряжения на контакте, высокая стойкость к истиранию, выдерживают работу на больших скоростях, стойкость к окислению.

В качестве пружинных металлических контактных материалов применяют твердотянутую электролитическую медь, специальные сорта бронз (кадмиевые, кадмиево - оловянистые, бериллиевые), а также материалы соединения серебро - окись кадмия.

Электротехнические угольные материалы широко используют для изготовления щеток электрических машин, угольных электродов для гальванических элементов, дуговых печей.

Материалы для размыкающих контактов.

Материалы для размыкающих контактов работают в сложных условиях, поскольку в процессе работы между контактными поверхностями размыкающих контактов могут возникать электрические разряды в виде искры или дуги. Материалы для размыкающих контактов должны обладать следующими свойствами:

- низкое значение удельного электрического сопротивления;
- малое падение напряжения на контактах;
- стойкость к механическому и электрическому износу;
- не допускать эрозии (обгорания) контактирующих поверхностей;
- не допускать приваривания контактных поверхностей друг к друга под действием электрической дуги при размыкании контактов;
- постоянство контактного электрического сопротивления;
- легкая обработка;
- низкая стоимость;

Слаботочные (маломощные) размыкающие контакты изготавливают из благородных и тугоплавких металлов и сплавов на их основе типа твердых растворов (основные свойства этих материалов приведены).

Сплавы серебро-кадмий отличаются высокой эрозионной стойкостью вследствие высокой скорости гашения дуги между контактами за счет паров кадмия и кислорода.

Сильноточные (мощные) размыкающие контакты изготавливают из металлокерамических материалов.

Металлокерамика

Металлокерамические или порошковые сплавы получают из металлических порошков методом их прессования и последующего спекания при температуре ниже температуры плавления исходных материалов или с частичным расплавлением наиболее тугоплавкой составляющей смеси. Основным сырьем для получения металлокерамических изделий являются порошки вольфрама, титана, кобальта, марганца, хрома и других металлов и сплавов. Для получения порошков исходные материалы дробят и измельчают в шаровых (черные и цветные металлы) или вихревых мельницах (железо, медь, алюминий, серебро). В качестве вязких связующих материалов в смесь вводят кобальт или никель. В электродах, которые используются для герметизации корпусов микросхем ударной конденсаторной сваркой, применяют твердый сплав *эльконайт*, получают методом порошковой металлургии, пропитывая спрессованные вольфрамовые заготовки расплавленной медью, и выпускают в виде слитков цилиндрической формы.

Металлические покрытия.

Химическая коррозия возникает при воздействии на металл при высокой температуре находящихся в атмосфере газов и паров, а также жидких неэлектролитов (минеральное масло, керосин и др.).

Электрохимическая коррозия возникает в результате воздействия на металл электролитов-растворов солей, кислот, щелочей, дождевой, речной и морской воды.

Гальванические (электролитические) покрытия получают осаждением металлов при электролизе водных растворов соответствующих солей.

Гальванические покрытия получают под действием постоянного тока в кислых и цианистых электролитах.

Покрываемая деталь является отрицательным полюсом (катодом), а металлическое покрытие – положительным полюсом (анодом). Под действием ЭДС молекулы солей в водных растворах диссоциируют на электрически заряженные (положительно и отрицательно) частицы-ионы. Перенос ионов под действием ЭДС называют *электролизом*.

Металлизация – это процесс получения относительно толстого металлического покрытия. Толстые металлические покрытия получают погружением детали в расплавленный металл (горячая металлизация) или с помощью пистолета-распылителя (горячее распыление).

Вакуумные покрытия получают при нанесении тонкого слоя любого металла на поверхность металлических и неметаллических деталей в вакууме. При этом используют катодное распыление или вакуумное испарение. Вакуумное испарение находит более широкое применение, так как не имеет недостатков катодного распыления.

Химический способ применяют для получения металлических покрытий с помощью специальных растворов без электрического тока. Он основан на восстановлении ионов осаждаемого металла в результате взаимодействия с восстановителем. Наиболее широко применяют химическое никелирование и химическое меднение. Химическое меднение используют для металлизации пластмасс при изготовлении печатных плат.

Обмоточные провода

Провода для воздушных линий электрической передачи и контактной сети.

Наибольшее распространение при сооружении воздушных линий электропередачи имеют следующие голые провода: медные марки М однопроволочный сечением 4-10 мм² и многопроволочные сечением 16-400 мм²; алюминиевые марки А многопроволочный витой из алюминия марки АТ сечением 16-600 мм²; алюминиевый с сердечником из стальных проволок марки АС сечением 10-400 мм².

Для передачи электроэнергии на токоприемник электро-подвижного состава применяют медные контакты (троллейные) провода сечением 100 мм² для главных путей и 85 мм² – для станционных и других путей (рис 162). Медные или алюминиевые полосы, применяемые как электрические проводники в распределительных устройствах для передачи электроэнергии на близкие расстояния, называются шинами.

Обмоточные и эмалированные провода. Провода этой группы служат для изготовления обмоток электрических машин, аппаратов и приборов. Они производятся круглого и квадратного сечения из меди и алюминия, с эмалевой, волокнистой, пленочной и эмалево-волокнистой изоляцией. Прямоугольные провода дают лучшее заполнение при образовании обмоток катушек и других изделий.

Эмалированные обмоточные провода имеют толщину изоляции 0,005-0,07 мм. Их основные свойства – эластичность, нагревостойкость и электрическая прочность эмалевых покрытий. Провода с волокнистой и проволочной изоляцией имеют толщину изоляции от 0,05 до 0,22 мм. В качестве волокнистой изоляции применяется пряжа из хлопчатобумажных, шелковых, капроновых, асбестовых и стеклянных волокон.

Монтажные провода. Эту группу проводов применяют для соединения различных частей в электрических машинах и аппаратах. Токопроводящие жилы монтажных проводов изготавливают из меди, а изолируют изоляционной резиной, полихлорвиниловым пластиком, а также хлопчатобумажной, шелковой и капроновой пряжей. Чтобы в электрических устройствах можно было лучше отличать один провод от другого, изоляцию монтажных проводов окрашивают в различные цвета.

Установочные провода и шнуры. Установочные провода применяются в силовых осветительных установках для распределения электрической энергии и присоединения к сети потребителей тока: двигателей, электрических аппаратов и светильников. Медные или алюминиевые жилы установочных проводов изолируют электроизоляционной резиной и полихлорвиниловым пластиком. Провода с полихлорвиниловой изоляцией (рис 163) выпускают без защитных оболочек, так как полихлорвинил обладает высокой водостойкостью и негорючестью. Наибольший объем потребления установочных проводов и шнуров приходится на ремонт пассажирских вагонов и локомотивов. Поверх резиновой изоляции установочных проводов накладывают защитный покров в виде оплетки из хлопчатобумажной или шелковой пряжи и стекловолокна (рис 164). Установочные провода выпускают одно-, двух-, трех-, четырех- и многожильными на напряжение 220, 380, 500, 2000 и 3000 В.

Двухжильный провод в оплетке с особо гибкими медными жилами из скрученных мишуных нитей, покрытых слоем изоляционной резины, называют *осветительным шнуром*. Шнуры применяют для присоединения подвешенных токоприемников – настольных ламп, рефлекторов, телефонных трубок. Их выпускают на напряжение 220 В.

Обмоточные провода служат для изготовления обмоток электрических машин, аппаратов и приборов и выпускаются с жилами из проводниковых меди и алюминия, а также сплавов большого удельного сопротивления (манганина, константана, никрома и др.). Жилы обмоточных проводов могут иметь эмалевую, пленочную, волокнистую и эмалево-волокнистую изоляцию.

Провода с эмалевой изоляцией. Эмалевая изоляция по сравнению с пленочной и волокнистой имеет меньшую толщину (0,003—0,070 мм), что позволяет в тот же объем обмотки заложить большее количество проводов и тем самым увеличить мощность электрической машины или аппарата. Эмалевая изоляция представляет собой гибкое лаковое покрытие, полученное в результате отверждения сплошного слоя эмаль-лака, нанесенного на провод на специальных эмалировочных машинах.

К основному типу обмоточных проводов нагревостойкости класса А (105 °С) относятся ПЭВ-1, ПЭВ-2 и ПЭМ-1, ПЭМ-2 с механически прочной эмалевой изоляцией на основе поливинилацетатных смол. Эти провода широко применяют для изготовления обмоток электрических машин общепромышленного назначения. Так как изоляция проводов ПЭМ-1 и ПЭМ-2 стойка к нефтяному маслу, то их применяют также для изготовления обмоток маслонаполненных аппаратов.

Изоляцию нагревостойкости класса Е (120 °С) имеют обмоточные провода ПЭВТЛ-1 и ПЭВТЛ-2, эмалированные полиуретановыми термопластичными эмаль-лаками. Эмаль-лаки образуют механически прочное изоляционное покрытие проводов, размягчающееся при 160 °, что ограничивает их область применения (обмотки электрических машин и аппаратов малой мощности).

Особенность этих проводов — возможность лужения и пайки без предварительной зачистки изоляции, которая при пайке размягчается и в расплавленном виде является флюсующим веществом, обеспечивающим применение оловянно-свинцовых припоев. Более высокой нагревостойкостью (130 °С) и хорошими электроизоляционными свойствами обладают провода ПЭТВ, эмалированные полиэфирным лаком на основе лавсана.

Повышенная механическая прочность эмаль-лаковой изоляции этого типа позволяет механизировать намотку обмоток электрических машин и аппаратов, т. е. она хорошо выдерживает многократные перегибы и растяжения.

Изоляцию класса нагревостойкости F (155 °С) имеют провода ПЭТ-155 с эмаль-лаковой изоляцией на полиэфиримидной основе, обладающей хорошими изоляционными свойствами.

Для механизированной намотки катушек выпускаются провода марки ПЭТМ с эмаль-лаковой изоляцией той же нагревостойкости, обладающей повышенной механической прочностью.

Эмаль-лаковую изоляцию для работы при температуре 180—200 °С имеют провода марки ПЭТ-200. Эта изоляция изготавливается на основе полиимидов, которые обладают высокими электрическими и механическими свойствами.

Для работы при температуре 220 °С предназначены провода ПНЭТ-имид, имеющие медную никелированную жилу, покрытую эмаль-лаковой изоляцией на поли-имидной нагревостойкой основе, обладающей высокими электрическими свойствами.

Разработаны и применяются обмоточные провода ПЭЖБ с неорганической изоляцией (стеклоэмаль), которые могут работать при температуре 300 °С, а кратковременно — до 600 °С.

Провода с бумажной изоляцией изготавливают из медных и алюминиевых жил, имеющих изоляцию в виде обмотки из кабельной бумаги толщиной 0,10—0,12 мм. Основной областью применения этих проводов являются обмотки трансформаторов с внутренней масляной изоляцией. Бумажная изоляция, пропитанная маслом, обладает большой электрической прочностью (порядка 80 МВ/м). Толщина бумажной изоляции во много раз превосходит толщину эмаль-лаковой и имеет в пропитанном виде большую электрическую прочность.

Провода с волокнистой изоляцией изготавливают из медных и алюминиевых жил круглого и прямоугольного сечения. Изоляция жид представляет собой одинарную или двойную обмотку из хлопчатобумажной, шелковой пряжи, пряжи из синтетических (лавсан, капрон) или стеклянных волокон. Наибольшей нагревостойкостью обладают провода со стекловолокнистой изоляцией.

Толщина волокнистой изоляции намного превосходит толщину эмаль-лаковой, но электрическая прочность такой чистой изоляции, пропитанной лаками или компаундами, значительно больше. Обмотки, изготовленные из проводов с волокнистой изоляцией, требуют тщательной сушки и пропитки изоляционными лаками или компаундами.

Провода с эмалево-волокнистой изоляцией имеют эмалированную медную жилу круглого сечения поверх слоя эмали, который состоит из хлопчатобумажной, шелковой, лавсановой или стеклянной пряжи. Такая двойная изоляция обеспечивает повышенную механическую и электрическую прочность проводов.

Провода с эмалево-волокнистой изоляцией широко применяют для изготовления обмоток электрических машин и аппаратов, в которых могут быть повышенные механические нагрузки на обмоточные провода как в процессе изготовления обмоток, так и в процессе эксплуатации.

Наибольшими механической прочностью и сопротивлением истиранию обладает изоляция из лавсановых и капроновых волокон, а наиболее высокой нагревостойкостью — изоляция из стеклянной пряжи, наложенной на слой кремнийорганической эмали.

Лекция 9

Полупроводниковые материалы

Свойства и строение полупроводников.

Полупроводниковые материалы обладают проводимостью, которой можно управлять, изменяя напряжение, температуру, освещенность и другие факторы. По способности проводить электрический ток полупроводники занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Способность проводить электрический ток характеризуется удельным электрическим сопротивлением ρ или удельной электрической проводимостью γ . Диапазон значений удельного электрического сопротивления ρ для полупроводников при комнатной температуре составляет от $10^{-6} \dots 10^9$ Ом*м.

В отличие от проводников у полупроводников при уменьшении температуры их удельная электрическая проводимость уменьшается, а при стремлении к 0^0 К полупроводники прекращают проводить электрический ток и переходят в разряд диэлектриков. При повышении температуры удельная электрическая проводимость γ полупроводников резко возрастает.

Поведение полупроводника зависит также от его внутренней структуры. В проводниковых материалах проводимость связана с появлением свободных зарядов, что вызвано изменением температуры и внутренним строением проводника. Для появления свободных носителей заряда в полупроводниковом материале требуется внешняя энергия (тепловая, механическая нагрузка, облучение ядерными частицами, электрическое и магнитное поля и т. д.). Если носители заряда появились под действием тепла, то они называются равновесными. В результате воздействия на полупроводник других видов энергии образуются дополнительные неравновесные носители заряда.

Собственная проводимость полупроводников может быть рассмотрена на примере кремния, который является элементом IV группы Периодической системы элементов. Эти элементы образуют алмазоподобную модификацию гранцентрированной кубической решетки, в которой каждый атом, расположенный в узле кристаллической решетки, окружен четырьмя другими атомами и связан с ними ковалентной связью. Так как при ковалентной связи каждый внешний электрон принадлежит одновременно двум атомам, то внешние оболочки атомов содержат по восемь электронов. При этом все электроны внешних оболочек участвуют в образовании ковалентных связей и свободные носители, создающие электропроводимость отсутствуют. Для того чтобы электрон превратился в свободный носитель заряда, необходимо ему дополнительную энергию, достаточную для разрыва ковалентной связи. Такая энергия определяется шириной запрещенного слоя ΔW_a .

При разрыве ковалентной связи освободившейся электрон под действием тепловой энергии хаотически движется по объему полупроводника. На месте оторвавшегося электрона остается положительно заряженная незаполненная связь с зарядом, который равен заряду электрона, называется дыркой. На зонной диаграмме электрону соответствует зона проводимости W_c . А дырке – незанятое электроном состояние в валентной зоне W_v . При отсутствии внешнего электрического поля дырка. Как и электрон, совершает хаотические движения. При этом сама дырка, в отличие от электрона, не перемещается по кристаллу. Ее движение связано с тем, что за счет энергии тепловых колебаний решетки электрон соседней ковалентной связи может заполнить свободную ковалентную связь в атоме с дыркой. В результате этого атом, у которого заполняются все связи становится нейтральным, а в атоме, потерявшем электрон, образуется дырка. Таким образом создается впечатление движения дырок.

Подвижность электронов, как правило, выше подвижности дырок. Для кремния $\mu_n=0,145$ м²/(В*с), $\mu_p=0,145$ м²/(В*с).

Процесс образования свободных отрицательно заряженных электронов проводимости и положительно заряженных дырок проводимости называют генерацией электронно-дырочных пар.

Одновременно с генерацией электронно-дырочных пар в полупроводнике происходит и обратный процесс, этот процесс называют рекомбинацией носителей зарядов.

Примесная проводимость полупроводников обусловлена несовершенством кристаллической структуры полупроводника. Дефекты в кристаллической решетке вызывают образование дополнительных энергетических уровней внутри запрещенной зоны. Благодаря этому для перехода электрона с дополнительного уровня в зону проводимости или из валентной зоны на дополнительный уровень требуется энергия, меньше ширины запрещенной зоны ΔW .

Если в кристаллической решетке кремния находится атом примеси, который представляет собой элемент V группы Периодической системы элементов, например фосфор, то четыре из пяти валентных электронов фосфора будут участвовать в формировании ковалентных связей с соседними атомами основного элемента кремния. Пятый валентный электрон фосфора связан только со своим атомом, и прочность этой связи намного меньше прочности ковалентной связи. Для перехода этого электрона на дополнительный энергетический уровень W_d требуется энергия, много меньше энергии ширины запрещенной зоны ΔW . Для валентного электрона в кремнии энергия ионизации $W_d = 0,044$ эВ, $\Delta W = 1,12$ эВ. Оторвавшийся от атома фосфора электрон превращается в электрон проводимости. На месте оторвавшегося электрона образуется дырка, которую не могут заполнить электроны других атомов фосфора, так как концентрация его в кремнии очень мала и его атомы расположены далеко друг от друга. Следовательно, дырка остается неподвижной, дырочная проводимость в таком полупроводнике отсутствует и его проводимость носит электронный характер.

Полупроводники с преобладанием электронной электропроводностью называют электронными или *n*-типа. Электроны в полупроводнике *n*-типа называют основными носителями заряда. А дырки – неосновными носителями.

Если в кристаллической решетке полупроводника содержится III валентная примесь периодической системы элементов, например бора, то все три валентных электрона бора участвуют в образовании ковалентных связей с полупроводником. А одна связь полупроводника остается незадействованной (дырка) ее может заполнить электрон соседнего атома для этого электрон должен получить энергию гораздо меньшую чем энергия запрещенной зоны ΔW .

Дефекты в кристаллической решетке, которые образуют появление дополнительных дырок проводимости, называют акцепторными, а электропроводность, обусловленную акцепторной примесью-дырочной или *p*-типа.

Процесс введения примесей в полупроводник называют легированием.

Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках.

При прохождении света через полупроводник частицы света (фотоны) частично отражаются и частично поглощаются. Поглотив фотон, электрон переходит на более высокий энергетический уровень, если энергия этого фотона достаточна для перехода электрона в зону проводимости, то электрон переходит на уровень проводимости.

Максимальную длину волны, которую поглощает полупроводник, называют длинноволновой или красной границей. А проводимость, вызванную действием света, называют фотопроводимостью.

Электронные процессы на поверхности полупроводников.

На реальной поверхности полупроводников присутствуют различные макро- и микроскопические дефекты. Их появление вызвано следующими причинами: дислокацией, дефекты упаковки; при процессе механической обработки; поглощение из

окружающей среды посторонних молекул. Это приводит к тому, что параметры поверхностного слоя могут сильно отличаться от объемных параметров.

Контактные явления в полупроводниках.

Они возникают вокруг границы раздела контактного электрического поля.

Если одна область полупроводника обладает электронной проводимостью, а другая – дырочной, то границу между этими областями называют электронно-дырочным переходом или *p-n*–переходом. Получить *p-n* – переход при механической стыковке полупроводников с разными типами проводимости нельзя. Для получения *p-n*–перехода одну часть полупроводника легируют донорной, а другую – акцепторной примесью. При соприкосновении электроны диффундируют в *p*-область, где велика концентрация дырок, и рекомбинируют с дырками. Аналогично дырки диффундируют в *n*-область, где велика концентрация электронов. В результате этого у границы раздела *n*-области остаются некомпенсированные ионы донорной примеси, которые создают объемный положительный заряд. У границы раздела *p*-области некомпенсированные ионы акцепторов создают объемный отрицательный заряд. Таким образом, в области раздела полупроводников *n*-типа и *p*-типа образуется зона, содержащая свободные носители заряда. Эта область составляет толщину *p-n*-перехода. При этом образовавшийся положительный объемный заряд некомпенсированных ионов донорной примеси препятствует дальнейшей диффузии дырок из *p*-области в *n*-область.

Отрицательный объемный заряд ионов акцепторной примеси препятствует диффузии электронов в *p*-область. Таким образом некомпенсированные ионы примеси создают на границе раздела потенциальный барьер для основных носителей заряда. Для преодоления этого барьера основные носители должны обладать достаточной кинетической энергией. С помощью приложения внешнего поля высоту потенциального барьера можно увеличивать или уменьшать, меняя полярность.

При приложении к такой системе внешнего напряжения, когда напряженность $E_{\text{вн}}$ внешнего источника совпадает с напряженностью E_0 местного электрического поля, электроны в *n*-области и дырки в *p*-области будут перемещаться от границы раздела к электродам 1 и 2. При этом расширяются зоны, занятые электронами в полупроводнике *p*-типа и дырками в полупроводнике *n*-типа. Следовательно, электрическое сопротивление *p-n*-перехода сильно возрастает, т.е. образуется запирающий слой, и *p-n*-переход не будет пропускать ток. Фактически же через *p-n*-переход будет проходить весьма малый ток, обусловленный перемещением не основных носителей заряда и называемый обратным током.

В случае же, когда напряженность $E_{\text{вн}}$ внешнего источника направлена навстречу напряженности E_0 , местное электрическое поле заметно ослабевает и электроны из *n*-области полупроводника и дырки из *p*-области начинают перемещаться к *p-n*-переходу. Вследствие этого запирающий слой сужается, а его электрическое сопротивление резко уменьшается. В этом случае *p-n*-переход пропускает ток, который называют прямым, а его направление – прямым, или прямым.

Свойства электронно-дырочного перехода пропускать ток в одном направлении и не пропускать в другом используют в полупроводниковых выпрямителях. При приложении переменного напряжения *p-n*-переход пропускает ток только в течение одного полупериода, т.е. выпрямляет его.

Начиная с 300 В обратного напряжения *p-n*-переход пропускает очень малые обратные токи. Если же увеличивать обратное напряжение, то обратный ток с некоторого момента начнет сильно возрастать и может достигнуть такого значения, при котором произойдет пробой *p-n*-перехода.

Простыми называют такие полупроводники, основной состав которых образован атомами одного химического элемента. Большинство полупроводников являются кристаллическими веществами.

Кристаллические вещества состоят из элементарных ячеек (решеток).

Германий Ge.

Элемент IV группы периодической системы элементов Д. И. Менделеева. В земной коре содержание невысокое и составляет 0,001%

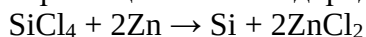
Получают германий в результате сложных химических реакций из продуктов сгорания бурого угля. В последствии его очищают зонной плавкой.

Германий легируют нейтральными, донорными и акцепторными примесями.

Свойства германия: атомная масса $m = 72,59$; число атомов в единице объема $4,45 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$; ширина запрещенной зоны при комнатной температуре $\Delta W = 0,75 \text{ эВ}$; удельное электрическое сопротивление $\rho = 0,68 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; плотность при комнатной температуре $D = 5,35 \text{ г/см}^3$; температура плавления при комнатной температуре $T_{\text{пл}} = 937^\circ\text{C}$.

Кремний Si.

Элемент IV группы периодической системы элементов Д. И. Менделеева, темно-серое твердое и хрупкое вещество с металлическим блеском. Содержание в земной коре примерно 1/4 массы земной коры. Из соединений кремний получают несколькими способами. Чаще всего используют метод восстановления четыреххлористого кремния SiCl_4 парами цинка или водорода:



Реакция проводится при температуре 950°C .

В технологическом смысле кремний более сложный материал, чем германий, так как его $T_{\text{пл}} = 1414^\circ\text{C}$, в связи с этим очистку кремния ведут зонной плавкой в вакууме без применения тиглей.

Легируют донорными и, акцепторными и нейтральными примесями: донорные V валентные элементы, акцепторные III валентные элементы, нейтральные IV валентные элементы. Кремний обладает следующими основными свойствами: атомная масса $m = 28,08$; число атомов кремния в единице объема $5 \cdot 10^{28} \text{ в } 1 \text{ м}^3$; ширина запрещенной зоны при температуре 20°C $\Delta W = 1,12 \text{ эВ}$; удельное сопротивление кремния $\rho = 2,3 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; температура плавления $T_{\text{пл}} = 1414^\circ\text{C}$

Селен Se.

Селен – элемент IV группы периодической системы химических элементов Д.И.Менделеева. Его содержание в земной коре составляет $6 \cdot 10^{-5} \%$ (по массе). Селен обладает следующими свойствами: атомная масса $m = 78,96$; температура плавления $T_{\text{пл}} = 220^\circ\text{C}$; температура кипения $T_{\text{кип}} = 685^\circ\text{C}$.

Селен получают нагреванием любой другой аллотропической модификации до температуры $180\text{--}200^\circ\text{C}$, близкой к температуре плавления. Монокристаллы селена получают осаждением с паровой фазы или выращиванием из расплава.

Теллур.

Теллур относят к IV группе периодической системы химических элементов Д.И.Менделеева.

Теллур обладает следующими свойствами: ширина запрещенной зоны $\Delta W = 0,35 \text{ эВ}$; температура плавления $T_{\text{пл}} = 451^\circ\text{C}$; температура кипения при атмосферном давлении $T_{\text{кип}} = 500^\circ\text{C}$; удельное электрическое сопротивление чистого теллура при комнатной температуре $\rho = 29 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Полупроводниковые соединения.

Структура сложных полупроводников образована атомами различных химических элементов. К этой группе относят твердые растворы и химические соединения типа A^mX и B^nY , где верхние индексы m и n обозначают номер группы периодической системы элементов, а нижние x и y – число атомов этого элемента в соединении.

Сложные полупроводники типа $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{IV}}$.

Единственным двойным соединением элементов IV группы периодической системы элементов в твердой фазе является соединение кремния с углеродом – карбид кремния SiC . Карбид кремния обладает следующими свойствами: молекулярная масса $m = 40,16$;

ширина запрещенной зоны $\Delta W = 2,72 \dots 3,34$ эВ. Такое большое значение ширины запрещенной зоны позволяет использовать карбид кремния при температурах до 700°C .

Сложные полупроводники типа $A^{III}B^V$ представляют собой химические соединения металлов III группы с элементами V группы периодической системы элементов.

Все полупроводниковые соединения этого типа имеют структуру типа цинковой обманки или сфалерита. Такая структура аналогична кристаллической решетке кремния или германия. Отличие состоит в том, что в узлах кристаллической решетки $A^{III}B^V$ находятся не нейтральные атомы, а поочередно расположенные положительно заряженные ионы B^V и отрицательно заряженные ионы A^{III} .

По поведению при нагревании соединения делят на неразлагающиеся и на разлагающиеся. Ширина запрещенной зоны ΔW изменяется в широких пределах: от 0,18 эВ до 2,45 эВ для фосфида алюминия. Высокая подвижность электронов позволяет использовать соединения $A^{III}B^V$ на высоких частотах.

Сложные полупроводники типа $A^{II}B^{VI}$.

Эту группу составляют двойные соединения халькогенов с металлами II группы периодической системы элементов. К халькогенам относят серу, селен и теллур. А соединения с этими элементами называют халькогенидами.

Халькогениды различаются между собой шириной запрещенной зоны ΔW , которая составляет от 3,7 эВ до 0,02 эВ. Температура плавления $T_{пл}$ от 1830 до 670°C .

Такие соединения обладают высоким пьезомодулем и находят применение при изготовлении преобразователей электромагнитных колебаний, в акустике, в диапазонах ВЧ и СВЧ.

Сложные полупроводники типа $A^{IV}B^{IV}$.

Эту группу полупроводников представляют: сульфид свинца, селенид свинца, теллурид свинца. Ширина запрещенной зоны этих соединений ΔW равна от 0,3 до 0,4 эВ. Теллурид свинца обладает высоким коэффициентом термоЭДС и малой теплопроводностью, поэтому используется при температурах от 300 до 700°C .

Сложные полупроводники типа $A^{V_2}B^{VI_3}$.

Эту группу полупроводниковых материалов представляют: сульфид сурьмы, селенид висмута, теллурид висмута. Эти материалы кристаллизуются в ромбическую и ромбоэдрическую структуры, обладающие низкой симметрией.

Благодаря высокой фоточувствительности сульфид сурьмы используют для изготовления фотопроводящих мишеней передающих телевизионных трубок.

Оксидные полупроводники.

Полупроводниковыми свойствами обладают некоторые оксиды металлов, в которых ион металла относится к элементам переходного ряда периодической системы элементов.

Таковыми материалами являются: закись меди, представляющая собой типичный дырочный сложный полупроводник; оксид цинка, обладающий следующими свойствами: молекулярная масса $m = 41$; температура плавления $T_{пл} = 1975^\circ\text{C}$; ширина запрещенной зоны $\Delta W = 3,2$ эВ; двуокись титана обладает шириной запрещенной зоны $\Delta W = 3,0$ эВ; оксид железа молекулярная масса $m = 160$, температура плавления $T_{пл} = 1500^\circ\text{C}$, ширина запрещенной зоны $\Delta W = 2,2$ эВ; оксид никеля молекулярная масса $m = 75$, температура плавления $T_{пл} = 1700^\circ\text{C}$, ширина запрещенной зоны $\Delta W = 1,2$ эВ.

Стеклообразные полупроводники.

Полупроводниковые свойства проявляются не только в кристаллических, но и аморфных соединениях. К таким соединениям относятся неорганические стекла.

Стеклообразные полупроводниковые материалы пока еще мало изучены и не нашли широкого промышленного применения.

Органические полупроводники.

Они проявляют такую же зависимость проводимости от температуры, что и простые полупроводники.

Молекулярные кристаллы представляют собой полициклические, низкомолекулярные ароматические соединения.

Молекулярные комплексы представляют собой полициклические низкомолекулярные соединения с электронным взаимодействием между молекулами вещества.

Металлоорганические комплексы представляют собой низкомолекулярные вещества, молекула которых содержит в центре атом металла.

Полимерные полупроводники представляют собой материалы с длинными цепями сопряжения и сложным физико-химическим строением.

Пигменты представляют собой красители, обладающие полупроводниковыми свойствами. Они бывают *n*-типа и *p*-типа.

Лекция 10

Магнитные материалы

Классификация магнитных материалов.

Все материалы, находящиеся в магнитном поле, обладают определенными магнитными свойствами.

1. По характеру взаимодействия с внешним магнитным полем все электромагнитные материалы подразделяются на:

Немагнитные материалы, которые не взаимодействуют с полем, т.е. не приобретают магнитные свойства при воздействии на них магнитного поля.

Магнитные материалы обладают способностью намагничиваться.

В изолированном атоме электроны вращаются вокруг ядра с определенным орбитальным моментом. Одновременно электроны вращаются вокруг своих осей со спиновыми магнитными моментами. Орбитальные и спиновые магнитные моменты, суммируясь, образуют *магнитный момент* атома. Так как электроны с правым и левым вращениями имеют различное направление магнитных моментов, то суммарный магнитный момент атома может быть равен нулю или отличаться от него.

2. По силе взаимодействия в магнитном поле все материалы подразделяются на:

Сила воздействия вещества с магнитным полем оценивается безразмерной величиной – *магнитной восприимчивостью*

$$k_m = M/H$$

Слабوماгнитные материалы незначительно меняют свою намагниченность под действием внешнего магнитного поля, магнитной восприимчивостью $k_m \ll 1$.

К слабо магнитным материалам относятся:

Диамагнетики представляют собой материалы, состоящие из атомов, у которых оболочки полностью заполнены электронами. Поэтому результирующий момент атома равен нулю.

Магнитная восприимчивость диамагнетиков $k_m = -10^{-5}$ в большинстве случаев не зависит от температуры и напряженности намагничивающего поля.

К диамагнетикам относят большинство органических соединений и ряд металлов: медь, серебро, золото, свинец, и др.

Парамагнетики характеризуются тем, магнитные моменты отдельных атомов парамагнетиков ориентированы хаотично и в объеме твердого тела скомпенсированы. После снятия магнитного поля парамагнетик некоторое время сохраняет намагниченность.

Магнитная восприимчивость $k_m = 10^{-2} \dots 10^{-5}$. У большинства парамагнетиков k_m значительно зависит от температуры, для некоторых парамагнетиков (щелочных металлов) k_m от температуры не зависит, а для некоторых имеет место аномальная зависимость. От напряженности поля при нормальной температуре парамагнетическая восприимчивость зависит слабо, но при температурах близких к температурам Кюри, парамагнетики можно перевести в состояние магнитного насыщения. К парамагнетикам относят платину, алюминий и т.д.

Сильномагнитные материалы обладают способностью к значительному изменению намагниченности под действием внешнего поля и характеризуется магнитной восприимчивостью $k_m \gg 1$.

К сильномагнитным материалам относятся:

Ферромагнетики характеризуются следующими свойствами:

Способностью сильно намагничиваться даже в слабо магнитных полях ($k_m = 10^3 \dots 10^5$).

Способность переходить из ферромагнитного в парамагнитное состояние при температуре превышающей температуру Кюри.

Магнитная восприимчивость k_m имеет сложную нелинейную зависимость от температуры и напряжения поля.

При намагничивании ферромагнетиков наблюдаются явления анизотропии и магнитострикции.

Суть магнитной анизотропии состоит в том, что намагничиваемость кристалла по разным его направлениям не одинакова. В решетке кристалла ферромагнетика существуют направления легкого и трудного намагничивания.

Намагничивание и размагничивание ферромагнетиков сопровождается изменением линейных размеров и формы кристалла. Это явление называется *магнитострикцией*.

Магнитострикция оценивается константой магнитострикции (магнитострикционная деформация насыщения).

$$V_s = \Delta l / l_0$$

Эта константа может принимать положительное и отрицательное значение.

К ферромагнетикам относят железо, никель, кобальт и их сплавы, гадолиний, сплавы хрома и марганца и др.

Антиферромагнетики представляют собой материалы, у которых магнитные моменты соседних атомов равны, но их спины располагаются антипараллельно.

Магнитная восприимчивость равна от $10^{-3} \dots 10^{-5}$ и зависит от температуры.

Ферримагнетики во многом подобны ферромагнетикам, но обладают следующими особенностями:

- ∠ Значительно уступают ферромагнетикам по значению намагниченности насыщения M_s ;
- ∠ В ряде случаев имеют аномальную зависимость намагниченности насыщения от температуры с наличием точки компенсации.

Магнитомягкие материалы.

Магнитомягкие материалы делят на материалы:

1. для постоянных магнитных полей;
2. для низкочастотных магнитных полей;
3. для высокочастотных магнитных полей.

Магнитомягкие материалы для низкочастотных магнитных полей.

К магнитомягким материалам относят: технически чистое, электролитическое и карбонильное железо, низкоуглеродистую электротехническую сталь, кремнистую электротехническую сталь, пермаллой (железоникелевые сплавы).

Магнитомягкие материалы обладают следующими свойствами:

- малая коэрцитивная сила H_c ;
- высокая магнитная проницаемость μ ;
- малые потери на перемагничивание для получения максимальных значений магнитных индукций материала;
- высокая пластичность;
- малые колебания толщины материала;
- отсутствие окалины, бугров, вмятин, что позволяет повысить коэффициент заполняемости и соответственно уменьшить размеры изделий;
- независимость магнитных свойств от механических напряжений, позволяет прикладывать большие усилия сжатия, обжимки без ухудшения его параметров.

Технически чистое железо содержит менее 0,05% примесей. Имеет наиболее высокие значения индукции насыщения B_s из всех ферромагнитных материалов, низкое удельное электрическое сопротивление ρ , поэтому его используют для изготовления материалов, работающих постоянных магнитных полях. Коэрцитивная сила H_c и магнитная проницаемость μ изменяются в широких пределах. Это железо технологично, хорошо штампуются и обрабатывается на всех металлорежущих станках, имеют низкую стоимость.

Технически чистое железо применяют как шихтовый материал для получения почти всех ферромагнитных сплавов.

Электролитическое железо получают в результате электролиза FeSO_4 или FeCl_2 . Осажденное на катоде железо после тщательной промывки и измельчения в шаровых мельницах содержит большое количество водорода, поэтому не обладает высокими магнитными свойствами. После переплавки в вакууме и многократных отжигов его свойства улучшаются. В результате такой обработки получают электролитическое железо, которое содержит меньшее количество примесей, чем чистое железо и обладает более высокими магнитными свойствами:

→ коэрцитивная сила $H_C = 30 \text{ А/м}$,

→ максимальная магнитная проницаемость $\mu_{\max} = 15000$.

Имеет высокую стоимость.

Карбонильное железо получают в результате разложения пентакарбонила железа $\text{Fe}(\text{CO})_5$. При различных условиях разложения получают порошкообразную или губчатую железо. В результате термической обработки в водороде железо приобретает высокие магнитные свойства.

Свойства железа улучшают введение присадок, получают различные марки сталей. Применяют две основные разновидности магнитомягких электрических сталей: низкоуглеродистые стали и кремнистые стали.

Низкоуглеродистая электрическая сталь поставляется в неотожженном состоянии с невысокими магнитными свойствами.

Такую сталь подвергают термообработке, в процессе которой ее медленно нагревают до температуры 900°C , выдерживают в течение 2...4 часов и медленно охлаждают со скоростью не более 30...40 градусов в час до температуры 600°C .

Термически обработанные стали обладают коэрцитивной силой $H_C = 64...96 \text{ А/м}$, максимальной магнитной проницаемостью $\mu_{\max} = 3500...4500$ и содержанием углерода 0,1%.

Кремнистые электротехнические стали представляют собой твердый раствор кремния в железе. Легирование кремнием используют как один из способов снижения потерь на вихревые токи в листах за счет повышения удельного электрического сопротивления ρ .

Удельное электрическое сопротивление и плотность кремнистых электрических сталей в зависимости от содержания кремния приведены в таблице.

Параметры	Э1	Э2	Э3	Э4
Степень легирования стали кремнием	Слаболегированная	Среднелегированная	Повышеннолегированная	Высоколегированная
Содержание кремния, %	0,8...1,8	1,8...2,8	2,8...3,8	3,8...4,8
Удельное электрическое сопротивление ρ , мкОм*м	0,25	0,40	0,50	0,60
Плотность D , Мг/м ³	7,80	7,75	7,65	7,55

В результате легирования в низкоуглеродистых сталях улучшается состав вследствие того, что кремний связывает часть растворенных в металле газов и в первую

очередь кислород; снижается магнитострикция; увеличивается магнитная проницаемость μ ; снижается коэрцитивная сила H_c и потери на перемагничивание; при содержании кремния свыше 5% снижается индукция насыщения и ухудшаются механические свойства (повышается упругость и хрупкость).

Для улучшения свойств кремнистых электрических сталей необходимо тщательно очистить ее от примесей, обезуглероживать и подвергать особой термообработке.

Более существенного улучшения магнитных свойств кремнистых электрических сталей добиваются созданием в материале магнитной текстуры.

Для создания магнитной текстуры сталь подвергают холодной прокатке.

Холоднокатаная сталь становится магнитно-анизотропной. Деформация в холодном состоянии приводит к появлению больших внутренних напряжений, что вызывает рост коэрцитивной силы H_c . Эти напряжения снимаются отжигом.

Применение текстурных сталей в трансформаторах различного назначения позволяют снижать их массу на 20...40%.

Горячекатаные стали в отличие от холоднокатаных не имеют магнитной структуры.

Марку стали обозначают буквой «Э» и следующими за ней цифрами. Цифрами обозначают степень легирования и гарантированные электромагнитные свойства стали.

Листы и рулоны стали поставляются в отожженном виде. Допускается поставка сталей в нагартованном виде (без отжига). В этом случае к обозначению марки стали добавляют букву «Т».

Пермаллои представляют собой сплавы железа с никелем Fe-Ni или железа с никелем и кобальтом Fe-Ni-Co, обычно легированных молибденом, хромом и другими элементами.

К специфическим особенностям пермаллоев относят:

высокое значение начальной магнитной проницаемости в слабых полях (в 10...20 выше, чем у стали); изгибание пластины толщиной 0,1...0,3 мм под углом 90° снижает начальную магнитную проницаемость в 2 раза;

большую чувствительность к деформациям, особенно если при этом возникает наклеп;

без термической обработки магнитная проницаемость у пермаллоев меньше, чем у чистого железа; при переменном токе магнитная проницаемость μ падает в большей степени, чем у электротехнических сталей.

Все железоникелевые сплавы поставляют в виде горячекатаных листов, прутков и холоднокатаных лент толщиной от 2,5 мм до нескольких мкм только в не отожженном виде. Термообработку производят при температуре 1000...1200 °C при этом гарантированные магнитные свойства получают при строгом контроле температурного режима отжига.

Отожженные изделия должны быть светлыми, свободными от оксидов, темных пятен, цветов побежалости. Изделия, прошедшие термообработку, необходимо оберегать от ударов, изгибов, рихтовки, сильного сдавливания обмоткой.

К *низконикелевым* относят пермаллои с содержанием никеля 40...50%. Низконикелевые пермаллои используют в качестве магнитных материалов для изделий, которые работают в переменных магнитных полях, особенно при повышенных частотах.

К *высоконикелевым* относят пермаллои с содержанием никеля 70...80%. Высоконикелевые сплавы обладают следующими свойствами:

малая кристаллографическая анизотропия;

малая магнитострикция, т.е. зависимость магнитных свойств от механических напряжений;

магнитная проницаемость μ в несколько раз больше, чем низконикелевых, и в несколько десятков раз больше, чем у электротехнических сталей;

индукция насыщения B_c приблизительно в два раза меньше, чем у электротехнических сталей, и в полтора раза меньше, чем у низконикелевых;

удельное электрическое сопротивление ρ приблизительно в 2 раза меньше, чем у низконикелевых;

термическая обработка сложнее, чем у низконикелевых;

дороже низконикелевых из-за содержания никеля;

магнитные свойства значительно сильнее зависят от механических напряжений, чистоты и состава, чем у низконикелевых.

Высоконикелевые пермаллои применяют в качестве магнитного материала для сердечников мощных силовых трансформаторов и других устройств, для которых важно создание большого магнитного потока.

Магнитомягкие материалы для высокочастотных магнитных полей.

Магнитомягкие ферриты представляют собой магнитную керамику, которую получают спеканием оксида железа Fe_2O_3 с оксидами металлов.

В качестве магнитомягких материалов наибольшее распространение получили те, которые имеют кубическую структуру подобно минералу шпинели $\text{Mg}^*\text{Al}_2\text{O}_3$. В промежутках между ионами кислорода их кристаллической решетки размещаются ионы соответствующего металла. По физической природе они являются полупроводниками с удельным электрическим сопротивлением до $10^{16} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Ферриты имеют низкую индукцию насыщения ($B_m = 0,2 \dots 0,5 \text{ Т}$), поэтому их используют только в области слабых токов.

Основными характеристиками магнитомягких ферритов являются индукция насыщения B_c ($0,1 \dots 0,4 \text{ Т}$); магнитная проницаемость μ ($\mu_n = 20 \dots 20000$, $\mu_{\text{max}} = 35000$); тангенс угла магнитных потерь $\text{tg } \delta_m$, критическая частота $f_{\text{кр}}$, температурный коэффициент магнитной проницаемости α_μ , коэффициент стабильности K_μ .

Частота, при которой тангенс угла магнитных потерь резко возрастает и достигает значения $\text{tg } \delta_m = 0,1$, называется критической частотой $f_{\text{кр}}$.

Температурная зависимость магнитной проницаемости оценивается *относительным температурным коэффициентом магнитной проницаемости* (K^{-1}):

$$\alpha_\mu = \frac{TK\mu}{\mu_{T_2}} = \frac{\mu_{T_2} - \mu_{T_1}}{\mu_{T_1}^2 (T_2 - T_1)},$$

где T_1, T_2 – температура. При которых производились измерения магнитной проницаемости; TK_μ – температурный коэффициент магнитной проницаемости, K^{-1} .

Стабильность магнитной проницаемости во времени оценивается *коэффициентом стабильности*

$$K_\mu \approx \left[\frac{\mu_{t_2} - \mu_{t_1}}{\mu_{t_1}} \right] \frac{1}{\text{tgt}_2 / t_1} 100\%,$$

где K_μ – коэффициент стабильности, показывающий изменение параметров в течение года, %; μ_{t_1}, μ_{t_2} – значение начальной магнитной проницаемости в моменты t_1 и t_2 .

По составу ферриты могут быть одинарными (моноферриты), двойными (биферриты) и многокомпонентные (полиферриты). Наибольшее распространение получили биферриты: марганцевоникелевые, никелевоцинковые, литеевоцинковые.

Марганцевоникелевые ферриты обладают следующими свойствами:

высокие значения в начальной магнитной проницаемости μ_n , которые получают только в случае применения очень чистого сырья и при обжиге феррита в вакууме или азоте;

малые потери на перемагничивание до частот 10^8 Гц ;

низкая остаточная и относительно большая максимальная индукция;

более высокая индукция В, значительно большая температура Кюри, меньшее значение температурного коэффициента магнитной проницаемости α_μ по сравнению с марганцевоцинковыми ферритами.

Марганцевоцинковые ферриты применяют для изготовления сердечников импульсных трансформаторов с узким фронтом импульса и для сердечников аппаратуры дальней связи.

Никелевоцинковые ферриты обладают следующими свойствами:

предназначены для использования в слабых полях при частотах до ста мега герц;

малые потери и низкие значения начальной магнитной проницаемости в широком интервале температур;

высокая временная стабильность начальной магнитной проницаемости;

магнитная проницаемость зависит от температуры, частоты, значения параметров подмагничивающего поля;

магнитная проницаемость не зависит от механических воздействий;

свойства зависят от состава и технологий изготовления.

По магнитной проницаемости никелевоцинковые ферриты делят на 4 группы.

Ферриты первой группы с высоким значением магнитной проницаемости характеризуются высокой магнитной проницаемостью, наиболее низкой граничной частотой, не высокой температурой Кюри, узким диапазоном рабочих температур.

Ферриты второй группы со средним значением магнитной проницаемости отличаются от ферритов первой группы составом, повышенным значением температуры Кюри, меньшими потерями при перемагничивании, более высоким электрическим сопротивлением.

Ферриты третьей группы с низким значением магнитной проницаемости имеют высокое значение точки Кюри, более широкий диапазон рабочих частот и температур.

Ферриты четвертой группы со сверх низкими значениями магнитной проницаемости обладают граничными частотами до 200 МГц, большим электрическим сопротивлением, высокой термостабильностью, незначительными потерями на перемагничивание.

Магнитодиэлектрики представляют собой прессованный магнитный материал, состоящий из частиц ферромагнита, изолированных друг от друга диэлектриком.

Характерной особенностью магнитодиэлектриков является высокая стабильность магнитной проницаемости при изменении внешнего поля.

Технология изготовления магнитодиэлектриков состоит из следующих операций. Ферромагнитный порошок получают механическим дроблением или разложением соответствующих химических соединений. Он должен обладать требуемыми магнитными свойствами, определенным размером и формой частиц, достаточной механической прочностью, химической инертностью к диэлектрику.

Далее выполняется смешивание ферромагнитного порошка с изоляционным материалом в сухом состоянии или в процессе осаждения пленки предварительно растворенного диэлектрика на частицы ферромагнита.

Прессование – следующий этап технологии. Прессовочное давление зависит от типа магнитодиэлектрика и соотношения компонентов.

С помощью термообработки на заключительном этапе стабилизируют параметры магнитодиэлектриков, для чего их выдерживают при повышенных температурах в течение определенного времени.

Наибольшее применение находят магнитодиэлектрики на основе альсифера, легированных железоникелевых сплавов и карбонильного железа.

Альсифер представляет собой сплав алюминия, кремния и железа. Он нековок, хрупок, тверд; при оптимальном составе имеет наиболее высокое значение начальной

магнитной проницаемости, которая резко снижается при небольшом отклонении состава от оптимального; не содержит дефицитных металлов; имеет низкую стоимость.

Альсифер применяют для изготовления деталей, работающих в постоянных магнитных полях (экраны, детали магнитопроводов).

Для магнитодиэлектриков применяют сплавы альсифера с содержанием кремния 9...11% и алюминия 7,4%. Они обладают следующими свойствами:

начальная магнитная проницаемость равна 30000...35000;

максимальная магнитная проницаемость приблизительно равна 120000;

коэрцитивная сила приблизительно равна 1,8А/м при удельном электрическом сопротивлении приблизительно равна 0,8мкОм*м;

требования к точности поддержания состава сплава не высоки, т.к. свойства магнитодиэлектрика определяется в основном размерами, формой и взаимным расположением частиц альсифера и не зависит от его исходных свойств.

Магнитодиэлектрики на основе *железоникелевых сплавов* обладают более высокими значениями магнитной проницаемости равно 200...250 по сравнению с магнитодиэлектриками на основе альсифера, пониженными значениями температурного коэффициента магнитной проницаемости.

Для производства магнитодиэлектриков на основе железоникелевых сплавов в основном используют порошки из молибденового пермаллоя.

Магнитоникелевые сплавы на основе *карбонильного железа* применяют для изготовления сердечников катушек индуктивности, фильтров, контуров.

Промышленность выпускает карбонильные порошки двух классов: Р – для радиоаппаратуры и П – для проводной связи.

Их применяют для изготовления сердечников, катушек индуктивности, фильтров, контуров.

Магнито – твердые материалы. Магнитные материалы специального назначения.

Магнитотвердые материалы.

К магнитотвердым материалам относятся магнитные материалы с широкой гистерезисной петлей с большой коэрцитивной силой. Основными характеристиками магнитотвердых материалов является коэрцитивная сила, остаточная индукция, максимальное удельное магнитная энергия, отдаваемая во внешнее пространство.

Влияние температуры на величину остаточной магнитной индукции которой соответствует максимальному значению магнитной индукции для данного материала, оценивается температурным коэффициентом остаточной магнитной индукции

$$\alpha_B = \frac{(B_r)_2 - (B_r)_1}{(B_r)_1(T_2 - T_1)}$$

Максимальная удельная магнитная энергия является важнейшим параметром при оценки качества магнитотвердых материалов.

$$\omega_{\max} = (BH)_{\max} / 2$$

По назначению магнитотвердые материалы подразделяют на материалы для постоянных магнитов и материалы для записи и хранения информации (звуковой, цифровой, видеоинформации и др.).

По составу и способу получения магнитотвердые материалы подразделяют на налитые, порошковые и прочие.

Литые материалы на основе сплавов. Эти материалы имеют основой сплавы железо – никель – алюминий и железо – никель – кобальт.

Магнитотвердые и литые материалы получают в результате *дисперсионного твердения* сплава при его охлаждении с определенной скоростью от температуры

плавления до температуры начала распада. В процессе твердения происходит высокотемпературный распад твердого раствора на β - фазу и β_2 - фазу. β - фаза близка по составу к чистому железу, которое обладает сильно выраженными магнитными свойствами. Она выделяется в виде пластинок однодоменной толщины. β_2 - фаза близка по составу к интерметаллическому соединению никель – алюминий, обладающему низкими магнитными свойствами.

Марки этих материалов содержат буквы Ю и Н, указывающие на наличие в них алюминия и никеля.

Безкобальтовые сплавы обладают относительно низкими магнитными свойствами, но являются самыми дешевыми.

Кобальтовые сплавы применяют для изготовления изделий, которые требуют материалов с относительно высокими магнитными свойствами и магнитной изотропностью.

Высококобальтовые сплавы представляют собой сплавы с магнитной и кристаллической текстурой, содержащие кобальта более 15%.

Сплавы с магнитной текстурой получают в результате охлаждения сплава в магнитном поле с напряженностью 160...280 кА/м. От высоких температур 1250...1300 °С до температуры приблизительно 500 °С.

Недостатками высококобальтовых материалов являются высокая твердость и хрупкость, что значительно осложняет их механическую обработку.

Порошковые магнитные материалы.

Порошковые магнитотвердые материалы применяются для изготовления миниатюрных магнитов постоянной формы.

Металлокерамические магниты. Их получают в результате прессования металлических порошков без связующего материала и спекания их при высоких температурах. Для порошков используют сплавы ЮНДК (сплав системы Fe-Ni-Al, легированный кобальтом); на основе платины; на основе редкоземельных металлов.

Металлопластические магниты. Их получают из металлических порошков, которые прессуют вместе с изолирующей связкой и нагревают до невысоких температур, необходимых для полимеризации связующего вещества.

Оксидными магнитами являются магниты на основе ферритов бария.

Бариевые магниты обладают следующими свойствами:

значение остаточной магнитной индукции в 2...4 раза меньше, чем у литых магнитов;

большая коэрцитивная сила, придает повышенную стабильность при воздействии внешних магнитных полей, ударов и толчков;

плотность примерно в 1,5 раза меньше плотности сплавов типа ЮНДК, что снижает массу магнитных систем;

удельное электрическое сопротивление равно $10^4...10^7$ Ом*м, благодаря этому их используют в цепях с высокочастотными полями;

не содержит дефицитных и дорогих металлов;

К недостаткам бариевых магнитов относят:

плохие механические свойства (высокая хрупкость и твердость);

большую зависимость магнитных свойств от температуры;

эффект необратимой потери магнитных свойств после охлаждения магнита до температуры -60 градусов Цельсия.

Кобальтовые магниты.

Их свойства:

температурный гистерезис;

из-за большой хрупкости и низкой механической прочности их часто крепят с помощью клея;

высокая стоимость.

Магниты из микропорошков. Их получают прессованием специально подготовленного микропорошка.

Железные и железокобальтовые магниты из микропорошков Fe и Fe – Co изготавливают химическим способом получения частиц нужного размера. Из полученного порошка магниты прессуют и пропитывают раствором смол.

Прочие магнитотвердые материалы.

Пластически деформируемые сплавы обладают хорошими пластическими свойствами, которые имеют узкоспециальное применение: хорошо поддаются всем видам механической обработки; имеют высокую стоимость.

Кунифе – медь – никель – железо – обладают анизотропностью. Применяются в виде проволоки с малыми диаметрами и штамповок.

Викаллоу – кобальт - ванадий получают в виде высокопрочной магнитной ленты и проволоки. Из него изготавливают так же очень мелкие магниты сложной конфигурации.

Эластичные магниты представляют собой магниты на резиновой основе с наполнителем из мелкого порошка магнитотвердого материала.

Магнитные носители информации.

К ним применяют следующие требования:

высокая остаточная магнитная индукция для повышения уровня считываемого сигнала;

для уменьшения эффекта саморазмагничивания, значения коэрцитивной силы должно быть как можно выше;

для облегчения процесса стирания записи желательна малая величина коэрцитивной силы;

большие значения коэффициента выпуклости;

высокая температурная и временная стабильность магнитных свойств.

Их недостатки:

трудность монтажа записи, быстрый износ записывающих и воспроизводящих устройств и высокая стоимость.

Свойства лент, дисков и барабанов с покрытием магнитными порошками зависят от свойств исходных материалов;

степени измельчения частиц;

объемной плотности магнитного материала в рабочем слое;

ориентация частиц с анизотропией формы;

толщины рабочего слоя порошка;

свойств металлической ленты.

Жидкие магниты представляют собой жидкость наполненную мельчайшими частицами магнитотвердого материала. Жидкие магниты на кремнийорганической основе не расслаиваются под действием даже сильных магнитных полей, сохраняют работоспособность в диапазоне температур от -70 до +150 градусов Цельсия.

Магнитные материалы специального назначения.

Материалы с прямоугольной петлей гистерезиса. Степень прямоугольности петли гистерезиса оценивается *коэффициентом прямоугольности*

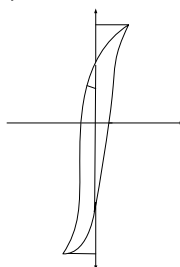
$$\alpha = B_c / B_{\max}'$$

где B_c – остаточная магнитная индукция, соответствующая максимальному значению магнитной индукции $B_{\max}'$.

Для петли гистерезиса с идеальной прямоугольностью $\alpha = 1,0$; для применяемых материалов $\alpha = 0,85 \dots 0,98$.

Магнитный сердечник с идеальной петлей гистерезиса имеет два устойчивых магнитных состояния, соответствующих положительному $+B_c$ и отрицательному $-B_c$.

значением остаточной магнитной индукции, и представляют собой магнитный элемент для хранения и переработки двоичной информации. Условно принимают состояние намагниченности материала $+B_c$ за 1, а состояние $-B_c$ за 0.



Важной характеристикой материалов с ППГ является зависимостью их свойств от температуры. При повышении температуры площадь петли гистерезиса и ее прямоугольность у таких материалов уменьшается, т.е. происходит уменьшение коэрцитивной силы H_c , остаточная индукция B_c и коэффициент прямоугольности a . при охлаждении происходит обратный процесс.

Для характеристики скорости перемагничивания материала используют *коэффициент переключения* K_g , которой характеризуют минимальную амплитуду импульса магнитного поля, необходимого для полного переключения сердечника.

Ферриты производят по прецизионной технологии методом оксидов или методом совместного осаждения гидроокиси. Особенностью технологического процесса является высокая температура окончательного отжига (около 1400°C) и «воздушная закалка», состоящая в резком охлаждении на воздухе от максимальной температуры.

Ферриты с ППГ разделяются на ферриты со спонтанной и с индуцированной (наведенной) прямоугольностью петли гистерезиса.

Ферриты со спонтанной петлей гистерезиса получают благодаря составу феррита и условиям отжига, при которых появление спонтанной прямоугольности петли гистерезиса обусловлено преобладанием процесса необратимого смещения доменных стенок.

Литиевые ферриты с ППГ приобретают необходимые свойства при введении в состав феррита натрия, магния, марганца и др. они обладают следующими свойствами: коэффициент прямоугольности $K_{пр}$ равно 0,9 при малых значениях коэффициента переключения K_g равно $48...52\text{A}\cdot\text{мкс/с}$; коэрцитивная сила $H_c=140...1200\text{A/м}$; хорошая термостабильность электромагнитных параметров.

Процесс получения литиевых ферритов с ППГ протекает со строгим соблюдением состава и определенной концентрации кислорода при спекании.

Марганец-магнєевые ферриты с ППГ благодаря большому разнообразию свойств получили наибольшее распространение. Они обладают простотой в изготовлении, повышенной индукцией и коэрцитивной силой в ферритах с добавкой оксидов цинка и кальция; по термостабильности уступают литиевым.

Магнитомягкие сплавы с ППГ состоят из железоникелевых и железоникелькобальтовых сплавов, легированных молибденом, медью или другими металлами. Выпускают в виде лент проката толщиной $20...500\text{ мкм}$, лент микронного проката толщиной 3 мкм , сердечников с чистотой перемагничивания примерно десятки килогерц и сердечников микронного проката с минимальным коэффициентом переключения.

Ферриты для сверх высоких частот (СВЧ-ферриты).

Диапазон сверх высоких частот соответствует частотам от сотен до десятков тысяч мегагерц. Ферриты, применяемые в диапазоне СВЧ, обладают следующими свойствами:

представляют собой среду, прозрачных для электромагнитных волн;

низкие значения тангенса угла диэлектрических потерь;

эффекты, вызваны взаимодействием электромагнитной волны с магнитными моментами электронов феррита, используют для управления потоком электромагнитной энергии;

зависимость предельной рабочей температуры ферритового элемента от температуры Кюри;

зависимость частоты ферромагнитного резонанса от свойств СВЧ – феррита;

высокие значения намагниченности насыщения M_s , позволяющая уменьшить объем ферритовых СВЧ – элементов;

высокая плотность и однородность структуры СВЧ- ферритов за счет применения монокристаллического материала;

высокое удельное электрическое сопротивление ($10^6 \dots 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{м}$);

высокая температурная стабильность в рабочем интервале температур.

Никелевые СВЧ - ферриты предназначены для изготовления изделий, которые работают в миллиметровом диапазоне длин волн и в коротко волновой части сантиметрового диапазона. Они обладают высокими значениями намагниченности насыщения M_s , относительно не большими размерами ширины резонансной кривой ΔH , высокой термостабильности.

Магниевого СВЧ – ферриты применяются для изготовления изделий, работающих в средней части сантиметрового диапазона. Они имеют значения намагниченности насыщения меньше, чем у никелевых СВЧ – ферритов; температура Кюри имеет меньшее значение по сравнению с никелевым СВЧ – ферритом .

Магниевого ферроалюминаты, магниевого и никелевого феррохромиты применяются для изготовления ферромагнитных изделий, работающих в длинноволновой части СВЧ – диапазона. Они обладают следующими свойствами:

малое значение намагничиваемости насыщения;

малые магнитные потери, что позволяет применять их в ферритных приборах, работающих в малых подмагничивающих полях;

малое значение температуры Кюри, что ограничивает область их применения.

Иттриевые ферриты – гранаты применяют для изготовления различных СВЧ – устройствах, работающих в низкочастотной части СВЧ диапазона. Их свойства: наименьшая ширина резонансной кривой; малое значение магнитных потерь, относительно высокой намагниченности, высокая термостабильность.

Термомагнитные ферриты.

К термомагнитным материалам предъявляют следующие требования: низкое значение t_K Кюри, близкие к рабочему интервалу температур; высокие значения температурных коэффициентов ТКВ, магнитной проницаемости ТК_м; определенная форма термомагнитной характеристики; устойчивая работа в интервале температур от -60 до $+80 \dots 100^\circ \text{C}$; малые поля необходимые для насыщения; высокая воспроизводимость характеристик.

К термомагнитным сплавам относят компенсаторы, кальмалой, термалой.

Многослойные магнитные материалы имеют слабую зависимость намагниченности насыщения от напряженности магнитного поля, малые параметры полей насыщения, возможность заранее рассчитать требуемые свойства материалов, разнообразие получаемых характеристик, однотипность технологии изготовления.

Магнитомягкие материалы с низкой температурой Кюри. Они применяются в качестве магнитных шунтов и добавочных резисторов для компенсации температурной погрешности или обеспечения изменения магнитной индукции в воздушном зазоре по данному закону.

Лекция 11

Резисторы

В зависимости от назначения резисторы делятся на общего назначения и специальные (прецизионные и сверхпрецизионные, высокочастотные, высоковольтные, высокомегаомные).

Резисторы общего назначения используются в качестве различных нагрузок, поглотителей и делителей в цепях питания, элементов фильтров, шунтов, в цепях формирования импульсов и т.п. Диапазон номинальных сопротивлений этих резисторов 1 Ом – 10 Мом, номинальные мощности рассеяния 0,062 – 100 Вт. Допускаемые отклонения сопротивления от номинального значения $\pm 1\%$; $\pm 2\%$; $\pm 5\%$; $\pm 10\%$; $\pm 20\%$.

Прецизионные и сверхпрецизионные резисторы отличаются высокой стабильностью параметров при эксплуатации и большой точностью изготовления (допуск от $\pm 0,0005$ до 0,5 %). Применяются они в основном в измерительных приборах, в различных счетно – решающих устройствах, вычислительной техники и системах автоматики. Диапазон их номинальных сопротивлений в ряде случаев шире, чем резисторов общего назначения. Например, в качестве шунтов используют резисторы с номинальным сопротивлением менее 1 Ом, а в эталонных катушках и магазинах сопротивлений применяют резисторы с номинальным сопротивлением до сотен гигаом. Зато мощности рассеяния их сравнительно небольшие и, как правило, не превышают 2 Вт. Объясняется это высокими требованиями к стабильности, которые трудно выполнить при больших мощностях рассеяния.

Высокочастотные резисторы (резисторы с «подавленной» реактивностью) отличаются малыми собственной индуктивностью и емкостью, предназначены для работы в высокочастотных цепях, кабелях и волноводах радиоэлектронной аппаратуры в качестве согласующих нагрузок, аттенуаторов, направленных ответвителей, эквивалентов антенн и т.п. Непроволочные высокочастотные резисторы способны работать на частотах до сотен мегагерц и более, а высокочастотные проволочные – до сотен килогерц.

Высоковольтные резисторы рассчитаны на большие рабочие напряжения (от единиц до десятков киловольт). Применяются они в качестве делителей напряжения, искрогасителей, поглотителей, в зарядных и разрядных высоковольтных цепях и т.п.

Высокомегаомные резисторы имеют диапазон номинальных сопротивлений от десятков мегаом до единиц тераом и рассчитываются на небольшие рабочие напряжения (100 – 400 В). Поэтому они работают в ненагруженном режиме и мощности рассеяния их малы (менее 0,5 Вт). Высокомегаомные резисторы применяют в электрических цепях с малыми токами, в приборах ночного видения, дозиметрах и в измерительной аппаратуре.

В зависимости от способа монтажа в аппаратуре как постоянные, так и переменные резисторы могут выполнять для печатного и навесного монтажа, а также для микромодулей и микросхем или для сопряжения с ними.

Резисторы для навесного монтажа могут иметь жесткие или мягкие выводы, аксиальные или радиальные из проволоки круглого сечения или ленты, в виде лепестков и т.п.

У резисторов, применяемых в составе микросхем и микромодулей, а также СВЧ резисторов в качестве выводов могут использоваться части их поверхности.

В зависимости от способа защиты от внешних воздействующих факторов резисторы конструктивно выполняются: изолированными, неизолированными, герметизированными и вакуумными.

Неизолированные резисторы (с покрытием или без покрытия) не допускают касания своим корпусом шасси аппаратуры. Напротив, изолированные резисторы имеют достаточно хорошее изоляционное покрытие (лаки, компаунды, пластмассы и т.п.) и допускают касание корпусом шасси или токоведущих частей аппаратуры.

Герметизированные резисторы имеют герметичную конструкцию корпуса, которая исключает возможность сообщения окружающей среды с его внутренним пространством. Герметизация осуществляется с помощью керамических или металлических корпусов, а также с помощью опрессовки специальным компаундом.

Вакуумные резисторы – резисторы, у которых резистивный элемент с основанием помещается в стеклянную вакуумную колбу. По существу, это разновидность герметизированного резистора.

Иногда резисторы разделяют на защищенные и незащищенные. Защищенные допускают эксплуатацию в условиях повышенной влажности в аппаратуре любого конструктивного исполнения, незащищенные – только в составе герметизированной аппаратуры или в корпусах микросхем.

По характеру изменения сопротивления все резисторы подразделяются на постоянные и переменные. Последние, в свою очередь, делятся на подстроечные и регулировочные.

Постоянные резисторы имеют фиксированное сопротивление, которое в процессе эксплуатации не регулируется.

Переменные резисторы – регулировочные. Допускают изменение сопротивления в процессе их функционирования в аппаратуре. Сопротивление подстроечных резисторов изменяется при разовой или периодической регулировке и не изменяется в процессе функционирования аппаратуры.

Переменные резисторы по конструкции могут быть выполнены: одноэлементными и многоэлементными (сдвоенные, строенные и счетверенные);

С круговым и прямолинейным перемещением подвижного контакта;

Однооборотными и многооборотными;

С выключателем и без выключателя;

С упором и без упора;

С фиксацией и без фиксации положения подвижной системы;

С дополнительными и без дополнительных отводов.

В зависимости материала резистивного элемента резисторы разделяют на следующие группы:

Проволочные с резистивным элементом из волоченной или литой проволоки с высоким удельным сопротивлением;

Непроволочные;

Металлофольговые с резистивным элементом из фольги определенной конфигурации, нанесенной на изолированное основание.

Непроволочные резисторы можно разделить на тонкопленочные (толщина слоя – нанометры), толстопленочные (толщина – доли миллиметра), объемные (толщина – единицы миллиметра). Разумеется, приведенное деление слоев весьма условное. Четкой градации по толщине, вообще говоря, не существует.

Тонкопленочные резисторы подразделяются: на металлодиэлектрические, металлоокисные и металлизированные с резистивным элементом в виде микрокомпозиционного слоя из диэлектрика и металла, или тонкой пленки окиси металла, или сплава металла; углеродистые и бороуглеродистые, проводящий элемент которых – пленка пиролитического углерода или бороорганических соединений.

К толстопленочным резисторам относят лакосажевые, керметные и резисторы на основе проводящих пластмасс. *Объемные резисторы* могут быть с органическим и неорганическим связующим диэлектриком. Проводящие резистивные слои толстопленочных и объемных резисторов представляют собой гетерогенную систему (композицию) из нескольких фаз, получаемую механическим смешением проводящего компонента, например графита или сажи, металла или окисла металла, с органическим или неорганическими связующими (смолы, стеклоэмали), наполнителем,

пластификатором и отвердителем. После соответствующей обработки образуется гетерогенный монолитный слой с необходимым комплексом резистивных параметров.

Лакосажевые композиции формируются на основе синтетических смол в виде лаковых растворов. Проводящим компонентом является сажа. Резисторы на основе этих композиций называют лакосажевыми, лакопленочными или пленочными композиционными.

В объемных резисторах в качестве связующего компонента используют органические смолы и стеклоэмали. Проводящей фазой является сажа.

В резистивных керметных слоях основным проводящим компонентом являются металлические порошки и их смеси, представляющие собой керамическую, стеклянную или полимерную основу с равномерно распределенными частицами металла. Широкое применение нашли системы палладий – окись палладия – серебро – стекло и системы на основе рутения.

В резисторах на основе проводящих пластмасс резистивный элемент формируется горячим прессованием из проводящей композиции в виде пресспорошков, изготовленных на основе связующих полимеров (диаллилфталатных, фенольных и других смол) и сажи. Возможны металлопластмассовые композиции, проводящим компонентом которых являются металлы.



Параметры и характеристики, входящие в полное условное обозначение резистора, указываются в следующей последовательности.

Для резисторов постоянных:

Номинальная мощность рассеяния;

Номинальное сопротивление и буквенное обозначение единицы измерения (Ом, кОм, Мом, гОм, тОм);

Допускаемое отклонение сопротивления в процентах (допуск);

Группа по уровню шумов (для непроволочных резисторов);

Группа по температурному коэффициенту сопротивлению (ТКС).

Для резисторов переменных:

Номинальная мощность рассеяния;

Номинальное сопротивление и буквенное обозначение единицы измерения (Ом, кОм, мОм);

Допускаемое отклонение сопротивления в процентах (допуск);

Функциональная характеристика (для непроволочных резисторов);

Обозначение конца вала и длины выступающей части вала (размер от монтажной плоскости до конца вала) по ГОСТ 4907 – 73 (ВС – 1 – сплошной гладкий, ВС – 2 – сплошной со шлицем, ВС – 3 – сплошной с лыской, ВС – 4 – сплошной с двумя лысками; ВП – 1 – полый гладкий, ВП – 2 – полый с лыской).

Для многоэлементных резисторов в полном условном обозначении параметры и характеристики записываются в виде дроби в порядке набора секций от выхода вала.

Буквенное обозначение единицы измерения мощности рассеяния указывается только в том случае, если она измеряется в ваттах (Вт). Обозначение климатического исполнения (В – всеклиматическое и Т – тропическое) для всех типов резисторов указывается перед обозначением документа на поставку.

Приведем несколько примеров полных условных обозначений.

Постоянный непроволочный резистор с регистрационным номером 4, номинальной мощности рассеяния 0,5 Вт, номинальным сопротивлением 10 кОм, с допуском $\pm 1\%$, группой по уровню шумов А, группы ТКС – Б, всеклиматического исполнения В, обозначается

Р1-4 – 0,5 – 10 кОм $\pm 1\%$ А-Б-В ОЖО.467.157 ТУ.

Переменный непроволочный счетверенный резистор с регистрационным номером 33, варианта конструктивного исполнения Д с параметрами и характеристиками в указанной выше последовательности,

С видом вала ВП-1, с длиной выступающей части вала 32 мм обозначается

РП1 – 33Д 0,125 – 1 кОм $\pm 10\%$ А
0,125 – 3,3 кОм $\pm 20\%$ А ВП- 1- 32 ОЖО. 468...ТУ
0,125 – 1 кОм $\pm 20\%$ В
0,125 – 2 Мом $\pm 20\%$ А

По существовавшей ранее системе буквы обозначали: С – резисторы постоянные, СП – резисторы переменные. Число, стоящее после букв, обозначало разновидность резистора в зависимости от материала токопроводящего элемента: 1 – непроволочные тонкослойные углеродистые и бороуглеродистые; 2 – непроволочные тонкослойные металлодиэлектрические и металлоокисные; 3 – непроволочные композиционные пленочные; 4 – непроволочные композиционные объемные; 5 – проволочные; 6 – непроволочные тонкослойные металлизированные.

Например, С2-33 обозначает резисторы постоянные непроволочные тонкослойные металлодиэлектрические, регистрационный номер 33; СП3-30 обозначает резисторы переменные непроволочные композиционные пленочные, регистрационный номер 30.

Маркировка на резисторах введена также буквенно-цифровая. Она содержит: вид, номинальную мощность, номинальное сопротивление, допуск и дату изготовления. В зависимости от размеров маркируемых резисторов и вида технической документации могут применяться полные и сокращенные (кодированные) обозначения номинальных сопротивлений и допусков.

Полное обозначение номинальных сопротивлений состоит из значения номинального сопротивления (цифра) и обозначения единицы измерения (Ом – Омы, кОм – килоомы, Мом – мегаомы, ГОм – гигаомы, Том – тераомы). Например, 215 Ом; 150 кОм ; 2,2 Мом; 6,8 ГОм; 1 Том.

Кодированное обозначение номинальных сопротивлений состоит из трех или четырех знаков, включающих две цифры и букву или три цифры и букву. Буква кода из русского или латинского (в скобках) алфавита обозначает множитель, составляющий сопротивление, и определяет положение запятой десятичного знака. Буквы R, K, M, G, T обозначают соответственно множители 1 , 10^3 , 10^6 , 10^{12} для сопротивлений, выраженных в Омах. Для приведенного выше примера следует писать: 215R, 150K, 2M2, 6G8, 1T0.

Полное обозначение допускаемого отклонения состоит из цифр, кодированное - из буквы.

На постоянных резисторах в соответствии с ГОСТ 17598-72 и требованиями Публикации 62 МЭК допускается маркировка цветным кодом. Ее наносят знаками в виде кругов и полос.

Для маркировки цветным кодом номинальное сопротивление резисторов в Омах выражается двумя или тремя цифрами (в случае трех цифр последняя цифра не равна нулю) и множителем 10^N , где n – любое целое от -2 до +9.

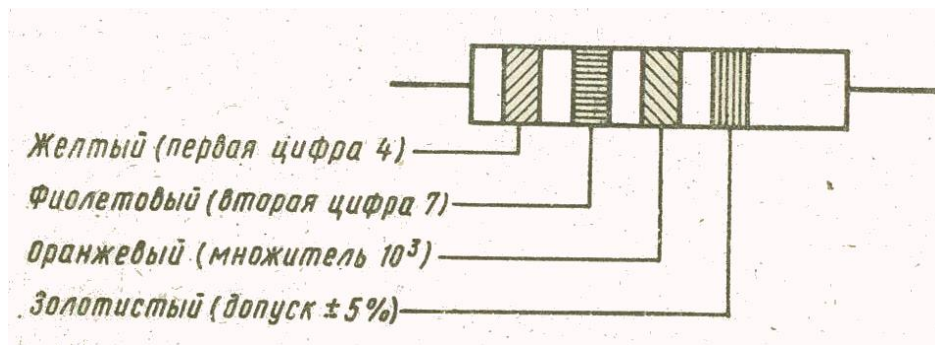
Маркировочные знаки сдвигают к одному из торцов резистора и располагаются слева направо в следующем порядке:

Первая полоса – первая цифра	}	номинальное сопротивление.
Вторая полоса – вторая цифра		
Третья полоса – множитель		
Четвертая полоса - допуск		

Цвета знаков маркировки номинального сопротивления и допусков

Цвет знака	Номинальное сопротивление, Ом				Допуск, %
	Первая цифра	Вторая цифра	Третья цифра	Множитель	
Серебристый	-	-	-	10^{-1}	+/- 10
Золотистый	-	-	-	10^{-2}	+/- 5
Черный	-	0	-	1	-
Коричневый	1	1	1	10	+/- 1
Красный	2	2	2	10^2	+/- 2
Оранжевый	3	3	3	10^3	-
Желтый	4	4	4	10^4	-
Зеленый	5	5	5	10^5	+/- 0,5
Голубой	6	6	6	10^6	+/- 0,25
Фиолетовый	7	7	7	10^7	+/- 0,1
Серый	8	8	8	10^8	+/- 0,05
Белый	9	9	9	10^9	-

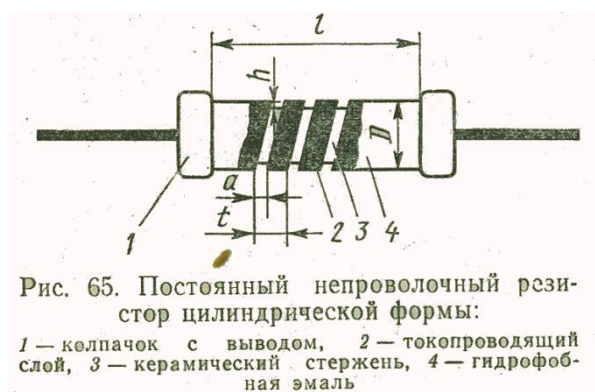
Цвета знаков маркировки номинального сопротивления и допусков должны соответствовать указанным в таблице. Пример цветной маркировки приведен на рисунке.



Маркировка резистора с номинальным сопротивлением 47кОм и допуском $\pm 5\%$

Для резисторов с номинальным сопротивлением, выраженным тремя цифрами и множителем, цветная маркировка состоит из пяти знаков (полос). Первые три полосы – три цифры, четвертая и пятая – множитель и допуск. Если размеры резистора не позволяют разместить маркировку ближе к одному из торцов резистора, площадь первого знака (ширина первой полосы) делается примерно в два раза больше других знаков.

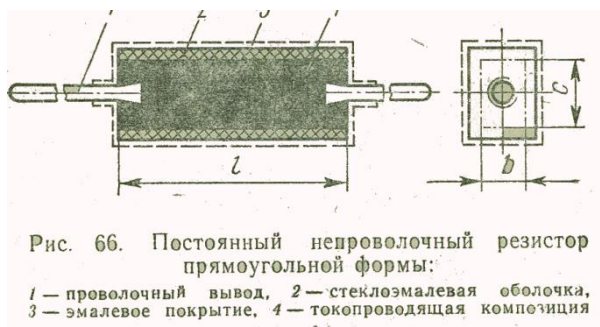
ПОСТОЯННЫЙ НЕПРОВОЛОЧНЫЙ РЕЗИСТОР ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ



представляет собой круглый керамический стержень 3, на внешнюю поверхность которого нанесен тонкий (от долей до единиц микрона) токопроводящий слой 2. На оба конца стержня насажены латунные колпачки 1 с аксиальными выводами. Для защиты от внешней среды резистор, за исключением концов выводов, покрывают гидрофобной эмалью 4. Токопроводящий слой может быть сплошным или со спиральной нарезкой. Такую конструкцию имеет большинство постоянных непроволочных углеродистых,

металлизированных и композиционных лакопленочных резисторов, часто называемых резисторами поверхностного типа.

Постоянный непроволочный резистор прямоугольной формы (рис. 66) представляет собой прямоугольный объемный стержень из токопроводящей композиции 4 с проволочными аксиальными выводами 1, опрессованный стеклоэмалевой (стеклокерамической) оболочкой 2. Такая конструкция характерна для композиционных непроволочных постоянных резисторов объемного типа.



Постоянный проволочный резистор (рис. 67) представляет собой изоляционный каркас, на который намотана проволока (или микропроволока в стеклянной изоляции), имеющая высокое удельное электрическое сопротивление. Обмотка может быть однослойной или многослойной, простой и специальной, секционированной и несекционированной. Выводы (гибкие, жесткие) закрепляют и припаивают к концам обмотки. Снаружи резистор покрывают термостойкой эмалью, опрессовывают пластмассой или герметизируют металлическим корпусом. Резистор может быть цилиндрическим или прямоугольным.

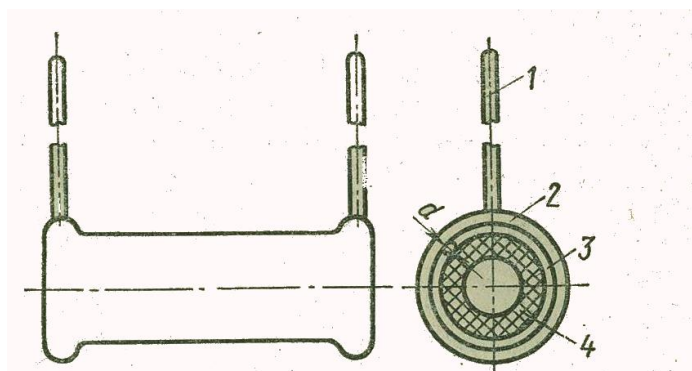


Рис. 67. Постоянный проволочный резистор:

1 — проволочный вывод, 2 — термостойкая эмаль, 3 — проволока с высоким удельным электрическим сопротивлением, 4 — керамический трубчатый каркас

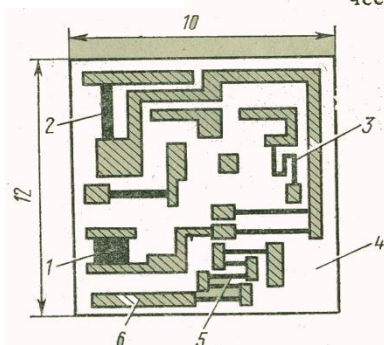


Рис. 68. Подложка с тонкопленочными резисторами, проводниками и контактными площадками: 1 и 2 — низкоомный и высокоомный резисторы прямоугольной формы, 3 — высокоомный резистор типа «меандр», 4 — ситалловая подложка толщиной 0,5—0,6 мм, 5 — высокоомный составной резистор, 6 — контактная площадка

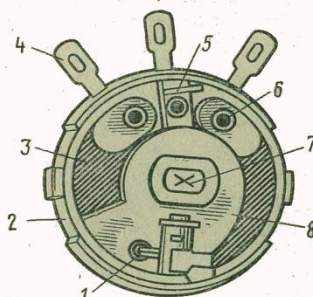


Рис. 69. Переменный непроволочный резистор круглой формы:

1 — подвижный контакт, 2 — пластмассовый корпус, 3 — токопроводящий элемент, 4 — вывод, 5 — ограничитель угла поворота, 6 — заклепка, 7 — расчеканенный торец оси, 8 — подвижная часть

Постоянный микромодульный резистор (ниточный) представляет собой стержень из стекловолна с нанесенной токопроводящей композицией и применяется при конструировании гибридных ИС (ГИС). Ниточные резисторы приклеивают к подложкам ГИС клеем - контактолом.

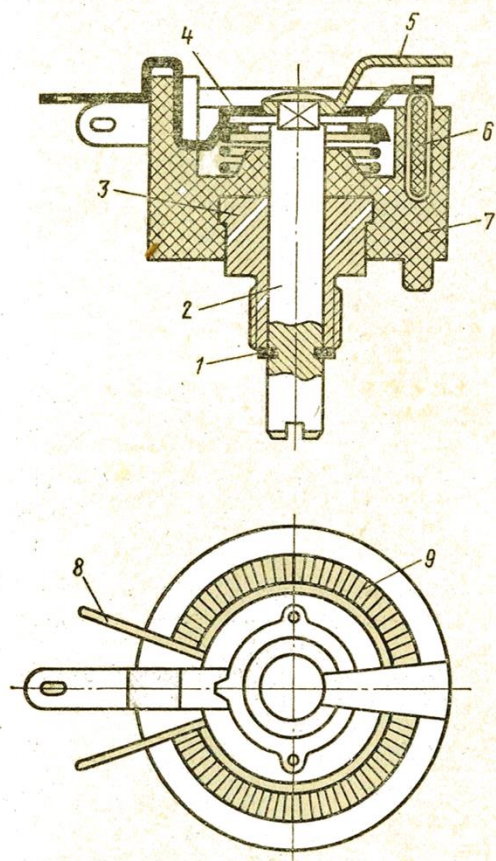


Рис. 70. Переменный проволочный резистор: 1 — стопорная разрезная гайка, 2 — ось, 3 — металлическая цапговая втулка, 4 — кольцо с ползуном, 5 — планка-ограничитель, 6 — пластина, 7 — пластмассовый корпус, 8 — вывод, 9 — провод

Подстроечные резисторы круглой формы могут быть без экрана.

Переменный проволочный резистор (рис. 70) по своей конструкции отличается от резистора, показанного на рис. 69, токопроводящим элементом, выполненным в виде обмотки из изолированного провода на гетинаксовой или металлической (оксидированной) пластине 6 дугообразной формы. Корпус 7 резистора может быть прямоугольным или круглым. Для контакта ползуна 4 с обмоткой провод 9 в верхней части дуги зачищают.

Подстроечный проволочный резистор прямоугольной формы имеет подвижные контакты, перемещающиеся по кругу или прямолинейно с помощью червячной пары или пары «микрометрический винт — гайка».

Основные параметры резисторов.

Основными электрическими параметрами резисторов являются: номинальное сопротивление и его допустимое отклонение от номинала, номинальная мощность рассеивания. Предельное рабочее напряжение, температурный коэффициент сопротивления, собственные шумы, а также частотные и нелинейные характеристики. Кроме того, важными параметрами переменных резисторов являются максимальное и минимальное сопротивления, изменение сопротивления от угла поворота, электрическая прочность относительно корпуса.

Номинальное сопротивление и его допустимое отклонение. Сопротивление (Ом) резистора в общем случае определяют по формуле

$$R = \rho l / S,$$

где ρ и S – удельное электрическое сопротивление, Ом $\times$ мм² / м, и площадь, мм², поперечного сечения токопроводящего элемента; l – длина пути прохождения тока, м.

Сопротивление поверхностных резисторов цилиндрической формы без спиральной нарезки и с нарезкой (см. рис. 65):

$$R = \rho l / \pi D (mm) h;$$

$$R = \rho N \pi D (m) / (t - a) h,$$

где l – длина образующей цилиндра резистора без нарезки, м; h – толщина токопроводящего слоя, мм; D – наружный диаметр керамического стержня; N , t и a – число витков, шаг и ширина спиральной нарезки, мм.

Сопротивление объёмных резисторов прямоугольной формы с композиционным токопроводящим слоем (см. рис. 66)

$$R = \rho l / bc,$$

где l , b и c – длина, ширина и высота композиционного стержня, мм.

Сопротивление проволочных резисторов

$$R = 4 \rho l / \pi d^2,$$

где l и d – длина, м, и диаметр, мм, проволоки.

Сопротивление непроволочных переменных резисторов с токопроводящим слоем подковообразной формы

$$R = \rho (r_2 + r_1) \pi \varphi / (r_2 - r_1) h * 360,$$

где ρ – удельное поверхностное электрическое сопротивление композиции, Ом $\times$ см; r_1 и r_2 – внешний и внутренний радиус подковы, см; h – толщина токопроводящей композиции, см; h – толщина токопроводящей композиции, см, φ – угол, соответствующий длине токопроводящего слоя, град.

Сопротивление тонкопленочных резисторов ГИС

$$R = \rho_{\square} l / b$$

Где ρ – удельное электрическое сопротивление пленки, отнесенное произвольному квадрату её поверхности, Ом/ $\square$; l и b – длина и ширина тонкопленочного резистора, мм.

Из формул (9) - (15) видно, что изменить сопротивление можно, изменив удельное электрическое сопротивление токопроводящего слоя, или геометрические размеры его сечения, или длину. Для поверхностных резисторов в пределах одной и той же группы, например углеродистых, наиболее рациональным является способ изменения длины токопроводящего слоя спиральной нарезки. Это позволяет при одних и тех же габаритах получить резисторы с различными сопротивлениями, но с одной и той же мощностью рассеивания. С той же целью для объёмных и переменных непроволочных резисторов меняют состав композиции либо площадь сечения слоя. В проволочных резисторах для изменения сопротивления при одних и тех же габаритах изменяют число витков, сечение провода или реже марку, а в пленочных резисторах ГИС – геометрические размеры, так как смена рабочего рабочего материала нежелательна из-за значительного увеличения технологического времени.

Значение требуемых сопротивлений при расчете и разработке конкретных видов РЭА могут быть различными, а изготовление резисторов любого типа сопряжено с производственными погрешностями, поэтому заводы-изготовители выпускают резисторы по стандартным шкалам номинальных значений (ГОСТ 2825 –67, ГОСТ 10318-74) с регламентированными классами точности (ГОСТ 9664 – 74). Так, шкала номинальных сопротивлений непроволочных постоянных резисторов имеет диапазон от 10 Ом до 1 Мом с допустимыми отклонениями $\pm 5, \pm 10, \pm 20\%$. Класс точности резисторов определяется

допуском на производственные погрешности, оцениваемые относительными отклонениями от номинала, которые выражаются в процентах. Допуски $\pm 5, \pm 10, \pm 20\%$ соответствуют I, II, III классами точности, наиболее употребительными в производстве. Однако в современной РЭА часто требуются резисторы с повышенной точностью, поэтому промышленность выпускает их с допусками $\pm 2; \pm 1; \pm 0,5; \pm 0,2; \pm 0,1; \pm 0,05; \pm 0,02$ и $\pm 0,01\%$. Переменные резисторы, как правило, имеют допуски $\pm 5, \pm 10, \pm 20, \pm 30\%$. Особенностью изготовления пленочных постоянных резисторов ГИС является возможностью получения в пределах технологических ограничений либо не стандартного номинального значения сопротивления; точностью изготовления без подгонки не превышает $\pm(5/15)\%$.

Номинальная мощность рассеивания. При прохождении тока через токопроводящий элемент выделяется тепловая энергия которая в результате конвенции излучения рассеивается внешней поверхностью резистора в окружающую среду или передается другим элементам РЭА за счет теплопроводности и определяет мощность рассеивания (Вт) резистора

$$P=I^2R,$$

где I – ток проходящий через резистор, а в зависимости от фактора внешней среды (температуры, давления, конвенции воздуха, влажности), конструкции резистора, формы и приложенного напряжения в резисторе будет выделяться и отводиться большая и меньшая мощность. Так, с увеличением температуры окружающей среды и уменьшения давления ухудшаются условия теплообмена и резистор начинает перегреваться. Наоборот, перегревы становятся менее заметными, если условия теплообмена или выделение мощности улучшается, например, за счет увеличения теплоотдающей поверхности резистора или применения его в импульсном режиме вместо непрерывного режима колебания тока.

Длительные перегревы (общие и локальные) необязательно приводят к перегоранию токопроводящего элемента и тем самым к внезапному отказу резистора. Они могут вызвать постепенное изменение в токопроводящем элементе, которое настолько ухудшает основные электрические параметры резистора, что дальнейшее применение резистора окажется не целесообразным. Поэтому одной из основных характеристик резистора является номинальная мощность рассеивания.

Под *номинальной мощностью рассеивания* понимают максимально допустимую мощность, которую резистор может рассеивать при длительной электрической нагрузке в нормальных условиях без изменения электрических параметров высшей нормы, указанных в технических условиях на него. Резисторы эксплуатируют, как правило, при мощностях рассеивания в 3-10 раз меньше номинальных, что обеспечивает более высокую надежность устройств. Однако некоторые резисторы в аппаратуре могут быть нагружены на номинальную мощность и на 10-20 % выше. При этом срок службы уменьшается до 10 раз и больше. Отношение реальной рассеиваемой мощности резистора к его номинальной называют *коэффициентом загрузки резистора*.

Промышленность выпускает резисторы с номинальными мощностями рассеивания от 0,01 до 500 Вт. Как правило чем выше номинальная мощность рассеивания тем больше габариты резистора. В большинстве радиоэлектронных изделий применяют резисторы с номинальной мощностью рассеивания не выше 2 Вт.

Предельное рабочее напряжение. Максимально допустимое напряжение, приложено к выводам резистора которое не вызывает превышение технических условий на электрические параметры, называется предельным рабочим напряжением. Эта величина обычно задается для нормальных условий эксплуатации и зависит от длины резистора, шага спиральной нарезки, температуры и давления внешней среды. Чем выше температура и ниже атмосферное давление, тем вероятнее ухудшение тепловых режимов электрической

прочности резистора, вызывающее изменение сопротивления, повышение уровня собственных шумов и искрение (микродугу или перекрытие по поверхности). Чем больше длинна резистора и шаг нарезки, тем меньше вероятность возникновения искрения.

Температурный коэффициент сопротивления (ТКС). Этот параметр характеризует относительное изменение сопротивления резистора при изменении температуры окружающей среды на 1°С и выражается в 1/°С.

$$TKC = \Delta R / R_0 \Delta t$$

Где ΔR – абсолютное изменение сопротивления резистора (Ом) в диапазоне температур Δt , °С; R_0 – сопротивление резистора (Ом) при нормальной температуре t_0 .

$$\Delta t = t - t_0,$$

где t – положительная или отрицательная предельная температура эксплуатации резистора по техническим условиям, °С.

Значение ТКС и закон его изменения для положительного или отрицательного диапазонов температур, как правило, различны, однако для большинства резисторов в указанных диапазонах закон ТКС представляется линейным, а величина – постоянной. В случаях, когда ТКС изменяется по резко не линейному закону, в технических условиях на резистор указывают не величину ТКС, а предельное относительное изменение сопротивления при крайних значениях рабочих температур.

Значение и знак ТКС определяется в основном температурным коэффициентом удельного сопротивления (ТК ρ) материала токопроводящего слоя. Так, проволочные резисторы чаще всего имеют малые положительные ТКС; углеродные – отрицательные среднего значения; полупроводниковые – большой отрицательный, а металлизированные и композиционные – знакопеременный средний и большой.

Собственные шумы. При приложении к резисторам постоянного напряжения в них наблюдаются «шумы». Шум представляет собой переменную составляющую, накладываемую на постоянный уровень напряжения резистора, что создает помехи для прохождения сигнала и ограничивает чувствительность приемных трактов РЭА.

Особенно вредны шумы резисторов, используемых в особых цепях приемников, так как они усиливаются вместе с полезным сигналом. Собственные шумы резисторов имеют двоякую природу: это так называемые «тепловые» и «токовые» шумы.

Тепловые шумы возникают под действием хаотического движения электронов в токопроводящем слое, что приводит к случайным микроизменениям сопротивления резисторов и, следовательно, к появлению переменных пульсаций напряжения на нем. С увеличением температуры тепловые шумы возрастают. Они присущи всем видам резисторов и по своей величине гораздо меньше токовых шумов.

Электродвижущая сила (мкВ) тепловых шумов определяют по формуле

$$E_{ш} = \sqrt{4kTR\Delta F},$$

где k – постоянная Больцмана ($1,37 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); T – температура, К; R – сопротивление, Ом; ΔF – полоса частот, Гц.

Таковые шумы возникают в резисторах с зернистой структурой токопроводящего слоя – в несплошных углеродистых, металлизированных и композиционных. Направление тока при его прохождении и через токопроводящий слой этих резисторов носит случайный характер и наиболее вероятно там, где в данный момент соприкасается зерен повышена. Это приводит к появлению случайной составляющей напряжения на выводах резистора.

Уровень таковых шумов D (мкВ/В) определяет соотношение действующего значения случайной составляющей E_t к постоянному напряжению U , приложенному к резистору:

$$D = E_t / U.$$

С увеличением приложенного напряжения такие шумы возрастают. В переменных резисторах наблюдаются шумы, вызванные изменением сопротивления контактной пары за счет меняющегося во времени давления между контактами.

Наиболее шумящими резисторами являются композиционные, поэтому применение их в приемных устройствах ограничено. По уровню шумов резисторы делятся на 2 группы: а ($D \leq 1$ мкВ/В) и группа б ($D \leq 5$ мкВ/В).

Частотные свойства резисторов. При работе резисторов в диапазоне частот переменного тока сопротивление может изменяться относительно его номинала при постоянном токе, что приводит к изменению выходных параметров и устойчивости работы узлов, блоков и устройств в целом. Эти изменения, в особенности для мегагерцевого диапазона частот, могут составлять единицы децибел.

Упрощенная эквивалентная схема резистора для высоких частот (рис. 71) кроме собственно активного сопротивления R включает реактивные составляющие - индуктивности $L'_{пар}$ и $L''_{пар}$ и емкость $C_{пар}$, которая ухудшает частные свойства резисторов

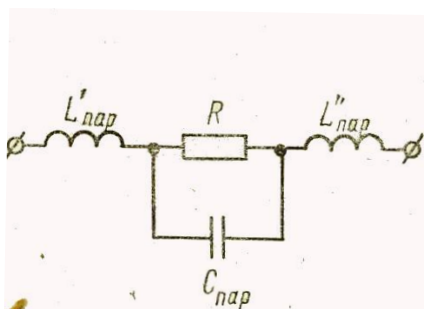


Рис. 71. Эквивалентная схема резистора для высоких частот

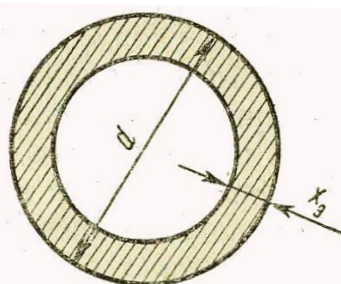


Рис. 72. Распределение тока в сечении провода при поверхностном эффекте в проволочных резисторах

и поэтому их часто называют «паразитными». Для различных типов резисторов паразитные индуктивности и емкость образуются по-разному, поэтому меры,

предусматривающие их уменьшение, так же различны. Более подробно мы рассмотрим это при описании конкретных типов резисторов.

Для проволочных резисторов паразитная индуктивность образуется за счет намотки провода и индуктивности выводов, а паразитная емкость — за счет межвитковой емкости. Проволочные резисторы по сравнению с непроволочными гораздо менее частотные и применение их без принятия специальных мер ограничивается областью постоянного тока и диапазоном звуковых частот.

С увеличением частоты, как известно, индуктивная составляющая полного сопротивления растет, а емкостная уменьшается, поэтому сопротивление проволочного резистора может изменяться и в ту и в другую сторону. Однако с увеличением частоты сопротивления проволочного резистора всегда увеличивается. Это объясняется действиями поверхностного эффекта, который состоит в том, что с увеличением частоты переменного поля в толще проводника возникают индуцированные токи (токи Фуко) вытесняющие переменный ток к поверхности проводника. При этом действующее сечение проводника по сравнению с полным его сечением (сечением, через которое проходит постоянный ток) уменьшается и, если проводник круглый, принимает условную форму кольца (рис. 72), образованного разностью между внешним диаметром проволоки d и диаметром, равным $d - x_\delta$, где $x_\delta = \sqrt{\rho / f\mu / 2}$ - глубина, мм, проникновения высокочастотного тока в проводник; f - частота переменного тока, МГц; μ - относительная магнитная проницаемость. Чем выше частота, тем меньше x_δ и площадь кольца и тем больше сопротивление проволочного резистора.

У непроволочных резисторов действием поверхностного эффекта можно пренебречь, так как они имеют зернистую структуру и диаметр зерен, как правило, гораздо меньше глубины проникновения. Для них частотные зависимости сопротивления в основном определяются паразитными емкостью и индуктивностью. Для непроволочных резисторов без спиральной нарезки (низкоомных) сопротивление увеличивается с частотой, так как в эквивалентной схеме нет паразитной емкости, а есть паразитная индуктивность. Для непроволочных резисторов со спиральной нарезкой, наоборот, влиянием паразитной индуктивности можно пренебречь. Уменьшение сопротивления обусловлено шунтирующим действием паразитной емкости, распределенной в пазах нарезки (рис. 73). Чем толще поверхностный токопроводящий слой, выше диэлектрическая проницаемость покрытия и больше число витков нарезки, тем больше паразитная емкость и хуже частотные свойства резистора.

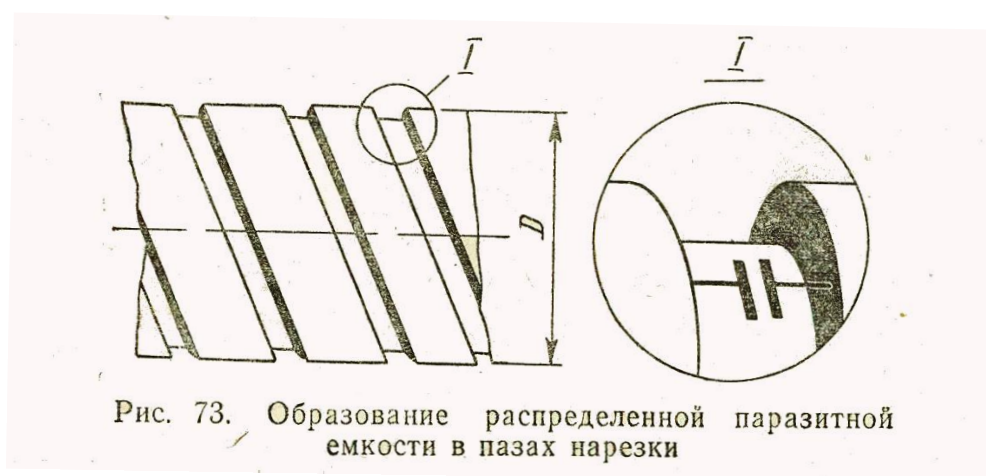


Рис. 73. Образование распределенной паразитной емкости в пазах нарезки

Лекция 12 Конденсаторы

Общая характеристика конденсаторов

Конденсатор- это элемент электрической цепи, состоящей из проводящих электродов (обкладок), разделенных диэлектриком и предназначенный для использования его емкости.

Емкость конденсатора есть отношение заряда конденсатора к разности потенциалов, которую заряд сообщает конденсатору

$$C=q/u,$$

Где C - емкость, Ф., q -заряд, Кл, u -разность потенциалов на обкладках конденсатора, В.

За единицу емкости в международной системе СИ принимают емкость такого конденсатора, у которого потенциал возрастает на один вольт при сообщении ему заряда один кулон. Эту единицу называют фарадой. Для практических целей она слишком велика, поэтому на практике используют более мелкие единицы емкости: микрофараду, нанофараду и пикофараду.

Для конденсатора, обкладки которого представляют собой плоские пластины одинакового размера, разделенные диэлектриком.

В качестве диэлектрика в конденсаторах используются органические и неорганические материалы, в том числе оксидные пленки некоторых металлов. Значения относительной диэлектрической проницаемости для некоторых материалов, используемых в конденсаторах, приведены в табл. 1.

При приложении к конденсатору постоянного напряжения происходит его заряд; при этом затрачивается определенная работа, выражаемая в *джоулях*. Она равна запасенной потенциальной энергии

$$W = CU^2 / 2.$$

Для сравнения конденсаторов используются удельные характеристики, представляющие собой отношение основных характеристик конденсатора к его объему V или массе m .

Материал	ϵ_r
Воздух	1,0006
Кварц	2,8
Стекло	4-16
Слюда	6-8
Стеклоэмаль	10-20
Стеклокерамика	15-450
Керамика	12-230
Сегнетокерамика	900-8000
Конденсаторная бумага	3,5-6,5
Триацетат и ацетобутират	3,5-4
Поликарбонат	2,8-3
Полиэтилентерефталат	3,2-3,4
Полистирол	2,5
Полипропилен	2,2-2,3
Политетрафторэтилен	2-2,1
Оксидные пленки	10-46

Для низкочастотных конденсаторов основными удельными характеристиками являются удельная емкость или удельный заряд.

Для высокочастотных высоковольтных конденсаторов удобной характеристикой является удельная реактивная мощность.

Для энергоемких накопительных конденсаторов используются удельная энергия и удельная масса.

Классификация конденсаторов.

В данном справочнике приведены две классификации: одна весьма общая, в которой ряд признаков присущ не только конденсаторам, но и многим другим электронным элементам, например по назначению, по способу монтажа и т.п., и вторая - конкретная, относящаяся только к конденсаторам. В основу ее положено дальнейшее деление групп конденсаторов по виду диэлектрика на подгруппы, связанные с использованием их в конкретных цепях аппаратуры, назначением и выполняемой функцией, например, низковольтные и высоковольтные, низкочастотные и высокочастотные, импульсные и пусковые, полярные и неполярные, помехоподавляющие и дозиметрические и др.

В зависимости от назначения конденсаторы разделяются на две большие группы: общего и специального назначения.

Группа общего назначения включает в себя широко применяемые конденсаторы, используемые практически в большинстве видов и классов аппаратуры. Традиционно к ней относятся наиболее распространенные низковольтные конденсаторы, к которым не предъявляются особые требования.

Все остальные конденсаторы являются специальными. К ним относятся: высоковольтные, импульсные, помехоподавляющие, дозиметрические, пусковые др.

По характеру изменения емкости различают конденсаторы постоянной емкости, переменной емкости и подстроечные.

Из названия конденсаторов постоянной емкости вытекает, что их емкость является фиксированной и в процессе эксплуатации, не регулируются.

Конденсаторы переменной емкости допускают изменение емкости в процессе функционирования аппаратуры. Управлению емкостью может осуществляться механически, электрическим напряжением и температурой. Их применяют для плавной настройки колебательных контуров, в цепях автоматики и т.п.

Емкость подстроечных конденсаторов изменяется при разовой или периодической регулировки и не изменяется в процессе функционирования аппаратуры. Их используют для подстройки и выравнивания начальных емкостей сопрягаемых контуров, для периодической подстройки и регулировки цепей схем, где требуется незначительное изменение емкости и т.п.

В зависимости от способа монтажа конденсаторы могут выполняться для печатного и для навесного монтажа, а также для использования в составе микромодулей и микросхем или для сопряжения с ними. Выводы конденсаторов для навесного монтажа могут быть жесткие или мягкие, аксиальные или радиальные из проволоки круглого сечения или ленты, в виде лепестков, с кабельным вводом, в виде проходных шпилек, опорных винтов и т.п. у конденсаторов для микросхем и микромодулей, а также СВЧ конденсаторов в качестве выводов могут использоваться части их поверхности. У большинства типов оксидных, а также проходных и опорных конденсаторов одна из обкладок соединяется с корпусом, который служит вторым выводом.

По характеру защиты от внешних воздействующих факторов конденсаторы выполняются: незащищенными, защищенными, неизолированными, изолированными, уплотненными и герметизированными.

Незащищенные конденсаторы допускают эксплуатацию в условиях повышенной влажности только в составе герметизированной аппаратуры. Защищенные конденсаторы допускают эксплуатацию в аппаратуре любого конструктивного исполнения.

Неизолированные конденсаторы не допускают касания своим корпусом шасси аппаратуры. Напротив, изолированные конденсаторы имеют достаточно хорошее изоляционное покрытие (компаунды, пластмассы и т.п.) и допускают касания корпусом шасси или токоведущей части аппаратуры.

Уплотненные конденсаторы имеют уплотненную органическими материалами конструкцию корпуса.

Герметизированные конденсаторы имеют герметичную конструкцию корпуса, который исключает возможность сообщения окружающей среды с его внутренним пространством. Герметизация осуществляется с помощью керамических и металлических корпусов или стеклянных колб.

По виду диэлектрика все конденсаторы можно разделить на группы: с органическим, неорганическим, газообразным и оксидным диэлектриком, который является также неорганическим, но в силу особой специфики характеристик выделен в отдельную группу.

Конденсаторы с органическим диэлектриком. Эти конденсаторы изготавливают обычной намоткой тонких длинных лент конденсаторной бумаги, пленок или их комбинации с металлизированными или фольговыми электродами.

Деление конденсаторов с органической изоляцией на низковольтные (до 1600 В) и высоковольтные (свыше 1600В) носит чисто условный характер и не для всех типов строго соблюдается. Например, для бумажных конденсаторов границей деления является напряжение 1000В.

По назначению и используемым диэлектрическим материалам низковольтные конденсаторы можно разделить на низкочастотные и высокочастотные.

К низкочастотным пленочным относятся конденсаторы на основе полярных и слабополярных органических пленок (бумажные, металлобумажные, полиэтилентерефталатные, комбинированные, лакопленочные, поликарбонатные, и полипропиленовые), тангенс угла диэлектрических потерь которых имеет резко выраженную зависимость от частоты. Они способны работать на частотах до $10^4 - 10^5$ Гц при существенном снижении амплитуды переменной составляющей напряжения с увеличением частоты.

К высокочастотным пленочным относятся конденсаторы на основе неполярных органических пленок (полистирольные и фторопластовые), имеющие малое значение тангенса угла диэлектрических потерь, не зависящее от частоты. Они способны работать на частотах до $10^5 - 10^7$ Гц. Верхний предел по частоте зависит от конструкции обкладок и контактного узла и от емкости. К этой группе относят и некоторые типы конденсаторов на основе слабополярной полипропиленовой пленки.

Высоковольтные конденсаторы можно разделить на высоковольтные постоянного напряжения и высоковольтные импульсные.

В качестве диэлектрика высоковольтных конденсаторов постоянного напряжения используют: бумагу, полистирол, политетрафторэтилен (фторопласт), полиэтилентерефталат (лавсан) и сочетание бумаги и синтетических пленок (комбинированные).

Высоковольтные импульсные конденсаторы в большинстве случаев делают на основе бумажного и комбинированного диэлектриков.

Основное требование, предъявляемое к высоковольтным конденсаторам, - высокая электрическая прочность. Поэтому часто прибегают к использованию комбинированного диэлектрика, состоящего, например, из слоев бумаги и пленки, слоев различных органических пленок и слоя жидкого диэлектрика (пропитанная конденсаторная бумага). Комбинированные конденсаторы обладают повышенной по сравнению с бумажными конденсаторами электрической прочностью, надежностью и имеют более высокое сопротивление изоляции.

Высоковольтные импульсные конденсаторы наряду с высокой электрической прочностью и сравнительно большими емкостями должны допускать быстрые заряды, т.е. пропускать большие токи. Следовательно, их собственная индуктивность должна быть малой, чтобы не искажать формы импульсов. Этим требованиям лучше всего удовлетворяют конденсаторы бумажные, металлобумажные и комбинированные.

Дозиметрические конденсаторы работают в цепях с низким уровнем токовых нагрузок. Поэтому они должны обладать очень малым саморазрядом, большим сопротивлением изоляции, а следовательно, и большой постоянной времени. Лучше всего для этой цели подходят фторопластовые конденсаторы.

Помехоподавляющие конденсаторы предназначены для ослабления электромагнитных помех в широком диапазоне частот. Они имеют малую собственную индуктивность, в результате чего повышается резонансная частота и полоса подавляемых частот. Кроме того, для повышения безопасности обслуживания персонала, помехоподавляющие конденсаторы должны иметь высокую электрическую прочность изоляции. Помехоподавляющие конденсаторы делают бумажные, комбинированные и пленочные (в основном лавсановые).

Конденсаторы с неорганическим диэлектриком. Конденсаторы с неорганическим диэлектриком можно разделить на 3 группы: низковольтные, высоковольтные и помехоподавляющие. В качестве диэлектрика в них используется керамика, стекло, стеклокерамика и слюда. Обкладки выполняются в виде тонкого слоя металла, нанесенного на диэлектрик путем его непосредственной металлизации, или в виде тонкой фольги.

Группа низковольтных конденсаторов включает в себя низкочастотные и высокочастотные конденсаторы.

По назначению они подразделяются на три типа:

Тип 1- конденсаторы, предназначенные для использования в резонансных контурах или других цепях, где малые потери и высокая стабильность емкости имеют существенное значение;

Тип 2- конденсаторы, предназначенные для использования в цепях фильтров, блокировки и развязки или других цепях, где малые потери и высокая стабильность емкости не имеют существенного значения;

Тип 3- керамические конденсаторы с барьерным слоем, предназначенные для работы в тех же цепях, что и конденсаторы типа 2, но имеющие несколько меньшее значение

сопротивления изоляции и большее значение тангенса угла диэлектрических потерь, что ограничивает область применения низкими частотами.

Обычно конденсаторы типа 1 считаются высокочастотными, а типов 2 и 3 – низкочастотными. Определенной границы между конденсаторами типов 1 и 2 не существует. Высокочастотные конденсаторы работают в цепях с частотой до сотен мегагерц, а некоторые типы используют в гигагерцевом диапазоне.

Слюдяные и стеклоэмалевые (стеклянные) конденсаторы относятся к конденсаторам типа 1, стеклокерамические могут быть как типа 1, так и типа 2, керамические – трех типов.

Высоковольтные конденсаторы большой и малой реактивной мощностью делаются в основном с диэлектриком из керамики и слюды. По назначению они могут быть типов 1 и 2 и также, как низковольтные конденсаторы, они разделяются на высокочастотные и низкочастотные.

Основным параметром для высоковольтных низкочастотных конденсаторов является удельная энергия, поэтому керамику для них подбирают с большой диэлектрической проницаемостью. Для высокочастотных конденсаторов основным параметром является допустимая реактивная мощность. Она характеризует нагрузочную способность конденсатора при наличии больших напряжений высокой частоты. Для увеличения реактивной мощности выбирают керамику с малыми потерями, а конструкцию и выводы конденсаторов рассчитывают на возможность прохождения больших токов.

Высоковольтные слюдяные конденсаторы делают фольговыми, так как они предназначены для работы при повышенных токовых нагрузках.

Помехоподавляющие конденсаторы с неорганическим керамическим диэлектриком разделяются на опорные и проходные. Их основное назначение – подавление промышленных и бытовыми приборами, выпрямительными устройствами и др., а также помех атмосферных и помех, излучаемых различными радиоэлектронными устройствами, т.е. по существу они являются фильтрами нижних частот. К этой группе, исходя из функционального назначения и конструктивного исполнения, условно можно отнести керамические фильтры.

Опорные конденсаторы – это конденсаторы, одним из выводов которых является опорная металлическая пластина с резьбовым креплением.

Проходные конденсаторы делают коаксиальными – один из выводов которых представляет собой токоведущий стержень, по которому протекает полный ток внешней цепи, и некоаксиальными – через выводы которых протекает полный ток внешней цепи.

Проходные керамические конденсаторы имеют конструкцию трубчатого или дискового типа в виде многослойных монокристаллических шайб.

Если в конденсаторах с целью повышения резонансной частоты принимаются меры к уменьшению собственной индуктивности, то в фильтрах, наоборот, к емкости добавляют внешнюю индуктивность (ферритовый сердечник) либо используют индуктивность выводов. При этом в зависимости от соединения емкости и индуктивности возможны следующие схемы включения: Г-образные, Т – образные и П – образные.

Конденсаторы с оксидным диэлектриком (электролитические). Они разделяются на конденсаторы: общего назначения, неполярные, высокочастотные, импульсные, пусковые и помехоподавляющие. В качестве диэлектрика в них, используется оксидный слой, образуемый электрохимическим путем на аноде – металлической обкладке из некоторых металлов.

В зависимости от материала анода оксидные конденсаторы подразделяются на алюминиевые, танталовые и ниобиевые.

Второй обкладкой конденсатора – катодом служит электролит, пропитывающий бумажную или тканевую прокладку в оксидно– электролитических (жидкостных) алюминиевых и танталовых конденсаторах, жидкий или гелеобразный электролит в танталовых объемно-пористых конденсаторах и полупроводник (двуокись марганца) в оксидно-полупроводниковых конденсаторах.

Конденсаторы с оксидным диэлектриком – низковольтные, с относительно большими потерями, но в отличие от других типов низковольтных конденсаторов имеют несравнимо большие заряды и большие емкости (от единиц до сотен тысяч микрофарад). Они используются в фильтрах источников электропитания, цепях развязки, шунтирующих и переходных цепях полупроводниковых устройств на низких частотах и т.п.

Конденсаторы группы общего назначения имеют униполярную (одностороннюю) проводимость, вследствие чего их эксплуатация возможна только при положительном потенциале на аноде. Тем не менее, это наиболее распространенные оксидные конденсаторы. Они могут быть жидкостными, объемно-пористыми и оксидно-полупроводниковыми.

Неполярные конденсаторы с оксидным диэлектриком могут включаться в цепь постоянного и пульсирующего тока без учета полярности, а также допускать смену полярности в процессе эксплуатации.

Неполярные конденсаторы делают оксидно-электролитические (жидкостные) алюминиевые и танталовые и оксидно-полупроводниковые танталовые.

Высокочастотные конденсаторы (алюминиевые жидкостные и танталовые оксидно-полупроводниковые) широко применяются в источниках вторичного электропитания, в качестве накопительных и фильтрующих элементов в цепях развязок и переходных цепях полупроводниковых устройств в диапазоне частот пульсирующего тока от десятков герц до сотен килогерц. Отсюда следует, что понятие «высокочастотные» для оксидных конденсаторов относительное. По частотным характеристикам их нельзя сравнивать с конденсаторами на неорганической основе.

Для расширения возможностей использования оксидных конденсаторов в более широком диапазоне частот необходимо снижать их полное сопротивление. Это оказалось возможным при появлении совершенно новых конструктивных решений – четырехвыводных конструкций и плоской конструкции типа «книга», позволяющих их эксплуатацию на значительно более высоких частотах.

Импульсные конденсаторы используются в электрических цепях с относительно длительным зарядом и быстрым разрядом, например в устройствах фотовспышек и др. Такие конденсаторы должны быть энергоемкими, иметь малое полное сопротивление и большое рабочее напряжение. Наилучшим образом этому требованию удовлетворяют оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы с напряжением до 500 В.

Пусковые конденсаторы используются в асинхронных двигателях, в которых емкость включается только на момент пуска двигателя. При наличии пусковой емкости вращающееся поле двигателя при пуске приближается к круговому, а магнитный поток увеличивается. Все это способствует повышению пускового момента, улучшает характеристики двигателя.

Связи с тем пусковые конденсаторы включаются в сеть переменного тока, они должны быть неполярными и иметь сравнительно большое для оксидных конденсаторов рабочее напряжение переменного тока, несколько превышающее напряжение промышленной сети. На практике используются пусковые конденсаторы емкостью порядка десятков и сотен микрофарад, созданные на основе алюминиевых оксидных пленок с жидким электролитом.

В группу оксидных помехоподавляющих конденсаторов входят только проходные оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы. Они так же, как и проходные конденсаторы других типов, выполняют роль фильтра нижних частот, но в отличие от них имеют гораздо большие значения емкостей, что дает возможность сдвигать частотную характеристику в область более низких частот.

Конденсаторы с газообразным диэлектриком. По выполняемой функции и характеру изменения емкости эти конденсаторы разделяются на постоянные и переменные. В качестве диэлектрика в них используют воздух, сжатый газ (азот, фреон, элегаз), вакуум. Особенность газообразных диэлектриков является малое значение тангенса угла диэлектрических потерь (до 10^{-5}) и высокая стабильность электрических параметров. Поэтому основной областью их применения является высоковольтная и высокочастотная аппаратура.

В радиоэлектронной аппаратуре из конденсаторов с газообразным диэлектриком наибольшее распространение получили вакуумные. По сравнению с воздушными они имеют значительно большие удельные емкости, меньшие потери в широком диапазоне частот, более высокую электрическую прочность и стабильность параметров при изменении окружающей среды. По сравнению с газонаполненными, требующими периодической подкачки газа из-за его утечки, вакуумные конденсаторы имеют более простую и легкую конструкцию, меньшие потери и лучшую температурную стабильность; они более устойчивы к вибрации, допускают более высокое значение реактивной мощности.

Вакуумные конденсаторы переменной емкости обладают малым значением момента вращения, а масса и габариты их значительно ниже по сравнению с воздушными конденсаторами. Коэффициент перекрытия по емкости вакуумных переменных конденсаторов может достигать 100 и более.

Вакуумные конденсаторы применяются в передающих устройствах ДВ, СВ и КВ диапазонов на частотах до 30-80 МГц в качестве контурных, блокировочных, фильтровых и разделительных конденсаторов, используются также в качестве накопителей в импульсных искусственных линиях формирования и различного рода мощных высокочастотных установках.

Конструкция конденсаторов.

Пакетная конструкция характерна для слюдяных (рис. 80, а-б), стеклоэмалевых, стеклокерамических и некоторых керамических конденсаторов. Пакет 4 образован чередующимися слоями пластин 2 диэлектрика и обкладок 3, которые могут быть нанесены в виде пленок металла напылением или вжиганием. Обкладки чередующихся слоев конденсаторов, выполненных из фольговых полосок 1, имеют контакт с обоих торцов пакета. К торцам припаивают выводы 6 конденсатора, состоящие из проволочек или лент. Пакетную конструкцию опрессовывают, герметизируют или покрывают влагозащитной эмалью.

Трубчатая конструкция (рис. 81, а и б) характерна для некоторых керамических конденсаторов. Обкладки конденсаторов 4 и 5 образованы на внешней и внутренней поверхностях трубки 6 методом вжигания серебра в керамику. Толщину стенок трубки

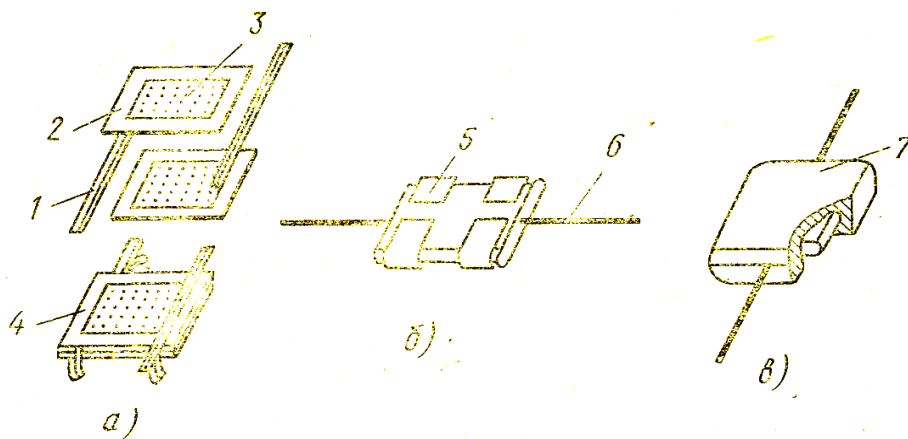


Рис. 80. Слюдяной конденсатор с металлизированными обкладками:

а — сборка пластин, б — пакет пластин после сборки, в — опрессованный конденсатор; 1 — фольговая полоска, 2 — пластинка слюды, 3 — металлизированная обкладка, 4 — пакет пластин, 5 — обжимка, 6 — проволоочный вывод, 7 — пластмассовая опрессовка

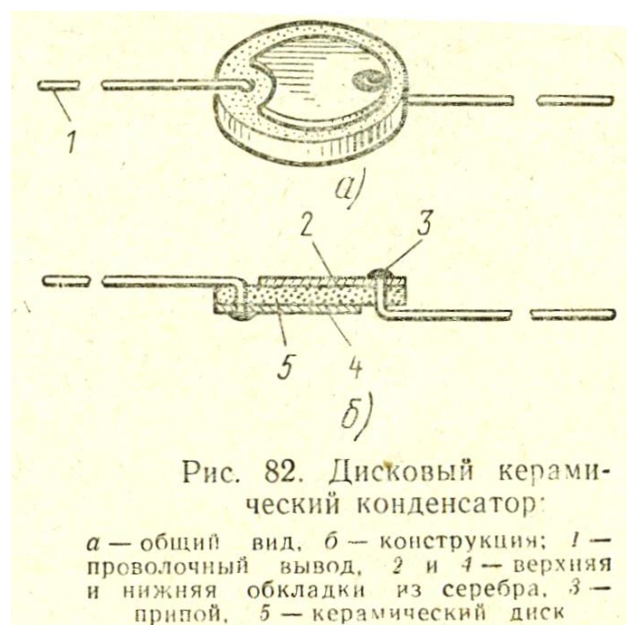
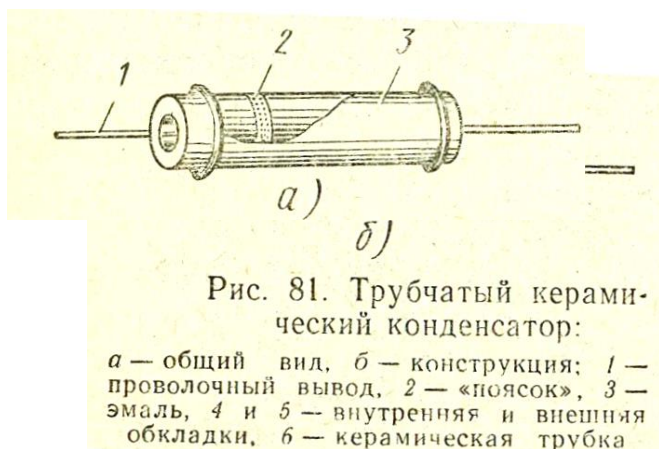
выбирают от 0.25 мм и выше. Для присоединения гибких проволоочных выводов 1 нижнюю обкладку выводят на внешний цилиндр и создают между ней и верхней обкладкой изолирующий “поясок” 2.

Для миниатюрных конденсаторов выводы припаивают непосредственно к обкладкам, не закручивая их и не создавая перехода внутренней обкладки на внешнюю поверхность цилиндра.

Трубчатые конденсаторы имеют влагостойкое цветное эмалевое покрытие, по которому определяют группу стабильности емкости конденсатора.

Дисковая конструкция характерна для некоторых постоянных и полу переменных керамических конденсаторов. На керамическом диске 5 конденсатора (рис 82,а и б) сверху и вниз имеются обкладки 2 и 4, выполненные из воженного серебра в виде полумесяца (при жестком креплении проволочных выводов 1, проходящих через толщину диска) или круга (при непосредственной припайке проволочных выводов к обкладкам). Дисковые конденсаторы также покрывают цветной эмалью.

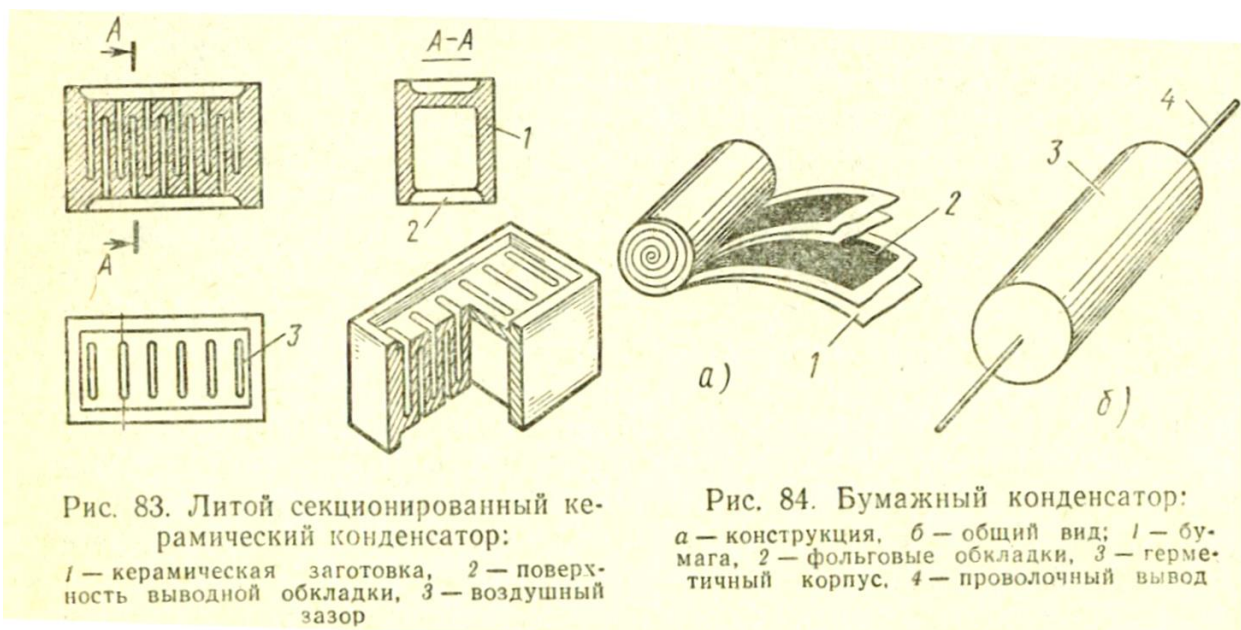
Литая секционированная конструкция (рис 83) характерна для керамических конденсаторов КЛС (керамические литые секционированные) и КЛГ (керамические литые герметизированные). Конденсаторы изготовляют методом горячей керамики. Минимальная толщина стенок при литье около 1000 мкм, а воздушный зазор 3 (прорезь) между ними-130-150 мкм. Обкладки наносят на поверхности стенок методом окунания в серебряную пасту, которую затем вжигают в керамику.



Получение нужной коммутации секций осуществляют пасты с последующим наращиванием обкладок и припайкой к ним проволочных выводов конденсатора. После этого конденсатор лакируют и покрывают цветной эмалью и цветными полосками по торцам.

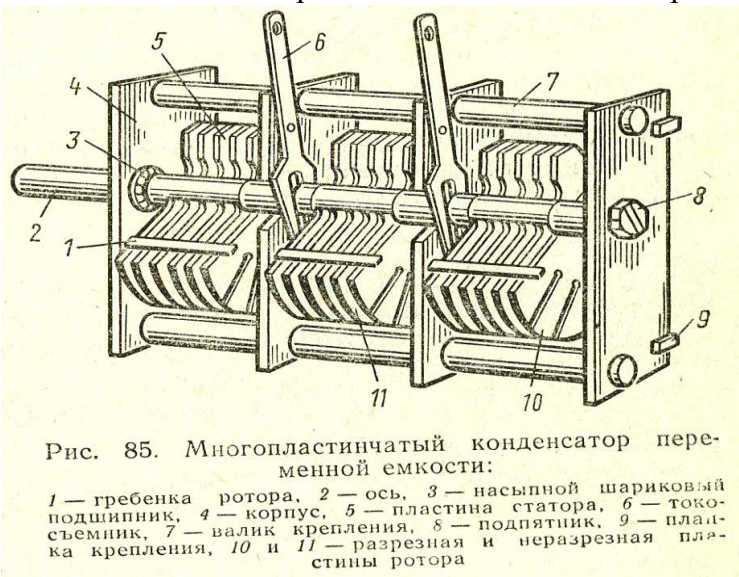
Рулонная конструкция характерна для бумажных (рис 84, а и б), пленочных и электролитических сухих конденсаторов.

В этом случае диэлектрик (бумагу, пленку) или обкладку(алюминиевую фольгу) с



нанесенным на неё диэлектриком(окисью алюминия, тантала, ниобия) в виде длинных и тонких лент свертывают в рулон. При этом в бумажных и пленочных конденсаторах одновременно свертывают фольговые обкладки 2, разделенные бумагой или пленкой (толщина бумаги не более 5мкм, пленки-10-20 мкм, обкладок из алюминия —8мкм). В металlobумажных и металлопленочных конденсаторах обкладки выполняют нанесением металлического тонкого слоя (сотые доли микрометра) на поверхность ленты диэлектрика. В электрических конденсаторах между двумя обкладками (оксидированной и не оксидированной) прокладывают ленту из бумаги или бязи, пропитанную электролитом, которую сворачивают в рулон одновременно с обкладками. Роль диэлектрика выполняет оксидная пленка алюминия или

тантала. Малая толщина диэлектрика обеспечивает электролитическим конденсаторам повышенную удельную емкость. Электролит выполняет роль второй обкладки, необходим для поддержания требуемой электрической прочности пленки при рабочих напряжениях от единиц до сотен вольт и является ограничивающим гасящим сопротивлением в схеме конденсатора. Толщину алюминиевой фольги принимают равной 50-100 мкм, а танталовой - до 10мкм. Секции, намотанные в рулон, помещают в металлические корпуса, герметизируют пайкой, сваркой, компаундами и уплотнительными резиновыми прокладками.



Многопластинчатая конструкция характерна для воздушных конденсаторов переменной емкости. Основными элементами таких конструкций являются корпус 4, статорная и роторная секции, система подвески оси, ось 2, токосъемники 6 и система подвески статора. Статорная и роторная секции состоят соответственно из пластин 5 и 10,11, укрепленных на щвелерах и оси

различными методами (расчеканкой, пайкой, отбортовкой, методом напряженных посадок). Ротор, как правило, заземлен на корпус, а статор изолирован от него.

Вращением оси изменяют положение роторных и статорных пластин в пределах угла поворота от 0 до 180, а следовательно, площадь их перекрытия и емкость конденсатора. Закон изменения емкости в зависимости от угла поворота определяется формой роторных пластин, реже - статорных. С помощью подпятника 8 регулируется плавность вращения оси. Крайние пластины 10 ротора делают разрезными. Отгибая или подгибая часть сектора пластины, можно менять емкость конденсатора в небольших пределах, подгоняя ее под требуемое значения для заданного угла поворота.

Параметры конденсаторов.

Основными параметрами конденсаторов являются номинальная емкость и класс точности, стабильность емкости, электрическая прочность, сопротивление изоляции, потери и частотные характеристики.

Емкость (Ф) конденсатора в общем случае

$$C = Q / U$$

где Q – накопленный на обкладках электрический заряд, Кл; U – напряжение на обкладках, В.

Емкость конденсаторов (пФ) с плоскими электродами

$$C = 0,0884eS / d$$

где e- относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; S – площадь обкладки, см²; d-толщина диэлектрика, см.

Емкость многопластинчатых, литых секционированных и пакетных конденсаторов

$$C = 0,0884eS(n - 1) / d ,$$

Где n- число пластин (обкладок).

Емкость трубчатых конденсаторов

$$C = 0,241 \frac{el}{\left| \lg \frac{D_2}{D_1} \right|} .$$

где l – длина обкладок на образующей цилиндра, см; D1 и D2 – внешний и внутренний диаметры трубки, см. Поскольку толщина трубки - $\Delta = D_1 - D_2$, то

$$C = 0,241el / \left| \lg(1 - \Delta / D_1) \right|$$

Емкость конденсаторов рулонного типа

$$C = 0,1768ebL / d ,$$

где b и L – ширина и длина обкладки на ленте, см.

Емкости конденсаторов с объемно-пористым анодом могут быть рассчитаны как емкость конденсаторов с плоскими электродами, если под площадью обкладки S понимать полную эффективную площадь пористого анода, а под толщиной диэлектрика d-толщину оксидированной пленки тантала.

Как видно из приведенных формул, емкость прямо пропорциональна диэлектрической постоянной материала диэлектрика и площади обкладок и обратно пропорциональна диэлектрическому зазору между ними.

Емкость, отнесенная к объему конденсатора V , называется удельной.

$$C_{уд} = C/V.$$

Удельная емкость – одна из важнейших характеристик для сравнения качеств конденсаторов. Так, малогабаритные или миниатюрные конденсаторы обладают повышенной удельной емкостью и небольшим рабочим напряжением. В бумажных и электролитических конденсаторах удельную емкость повышают в основном за счет уменьшения толщины диэлектрика и увеличения площади обкладок.

Номинальная емкость (1 пФ и выше) стандартизированные конденсаторы, за исключением электролитических и прямоугольных бумажных и пленочных, соответствует шкале ГОСТ 2519-67. Для электролитических конденсаторов шкала номиналов имеет пределы 0,5-10000 мкФ, а для бумажных и пленочных в прямоугольных корпусах – 0,1-1000 мкФ.

Класс точности конденсаторов определяется допустимым отклонением емкости. Конденсаторы выпускают по I, II и III классам точности, что соответствует допускам $\pm 5, \pm 10, \pm 20\%$. Блокировочные, разделительные и фильтровые конденсаторы выбирают, как правило, по III, реже – по II классу. Контурные конденсаторы и конденсаторы, используемые в измерительной аппаратуре и других ответственных цепях, выбирают по I классу и даже по классу $0(\pm 2\%)$ или $00(\pm 1\%)$. В настоящее время классы точности и соответствующие им допуски регламентированы шкалой ГОСТ 9661-73.

Стабильность емкости конденсаторов определяется ее изменением под действием дестабилизирующих факторов (температуры, старения, влаги, фонового излучения и т.п.). В технических условиях (ТУ) на конденсатор, как правило, обычно приводят данные о влиянии первых трех факторов.

Влияние температуры на емкость конденсаторов небольших емкостей высокочастотного диапазона характеризуется в ТУ температурным коэффициентом емкости ТКЕ ($1/^\circ\text{C}$).

$$ТКЕ = \Delta C / C_0 \Delta t$$

где C_0 – емкость конденсатора при нормальной температуре, пФ;

ΔC – изменение емкости при отклонении температуры от нормальной на величину Δt . Таким образом, температурный коэффициент емкости есть относительное изменение емкости конденсатора при изменении температуры окружающей среды на 1°C .

Для большинства указанных конденсаторов в рабочем диапазоне температур наблюдается постоянство ТКЕ, т.е. закон изменения емкости от температуры близок к линейному.

Для низкочастотных конденсаторов большой емкости (бумажных, пленочных, электролитических) закон изменения емкости в рабочем диапазоне температур, как правило, нелинейный, сами изменения могут иметь положительное или отрицательное значения ТКЕ для различных конденсаторов в партии. Поэтому температурная стабильность таких конденсаторов оценивается предельными отклонениями емкости при крайних значениях температур $(\Delta C / C)_{от} \%$ и значительно ниже, чем у высокочастотных.

Электрическая прочность конденсатора характеризуется тремя видами напряжений: рабочим, испытательным и пробивным.

Рабочим напряжением конденсатора наибольшее напряжение, прикладываемое к обкладкам конденсатора, при котором он нормально работает, не изменяя своих характеристик в заданном интервале температур в течение гарантийного срока службы.

После изготовления конденсаторов и часто перед установкой в радиоаппаратуру (входной контроль) их выборочно подвергают испытательному напряжению в течение 1-1,5 мин.

Напряжение, при котором происходит пробой диэлектрика или возникает дуга через закраины конденсатора, называется пробивным.

Сопротивление изоляции конденсатора характеризует сопротивление, шунтирующее его емкость, и возникает при появлении в конденсаторе токов утечки, обусловленных в основном током абсорбции и диссоциацией влаги на поверхности конденсатора. Сопротивление изоляции зависит от температуры и влажности окружающей среды, поэтому для его повышения и стабильной работы конденсаторы герметизируют.

Сопротивление изоляции керамических, слюдяных и пленочных конденсаторов $10^4 - 10^5$ Мом, бумажных и металлобумажных - $10^2 - 10^3$ Мом. Значительными токами утечки (единицы миллиампер) обладают электролитические конденсаторы. Малое сопротивление изоляции конденсатора

может привести к изменению режима работы последующих цепей.

При больших потерях конденсатор нельзя использовать на высокой частоте. Потери, возникающее в диэлектрике, обкладках и выводах конденсатора, определяются тангенсом угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$, который у высокочастотных конденсаторов равен $10^{-1} - 10^{-2}$.

Частотные свойства конденсаторов характеризуется паразитной индуктивностью и активными потерями. Паразитная индуктивность большинства конденсаторов зависит от конструкции выводов, а также взаимной индукции между обкладками рулонных конденсаторов. Чем короче и толще выводы, тем меньше паразитная индуктивность. В бумажных и металлобумажных конденсаторах для уменьшения паразитной индуктивности применяют «безындукционные» намотки, когда выступающие витки одной обкладки сплошь металлизуют с одного торца, а другой – с противоположного (рис. 86, а), или используют симметричное расположение выводов, при котором ток I , входящий в конденсатор и выходящий из него, имеет противоположное направление в обкладках, что сводит к минимуму их взаимную индукцию H (рис. 86, б).

В зависимости от преобладания активных потерь (в диэлектрике или обкладках и выводах) эквивалентные схемы конденсаторов имеют различный вид. Для высокочастотных конденсаторов необходимо учитывать в первую очередь паразитную индуктивность выводов L_B и потери в диэлектрике r_D (рис. 87, а). Для электролитических конденсаторов основным ограничителем их применения на определенной частоте являются потери в электролите r_3 (рис. 87, б). Из схемы видно, что область возможного применения

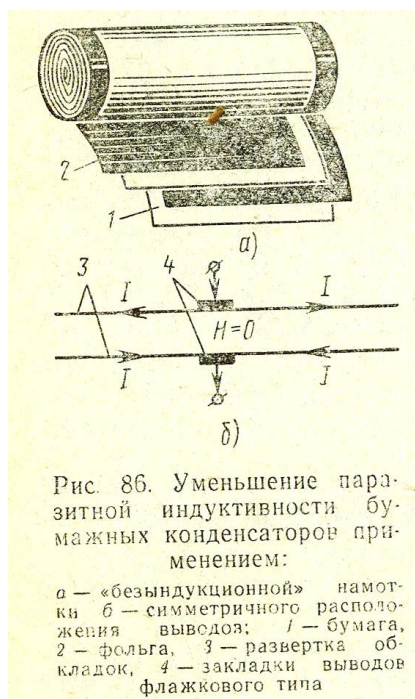


Рис. 86. Уменьшение паразитной индуктивности бумажных конденсаторов применением:

а — «безындукционной» намотки б — симметричного расположения выводов: 1 — бумага, 2 — фольга, 3 — развертка обкладок, 4 — закладки выводов флажкового типа

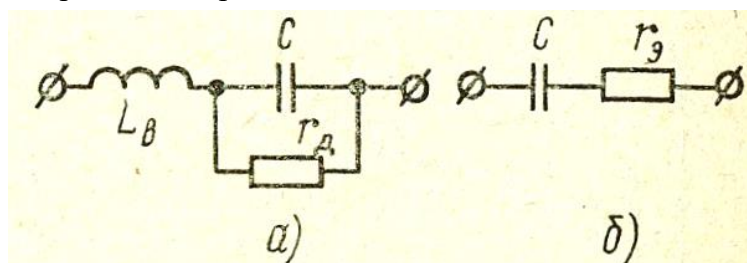


Рис. 87. Эквивалентная схема конденсаторов:

а — высокочастотного, б — низкочастотного (электролитического)

электролитических конденсаторов ограничивается диапазоном постоянного тока и звуковых частот.

Действительно, для показанной на рис. 87, б схемы

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C r_{\varepsilon},$$

тогда

$$C_{\text{дейст}} = C / (1 + \operatorname{tg}^2 \delta),$$

где $C_{\text{дейст}}$ - действующая емкость конденсатора. Отсюда следует, что при наличии в электролитических конденсаторах больших потерь $r_{\varepsilon} \operatorname{tg} \delta$ уже при низких частотах может быть значительным. Это снижает $C_{\text{дейст}}$, приводя к потере основных свойств конденсатора. С увеличением частоты напряжения, приложенного к конденсатору, резко увеличиваются потери в нем и возникает тепловой пробой.

Кроме указанных выше параметров переменные и полупеременные конденсаторы характеризуются законом изменения емкости от угла поворота и диапазоном изменения емкости (минимальной и максимальной емкостями).

Маркировка конденсаторов.

Условное обозначение конденсаторов может быть сокращенным и полным.

В соответствии с действующей системой сокращенное условное обозначение состоит из букв и цифр.

Первый элемент – буква или сочетание букв, обозначающие подкласс конденсатора:

К – постоянной емкости,

КТ – подстроечные,

КП – переменной емкости.

Второй элемент – обозначение группы конденсатора в зависимости от материала диэлектрика в соответствии с табл. 1.2

Таблица 1.2. Условное обозначение конденсаторов в зависимости от материала диэлектрика.

Подкласс конденсаторов	Группа конденсаторов	Обозначение группы
Конденсаторы постоянной емкости	Керамические на номинальное напряжение ниже 1600В	10
	Керамические на номинальное напряжение 1600В и выше	15
	Стеклянные	21
	Стеклокерамические	22
	Тонкопленочные с неорганическим диэлектриком	26
	Слюдяные малой мощности	31
	Слюдяные большой мощности	32
	Бумажные на номинальное напряжение 2кВ, фольговые	40
	Бумажные на номинальное напряжение 2кВ и выше, фольговые	41
	Бумажные металлизированные	42
	Оксидно-электролитические алюминиевые	50
	Оксидно-электролитические танталовые, ниобиевые и д.р.	51
	Объемно-пористые	
	Оксидно-полупроводниковые	52

	С воздушным диэлектриком	53
	Вакуумные	60
	Полистирольные	61
	Фторопластовые	71(70)
	Полиэтилентерефталатные	72
	Комбинированные	73(74)
	Лакопленочные	75
	Поликарбонатные	76
	Полипропиленовые	77
		78
Подстроечные конденсаторы	Вакуумные	1
	С воздушным диэлектриком	2
	С газообразным диэлектриком	3
	С твердым диэлектриком	4
Конденсаторы переменной емкости	Вакуумные	1
	С воздушным диэлектриком	2
	С газообразным диэлектриком	3
	С твердым диэлектриком	4

Третий элемент – пишется через дефис и обозначает регистрационный номер конкретного типа конденсатора. В состав третьего элемента может входить также буквенное обозначение.

Приведенная система не распространяется на условные обозначения старых типов конденсаторов, в основу которых брались различные признаки: конструктивные разновидности, технологические особенности, эксплуатационные характеристики, области применения и т.п. Например:

КД-конденсаторы дисковые,
 КМ – керамические монолитные,
 КЛС – керамические литые секционные,
 КСО – конденсаторы слюдяные опрессованные,
 СГМ – слюдяные герметизированные малогабаритные,
 КБГИ – конденсаторы бумажные герметизированные изолированные,
 МБГЧ – металlobумажные герметизированные частотные,
 КЭГ – конденсаторы электролитические герметизированные,
 ЭТО – электролитические танталовые объемно-пористые,
 КПК – конденсаторы подстроечные керамические.

Полное условное обозначение конденсатора состоит из сокращенного обозначения, обозначения и величины основных параметров и характеристик, необходимых для заказа и записи в конструкторской документации, обозначения климатического исполнения и документа на поставку.

Параметры и характеристики, входящие в полное условное обозначение, указываются в следующей последовательности:

обозначение конструктивного исполнения,
 номинальное напряжение,
 номинальная емкость,
 допускаемое отклонение емкости (допуск),
 группа и класс по температурной стабильности емкости,
 номинальная реактивная мощность,
 другие, необходимые дополнительные характеристики.

Рассмотрим примеры условных обозначений конденсаторов.

1. Керамический конденсатор постоянной емкости на номинальное напряжение до 1600В с регистрационным номером 17 сокращено обозначается К10-17.

2. Подстроечный керамический конденсатор с регистрационным номером 25 сокращено обозначается КТ4-25.
3. Конденсатор керамический К10-7В всеклиматического исполнения «В», группы ТКЕ М47, номинальной емкостью 27пФ, с допуском $\pm 10\%$, поставляемый по ГОСТ 5.621-70, имеет полное условное обозначение
К10-7В-М47-27пФ $\pm 10\%$ ГОСТ 5.621-70.
4. Конденсатор полиэтилентерефталатный К74-5 номинальной емкостью 0,22мкФ, с допуском $\pm 20\%$, поставляемый по ГОСТ 5.623-70, имеет полное обозначение
К74-5-0,22мкФ $\pm 20\%$ ГОСТ 5.623-70

5. Конденсатор оксидно-электролитический алюминиевый К50-7, конструктивного варианта «а», на номинальное напряжение 250В, номинальной емкостью 100мкФ, всеклиматического исполнения «В», поставляемый по ГОСТ 5.635-70, имеет полное обозначение

К50-7а-250 В-100 мкФ-В ГОСТ 5.635-70.

6. Конденсатор подстроечный с твердым керамическим диэлектриком, малогабаритный КПК-М, с пределами номинальной емкости от 2 до 7 пФ, поставляемый по ГОСТ 5.500-76, имеет полное обозначение

КПК-М-2/7 ГОСТ 5.500-76.

Маркировка на конденсаторах (также как и условное обозначение) буквенно-цифровая. Она содержит: сокращенное обозначение конденсатора, номинальное напряжение номинальное значение емкости, допуск, обозначение климатического исполнения (буква «В» для конденсаторов всеклиматического исполнения) и дату изготовления.

В зависимости от размеров маркируемых конденсаторов и вида технической документации могут применяться полные или сокращенные (кодированные) обозначения номинальных емкостей и их допускаемых отклонений. Кодированные обозначения предназначены для маркировки малогабаритных конденсаторов и для записи на принципиальных малоформатных многоэлементных электрических схемах.

Полное обозначение номинальных емкостей состоит из значения номинальной емкости (цифра) и обозначения единицы измерения.

Кодированное обозначение номинальных емкостей состоит из трех или четырех знаков, включающих две или три цифры и букву. Буква кода из русского или латинского алфавита (в скобках) обозначает множитель, составляющий значение емкости, и определяет положение запятой десятичного знака. Буквы П (р), Н(п), М(μ), И(м), Ф(Ф) обозначают множители 10^{-12} , 10^{-9} , 10^{-6} , 10^{-3} и 1 соответственно для значений емкости, выраженных в фарадах. Для приведенного примера следует писать: 1П5 (1р5), 10Н (10п), 10М (10 μ), 1Ф0 (1Ф0).

Полное обозначение допускаемого отклонения состоит из цифр, а кодированное из буквы. В связи с тем, что буквенное обозначение допусков изменялось, и на практике могут встречаться различные варианты, в табл. 1.3 приведены кодированные обозначения допусков по стандартам СССР, публикаций Международной электротехнической комиссии (МЭК) и стандарта СЭВ.

Лекция 13

Полупроводниковые приборы

Классификация современных полупроводниковых приборов по их назначению, физическим свойствам, основным электрическим параметрам, конструктивно-технологическим признакам, роду исходного полупроводникового материала находит отражение в системе условных обозначений их типов.

В соответствии с возникновением новых классификационных групп приборов совершенствуется и система их условных обозначений, которая на протяжении последних 15 лет трижды претерпевала изменения.

Система обозначений современных полупроводниковых диодов, тиристоров и оптоэлектронных приборов установлена отраслевым стандартом ОСТ 11 336.038-77 и базируется на ряде классификационных признаков этих приборов.

В основу системы обозначений положен семизначный буквенно-цифровой код, первый элемент которого (буква — для приборов широкого применения, цифра — для приборов, используемых в устройствах специального назначения) обозначает исходный полупроводниковый материал, на основе которого изготовлен прибор.. Второй элемент обозначения — буква, определяет подкласс приборов, третий элемент — цифра (или буква для оптопар), определяет один из основных характеризующих прибор признаков (параметр, назначение или принцип действия). Четвертый, пятый и шестой элементы — трехзначное число, обозначающее порядковый номер разработки технологического типа прибора, седьмой элемент — буква, условно определяет классификацию по параметрам приборов, изготовленных по единой технологии.

В стандарте предусмотрено также введение в обозначение дополнительных знаков при необходимости отметить отдельные существенные конструктивно-технологические особенности приборов.

Для обозначения исходного материала используются следующие символы (первый элемент обозначения):

Г или 1 — для германия или его соединений;

К или 2 — для кремния или его соединений;

А или 3 — для соединений галлия (например, для арсенида галлия);

И или 4- — для соединений индия (например, для фосфида индия).

Для обозначения подклассов приборов используется одна из следующих букв (второй элемент обозначения):

Д — для диодов выпрямительных, импульсных, магнитодиодов, термодиодов;

Ц — выпрямительных столбов и блоков;

В — варикапов;

И — туннельных диодов;

А — сверхвысокочастотных диодов;

С — стабилитронов (включая стабилитроны и ограничители);

Г — генераторов шума;

Л — излучающих оптоэлектронных приборов;

О — оптопар;

У — триодных тиристоров.

Для обозначения наиболее характерного признака прибора используются следующие символы применительно к различным подклассам приборов (третий элемент обозначения).

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Полупроводниковым диодом называют прибор с двумя выводами и одним электронно-дырочным переходом. Различают точечные (рис. 14.13) и плоскостные (рис. 14.14) диоды. В стеклянном или металлическом корпусе 2 точечного диода крепится германиевый или кремниевый кристалл п-типа 3 площадью порядка 1 мм^2 и толщиной $0,5 \text{ мм}$, к которому прижимается стальная или бронзовая игла 4, легированная акцепторной присадкой. В процессе формовки через контакт иглы с кристаллом пропускают мощные импульсы тока.

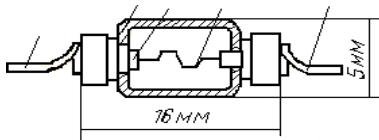


Рис. 14.13. Конструкция точечного германиевого диода типа ДЮЗ:

- 1 — вывод; 2 — стеклянный корпус;
3 — полупроводниковый кристалл; 4 —
стальная пружина

При этом кончик иглы оплавляется и часть акцепторной примеси внедряется в кристалл. Вокруг иглы образуется микроскопическая (точечная) область с дырочной электропроводностью. На полусферической границе этой области с кристаллом п-типа возникает электронно-дырочный переход.

Малая площадь р-п-перехода в точечном диоде обеспечивает ему минимальное значение межэлектродной емкости.

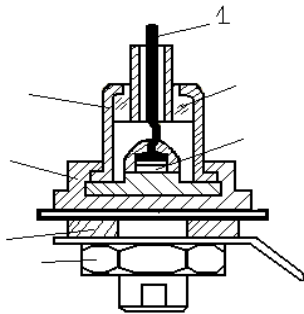


Рис. 14.14. Конструкция плоскостного выпрямительного диода:

- 1 — вывод; 2 — стеклянная втулка; 3 —
полупроводниковый кристалл; 4 — гайка; 5
— шайба; 6 — основание; 7 — металличе-
ский корпус

Площадь р-п-перехода плоскостных диодов достигает десятков и сотен мм^2 . Для получения таких площадей используют методы сплавления или диффузии. При методе сплавления на пластинку кристалла с донорной примесью помещают таблетку акцепторной примеси, которая расплавляется при нагреве в печи. Расплав частично проникает в кристалл и образует область р-типа, граничащую с массой кристалла. У этой границы возникает р-п-переход.

При изготовлении диода методом диффузии кристалл с донорной примесью помещают в газовую среду акцептора (кристалл с акцепторной примесью — в газовую среду донора) и выдерживают длительное время при заданной температуре. Диффундируя в поверхности кристалла, молекулы акцептора (или донора) образуют область с типом электропроводности, противоположным типу электропроводности кристалла.

Метод сплавления позволяет получить р-п-переход с резким изменением концентрации примеси. При методе диффузии концентрация примесных атомов в области р-п-перехода изменяется плавно.

Мощные плоскостные полупроводниковые диоды, рассчитанные на большие токи, изготавливают в массивных металлических корпусах, обеспечивающих поглощение и отвод тепла, выделяющегося в р-п-переходе. С помощью массивных шайб и гаек корпус диода плотно прижимается к монтажной металлической панели.

Основной характеристикой диода служит его вольт-амперная характеристика, вид которой совпадает с видом характеристики р-п-перехода (см. рис. 14.12). Вольт-амперная характеристика диода существенным образом зависит от температуры окружающей среды. С повышением температуры прямой ток диода при одном и том же напряжении может увеличиться в несколько раз. При заданном прямом токе с увеличением температуры снижается прямое напряжение между электродами диода.

Существенным образом влияет температура окружающей среды и на обратный ток, который тоже возрастает с увеличением температуры. При увеличении температуры окружающей среды выше определенного значения уже при небольших обратных напряжениях развивается тепловой пробой р-п-перехода и диод выходит из строя. Работоспособность германиевых диодов теряется при температуре около 70 °С, а кремниевых — при 200 °С. Высокая термическая устойчивость кремния — важнейшее его преимущество по сравнению с другими полупроводниковыми материалами. Кремниевые диоды допускают плотность тока в прямом направлении 10 А/мм² и более, что позволяет изготавливать мощные полупроводниковые устройства с относительно небольшими массами и габаритами.

Одна из важных характеристик диода — *пробивное обратное напряжение*. Это напряжение зависит от ширины обедненного слоя и у современных плоскостных диодов равно сотням и тысячам вольт. Оно несколько увеличивается с повышением температуры, не выходящим за пределы работоспособности диода.

Внутреннее сопротивление плоскостных диодов прямому току при поминальных режимах работы составляет десятые доли ома, с повышением температуры оно уменьшается.

Маркировку диодов осуществляют с помощью цифр и букв. *Первая цифра* или буква обозначает материал полупроводникового кристалла. Цифрой 1 или буквой г обозначают германий; цифрой 2 или буквой К — кремний; цифрой 3 или буквой А — арсенид галлия.

На втором месте ставят букву, обозначающую класс диода: Д — выпрямительный; А — СВЧ-диод; В - варикап; С- стабилитрон, И — туннельный диод.

Три последующие цифры, характеризуют тип или область применения прибора: если цифры лежат в пределах 101 — 399, то диод предназначен для выпрямления переменного тока; если в пределах 401—499, то для работы в высокочастотных и сверхвысокочастотных цепях; если в пределах 501 — 599, то для работы в импульсных схемах; диоды, маркируемые цифрами 601—699, используют в качестве конденсаторов с регулируемой емкостью (варикапы).

Последняя буква указывает на некоторые конструктивные или другие особенности диода (разновидность прибора).

Например, маркировка КС196В расшифровывается следующим образом: кремниевый стабилитрон плоскостного типа, разновидность В.

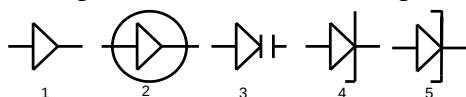


Рис. 14.17. Условные обозначения полупроводниковых диодов:

/ — выпрямительный диод; 2 — СВЧ-диод; 3 — варикап; 4 — стабилитрон; 5 — туннельный диод

ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Физические принципы, положенные в основу полевых транзисторов, были известны давно, однако их реализация встретила существенные технические трудности. Только в 60-х годах полевые транзисторы начали достаточно широко применять в различных областях электроники. В полевых транзисторах используют эффект воздействия поперечного электрического поля на проводимость канала, по которому движутся носители электрического заряда. Полевые канальные транзисторы имеют ряд существенных достоинств, к которым прежде всего относятся большое входное сопротивление приборов ($10^{10} — 10^{15}$ Ом); большая устойчивость к проникающим излучениям (допускается уровень излучений на 3—4 порядка больший, чем для биполярных транзисторов); малый уровень собственных шумов; малое влияние температуры на усилительные свойства.

Полевые транзисторы изготавливают двух типов: с затвором в виде р-п-перехода и с изолированным затвором.

Устройство транзистора с затвором в виде р-п-перехода схематично представлено на рис. 14.25.

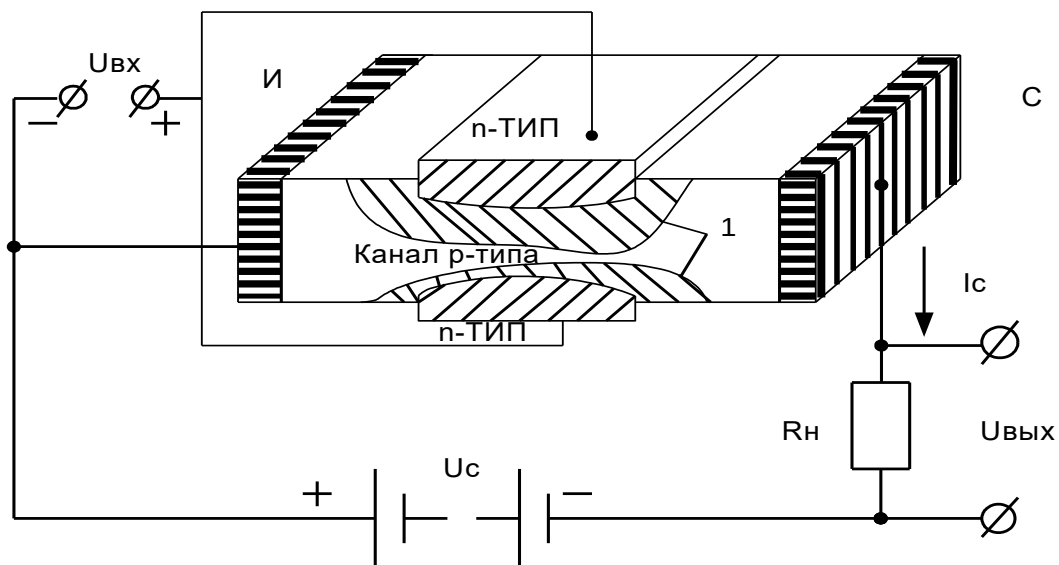


Рис.14.25. Схематическое изображение полевого транзистора с р-п-переходами: И-исток; С-сток; 1-обедненный слой

Основу прибора составляет слабо легированная полупроводниковая пластина р-типа, к торцам которой приложено напряжение U_c , создающее ток I_c через сопротивление нагрузки R_n . В полупроводниковой пластине этот ток обеспечивается движением основных носителей заряда. Торец пластины, от которого движутся носители заряда, называется *и* с *т* о *к* о *м*, торец, к которому движутся носители заряда — *с* т о *к* о *м*. В две противоположные боковые поверхности основной р-пластины вплавлены пластинки типа *n*. На границе раздела пластинок *n* и *p* возникают электронно-дырочные переходы. К этим переходам в непроводящем направлении приложено входное напряжение $u_{вх}$. Значение напряжения $u_{вх}$ можно менять при обязательном сохранении указанной на рисунке полярности. Обычно $u_{вх}$ состоит из двух составляющих: переменного напряжения управляющего сигнала и постоянной составляющей начального смещения, значение которой превышает амплитуду сигнала. Пластины *n*-типа образуют *з а т в о р*. При указанной полярности напряжения на затворе вокруг этих пластин образуется слой, обедненный носителями заряда и, следовательно, имеющий малую проводимость. Между обедненными слоями сохраняется канал с высокой проводимостью.

Принцип действия полевого транзистора основан на изменении ширины обедненного слоя при изменении обратного напряжения р-п-перехода (см. § 14.5 «Электронно-дырочный переход»). С увеличением напряжения на затворе ширина обедненных слоев увеличивается, а поперечное сечение канала и его проводимость уменьшаются.

Таким образом, изменяя напряжение $u_{\text{зх}}$ на затворе, можно менять ток через сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$ и выходное напряжение $u_{\text{вых}}$.

Работу полевого транзистора принято характеризовать зависимостью тока стока $I_{\text{с}}$ от напряжения между истоком и стоком $U_{\text{с}}$ при различных значениях напряжения на затворе $U_{\text{з}}$. Эта зависимость аналогична анодной характеристике усилительной лампы.

Семейство характеристик полевого транзистора с затвором в виде р-п-перехода изображено на рис. 14.26.

Сначала с увеличением $U_{\text{с}}$ ток $I_{\text{с}}$ нарастает практически линейно. Затем наступает режим насыщения и увеличение $U_{\text{с}}$ не приводит к росту тока. Это объясняется тем, что при насыщении напряженность продольного поля в канале складывается с напряженностью поперечного поля и канал в области стока сужается. Причем чем больше напряженность продольного поля (чем больше $U_{\text{с}}$), тем больше сужается канал в области стока. Ток $I_{\text{с}}$ при этом остается постоянным. Ток насыщения тем меньше, чем больше напряжение на затворе (обратное напряжение р-п-перехода).

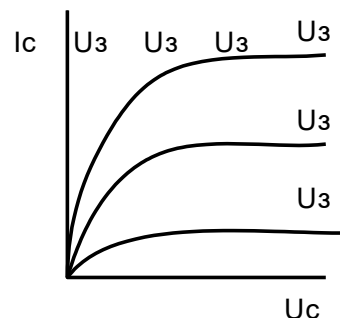


Рис. 14.26. Семейство характеристик полевого транзистора с затвором в виде р-п-перехода

Устройство полевого транзистора с изолированным затвором схематически показано на рис. 14.27. Основу прибора составляет пластина полупроводника р-типа. На небольшом расстоянии друг от друга в поверхность основной пластины вплавляют донорную примесь. Затем поверхность пластины кремния, подвергают термической обработке, в результате чего на ней нарастает тонкий (0,1 мкм) слой двуокиси, являющейся хорошим изолятором. На слой изолятора накладывают металлическую пластину затвора, перекрывающую области донорной примеси n .

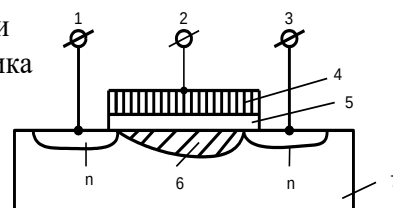


Рис. 14.27. Схематическое изображение полевого транзистора с изолированным затвором: 1-исток; 2-затвор; 3-сток; 4-металл; 5-диэлектрик; 6-канал n-типа; 7-полупроводник p-типа

Транзисторы с изолированным затвором чаще называют транзисторами типа МДП (металл—диэлектрик—полупроводник). Упрощенно принцип его работы можно представить следующим образом: при отсутствии напряжения на затворе области n истока и стока разделены непроводящей прослойкой основной пластины; при подаче на затвор положительного напряжения электроны вытягиваются из основной пластины и скапливаются под изолирующей прослойкой. При определенной разности потенциалов концентрация электронов под диэлектриком превысит концентрацию дырок и области n будут соединены проводящим электронным каналом.

В рассмотренном случае проводящий канал между истоком и стоком индуцируется напряжением затвора. Разновидностью МДП транзисторов являются конструкции, при которых канал «встраивается» в процессе изготовления прибора путем, введения соответствующих примесей. Напряжение затвора меняет концентрацию носителей и проводимость встроенного канала.

Полевые транзисторы могут быть изготовлены и на основе пластин n -типа.

БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР

Биполярным транзистором называют полупроводниковый прибор, основу которого составляют два взаимодействующих электронно-дырочных перехода, имеющий три или более выводов.

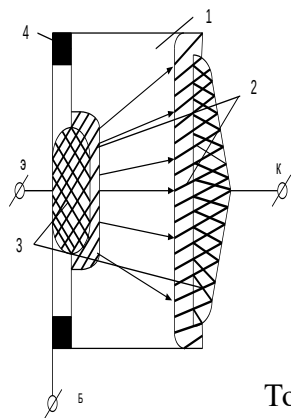


Рис. 14.18. Схематическое изображение транзистора типа $p-n-p$:

1 — кристалл германия типа p ; 2 — области типа p ; 3 — вплавленные пластинки индия; 4 — контактное кольцо базы; Э — эмиттерный вывод; К — коллекторный вывод; Б — вывод базы. Стрелками показано движение дырок

Биполярный транзистор является аналогом лампового триода, он способен выполнять усилительные, генераторные и ключевые функции.

Устройство биполярного транзистора, изготовленного методом сплавления, схематически представлено на рис. 14.18. В пластинку германия 1, легированного донорной примесью (с электронной электропроводностью), вплавлены две таблетки трехвалентного индия 3 (акцептор). В объеме германия возле пластинок индия образуются две области с дырочной электропроводностью 2, разделенные тонким слоем базовой пластины. У границ, разделяющих p -области и базу, образуются два электронно-дырочных перехода. Переход, изображенный на рисунке слева, называется эмиттерным, справа — коллекторным. Эмиттерный, коллекторный переходы и база имеют выводы для включения прибора в электрическую цепь (Э, К, Б).

Толщина базового слоя, разделяющего эмиттерный и коллекторный переходы, на рисунке значительно преувеличена. Для того чтобы переходы взаимодействовали, толщина базовой прослойки между ними должна быть меньше диффузионной длины носителей заряда (т. е. меньше расстояния, которое проходят носители заряда до рекомбинации). У современных приборов толщина базы имеет порядок единиц микрометров. Кроме того, концентрацию легирующей примеси базы делают на два, три порядка меньше концентрации примесей в эмиттерной и коллекторной областях.

Материалы, методы получения $p-n$ -переходов, параметры и конструктивное оформление современных транзисторов весьма разнообразны. Мы рассмотрели сплавной германиевый транзистор, у которого тип электропроводности областей меняется в следующем порядке: p (эмиттер), n (база), p (коллектор). Такой прибор называют транзистором типа $p-n-p$. Он может быть изготовлен и на основе кремния n -типа.

Если в качестве базы использовать германий или кремний p -типа, а эмиттерный и коллекторный переходы образовать с по-

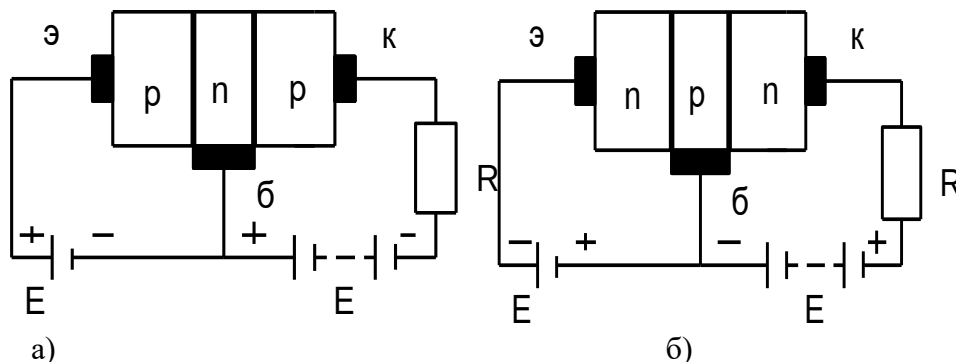


Рис. 14.19. Включение источников питания транзистора:

• а — типа $p-n-p$; б — типа $n-p-n$

мощью донорных материалов, то получим транзистор типа $n-p-n$. Такие транзисторы находят применение в высокочастотных схемах.

Принцип действия транзисторов обоих типов одинаков. Разница в том, что полярность включения источников питания для них противоположна (рис. 14.19). В соответствии с этим в транзисторе типа $p-n-p$ коллекторный ток создается движением дырок, а в транзисторе типа $n-p-n$ — движением электронов.

Рассмотрим принцип действия транзистора типа $p-n-p$ (рис. 14.19, а).

Разомкнем цепь эмиттера, а коллектор оставим под напряжением указанной полярности. Коллекторный переход, как видно из рисунка, находится под обратным напряжением, при этом через него протекает небольшой ток, образованный движением неосновных носителей. Этот начальный ток у германиевых транзисторов составляет десятки, а у кремниевых — единицы микроампер.

Замкнем цепь эмиттера. Эмиттерный переход окажется под прямым напряжением. Через него потечет ток, образованный диффузией электронов в эмиттер. Мы отмечали ранее, что

концентрация электронов в базе значительно меньше, чем концентрация дырок в эмиттере, поэтому ток через переход практически будет создаваться эмиттированием дырок в базу в базу

Поскольку толщина базы невелика, то дырки пройдут ее без рекомбинации и диффундируют в область коллектора, где, перемещаясь под действием коллекторного напряжения, создадут коллекторный ток.

Небольшая часть дырок, рекомбинировавших в базе, а также электроны, диффундирующие из базы в эмиттер, создадут небольшой ток базы, примерно на два порядка меньший тока эмиттера и тока коллектора.

Таким образом, коллекторный ток и пропорциональное ему напряжение на R_n почти целиком определяются количеством эмиттированных дырок, т. е. током эмиттера.

Отношение приращения тока коллектора к вызвавшему его приращению тока эмиттера при постоянном напряжении на коллекторе называется коэффициентом усиления по току:

$$\alpha = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E} \text{ при } U_K = \text{CONST}$$

Коэффициент усиления по току тем выше, чем больше эмиттированных дырок диффундирует через коллекторный переход. Конструкция транзистора обеспечивает экстракцию (улавливание) коллектором до 99 % дырок, эмиттированных в базу.

В рассмотренной схеме включения коэффициент усиления транзистора по току меньше единицы (0,95—0,99). Схема может быть использована для усиления сигнала по напряжению или по мощности. Действительно, если токи эмиттера и коллектора примерно равны, то напряжение в цепи коллектора, а следовательно, и мощность могут в десятки раз превышать напряжение и мощность в цепи эмиттера.

В заключение отметим, что названия «эмиттер» (инжектор, излучатель носителей заряда), «коллектор» (собирающий носители) и «база» отвечают функциональному назначению этих частей биполярного транзистора.

Полярность электродов транзисторов показана на рис. 14.20, причем база (Б) заземлена (потенциал равен нулю).

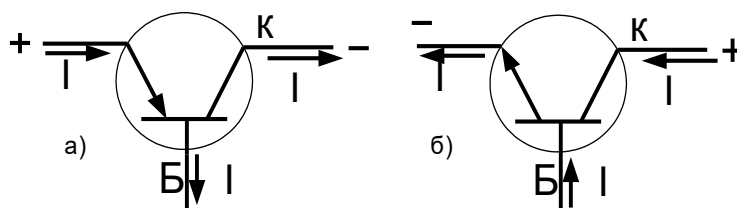


Рис. 14.20. Условные обозначения биполярных транзисторов:
а-типа p-n-p; б-типа n-p-n

Рассматривая последовательность слоев биполярного транзистора, нетрудно убедиться, что в принципе работоспособность прибора сохранится, если эмиттер и коллектор поменять местами. Однако и н е р с н о е включение неравноценно нормальному вследствие несимметричности конструкции (см. рис. 14.18) транзистора.

Поскольку размеры эмиттера меньше размеров коллектора, то при инверсном включении эмиттер не сможет уловить значительную часть носителей заряда, инжектированных коллектором в базу. Кроме того, из-за малых размеров эмиттер, используемый в роли коллектора, будет быстрее нагреваться. При неправильном включении триода эффективность его работы заметно снизится.

Итак, включать транзистор в схему следует в строгом соответствии с обозначением его выводов согласно типу транзистора.

Независимо от типа транзистора (*p-n-p* или *n-p-n*) применяют три основные схемы его включения: с общей базой, с общим эмиттером, с общим коллектором.

Лекция 14

Интегральные микросхемы

Интегральные схемы (ИС) по конструктивно-технологическому исполнению делят на полупроводниковые, гибридно-пленочные и пр.

Полупроводниковыми интегральными микросхемами называют такие, у которых все элементы и межэлементные соединения выполнены в объеме и (или) на поверхности полупроводникового материала.

Получение и очистка монокристаллических слитков. Большинство приборов изготавливают из полупроводниковых пластин или кристаллов, вырезанных из монокристаллических слитков. Для получения монокристаллических слитков применяют методы бес тигельной зоной плавки, вытягивания из расплава (метод Чохральского) и гарнисажной плавки.

С целью уменьшения потерь при получении пластин из слитков в производстве ИМС применяют полупроводниковые материалы в виде монокристаллических эпитаксиальных тонких пленок, которые наносят на монокристаллические подложки кремния, сапфира, корунда и др.

Получение полупроводниковых пластин. Полупроводниковые материалы отличаются высокой твердостью и хрупкостью, поэтому для их обработки применяют специальные методы. Нарезание слитков на пластины осуществляют стальными полотнами, проволокой с применением абразивов, а также дисками с алмазосодержащей внутренней режущей кромкой.

Перед резкой слиток закрепляется на оправке специальными мастиками. Для удаления продуктов резания и отвода теплоты в зону резания подается охлаждающая жидкость (обычно 5%-й раствор кальцинированной соды).

После резки пластины подвергают шлифованию и полировке.

Шлифование полупроводниковой пластины используют для получения требуемой толщины и параллельности плоскостей. При этом с пластины удаляется поверхностный слой, нарушенный при резании слитка.

Пластину закрепляют на оправке специальными составами и шлифуют с одной стороны, а затем переклеивают ее на оправку отшлифованной стороной и шлифуют другую сторону. В процессе шлифования осуществляют непрерывную подачу шлифовальной суспензии.

Для шлифования используют абразивные порошки и пасты.

Шлифовальные абразивные порошки. Абразивным может быть любой природный или искусственный материал, зерна которого обладают твердостью, абразивной способностью, механической и химической стойкостью, т.е. способностью резать и шлифовать другие материалы.

Главной особенностью абразивных материалов является их высокая твердость по сравнению с другими материалами и минералами. Между собой они различаются размерами (крупностью) зерен. Размер зерна оказывает существенное влияние на глубину залегания механически нарушенного слоя на поверхности полупроводниковых материалов при резании, шлифовании и полировании.

Электрокорунд представляет собой оксид алюминия Al_2O_3 , который получают в результате плавки химически чистого оксида алюминия (глинозема). При переходе из расплавленного состояния в твердое оксид алюминия кристаллизуется в α -корунд, который является чрезвычайно твердым веществом белого цвета, уступающим по твердости только алмазу и карбиду кремния [микротвердость лежит в пределах $(1,8...2,4) \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$]; твердость по шкале Мооса 9. Электрокорунд имеет плотность $D = 4 \text{ г/см}^3$, температуру размягчения $T_{\text{рад}} = 1750^\circ\text{C}$, температуру плавления $T_{\text{пл}} = 2050^\circ\text{C}$, модуль упругости $7,6 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$.

В зависимости от содержания Al_2O_3 делят на три сорта:

электрокорунд белый, получаемый плавлением чистого глинозема, содержит от 98,5 до 99,5% Al_2O_3 ;

электрокорунд нормальный, получаемый плавлением боксита с углем, содержит от 91,0 до 96,0% Al_2O_3 ;

электрокорунд черный, получаемый плавлением железистого боксита без добавки угля, содержит от 65,0 до 75,0% Al_2O_3 .

Выплавляют корунд в открытых дуговых электропечах мощностью до 10 000 кВт. Исходным сырьем является боксит без примесей окиси кальция, кремния, магния, серы и др.

Карбид кремния SiC представляет собой химическое соединение кремния с углеродом, которое обладает следующими свойствами:

хрупкость;

химически чистый бесцветен, а технический в зависимости от примесей приобретает оттенки от светло-зеленого до черного;

кристаллизуется в основном в виде тонких шестиугольных пластинок размером от 2 до 15 мм, слабо связанных друг с другом по плоскостям спайности;

хороший абразивный материал с высокими режущими свойствами, превышающими абразивную способность электрокорунда почти в 2 раза;

микротвердость $3,4 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$;

твердость по шкале Мооса 9,2;

плотность $D = 3,16 \dots 3,39 \text{ г/см}^3$;

предел прочности при сжатии $\sigma_c = 2,5 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$.

Получают карбид кремния при нагревании смеси кремния с углеродом в электрических печах при температуре выше 2000°C . Шихту сплавляют, после остывания разбивают гидромониторами¹ и сортируют.

Выпускают карбид кремния двух разновидностей:

зеленый, при производстве которого в шихту вводят до 6% по массе поваренной соли NaCl и аморфный карбид кремния, содержащий до 85% SiC ;

черный, отличающийся от зеленого процентным содержанием SiC и большей хрупкостью и меньшей твердостью.

Карбид бора BC представляет собой тугоплавкое соединение бора с углеродом, которое обладает следующими свойствами:

по твердости превосходит все абразивные материалы, уступая лишь алмазу;

чрезвычайная хрупкость по сравнению с другими абразивами;

при длительном нахождении на воздухе при повышенной температуре окисляется и обезуглероживается, поэтому для шлифования его применяют в виде порошка в режимах без большого теплообразования;

плотность $D = 2,5 \text{ г/см}^3$;

термостойкость $500 \dots 600^\circ\text{C}$;

температура разложения $T_p = 2350^\circ\text{C}$;

предел прочности при сжатии $\sigma_{сж} = 1,9 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$.

Исходным сырьем для производства карбида бора служат борная кислота и нефтяной кокс. Шихту плавят, полученный после плавки продукт дробят, сортируют и классифицируют по группам зернистости.

Алмазные шлифовальные порошки представляют собой смеси алмазных зерен, которые имеют правильную кристаллическую форму. За размер зерен принимают половину суммы длины и ширины проекции зерна на предметном столе микроскопа. Основной фракцией алмазного порошка принято называть совокупность зерен определенного размера, преобладающих по количеству в составе данного порошка.

По размеру зерен, методу получения и контроля алмазные порошки делят на шлифпорошки, получаемые рассевом на ситах, и микропорошки, получаемые классификацией² с использованием жидкости.

Качество алмазных порошков характеризуется зерновым составом, прочностью, абразивной способностью и шероховатостью обработанной поверхности.

Для механической обработки полупроводниковых материалов используют алмазные шлифпорошки из синтетических алмазов; шлифпорошки из природных алмазов, прочность на сжатие которых зависит от их зернистости и возрастает с увеличением алмазных зерен; алмазные микропорошки, которые обладают по сравнению с алмазными шлифпорошками меньшими размерами зерен; абразивная способность микропорошков определяется отношением массы сошлифованного корунда к массе израсходованного алмазного микропорошка)

Шлифовальные пасты. Они состоят из алмазных микропорошков различной зернистости и высокомолекулярных поверхностно-активных веществ.

В зависимости от содержания алмазного микропорошка выпускаются алмазные пасты высокой концентрации (В), средней концентрации (С), низкой концентрации (Н) и пониженной концентрации (П).

В зависимости от зернистости пасты разделяют по консистенции на твердую (Т), густую (Г), мазеподобную (М) и жидкую (Ж). (После шлифования на поверхности пластины остается нарушенный поверхностный слой, который удаляют полированием. Полирование проводят в два этапа:

предварительное полирование на тканых материалах (батист и др.) с использованием суспензий на основе алмазного порошка с размером зерен не более 3 мкм, толщина удаляемого слоя 2,5 мкм;

окончательное полирование на замше или коже с использованием алмазных микропорошков с размером гранул 1 мкм.

При механической обработке полупроводниковых материалов применяют различные полировочные пасты и полировочные составы.

Полировочная паста представляет собой массу зеленого цвета, которая имеет температуру каплепадения органической основы 44°C и максимальную глубину микронеровностей (рисок), не превосходящую 0,5 мкм.

В состав пасты входят 62...65% оксида хрома, 10...12% нефтяного парафина марок А и В и 35...38% олеиновой кислоты, стеарина, серы, натриевого и калиевого хромпика.

Применяют полировочную пасту для полирования изделий на хлопчатобумажных, фетровых и кожаных кругах-полировальниках.

Оксид хрома Cr_2O_3 представляет собой порошок зеленого цвета с содержанием чистого продукта в пересчете на Cr_2O_3 не менее 98...99% и влаги не более 0,15%. Получают оксид хрома восстановлением двуххромовокислого аммония серой. Полученный сплав измельчают, отмывают водой от ионов SO_4 и других водорастворимых солей и берут из отмытого оксида хрома фракцию с соответствующим размером зерен.

Широко используют для полирования пластин германия, кремния, арсенида галлия и карбида кремния.

Аммоний двуххромовокислый представляет собой кристаллическое вещество оранжево-красного цвета, которое растворяется в воде и применяется для приготовления порошка тонкого оксида хрома.

Полирит представляет собой порошок коричневого цвета разных оттенков, содержащий 97% оксидов редкоземельных металлов, в том числе до 45% оксида церия.

Применяют для полирования стекла и полупроводниковых материалов.

Полировочные составы. Они представляют собой смеси аэросила, глицерина, диэтилендиамина, этиленгликоля и деионизованной воды.

Для полирования полупроводниковых материалов наиболее часто применяют три состава:

1 - деионизованная вода 1000 мл, аэросил-380 120 мл, глицерин 50...70 мл, водный раствор этилендиамина 100...200 мл;

2 - деионизованная вода 1000 мл, аэросил-300 100...150 мл, этиленгликоль 50...70 мл, диэтламин 50...150 мл;

3 - деионизованная вода 1000 мл, аэросил-380 40...80 мл, аэросил-300 20...40 мл, глицерин 50...70 мл, этилендиамин 100...200 мл, 30%-я перекись водорода 50...150 мл.

Аэросил представляет собой рыхлый голубовато-белый порошок чистой двуокиси кремния, который обладает молекулярной массой $m = 60,08$; пожаро- и взрывобезопасен; токсичен: вдыхание пыли вызывает болезнь легких (предельно допустимая концентрация пыли аэросила в воздухе производственных помещений 1 мг/м³).

Содержание примесей в аэросиле не должно превышать 0,003% оксида железа; 0,05% оксида алюминия; 0,02% двуокиси титана; 0,025% соляной кислоты и 2,3...4,0% влаги для трех марок.

Порошок полировальный «Элплаз» представляет собой смесь белого цвета со слабым зеленоватым оттенком. Размер частиц не более 0,5 мкм. Применяют для заключительного полирования полупроводниковых пластин перед эпитаксиальным наращиванием. Выпускают порошок марок: А, Б и В.

Шлифование и полирование ведут с помощью шлифовальных и полировальных, для которых используют различные материалы.

Материалы для изготовления шлифовальных и полировальных. В качестве шлифовальных используют диски с плоской поверхностью из чугуна, стали, сплавов меди, стекла, дерева, текстолита, текстовинита. На плоской поверхности диска, которая называется рабочей, закрепляют полупроводниковые пластины или кристаллы и заливают абразивной суспензией.

Для полировальных используют шлифовальные диски, которые обтягивают различными тканями или синтетическими пленками. Выбор материала зависит от совместимости ткани и пленки с абразивной суспензией, срока службы и требуемой чистоты обработки поверхности. Для изготовления полировальных чаще всего используют фетр, фетр с пластиковым наполнителем, велюр, ворсит, замшу, войлок, фланель и др.

Чугун относится к группе черных металлов и представляет собой сплав железа с углеродом.

Выплавляемый в доменных печах чугун по назначению подразделяют на литейный и предельный (для выплавки стали).

По содержанию углерода и формы графитных включений чугуны бывают белые, серые, ковкие и высокопрочные.

Сталь представляет собой сплав железа с углеродом, который отличается от чугуна меньшим содержанием углерода. Углеродистые стали обладают хорошими механическими свойствами, достаточной прочностью, восприимчивостью к механическим нагрузкам и удовлетворительной коррозионной стойкостью в условиях влажной работы.

Для изготовления шлифовальных используют латуни (сплавы меди с цинком) и бронзы (сплавы меди, в который основным легирующим компонентом является любой металл, кроме цинка) (см. гл. 3).

Стекло разных марок используют для изготовления шлифовальных методом горячего литья в формы и соответствующей механической обработкой полученного полуфабриката.

Древесину прессованную получают уплотнением предварительно распаренной или нагретой натуральной древесины с последующей ее сушкой и тепловой обработкой. В зависимости от вида уплотнения получают: древесину одноосного поперечного уплотнения в виде брусков (влажностую) марок ДПО и ДПО-В, для изготовления которой используют березу, бук и осину; древесину двухосного поперечного уплотнения с повышенными показателями раскалывания и скалывания марки ДПД, для изготовления которой, используют березу, бук, осину, граб и ольху.

Текстолит получают пропиткой различных тканей горячей смолой и последующим прессованием (см. гл. 5).

Из текстолита изготавливают диски шлифовальников различной толщины и диаметра.

Стеклопластик представляет собой материал, в котором основой является стеклоткань, а пропиточным составом - эпоксидная смола. Стеклопластик обладает плотностью $D = 1,85 \text{ г/см}^3$, низкой водопоглощающей способностью, высокой нагревостойкостью и высокой механической прочностью.

Стеклотекстолит используют для изготовления шлифовальных дисков.

Текстовинит представляет собой хлопчатобумажную ткань с поливинилхлоридным пористым и непористым покрытиями. Он эластичен, устойчив к действию воды, керосина, бензина и различных масел; имеет низкую истираемость и термостойкость 70°C .

Текстовит используют в качестве полировального материала при обтягивании шлифовальных кругов.

Пласкожа представляет собой пластины размером $600 \times 600 \times 5$, изготовленные проклейкой кожевенного хромового волокна каучуковым клеем. Она имеет предел прочности $\sigma = 10^7 \text{ Н/м}^2$, относительное удлинение при разрыве 40%; намокаема в бензине 30%.

Применяют в качестве подложки при шлифовании и полировании.

Винилискожа Т представляет собой материал, состоящий из тканевой основы, покрытой виниполимерной смолой и клеящим веществом с нанесенным на него ворсом из искусственного волокна. Прочность окраски ворса при мокрой обработке трением не менее 4 баллов.

Кирза представляет собой хлопчатобумажную ткань, пропитанную каучуковым раствором, которая имеет предел прочности на растяжение $\sigma_p = 2 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$, истираемость $0,35 \text{ Н/м}^2$ после 10 000 оборотов. Применяют в качестве подложки при шлифовании изделий.

Ворсит представляет собой вельветон, на ворсистую сторону которого последовательно наносят несколько слоев каучуковой смеси. Он обладает следующими свойствами: удлинение при разрыве 20%, стойкость к истиранию $5 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}^2$ за 1000 оборотов.

Применяют в качестве подложки при шлифовании изделий.

Замша представляет собой кожу с низким и густым ворсом, выделанную с жировым дублением из шкур оленя, лося, овец.

Войлок представляет собой тонкошерстный материал, изготовленный в виде листов толщиной от 2,5 до 20 мм. Удлинение при разрыве не превышает 135%; предел прочности на разрыв при толщине 2 мм $\sigma_p = 1,5 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$, при толщине 5 мм $\sigma_p = 3,5 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$.

Из листового войлока изготавливают диски для полировальников. В процессе механической обработки полупроводниковых материалов выполняют крепление слитков при резании на пластины, крепление пластин при шлифовании, полировании и разделении на кристаллы. Для крепления слитков используют эпоксидные смолы, клей БФ, полистирол. Пластины и кристаллы крепят с помощью воска, парафина, шеллака, плицеина, глифталевого лака.

Материалы для наклейки слитков, пластин и кристаллов. К таким материалам относятся эпоксидные смолы, клей, полистирол, воск, парафин, канифоль и др.

Эпоксидные смолы ЭД-5 и ЭД-6 представляют собой прозрачные вязкие жидкости от светло-желтого до светло-коричневого цвета. Для приготовления клеящего состава в эпоксидные смолы вводят отвердители (амиды, амины или ангидриды), пластификаторы, наполнители и разбавители.

Клей БФ (БФ2, БФ4, БФ6) представляет собой прозрачную или мутную жидкость от желтого до красно-бурого цвета, которую получают смешиванием фенолформальдегидной и поливинилбути-ральной смол. Он имеет высокую клеящую способность по отношению к различным материалам, прочность клеевого соединения для различных материалов колеблется от $2 \cdot 10^6$ до $3,5 \cdot 10^7$ Н/м², на-гревостойкость 180°C.

Для крепления полупроводниковых слитков используют смесь клея БФ с абразивным микропорошком в соотношении 30% клея и 70% микропорошка.

Полистирол представляет собой порошок белого цвета, который растворяется в толуоле с образованием однородной вязкой жидкости; имеет температуру размягчения $T_{раз} = 80...85^\circ\text{C}$, температуру плавления $T_{пл} = 140...160^\circ\text{C}$.

Для крепления слитков и подложек полистирол используют в виде эмульсии, которую наносят на склеиваемую поверхность и сушат при температуре 85°C в течение нескольких часов, или в виде пленки толщиной 0,2...0,3 мм, которой обматывают слитки и нагревают при температуре 85°C в течение 5 ч.

Воск представляет собой термопластичный материал животного (пчелиный) и растительного происхождения желтого цвета. Он нерастворим в воде и устойчив ко многим веществам, растворяется в бензине; имеет температуру размягчения $T_{раз} = 60...70^\circ\text{C}$; при температуре выше 70°C расплывается по поверхности подложки, а при охлаждении застывает и образует твердую пленку. Используют для приклейки полупроводниковых пластин к шлифовальным и полировальным планшайбам.

Парафин представляет собой термопластичный материал белого цвета, который имеет крупнокристаллическую рыхлую структура, что обуславливает большую усадку при застывании, 10...12%; температура размягчения и плавления $T_{пл} = 50...55^\circ\text{C}$.

Парафин получают из дистилляторов, выделяемых при разгонке парафиновой нефти. При охлаждении парафин выкристаллизовывается. При быстром охлаждении в парафине образуются многочисленные воздушные пузыри. Полученный продукт очищают серной кислотой и отбеливают глиной.

Для крепления полупроводниковых пластин шлифовальные и полировальные планшайбы нагревают до температуры 60...70°C, покрывают парафином, укладывают на них пластины, а сверху на пластины помещают специальный груз. После остывания планшайб парафин застывает, образуя жесткое соединение планшайбы с пластиной.

Канифоль представляет собой хрупкую, прозрачную стекловидную массу желтого цвета, которую выпускают марок А, Б, В и Г. Она имеет температуру размягчения для всех марок $T_{раз1} = 68^\circ\text{C}$, $T_{раз2} = 66^\circ\text{C}$, $T_{раз3} = 54^\circ\text{C}$, $T_{раз4} = 73^\circ\text{C}$; содержание изменяется от 0,2 до 0,4%; зольность не превышает 0,07%; механические примеси колеблются от 0,03 до 0,1%; растворима в нефтяных и растительных маслах, жидких углеводородах, спирте, скипидаре и др.

Получают канифоль из смолы хвойных деревьев отгонкой жидких составных частей (скипидара).

Пицеин представляет собой термопластичное вещество, полученное смешиванием 25 частей канифоли и 75 частей пчелиного воска. Смесь расплавляют, варят в течение нескольких часов, фильтруют и разливают в формы. Время варки оказывает влияние на свойства пицеина и подбирается опытным путем.

С помощью пицеина крепят полупроводниковые пластины и кристаллы на планшайбы.

Шеллак представляет собой органическое слоистое вещество чешуйчатого строения желто-коричневого цвета различных оттенков. Он обладает температурой размягчения $T_{раз} = 80...90^\circ\text{C}$, температурой плавления $T_{пл} = 110...120^\circ\text{C}$, плотностью $D = 1,04$ г/см³,

коэффициентом усадки 3,6%, водонепроницаемостью, не превышающей 5%; растворяется в спирте и щелочах; имеет высокую механическую прочность.

Шеллак используют в чистом виде и в виде шеллачно-бакелитовой мастики, которую хранят вдали от открытого огня.

Церезин представляет собой термопластичное кристаллическое вещество желтоватого цвета, которое получают из некоторых сортов нефти, а также из горного воска. Он обладает следующими свойствами:

- мелкокристаллическая структура;
- температура плавления $T_{пл} = 60...80^{\circ}\text{C}$ выше, чем у парафина;
- усадка при охлаждении 7...8%.

Глифталевый лак представляет собой прозрачную жидкость. По составу это синтетическая алкидная смола, модифицированная канифолью и растительным маслом. Он обладает следующими свойствами:

- высокая клеящая способность;
- температура размягчения $T_{раз} = 100...110^{\circ}\text{C}$;
- высокая прочность пленок и слоев.

Применяют для наклейки полупроводниковых пластин на подложки.

Очистка пластин. Для удаления загрязнений, полученных при механической обработке, используют жидкую или сухую очистку.

Для промывки полупроводниковых пластин и кристаллов используют кислоты, растворители, дистиллированную и деионизованную воду.

К органическим растворителям относят бензин авиационный, толуол C_7H_8 , спирт этиловый ректификованный, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, спирт метиловый CH_3OH , ацетон технический, этиленгликоль $\text{CH}_2\text{OH}-\text{CH}_2\text{OH}$.

Фотолитография является важнейшим технологическим процессом, который позволяет получать микроизображения любой сложной формы. При фотолитографии применяют фотографические (фотоэмульсии для получения на поверхности полупроводниковой пластины светочувствительных слоев), химические (растворители, проявители, закрепители) и электроизоляционные (оптическое стекло, краски, эмали, лаки) материалы.

Для получения полупроводникового материала определенного типа проводимости, создания в нем областей с требуемой концентрацией носителей заряда определенного знака, образования в монокристалле *p-n*-переходов и областей под омические контакты используют диффузию примесей.

В качестве примесей в диффузионных процессах на германии и кремнии используют элементы Периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева: III группы (бор, алюминий, галлий, индий), V группы (фосфор, мышьяк, сурьма), I группы (серебро, золото), II группы (кадмий, цинк), VI группы (кислород, селен, теллур).

Диффузаны применяют в элементарном виде и в виде соединений - оксидов и сплавов. Для проведения процессов диффузии используют различные тигли, кассеты, лодочки, которые изготавливают из графита или кварца.

Разделение полупроводниковых пластин на кристаллы. Этот процесс осуществляют в два этапа. Перед разделением каждую схему проверяют на функционирование и неисправные помечают специальной краской. После разделения пластины неисправные кристаллы отбраковывают.

На первом этапе на пластине со сформированными полупроводниковыми структурами производят скрайбирование, нанося алмазным резцом неглубокие риски.

Бесконтактное скрайбирование выполняют лазером, испаряя материал пластин кремния в виде канавок по линии разделения кристалла. На втором этапе пластину разламывают на кристаллы вдоль нанесенных рисок роликом, гибкой лентой или на сферической опоре. При ломке роликом пластину укладывают на мягкую гибкую опору рисками вниз и

прокатывают стальным, резиновым или фторопластовым роликом в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

При ломке с помощью гибкой ленты на обратную сторону пластины наносят быстро выдыхающую эмульсию, которая, высыхая, образует пленку, удерживающую кристаллы после ломки. Пластины помещают на резиновую ленту, которая находится на гибкой опоре из пружинной стали, рискам вверх. При использовании сферической опоры пластины укладывают в пакет из тонкой пленки, который помещают на сферическую опору и прижимают диафрагмой. Пластина обжимается упругой резиновой диафрагмой на сферической опоре и разламывается на отдельные кристаллы сразу в двух направлениях. Если толщина пластин не позволяет применять скрайбирование, их разделяют на кристаллы алмазным диском}

После разделения и химической обработки выполняют монтаж кристаллов на основании корпуса с помощью клеев, пайкой или посадкой на эвтектику.

Клей должен иметь термический коэффициент расширения, близкий к термическому коэффициенту расширения склеиваемых материалов; хорошую прочность соединения и сохранение своих физико-химических свойств в диапазоне рабочих температур прибора; высокую химическую стойкость; высокие электроизоляционные и оптические свойства; вязкость и срок жизни, обеспечивающие технологичность процесса.)

Полярные материалы склеивают полярными клеями, а неполярные - неполярными (см. гл. 5).

Основания корпусов изготавливают из металлов и их сплавов, керамики или пластмасс.

Для крепления кристаллов на основания корпусов чаще всего используют клеи ВК-9, К-400.

Для пайки кристаллов мягкими припоями на обратной (непланарной) стороне кристалла заранее получают контакт диффузией бора или фосфора или образованием силицида. Пайку кристалла выполняют легкоплавкими припоями через прокладку или индиевыми пастами. Кристалл через прокладку прижимают к основанию корпуса и нагревают в атмосфере водорода до сплавления.

Для пайки кристаллов больших размеров применяют прокладки толщиной 100...200 мкм из сплава, состоящего из 25% серебра, 25% германия, 50% свинца.

При креплении кристалла на основание корпуса из золоченного кобальта на обратную сторону кристалла напыляют пленку олова толщиной 1,0 мкм с подслоем хрома толщиной 0,015 мкм. В процессе пайки при температуре 240...260°C образуется эвтектика, состоящая из 20% золота и 80% олова.

Для приборов с невысокой рабочей температурой монтаж кристаллов осуществляют низкотемпературными припоями на основе индия, например: 50% индия и 50% олова.

Для крепления кристаллов на основание корпуса используют также галлиевые или индиевые пасты. Галлиевые пасты нетехнологичны из-за быстрого окисления и требуют строгого соблюдения правил техники безопасности. На основе индия используют дозированное нанесение пасты следующего состава: 36,4% индия, 33,6% олова, 30% меди.

Для крепления кристалла на основание корпуса с помощью эвтектики на посадочную площадку на основании корпуса или на все основание корпуса наносят золотое покрытие. При больших размерах кристалла используют золотую прокладку из сплава ЗлСу-01 для кремния *p*-типа (электронного), для кремния *n*-типа (дырочного) из сплава ЗлГл-01.

Эвтектика образуется между материалом кристалла и золотом в процессе их взаимного растворения при пайке, которая выполняется при температуре примерно 430°C. В состав эвтектики входят 94% золота и 6% кремния (весовых) или 70% золота и 30% кремния (атомных).

Кристаллы присоединяют к внутренним выводам корпуса. Полупроводниковые ИМС изготавливают в миниатюрных корпусах или в бескорпусном исполнении. Бескорпусные полупроводниковые ИМС применяют в гибридно-пленочных интегральных схемах, многокристалльных больших интегральных схемах и микросборках.

Бескорпусные активные элементы поставляют на полупроводниковой пластине, в виде дискретных безвыводных кристаллов, а также с проволочными мягкими выводами и объемными жесткими выводами.

Для мягких проволочных проводников используют золото, алюминий, никель. Жесткие выводы выполняют в виде столбиков, шариков и балок или лепестков.

Корпусной герметизации подвергают в основном кристаллы с мягкими проволочными или лепестковыми

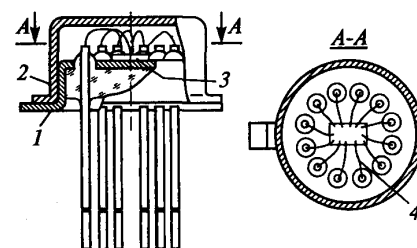


Рис. 7.1. Микросхема в металлостеклянном корпусе:
1 – основание; 2 – крышка; 3 – кристалл микросхемы; 4 – контактные выводы

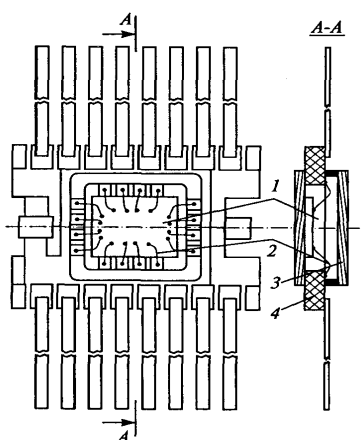


Рис. 7.2. Микросхема в металлокерамическом корпусе:
1 – кристалл микросхемы; 2 – контактный вывод; 3 – крышка; 4 – основание

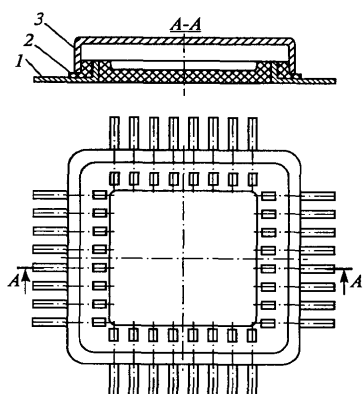


Рис. 7.3. Плоский металлопластмассовый корпус для интегральных схем

выводами. Для монтажа на подложку использую все виды кристаллов.

Корпуса служат для защиты микросхем от климатических и механических воздействий. Корпус состоит из основания, содержащего выводы, и крышки. По расположению выводов корпуса бывают со штырьковыми и планарными выводами. По применяемым материалам корпуса делят на металлостеклянные (рис.7.1), металлокерамические (рис.7.2) и металлопластмассовые (рис. 7.3).

Металлостеклянные корпуса состоят из металлической крышки и металлического основания, в котором металлические выводы изолируются стеклом. Для изготовления таких корпусов используют железоникелевые сплавы. Основным сплавом является ковар, который состоит из 29% никеля, 18% кобальта и 53% железа. Этот сплав достаточно хорошо согласуется по термическому коэффициенту линейного расширения с кремнием и стеклом; имеет хорошую теплопроводность, высокое удельное электрическое сопротивление, удовлетворительную коррозионную стойкость и высокую технологичность.

Выводы корпусов изготавливают из ковара или никеля.

Для изоляции выводов используют тугоплавкое боросиликатное стекло.

Металлокерамические корпуса состоят из керамического основания и металлической крышки.

Пластмассовый корпус состоит из пластмассового основания и металлической крышки. Он имеет низкую герметичность, так как при резком изменении температур образуются трещины. Корпуса герметизируют пайкой или сваркой.

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ГИБРИДНО-ПЛЕНОЧНЫХ И МНОГОКРИСТАЛЬНЫХ БОЛЬШИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Гибридно-пленочные интегральные схемы (ГПС) представляют собой микросхемы, у которых пассивные элементы выполняют в виде тонких или толстых пленок, а активные - в виде навесных дискретных компонентов.

Тонкопленочные интегральные схемы. Подложки тонкопленочных микросхем должны обладать доступностью материала и низкой стоимостью; большим поверхностным и объемным электрическим сопротивлением, в том числе в присутствии влаги и электролитов; малой (а в ряде случаев большой) диэлектрической проницаемостью; высокой теплопроводностью; высокой механической прочностью; термостойкостью; устойчивостью к изменениям температуры и химической стойкостью.

Этим требованиям не может удовлетворить ни один из известных материалов. Наиболее часто используемые материалы для подложек стекла - стеклокерамические материалы (ситалл, поликор), керамика и синтетический сапфир.

Тонкие пленки толщиной до 10 мкм (резисторы, конденсаторы, соединительные проводники - пленочные и проволочные) получают методами термического напыления, катодного распыления, ионно-плазменного или магнетронного распыления.

Для резистивных пленок используют различные металлы (хром, тантал, вольфрам, гений), оксиды металлов (оксид олова) и металлокерамические соединения (многокомпонентный металлосилицидный сплав).

Конденсаторы представляют собой трехслойную структуру проводник-диэлектрик-проводник. Хорошим материалом для обкладок конденсаторов является алюминий, который по сравнению с другими металлами не имеет коротких замыканий.

В качестве материала для диэлектрической прослойки конденсаторов применяют диоксид кремния SiO_2 , оксид германия GeO , халькогенидное стекло ХГ-44, оксиды алюминия Al_2O_3 , тантала Ta_2O_5 , титана TiO_2 и др.

Материалы для соединительных проводников и контактных площадок толщиной 0,5...5 мкм должны иметь низкое электрическое сопротивление ρ , высокую коррозионную стойкость, хорошую адгезию к подложке и другим материалам пленок.

Этим требованиям отвечают двухслойные пленки, в которых один слой обладает хорошей адгезией к подложкам (хром, марганец, титан), а другой обеспечивает пайку или сварку (медь, золото, алюминий).

Подложки монтируют на основание корпуса с помощью клеев или пайкой. Для повышения теплопроводности клеев в них вводят порошкообразный наполнитель. В качестве наполнителя часто используют нитрид бора, который представляет собой диэлектрический материал белого или слегка желтоватого цвета. В его состав входят 43,6% бора и 56,2% азота; суммарное содержание примесей (железа, кремния, меди, кальция, магния) не превышает 0,05%. Нитрид бора имеет монолитную столбчатую структуру, высокую плотность $D = 2,24 \text{ г/см}^3$; он устойчив к большинству химических соединений при комнатной температуре, а при температуре 100°C взаимодействует с расплавленными металлами и газами (кроме фтора); удельное электрическое сопротивление зависит от температуры.

Получают нитрид бора методом химического пиролитического осаждения. Кроме порошков с высокой теплопроводностью используют в качестве тигельного материала, а также для изготовления высокотемпературных изоляторов и защитных покрытий.

Бескорпусные навесные компоненты закрепляют на плате также с помощью клеев или пайкой низкотемпературными мягкими припоями.

В качестве бескорпусных навесных компонентов используют полупроводниковые кристаллы (диоды, транзисторы, интегральные микросхемы), микроконденсаторы и резисторы.

Присоединение выводов навесных компонентов к контактным площадкам платы и внутренним выводам корпуса осуществляют гибкими проводниками из золота, никеля пайкой или термокомпрессионной сваркой, а также из алюминия ультразвуковой сваркой.

Гибридно-пленочные интегральные схемы герметизируют в металlostеклянные или металлокерамические корпуса пайкой или сваркой (рис. 7.4).

Для проводящих частей корпусов (оснований, крышек, выводов, выводных рамок) применяют чистые металлы или сплавы на основе никеля и железа.

Никель представляет собой металл серебристо-серого цвета с сильным металлическим блеском; в природе более распространен, чем медь, и встречается в сернистых, силикатных и сернистомышьяковых рудах.

При комнатной температуре химически малоактивен, а при температуре выше 400 °С окисляется в присутствии кислорода.

Никель легко протягивается и механически обрабатывается. В атмосфере водорода поддается пайке твердыми (обычно серебряными) и мягкими припоями, хорошо сваривается методами контактной сварки. Водород по мере повышения температуры хорошо растворяется в никеле, диффундирует с высокой скоростью и легко выделяется из него при нагревании в вакууме. Для изготовления деталей корпусов используют никель марки НП2 в виде холоднокатаной ленты толщиной от 0,1 до 2 мм и шириной до 300 мм, а также проволоки.

Никелевая проволока используется для изготовления выводов корпусов. Выпускается отожженной (мягкой) и неотожженной (твердой) диаметром от 0,03 до 12 мм с относительным удлинением 25%. Имеет гладкую поверхность, без забоин, трещин, пузырей, раковин, что позволяет получать вакуумплотные металlostеклянные спаи.

Ковар - сплав никеля 28,7...29,2%, кобальта 17,3...17,8% и железа - остальное. Обладает малой теплопроводностью, сравнительно близкой к теплопроводности стекла, и высоким удельным электрическим сопротивлением. Это позволяет применять для соединения деталей из ковара, никеля и стали электросварку. Он хорошо покрывается различными металлами гальваническим и химическим способами.

Для изоляции выводов металlostеклянных корпусов используют тугоплавкое боросиликатное стекло в виде стеклотаблеток, стеклопорошков или стеклянных трубок (капилляры).

Используются также металлокерамические корпуса.

Керамика представляет собой твердый плотный материал, получаемый спеканием неорганических солей с минералами и оксидами металлов. Исходные материалы делят на непластичные (кристаллообразующие), к которым относят неорганические соли (хлористый алюминий, хлористое железо, хлористый магний), минералы (кварц, глинозем, тальк), оксиды металлов (циркония, бария/кальция, магния, титана), карбонаты, пластичные (глинистые материалы, облегчающие оформление заготовок и деталей).

Керамические материалы состоят из кристаллической, стекловидной и газовой фаз.

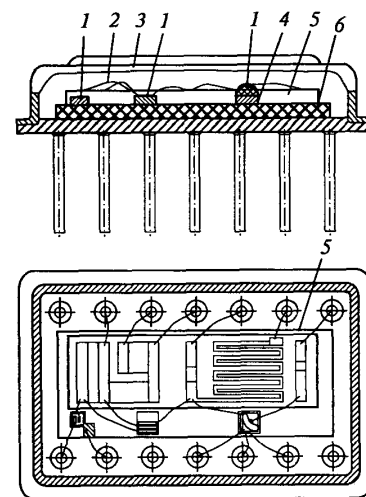


Рис. 7.4. Гибридная микросхема:

- 1 – активные компоненты;
- 2 – контактный вывод; 3 – крышка корпуса; 4 – припой; 5 – ситалловая подложка с пассивной частью схемы;
- 6 – керамическое основание;
- 7 – основание корпуса

При металлизации керамики, которая позволяет спаивать керамические детали, применяют чистые порошки тугоплавких металлов (молибдена, вольфрама) или смеси порошков этих металлов с порошками железа, марганца, меди, а также порошки карбидов.

В зависимости от применяемых для металлизации материалов различают молибденовую, молибден-марганцевую и карбидную технологии.

При молибденовой технологии применяют молибденовую пасту с небольшой добавкой железа.

При молибден-марганцевой технологии применяют пасту, состоящую из 55% металлического молибдена, 17,5% марганца, 23% оксида молибдена, 4,5% порошкового стекла, 20 мл связующего вещества и 22,5 мл амилацетата Ха 100 г шихты.

При карбидной металлизации применяют пасты из смесей порошков монокарбидов титана, вольфрама, молибдена, а также боридов тугоплавких металлов с порошками карбонального железа, никеля и кобальта.

Для контроля герметичности на малые течи используют гелий, элегаз, на большие – этиленгликоль, уайт-спирит.

Толсто пленочные микросхемы. Материалом для подложек толсто пленочных микросхем служит высокоглиноземная керамика (чаще всего марки 22ХС), которую получают литьем под давлением или прессованием с последующим обжигом.

В мощных гибридных схемах применяют подложки из оксида бериллия, теплопроводность которого в 9 раз выше, чем у глиноземной керамики. Такая керамика имеет низкую прочность, высокую стоимость и высокую токсичность бериллия, что затрудняет ее обработку.

Подложки имеют прямоугольную форму с минимальной толщиной 0,6 мм. Минимальная площадь подложки составляет 6 мм², максимальная - 500 мм².

Для получения толстых пленок, требующих рассеяния большой мощности, используют проводящие, резистивные, диэлектрические и лудящие пасты, которые наносятся ракелем через трафарет.

Проводящие и резистивные пасты описаны в 3.7.2.

Диэлектрические пасты применяют для создания изоляционных слоев и конденсаторов. Они состоят из стекла с керамическим наполнителем. Такие пасты выдерживают многократную термообработку, но полученные из них слои благодаря керамическому наполнителю обладают значительной пористостью. Пористость изоляционных слоев устраняют применением паст, содержащих 20... 30% стекла с использованием в качестве наполнителя титаната бария.

Для защиты резисторов и конденсаторов от воздействия влаги применяют специальные покрытия (глазури). В качестве глазурей используют легкоплавкие стекла, которые не влияют на величину электрического сопротивления резисторов.

Лудящие пасты состоят из низкотемпературного припоя и органического связующего вещества. В состав органического связующего вещества входит флюс на основе канифоли. Наносят лудящие пасты на контактные площадки трафаретной печатью. В процессе оплавления пасты основная часть связующего вещества испаряется и выгорает.

К трафаретам предъявляются специальные требования, что определяется условиями их эксплуатации: жесткость и упругость, высокая чистота обработки поверхности для плотного прилегания к подложке, химическая стойкость.

Применяют сетчатые и фольгированные трафареты.

Сетчатые трафареты изготавливают из нейлона или нержавеющей проволоки диаметром 0,04...0,07 мм. Фольгированные трафареты (металлические маски) изготавливают из биметаллов³ (бронза - никель) толщиной, равной толщине слоя пасты. После нанесения паста вжигается в конвейерных печах с кварцевым муфельем⁴.

Монтажные операции, герметизацию и контроль герметичности ведут с использованием тех же процессов, что и для тонкопленочных ИМС.

Многокристалльные большие интегральные схемы (МБИС). Конструктивной основой МБИС является коммутационная плата с многоуровневой разводкой, пленочными пассивными элементами и навесными активными элементами. В качестве активных элементов применяют бескорпусные интегральные микросхемы, которые в 70 раз легче и занимают в 30 раз меньшую площадь, чем их корпусированные аналоги.

Коммутационные платы могут быть выполнены на основе пленочной технологии (поликор, ситалл), многослойной керамики, полиимидной пленки.

По тонкопленочной технологии получают коммутационные платы, которые имеют 1...2 уровня коммутации. В качестве проводящего материала используют, как правило, алюминий, а для меж-слойной изоляции - полиимидный лак ПАК-1, который наносят на плату в жидком состоянии, и после полимеризации и высокотемпературного отжига образуется полиамидная пленка.

В качестве навесных компонентов используют бескорпусные интегральные схемы с проволочными или лепестковыми алюминиевыми проводниками.

Монтажные операции, герметизация и контроль герметичности аналогичны тем, которые используют для гибридно-пленочных ИМС.

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ УСТРОЙСТВ С ПЕЧАТНЫМ МОНТАЖОМ

Печатные платы являются одним из монтажных элементов электронных приборов, который обладает определенными преимуществами по сравнению с объемным монтажом.

Печатной платой называется материал основания, вырезанный по размеру и содержащий необходимые отверстия и по меньшей мере один проводящий рисунок. Печатная плата с навесными компонентами представлена на рис.7.5.

Основными видами печатных плат являются односторонние (ОПП), двусторонние (ДПП), многослойные (МПП), гибкие печатные платы (ГПП) и гибкие печатные кабели (ГПК).

Основания печатных плат изготавливают из нефольгированных или фольгированных слоистых пластиков, которые по типу материала наполнителя делят на гетинакс (бумага), текстолит (хлопчатобумажная ткань), стеклотекстолит (стеклоткань) и стекломат (стекловолокно) (см.5.2.4).

Печатные платы изготавливают прямоугольной формы. Максимальный размер любой из сторон не должен превышать 470 мм. При увеличении размеров плат снижается их жесткость и виброустойчивость. Заготовки печатных плат отрезают с припуском по контуру дисковой фрезой, на дисковых или гильотинных ножницах. В процессе резки инструмент охлаждают сжатым воздухом, а пыль отсасывают. Окончательный контур платы получают вырубкой или фрезерованием после изготовления печатных проводников.

Заготовки фиксируют с помощью фиксирующих отверстий, которые получают сверлением или пробивкой. Пробивку обычно применяют при толщине материала до 0,5 мм. Выполняют пробивку на кривошипных прессах или специальных приспособлениях. Монтажные отверстия получают сверлением с помощью кондуктора из твердого сплава без применения охлаждающей жидкости. Для этого заготовки собирают в пакет толщиной не более 4,5 мм и сверлят на станках с числовым программным управлением.

В качестве проводящего материала для печатных проводников главным образом используют электролитическую медь с содержанием примесей не выше 0,05%, предельным

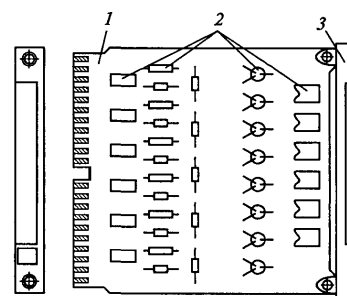


Рис. 7.5. Печатная плата с навесными компонентами:
1 – левая сторона; 2 – радиодеталь;
3 – правая планка

удлинением 5...6% и толщиной от 5 до 105 мкм. Электролитическую медь дополнительно обрабатывают с помощью зачистки щетками, шлифовки или полировки.

При изготовлении многослойных печатных плат поверхность меди, которая должна быть связана изоляционным материалом, часто оксидируют для улучшения сцепления между медной фольгой и материалом основы.

Реже используют катаную фольгу с более высоким удлинением, что необходимо для гибких печатных плат. Качество катаной фольги часто ухудшается из-за влияния механических включений.

Для получения требуемого рисунка проводников применяют *фотопечать* с использованием фотошаблонов, которая представляет собой способ нанесения рисунка печатных проводников и контактных площадок на материал основания, который покрывают фоторезистом, экспонируют через фотошаблон, задубливают, проявляют и травят.

Фоторезисты представляют собой тонкие пленки органических растворов, которые обладают свойством после экспонирования полимеризовываться и переходить в нерастворимое состояние. По способу образования рисунка фоторезисты делят на негативные и позитивные.

Жидкие фоторезисты наносят погружением (окунанием), поливом с центрифугированием, накатыванием ребристым роликом.

Металлизацию монтажных отверстий осуществляют химическим или гальваническим способами. Процесс металлизации отверстий состоит из следующих основных операций:

сенсibilизация проводится в растворе двухлористого олова, соляной кислоты и металлического олова в течение 5...7 мин с последующей промывкой в дистиллированной воде; в результате на поверхности стенок отверстий образуется пленка ионов двухлористого олова, который является восстановителем для палладия;

активация проводится в водном растворе двухлористого палладия и аммиака в течение 5...7 мин; в результате образуется металлический палладий, который служит центром кристаллизации при химическом меднении;

химическое меднение состоит в восстановлении меди на активированных поверхностях из раствора, в который входят соли меди, никеля, формалина, соды и др.; гальваническое меднение требует замкнутого контура проводящих покрытий, которые образуют с помощью технологических проводников, прошивки отверстий медной проволокой или применением специальных рамок; медь наращивают в сернокислом, борофтористо-водородном и других электролитах;

гальваническое осаждение сплава олово-свинец с целью предохранения проводящего рисунка при травлении и обеспечения хорошей паяемости;

травление включает себя предварительную очистку, собственно травление металла, очистку после травления и удаление фоторезиста; применяют травление печатных плат с рисунком, травление набрызгиванием, струйное травление.

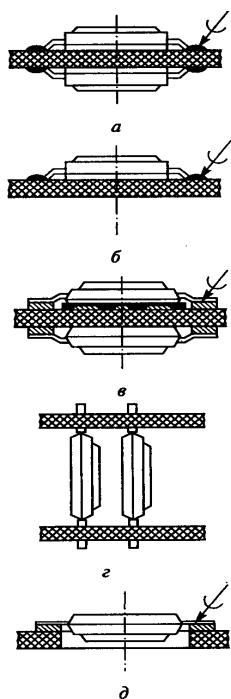


Рис. 7.6. Схемы установки интегральных схем с планарными выводами на печатную плату:

а - с двух сторон платы; б - с одной стороны платы; в - на прокладку; г - между платами; д - в отверстиях платы

Перед установкой на печатную плату выводы навесных дискретных элементов облуживают, формуют и обрезают. Детали или корпусированные микросхемы с планарными выводами устанавливают с фиксацией на клей или без фиксации с последующим присоединением выводов к контактным площадкам платы пайкой (рис. 7.6). Микросхемы со штырьковыми выводами устанавливают в монтажные отверстия с последующей пайкой волной или вручную (рис. 7.7).

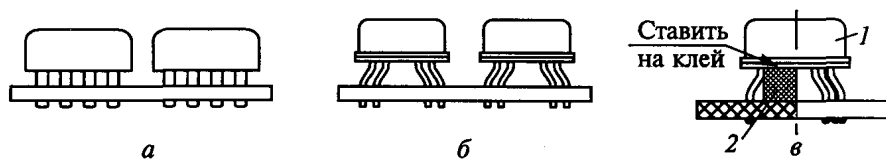


Рис. 7.7. Схемы установки интегральных схем со штырьковыми выводами на печатную плату:

a – без формовки выводов; *б* – с формовкой выводов; *в* – на прокладку

Список использованных источников:

1. Журавлева Л.В. «Электроматериаловедение»: М «Академия», 2013
2. Материаловедение : учеб. пособие / под общ. ред. И.Л.Власова М.: ФГБОУ "УМЦ ЖДТ", 2016. Режим доступа: [http:// www.e/lanbook.com](http://www.e/lanbook.com)
3. Электротехнические и конструкционные материалы : учеб. пособие / под общ. ред. В. А. Филикова. М.: Академия, 2010.
4. Серебряков А.С. Электротехническое материаловедение. Проводниковые, полупроводниковые и магнитные материалы. М.: ГОУ «УМЦ ЖДТ», 2008. Режим доступа: [http:// www.e/lanbook.com](http://www.e/lanbook.com)