

Реферат  
по дисциплине "Электротехника"

на тему: "Проводники, полупроводники и диэлектрики"

## Содержание

### Введение

1. Проводниковые материалы
  - 1.1. Общие сведения
  - 1.2. Медь
  - 1.3. Латуни
  - 1.4. Проводниковые бронзы
  - 1.5. Алюминий
2. Полупроводники. Полупроводниковые приборы
  - 2.1. Общие сведения
  - 2.2. Полупроводниковые диоды
  - 2.3. Тиристоры
3. Электроизоляционные материалы
  - 3.1. Основные определения и классификация диэлектриков
  - 3.2. Характеристики электроизоляционных материалов

### Заключение

### Список литературы

## Введение

В зависимости от характера действия на тела электрического поля их можно разделить на проводники, диэлектрики и полупроводники. Свойства тел и поведение их в электрическом поле определяются строением и расположением атомов в телах. В состав атомов входят электрически заряженные частицы: положительные – протоны, отрицательные – электроны. В нормальном состоянии атом электрически нейтрален, так как число протонов, входящих в состав ядра атома, равно числу электронов, вращающихся вокруг ядра и образующих «электронные оболочки» атома. Электроны внешней валентной оболочки определяют электропроводность вещества. Энергетические уровни внешних валентных электронов образуют валентную, или заполненную зону. В этой зоне электроны находятся в устойчивом связанном состоянии. Чтобы освободить какой-либо электрон этой зоны, необходимо затратить некоторую энергию. Следовательно, электроны, находящиеся в свободном состоянии, занимают более высокие энергетические уровни. Зона более высоких энергетических уровней, расположенная выше валентной зоны и отделенная от нее запрещенной зоной, объединяет незаполненные, или свободные, энергетические уровни и называется зоной проводимости или зоной возбуждения. Чтобы электрон перенести из валентной зоны в зону проводимости, необходимо ему сообщить извне энергию. Ширина запретной зоны, которую должен преодолеть электрон, чтобы перейти из устойчивого состояния в свободное состояние (в зону проводимости), является одним из главных критериев разделения тел на проводники, полупроводники и диэлектрики.

## 1. Проводниковые материалы

### 1.1. Общие сведения

В качестве проводников электрического тока могут быть использованы как твердые тела, так и жидкости, а при соответствующих условиях и газы. К проводниковым материалам в электротехнике относятся металлы, их сплавы, контактные металлокерамические композиции и электротехнический уголь. Важнейшими практически применяемыми в электротехнике твердыми проводниковыми материалами являются металлы и их сплавы, характеризующиеся электронной проводимостью; основной параметр для них – удельное электрическое сопротивление в функции температуры.

Диапазон удельных сопротивлений металлических проводников весьма узок и составляет от 0,016 мкОм·м для серебра до 1,6 мкОм·м для жаростойких железохромоалюминиевых сплавов. Электрическое сопротивление графита с увеличением температуры проходит через минимум с последующим постепенным повышением.

По роду применения проводниковые материалы подразделяются на группы:

*проводники с высокой проводимостью* – металлы для проводов линий электропередачи и для изготовления кабелей, обмоточных и монтажных проводов для обмоток трансформаторов, электрических машин, аппаратуры и пр.;

*конструкционные материалы* – бронзы, латуни, алюминиевые сплавы и т.д., применяемые для изготовления различных токоведущих частей;

*сплавы высокого сопротивления* – предназначенные для изготовления дополнительных сопротивлений к измерительным приборам, образцовых сопротивлений и магазинов сопротивлений, реостатов и элементов нагревательных приборов, а также сплавы для термопар, компенсационных проводов и т.п.;

*контактные материалы* – применяемые для пар неразъемных, разрывных и скользящих контактов;

*материалы для пайки* всех видов проводниковых материалов.

Механизм прохождения тока в металлах обусловлен движением (дрейфом) свободных электронов под воздействием электрического поля; поэтому металлы называют проводниками с электронной электропроводностью или проводниками первого рода.

### **Электрическое сопротивление проводников**

Электрическое сопротивление обусловлено тем, что свободные электроны при дрейфе взаимодействуют с положительными ионами кристаллической решетки металла. При повышении температуры учащаются соударения электронов с ионами, поэтому сопротивление проводников зависит от температуры. Сопротивление проводников зависит от материала проводника, т.е. строение его кристаллической решетки. Для однородного цилиндрического проводника длиной  $l$  и площадью поперечного сечения  $S$  сопротивление определяется по формуле

$$R = \rho \cdot l/S \quad (1.)$$

где  $\rho = RS/l$  – удельное сопротивление проводника (сопротивление однородного цилиндрического проводника, имеющего единичную длину и единичную площадь поперечного сечения).

Единица сопротивления – Ом.

1 Ом: Ом – сопротивление проводника, по которому при напряжении 1 В течет ток 1 Ом=1 В/А.

Величина  $\sigma = 1/\rho$ , обратная удельному сопротивлению, называется удельной электрической проводимостью проводника.

Единица электрической проводимости – сименс (См).

Сименс – электрическая проводимость проводника сопротивлением 1 Ом, т.е. 1 См=1 Ом<sup>-1</sup>. Из формулы (1.1) следует, что единицей удельного сопротивления является Ом-метр (Ом · м).

Таблица 1.1 Удельное сопротивление наиболее распространенных проводников

Материал $\rho$ , $10^{-6}$ Ом·м	Характеристика материала
Серебро 1,6	Наилучший проводник
Медь 1,7	Применяется наиболее часто
Алюминий 2,9	Применяется часто
Железо 9,8	Применяется редко

Удельное электрическое сопротивление проводника зависит не только от рода вещества, но и от его состояния. Зависимость удельного сопротивления  $\rho$  от температуры выражается формулой

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t), \quad (1.2)$$

где  $\rho_0$  – удельное сопротивление при  $0^\circ\text{C}$ ;  $t$  – температура (по шкале Цельсия);  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления, характеризующий относительное изменение сопротивления проводника при нагревании его на  $1^\circ\text{C}$  или 1 К:

$$\alpha = (\rho - \rho_0) / \rho_0 t. \quad (1.3)$$

Температурные коэффициенты сопротивления веществ различны при разных температурах. Однако для многих металлов изменение  $\alpha$  с температурой не очень велико. Для всех чистых металлов  $\alpha \approx 1/273 \text{ K}^{-1}$  (или  $^\circ\text{C}^{-1}$ ).

Зависимость сопротивления металлов от температуры положена в основу устройства термометров сопротивления. Они используются как при очень высоких, так и при очень низких температурах, когда применение жидкостных термометров невозможно.

Из понятия о проводимости проводника следует, что чем меньше сопротивление проводника, тем больше его проводимость. При нагревании чистых металлов их сопротивление увеличивается, а при охлаждении – уменьшается.

В 1911 г. Голландский физик Камерлинг-Оннес провел опыты с ртутью, которую можно получить в чистом виде. Он столкнулся с новым,

совершенно неожиданным явлением. Удельное сопротивление ртути при температуре 4,2 К (около  $-269^{\circ}\text{C}$ ) резко упало до такой малой величины, что его практически стало невозможно измерить. Это явление обращения электрического сопротивления в нуль Камерлинг-Оннес назвал сверхпроводимостью.

В настоящее время сверхпроводимость обнаружена у более чем 25 металлических элементов, большого числа сплавов, некоторых полупроводников и полимеров. Температура  $T_{кр}$  перехода проводника в сверхпроводящее состояние для чистых металлов лежит в пределах от 0,14 К для иридия до 9,22 К для ниобия.

Движение электронов в металле, находящемся в состоянии сверхпроводимости, является до такой степени упорядоченным, что электроны, перемещаясь по проводнику, почти не испытывают соударений с атомами и ионами решетки. Полное объяснение явления сверхпроводимости можно дать с позиций квантовой механики.

Кроме чисто электротехнических свойств, для проведения необходимой технологической обработки и обеспечения заданных сроков службы в эксплуатации, проводниковые материалы должны обладать достаточной нагревостойкостью, механической прочностью пластичностью.

## **1.2. Медь**

Чистая медь по электрической проводимости занимает следующее место после серебра, обладающего из всех известных проводников наивысшей проводимостью. Высокая проводимость и стойкость к атмосферной коррозии в сочетании с высокой пластичностью делают медь основным материалом для проводов.

На воздухе медные провода окисляются медленно, покрываясь тонким слоем окиси  $\text{CuO}$ , препятствующим дальнейшему окислению меди.

Коррозию меди вызывают сернистый газ  $\text{SO}_2$ , сероводород  $\text{H}_2\text{S}$ , аммиак  $\text{NH}_3$ , окись азота  $\text{NO}$ , пары азотной кислоты и некоторые другие реактивы.

Проводниковую медь получают из слитков путем гальванической очистки ее в электролитических ваннах. Примеси даже в ничтожных количествах, резко снижают электропроводность меди, делая ее малопригодной для проводников тока, поэтому в качестве электротехнической меди применяют лишь две ее марки М0 и М1.

Почти все изделия из проводниковой меди изготавливаются путем проката, прессования и волочения. Так, волочением могут быть изготовлены провода диаметром до 0,005 мм, ленты толщиной до 0,1 мм и медная фольга толщиной до 0,008 мм.

Проводниковая медь применяется как в отожженном после холодной обработки виде (мягкая медь марки ММ), так и без отжига (твердая медь марки МТ).

При температурах термообработки выше  $900^\circ\text{C}$  вследствие интенсивного роста зерна механические свойства меди резко ухудшаются.

В целях повышения предела ползучести и термической устойчивости медь легируют серебром в пределах 0,07 – 0,15%, а также магнием, кадмием, цирконием и другими элементами.

Медь с присадкой серебра применяется для обмоток быстроходных и нагревостойких машин большой мощности, а медь, легированная различными элементами, используется в коллекторах и контактных кольцах сильно нагруженных машин.

### **1.3. Латуни**

Сплавы меди с цинком, называемые латунями, широко используются в электротехнике. Цинк растворяется в меди в пределах до 39%.

В различных марках латуни содержание цинка может достигать до 43%. Латуни, содержащие до 39% цинка, имеют однофазную структуру твердого



раствора и называются  $\alpha$ -латунями. Эти латуни обладают наибольшей пластичностью, поэтому из них изготавливают детали горячей или холодной прокаткой и волочением: листы, ленты, проволоку. Без нагрева из листовой латуни методом глубокой вытяжки и штамповкой можно изготовить детали сложной конфигурации.

Латуни с содержанием цинка свыше 39% называют  $\alpha+\beta$ -латунями или двухфазными и применяют главным образом для фасонных отливок.

Двухфазные латуни являются более твердыми и хрупкими и обрабатываются давлением только в горячем состоянии.

Присадка к латуням олова, никеля и марганца повышает механические свойства и антикоррозионную устойчивость, а добавки алюминия в композиции с железом, никелем и марганцем сообщают латуням кроме улучшения механических свойств и коррозионной стойкости высокую твердость. Однако присутствие в латунях алюминия затрудняет пайку, а проведение пайки мягкими припоями становится практически невозможным.

*Латуни марок Л68 и Л63* вследствие высокой пластичности хорошо штампуются и допускают гибку, легко паяются всеми видами припоев. В электромашиностроении широко применяются для различных токоведущих частей;

*латуни марок ЛС59-1 и ЛМЦ58-2* применяются для изготовления роторных клеток электрических двигателей и для токоведущих деталей, изготовленных резанием и штамповкой в горячем состоянии; хорошо паяются различными припоями;

*латунь ЛА67-2,5* применяется для литых токоведущих деталей повышенной механической прочности и твердости, не требующих пайки мягкими припоями;

*латуни ЛК80-3Л и ЛС59-1Л* широко применяются для литых токоведущих деталей электрической аппаратуры, для щеткодержателей и для заливки роторов асинхронных двигателей. Хорошо воспринимают пайку различными припоями.

#### 1.4. Проводниковые бронзы

Проводниковые бронзы относятся к медным сплавам, необходимость применения которых в основном вызвана недостаточной в ряде случаев механической прочностью и термической устойчивостью чистой меди.

Общая номенклатура бронз весьма обширна, но высокой электропроводностью обладают лишь немногие марки бронз.

*Кадмиевая бронза* относится к наиболее распространенным проводниковым бронзам. Из числа всех марок кадмиевая бронза обладает наивысшей электрической проводимостью. Вследствие повышенного сопротивления истиранию и более высокой нагревостойкости эта бронза широко применяется для изготовления троллейных проводов и коллекторных пластин;

*бериллиевая бронза* относится к сплавам, приобретающим прочность в результате стирания. Она обладает высокими упругими свойствами, устойчивыми при нагревании до 250°C, и электрической проводимостью в 2 – 2,5 раза большей, чем проводимость других марок бронз общего назначения. Эта бронза нашла широкое применение для изготовления различных пружинных деталей, выполняющих одновременно и роль проводника тока, например: токоведущие пружины, отдельные виды щеткодержателей, скользящие контакты в различных приборах, штепсельные приборы и т.п.;

*фосфористая бронза* обладает высокой прочностью и хорошими пружинными свойствами, из-за малой электропроводности применяется для изготовления пружинных деталей с низкими плотностями тока.

Литые токоведущие детали изготавливаются из различных марок машиностроительных литевых бронз с проводимостью в пределах 8-15% проводимости чистой меди. Характерной особенностью бронз является малая усадка по сравнению с чугуном и сталью и высокие литейные свойства, поэтому они применяются для отливки различных токоведущих деталей

сложной конфигурации, предназначенных для электрических машин и аппаратов.

Все марки литевых бронз можно подразделить на оловянные и безоловянные, где основными легирующими элементами являются Al, Mn, Fe, Pb, Ni.

## **1.6. Алюминий**

Характерными свойствами чистого алюминия является его малый удельный вес, низкая температура плавления, высокая тепловая и электрическая проводимость, высокая пластичность, очень большая скрытая теплота плавления и прочная, хотя и очень тонкая пленка окиси, покрывающая поверхность металла и защищающая его от проникновения кислорода внутрь.

Хорошая электрическая проводимость обеспечивает широкое применение алюминия в электротехнике. Так как плотность алюминия в 3,3 раза ниже, чем у меди, а удельное сопротивление лишь в 1,7 раза выше, чем у меди, то алюминий, на единицу массы имеет вдвое более высокую проводимость, чем медь.

Сернистый газ, сероводород, аммиак и другие газы, находящиеся в воздухе промышленных районов, не оказывают заметного влияния на скорость коррозии алюминия. Действие водяного пара на алюминий также незначительно. В контакте с большинством металлов и сплавов, являющихся благородными по электрохимическому ряду потенциалов, алюминий служит анодом и, следовательно, коррозия его в электролитах будет прогрессировать.

Чтобы избежать образования гальванопар во влажной атмосфере, место соединения алюминия с другими металлами герметизируется лакировкой или другим путем.

Длительные испытания проводов из алюминия показали, что они в отношении устойчивости против коррозии не уступают медным.

Таблица 1.2. Основные характеристики проводниковых материалов

Материал	Плотность, Кг/м <sup>3</sup> · 10 <sup>3</sup>	Температура плавления, °С	Удельное электрическое сопротивление при 20°С, Ом · м · 10 <sup>-7</sup>	Средний температурный Коэффициент сопротивления от 0 до 100°С, 1/град	Примечание
Алюминий	2,7	660	0,026–0,028	4 · 10 <sup>3</sup> -	Провода, кабели, шины, проводники короткозамкнутых роторов, корпуса и подшипниковые щиты малых электромашин
Бронза	8,3–8,9	885–1050	0,021–0,052	4 · 10 <sup>3</sup> -	Кадмиевая бронза – контакты, фосфористая - пружины
Латунь	8,4–8,7	900–960	0,03–0,08	2 · 10 <sup>3</sup> -	Контакты, зажимы
Медь	8,7–8,9	1080	0,0175–0,0182	3 · 10 <sup>2</sup> -	Провода, кабели, шины
Олово	7,3	232	0,114–0,120	4,4 · 10 <sup>3</sup> -	Припой для лужения и пайки в сплаве со свинцом

## 2. Полупроводники. Полупроводниковые приборы

### 2.1. Общие сведения

Полупроводниками называют вещества, удельная проводимость которых имеет промежуточное значение между удельными проводимостями металлов и диэлектриков. Полупроводники одновременно являются плохими проводниками и плохими диэлектриками. Граница между полупроводниками и диэлектриками условна, так как диэлектрики при высоких температурах могут вести себя как полупроводники, а чистые полупроводники при низких температурах ведут себя как диэлектрики. В металлах концентрация электронов практически не зависит от температуры, а в полупроводниках носители заряда возникают лишь при повышении температуры или при поглощении энергии от другого источника.

Типичными полупроводниками являются углерод (C), германий (Ge) и кремний (Si). Германий – это хрупкий серовато-белый элемент, открытый в 1886 году. Источником порошкообразной двуокиси германия, из которой получают твердый чистый германий, являются золы некоторых сортов угля.

Кремний был открыт в 1823 году. Он широко распространен в земной коре в виде кремнезема (двуокиси кремния), силикатов и алюмосиликатов. Двуокисью кремния богаты песок, кварц, агат и кремень. Из двуокиси кремния химическим путем получают чистый кремний. Кремний является наиболее широко используемым полупроводниковым материалом.

Рассмотрим подробнее образование электронов проводимости в полупроводниках на примере кремния. Атом кремния имеет порядковый номер  $Z=14$  в периодической системе Д. И. Менделеева. Поэтому в состав его атома входят 14 электронов. Однако только 4 из них находятся на незаполненной внешней оболочке и являются слабо связанными. Эти электроны называются валентными и обуславливают четыре валентности кремния. Атомы кремния способны объединять свои валентные электроны с

другими атомами кремния с помощью так называемой ковалентной связи (рис. 2.1). При ковалентной связи валентные электроны совместно используются различными атомами, что приводит к образованию кристалла.

При повышении температуры кристалла тепловые колебания решетки приводят к разрыву некоторых валентных связей. В результате этого часть электронов, ранее участвовавших в образовании валентных связей, отщепляется и становится электронами проводимости. При наличии электрического поля они перемещаются против поля и образуют электрический ток.

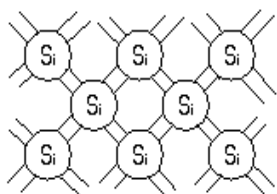


Рис. 2.1

Однако, при освобождении электрона в кристаллической решетке образуется незаполненная межатомная связь. Такие «пустые» места с отсутствующими электронами связи получили название «дырок». Возникновение дырок в кристалле полупроводника создает дополнительную возможность для переноса заряда. Действительно, дырка может быть заполнена электроном, перешедшим под действием тепловых колебаний от соседнего атома. В результате на этом месте будет восстановлена нормальная связь, но зато в другом месте появится дырка. В эту новую дырку в свою очередь может перейти какой-либо из других электронов связи и т.д. Последовательное заполнение свободной связи электронами эквивалентно движению дырки в направлении, противоположном движению электронов. Таким образом, если при наличии электрического поля электроны перемещаются против поля, то дырки будут двигаться в направлении поля, т.е. так, как двигались бы положительные заряды. Следовательно, в

полупроводнике имеются два типа носителей тока – электроны и дырки, а общая проводимость полупроводника является суммой электронной проводимости (n-типа, от слова negative) и дырочной проводимости (p-типа, от слова positive).

Наряду с переходами электронов из связанного состояния в свободное существуют обратные переходы, при которых электрон проводимости улавливается на одно из вакантных мест электронов связи. Этот процесс называют рекомбинацией электрона и дырки. В состоянии равновесия устанавливается такая концентрация электронов (и равная ей концентрация дырок), при которой число прямых и обратных переходов в единицу времени одинаково.

Рассмотренный процесс проводимости в чистых полупроводниках называется собственной проводимостью. Собственная проводимость быстро возрастает с повышением температуры, и в этом существенное отличие полупроводников от металлов, у которых с повышением температуры проводимость уменьшается. Все полупроводниковые материалы имеют отрицательный температурный коэффициент сопротивления.

Чистые полупроводники являются объектом, главным образом, теоретического интереса. Основные исследования полупроводников связаны с влиянием добавления примесей в чистые материалы. Без этих примесей не было бы большинства полупроводниковых приборов.

Чистые полупроводниковые материалы, такие как германий и кремний, содержат при комнатной температуре небольшое количество электронно-дырочных пар и поэтому могут проводить очень маленький ток. Для увеличения проводимости чистых материалов используется легирование.

Легирование – это добавление примесей в полупроводниковые материалы. Используются два типа примесей. Примеси первого типа – пятивалентные – состоят их атомов с пятью валентными электронами, например, мышьяк и сурьма. Примеси второго типа – трехвалентные –

состоят из атомов с тремя валентными электронами, например, индий и галлий.

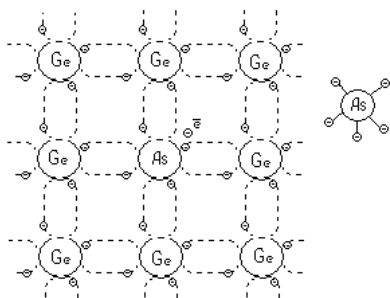


Рис. 2.2

Когда чистый полупроводниковый материал легируется пентавалентным материалом, таким как мышьяк (As), то некоторые атомы полупроводника замещаются атомами мышьяка (рис. 2.2). Атом мышьяка вводит четыре своих валентных электрона в ковалентные связи с соседними атомами. Его пятый электрон слабо связан с ядром и легко может стать свободным. Атом мышьяка называется донорским, поскольку он отдает свой лишний электрон. В легированном полупроводниковом материале находится достаточное количество донорских атомов, а следовательно и свободных электронов, для поддержания тока.

При комнатной температуре количество дополнительных свободных электронов превышает количество электронно-дырочных пар. Это означает, что в материале больше электронов, чем дырок. Поэтому электроны называют основными носителями. Дырки называют неосновными носителями. Поскольку основные носители имеют отрицательный заряд, такой материал называется полупроводником n-типа.

Когда полупроводниковый материал легирован трехвалентными атомами, например атомами индия (In), то эти атомы разместят свои три валентных электрона среди трех соседних атомов (рис. 2.3). Это создаст в ковалентной связи дырку.



Наличие дополнительных дырок позволит электронам легко дрейфовать от одной ковалентной связи к другой. Так как дырки легко принимают электроны, атомы, которые вносят в полупроводник дополнительные дырки называются акцепторными.

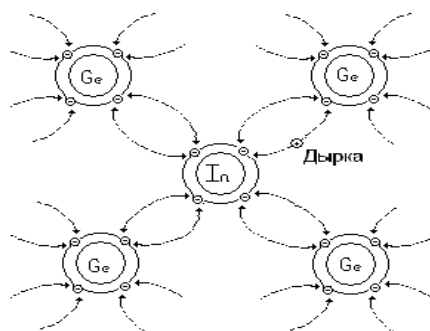


Рис. 2.3

При обычных условиях количество дырок в таком материале значительно превышает количество электронов. Следовательно, дырки являются основными носителями, а электроны – неосновными. Поскольку основные носители имеют положительный заряд, материал называется полупроводником p-типа.

Полупроводниковые материалы n- и p-типов имеют значительно более высокую проводимость, чем чистые полупроводники. Эта проводимость может быть увеличена или уменьшена путем изменения количества примесей. Чем сильнее полупроводниковый материал легирован, тем меньше его электрическое сопротивление.

Контакт двух полупроводников с различными типами проводимости называется p-n переходом и обладает очень важным свойством – его сопротивление зависит от направления тока. Отметим, что такой контакт нельзя получить, прижимая друг к другу два полупроводника. p-n переход создается в одной пластине полупроводника путем образования в ней областей с различными типами проводимости. Методы получения p-n переходов описаны ниже.

Итак, в куске монокристаллического полупроводника на границе между двумя слоями с различного рода проводимостями образуется р-п переход. На ней имеет место значительный перепад концентраций носителей зарядов. Концентрация электронов в n-области во много раз больше их концентрации в р-области. Вследствие этого электроны диффундируют в область их низкой концентрации (в р-область). Здесь они рекомбинируют с дырками и таким путем создают пространственный отрицательный заряд ионизированных атомов акцептора, не скомпенсированный положительным зарядом дырок.

Одновременно происходит диффузия дырок в n-область. Здесь создается не скомпенсированный зарядом электронов пространственный положительный заряд ионов донора. Таким образом, на границе создается двойной слой пространственного заряда (рис. 2.4), обедненный основными носителями тока. В этом слое возникает контактное электрическое поле  $E_k$ , препятствующее дальнейшему переходу электронов и дырок из одной области в другую.

Контактное поле поддерживает состояние равновесия на определенном уровне. Но и в этом случае под действием тепла небольшая часть электронов и дырок будет продолжать проходить через потенциальный барьер, обусловленный пространственными зарядами, создавая ток диффузии. Однако одновременно с этим под действием контактного поля неосновные носители заряда р- и n-областей (электроны и дырки) создают небольшой ток проводимости. В состоянии равновесия эти токи взаимно компенсируются.

Если к р-п переходу подключить внешний источник тока, то напряжение указанной на рис. 2.5 обратной полярности приведет к появлению внешнего поля  $E$ , совпадающего по направлению с контактным полем  $E_k$ . В результате ширина двойного слоя увеличится, и тока за счет основных носителей практически не будет. В цепи возможен лишь незначительный ток за счет неосновных носителей (обратный ток  $I_{обр}$ ).

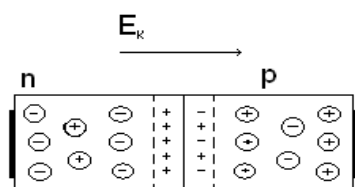


Рис. 2.4

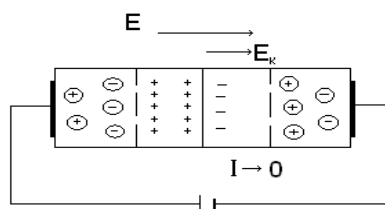


Рис. 2.5

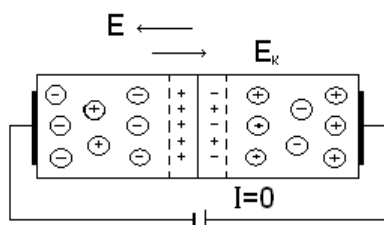


Рис. 2.6

При включении напряжения прямой полярности направление внешнего поля противоположно направлению контактного поля (рис. 2.6). Ширина двойного слоя уменьшится, и в цепи возникнет большой прямой ток  $I_{пр}$ . Таким образом, р-п переход обладает ярко выраженной односторонней проводимостью. Это выражает его вольтамперная характеристика (рис. 2.7).

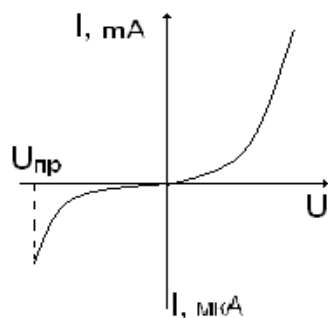


Рис. 2.7

Когда к р-n переходу приложено прямое напряжение, то ток быстро возрастает с ростом напряжения. Когда же к р-n переходу приложено обратное напряжение, ток очень мал, быстро достигает насыщения и не изменяется до некоторого предельного значения обратного напряжения  $U_{обр}$ , после чего резко возрастает. Это так называемое напряжение пробоя, при котором наступает пробой р-n перехода и он разрушается. Следует отметить, что на рисунке 2.7 масштаб обратного тока в тысячу раз меньше масштаба прямого тока.

## 2.2. Полупроводниковые диоды

Р-n переход является основой полупроводниковых диодов, которые применяются для выпрямления переменного тока и для других нелинейных преобразований электрических сигналов.

Диод проводит ток в прямом направлении только тогда, когда величина внешнего напряжения (в Вольтах) больше потенциального барьера (в эВ). Для германиевого диода минимальное внешнее напряжение равно 0,3 В, а для кремниевого 0,7 В.

Когда диод начинает проводить ток, на нем появляется падение напряжения. Это падение напряжения равно потенциальному барьеру и называется прямым падением напряжения.

Все диоды обладают малым обратным током. В германиевых диодах он измеряется в микроамперах, а в кремниевых в наноамперах. Германиевый диод имеет больший обратный ток, так как он более чувствителен к температуре. Этот недостаток германиевых диодов компенсируется невысоким потенциальным барьером.

Как германиевые, так и кремниевые диоды могут быть повреждены сильным нагреванием или высоким обратным напряжением. Производители указывают максимальный прямой ток, который может безопасно течь через диод, а также максимальное обратное напряжение (пиковое обратное

напряжение). Если превысить пиковое обратное напряжение, то через диод пойдет большой обратный ток, создающий избыточный нагрев и выводящий его из строя.

При комнатной температуре обратный ток мал. При повышении температуры обратный ток увеличивается, нарушая работу диода. В германиевых диодах обратный ток выше, чем в кремниевых диодах, и сильнее зависит от температуры, удваиваясь при повышении температуры приблизительно на  $10^{\circ}\text{C}$ .

Схематическое обозначение диода показано на рисунке 2.8, р-часть представлена стрелкой, а n-часть – чертой. Прямой ток течет от части р к части n (по стрелке). Часть n называется катодом, а часть р – анодом.

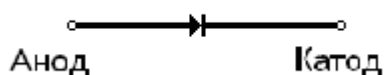


Рис. 2.8

Существуют три типа р-n переходов: выращенные переходы, вплавленные переходы и диффузионные переходы, которые изготавливаются по различным технологиям. Методы изготовления каждого из этих переходов различны.

Метод выращивания перехода (наиболее ранний) состоит в следующем: чистый полупроводниковый материал и примеси р-типа помещают в кварцевый контейнер и нагревают до тех пор, пока они не расплавятся. В расплавленную смесь помещают маленький полупроводниковый кристалл, называемый затравкой. Затравочный кристалл медленно вращается и вытягивается из расплава настолько медленно, чтобы на нем успел нарасти слой расплавленной смеси. Расплавленная смесь, нарастая на затравочный кристалл охлаждается и затвердевает. Она имеет такую же кристаллическую структуру как и затравка. После вытягивания затравка оказывается попеременно легированной примесями n- и р- типов.

Это создает в выращенном кристалле слои n- и p- типов. Таким образом, выращенный кристалл состоит из многих p-n слоев.

Метод создания вплавленных p-n переходов предельно прост. Маленькая гранула трехвалентного материала, такого как индий, размещается на кристалле полупроводника n-типа. Гранула и кристалл нагреваются до тех пор, пока гранула не расплавится сама, и частично не расплавит полупроводниковый кристалл. На участке где они стыкуются, образуется материал p-типа. После охлаждения материал перекристаллизовывается и формируется твердый p-n переход.

В настоящее время чаще всего используют диффузионный метод получения p-n переходов. Маска с прорезями размещается над тонким срезом полупроводника p- или n-типа, который называется подложкой. После этого подложка помещается в печь, и подвергается контакту с примесями, находящимися в газообразном состоянии. При высокой температуре атомы примеси проникают в подложку. Глубина проникновения контролируется длительностью экспозиции и температурой.

После формирования p-n перехода, диод надо поместить в корпус, чтобы защитить его от влияния окружающей среды и механических повреждений. Корпус должен также обеспечить возможность соединения диода с цепью. Вид корпуса определяется назначением диода (рис. 2.9). Если через диод должен протекать большой ток, корпус должен быть рассчитан так, чтобы уберечь p-n переход от перегрева.

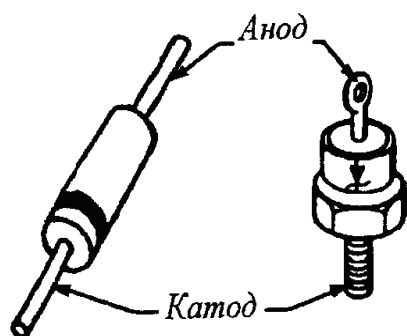


Рис. 2.9

Диод можно проверить путем измерения с помощью омметра прямого и обратного сопротивлений. Величина этих сопротивлений характеризует способность диода пропускать ток в одном направлении и не пропускать ток в другом направлении.

Германиевый диод имеет низкое прямое сопротивление, порядка 100 Ом, а его обратное сопротивление превосходит 100 000 Ом. Прямые и обратные сопротивления кремниевых диодов выше, чем у германиевых. Проверка диода с помощью омметра должна показать низкое прямое сопротивление и высокое обратное сопротивление.

Если положительный вывод омметра соединен с анодом диода, а отрицательный вывод с катодом, то диод смещен в прямом направлении. В этом случае через диод идет ток и омметр показывает низкое сопротивление. Если выводы омметра поменять местами, то диод будет смещен в обратном направлении. Через него будет идти маленький ток, и омметр покажет высокое сопротивление.

Если сопротивление диода низкое в прямом и в обратном направлениях, то он, вероятно, закорочен. Если диод имеет высокое сопротивление и в прямом, и в обратном направлениях, то в нем, вероятно, разорвана цепь.

Высокое обратное напряжение, приложенное к диоду, может создать сильный обратный ток, который перегреет диод, и приведет к его пробоя. Обратное напряжение, при котором наступает пробой, называется напряжением пробоя или максимальным обратным напряжением. Специальные диоды, которые называются стабилитронами, предназначены для работы при напряжениях, превышающих напряжение пробоя стабилитрона. Эта область называется областью стабилизации.

Когда обратное напряжение достаточно велико, чтобы вызвать пробой стабилитрона, через него течет высокий обратный ток. До наступления пробоя обратный ток невелик. После наступления пробоя обратный ток резко

возрастает. Это происходит потому, что сопротивление стабилитрона уменьшается при увеличении обратного напряжения.

Напряжение пробоя стабилитрона определяется удельным сопротивлением диода. Оно, в свою очередь зависит от техники легирования, использованной при его изготовлении. Паспортное напряжение пробоя — это обратное напряжение при токе стабилизации. Ток стабилизации несколько меньше максимального обратного тока диода. Напряжение пробоя обычно указывается с точностью от 1 до 20 %.

Способность стабилитрона рассеивать мощность уменьшается при увеличении температуры. Следовательно, рассеиваемая стабилитроном мощность указывается для определенной температуры. Величина рассеиваемой мощности также зависит от длины выводов: чем короче выводы, тем большая мощность рассеивается на диоде. Производитель указывает также коэффициент отклонения для определения рассеиваемой мощности при других температурах. Например, коэффициент отклонения 6 милливатт на градус Цельсия означает, что рассеиваемая диодом мощность уменьшается на 6 милливатт при повышении температуры на один градус.

Корпуса стабилитронов имеют такую же форму, как и у обычных диодов:

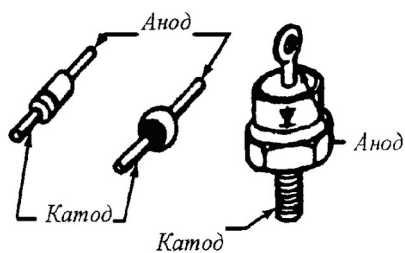


Рис. 2.10

Маломощные стабилитроны выпускаются в корпусах из стекла или эпоксидной смолы, а мощные в металлическом корпусе с винтом. Схематическое обозначение стабилитрона показано на рис. 2.11.





Рис. 2.11

Основными параметрами стабилитронов являются максимальный ток стабилизации, обратный ток и обратное напряжение. Максимальный ток стабилизации — это максимальный обратный ток, который может течь через стабилитрон без превышения рассеиваемой мощности указанной производителем. Обратный ток — это ток утечки перед началом пробоя. Он указывается при некотором обратном напряжении, равном примерно 80% напряжения стабилизации.

Стабилитроны используют для стабилизации напряжения, например, для компенсации изменения напряжения линии питания или изменения резистивной нагрузки, питаемой постоянным током.

На рисунке 2.12 показана типичная регулирующая цепь со стабилитроном. Стабилитрон соединен последовательно с резистором  $R$ . Резистор обуславливает прохождение через стабилитрон такого тока, чтобы он работал в режиме пробоя (стабилизации). Входное постоянное напряжение должно быть выше напряжения стабилизации стабилитрона. Падение напряжения на стабилитроне равно напряжению стабилизации стабилитрона. Стабилитроны выпускают с определенным напряжением пробоя, которое называют напряжением стабилизации. Падение напряжения на резисторе равно разности входного напряжения и напряжения стабилизации.

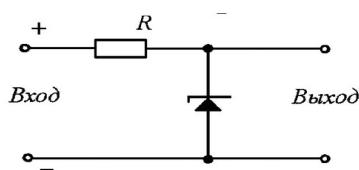


Рис. 2.12

Входное напряжение может увеличиваться или уменьшаться. Это обуславливает соответствующее увеличение или уменьшение тока через стабилитрон. Когда стабилитрон работает при напряжении стабилизации (в области пробоя), при увеличении входного напряжения через него может идти большой ток. Однако, напряжение на стабилитроне останется прежним. Стабилитрон оказывает противодействие увеличению входного напряжения, так как при увеличении тока его удельное сопротивление падает. Это позволяет выходному напряжению на стабилитроне оставаться постоянным при изменениях входного напряжения. Изменение входного напряжения проявляется только в изменении падения напряжения на последовательно включенном резисторе. Сумма падений напряжения на этом резисторе и стабилитроне равна входному напряжению. Выходное напряжение снимается со стабилитрона. Выходное напряжение может быть увеличено или уменьшено путем замены стабилитрона и включенного последовательно с ним резистора.

Описанная цепь выдает постоянное напряжение. При расчете цепи должны учитываться как ток, так и напряжение. Внешняя нагрузка потребляет ток, который определяется её сопротивлением и выходным напряжением. Через резистор, включенный последовательно со стабилитроном, протекает и ток нагрузки и ток стабилизации. Этот резистор должен быть подобран таким образом, чтобы через стабилитрон шел ток стабилизации, и он находился в области пробоя.

При увеличении резистивной нагрузки, идущий через нее ток уменьшается, что должно вызвать увеличение падения напряжения на нагрузке. Но стабилитрон препятствует любому изменению напряжения. Сумма тока стабилизации и тока нагрузки через последовательно включенный резистор остается постоянной. Это обеспечивает постоянство падения напряжения на последовательно включенном резисторе. Аналогично, когда ток через нагрузку увеличивается, ток стабилизации

уменьшается, обеспечивая постоянство напряжения. Это позволяет цепи поддерживать постоянным выходное напряжение при колебаниях входного.

### 2.3. Тиристоры

Тиристоры — это обширный класс полупроводниковых приборов, используемых для электронного переключения. Эти полупроводниковые устройства обладают двумя устойчивыми состояниями, и имеют три или более р-п переходов. Тиристоры охвачены внутренней положительной обратной связью, позволяющей увеличивать амплитуду выходного сигнала путем подачи на вход части выходного напряжения.

Тиристоры широко используются при управлѐнии мощностью постоянного и переменного тока. Они применяются для включения и выключения мощности, подаваемой на нагрузку, а также для регулирования ее величины, например, для управления освещѐнностью или скоростью вращения двигателя.

Тиристоры изготавливаются из кремния диффузионным или диффузионно-сплавным методом и состоят из четырех полупроводниковых слоев р-типа и n-типа, расположенных поочередно. На рисунках 2.13, 2.14 и 2.15 изображены упрощенная схема тиристора, его вольтамперная характеристика и его схематическое обозначение соответственно.

Четыре слоя прилегают друг к другу, образуя три р-п-перехода. Два крайних вывода — это анод и катод, а к одному из средних слоев может быть подключен управляющий электрод. Данный тиристор не содержит управляющего электрода, и управление его открыванием и закрыванием осуществляется путем изменения приложенного к нему напряжения. Такие тиристоры называются динисторами.

При указанной на рисунке 2.13 полярности приложенного к тиристорному напряжению, основная его часть придется на закрытый р-п-переход 2, тогда как переходы 1 и 3 окажутся открытыми. При этом дырки, переходящие из

слоя  $p_1$  в слой  $p_2$ , частично рекомбинируют с электронами в слое  $n_1$ . Их нескомпенсированный заряд в слое  $p_2$  вызовет вторичную встречную инжекцию электронов из слоя  $n_2$ , и электроны из слоя  $n_2$  пройдут через слой  $p_2$  в слой  $n_1$ , частично рекомбинируя с дырками в слое  $p_2$ . Они вызовут вторичную встречную инжекцию дырок из слоя  $p_1$ . Эти явления создадут необходимые условия для развития лавинного процесса. Однако лавинный процесс начнется только при некотором достаточно большом внешнем напряжении  $U_{пер}$ . При этом тиристор перейдет из точки А вольтамперной характеристики на участок ВС (рис. 2.14), и ток через него резко возрастет. При этом, благодаря обилию зарядов в переходе 2, напряжение на нем сильно упадет (примерно до 1 В), и энергия, выделяемая в этом переходе, окажется недостаточной для развития необратимых процессов в структуре прибора.

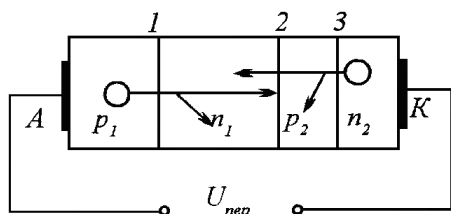


Рис. 2.13

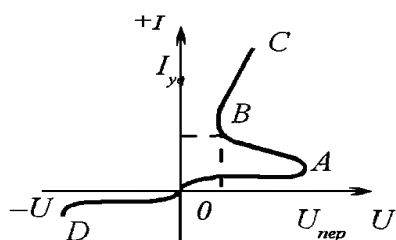


Рис. 2.14



Рис. 2.15

Если ток через тиристор сильно уменьшить до некоторого значения  $I_{уд}$  (тока удержания), то тиристор закроется и перейдет в состояние с низкой проводимостью (участок ОА на рис. 2.14). Если к тиристоры приложить напряжение обратной полярности, то его вольтамперная характеристика будет такой же, как у полупроводникового диода (участок ОД на рис. 2.14).

Рассмотренный неуправляемый тиристор имеет существенный недостаток: его открывание и закрывание возможно лишь при больших изменениях внешнего напряжения и тока.

Значительно чаще используют тиристоры, которые имеют управляющий электрод (рис. 2.16).

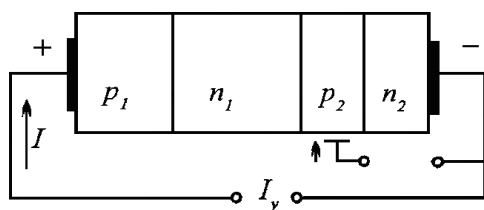


Рис. 2.16

### **3. Электроизоляционные материалы**

#### **3.1. Основные определения и классификация диэлектриков**

Электроизоляционными материалами или диэлектриками называются вещества, с помощью которых осуществляется изоляция элементов или частей электрооборудования, находящихся под разными электрическими потенциалами. По сравнению с проводниковыми материалами диэлектрики обладают значительно большим электрическим сопротивлением. Характерным свойством диэлектриков является возможность создания в них сильных электрических полей и накопления электрической энергии. Это свойство диэлектриков используется в электрических конденсаторах и других устройствах.

Согласно агрегатному состоянию диэлектрики делятся на газообразные, жидкие и твердые. Особенно большой является группа твердых диэлектриков (высокополимеры, пластмассы, керамика и др.).

Согласно химическому составу диэлектрики делятся на органические и неорганические. Основным элементом в молекулах всех органических диэлектриков является углерод. В неорганических диэлектриках углерода не содержится. Наибольшей нагревостойкостью обладают неорганические диэлектрики (слюда, керамика и др.).

По способу получения диэлектрики делятся на естественные (природные) и синтетические. Наиболее многочисленной является группа синтетических изоляционных материалов.

Многочисленную группу твердых диэлектриков обычно делят на ряд подгрупп в зависимости от их состава, структуры и технологических особенностей этих материалов. Так, выделяют керамические диэлектрики, воскообразные, пленочные, минеральные и др.

Все диэлектрики, хотя и в незначительной степени, обладают электропроводностью. В отличие от проводников у диэлектриков

наблюдается изменение тока со временем вследствие спада тока абсорбции. С некоторого момента под воздействием постоянного тока в диэлектрике устанавливается только ток проводимости. Величина последнего определяет проводимость диэлектрика.

При напряженности электрического поля, превосходящей предел электрической прочности диэлектрика, наступает пробой. Пробой представляет собой процесс разрушения диэлектрика, в результате чего диэлектрик теряет электроизоляционные свойства в месте пробоя.

Величину напряжения, при котором происходит пробой диэлектрика, называют пробивным напряжением  $U_{пр}$ , а соответствующее значение напряженности электрического поля называется электрической прочностью диэлектрика  $E_{пр}$ .

Пробой твердых диэлектриков представляет собой или чисто электрический процесс (электрическая форма пробоя), или тепловой процесс (тепловая форма пробоя). В основе электрического пробоя лежат явления, в результате которых в твердых диэлектриках имеет место лавинное возрастание электронного тока.

Характерными признаками электрического пробоя твердых диэлектриков являются:

независимость или очень слабая зависимость электрической прочности диэлектрика от температуры и длительности приложенного напряжения;

электрическая прочность твердого диэлектрика в однородном поле не зависит от толщины диэлектрика (до толщин  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  см);

электрическая прочность твердых диэлектриков находится в сравнительно узких пределах:  $10^6$ – $10^7$  В/см; причем она больше, чем при тепловой форме пробоя;

перед пробоем ток в твердом диэлектрике увеличивается по экспоненциальному закону, а непосредственно перед наступлением пробоя наблюдается скачкообразное возрастание тока;

при наличии неоднородного поля электрический пробой происходит в месте наибольшей напряженности поля (краевой эффект).

Тепловой пробой имеет место при повышенной проводимости твердых диэлектриков и больших диэлектрических потерях, а также при подогреве диэлектрика посторонними источниками тепла или при плохом теплоотводе. Вследствие неоднородности состава отдельные части объема диэлектрика обладают повышенной проводимостью. Они представляют собой тонкие каналы, проходящие через всю толщину диэлектрика. Вследствие повышенной плотности тока в одном из таких каналов будут выделяться значительное количество тепла. Это повлечет за собой еще большее нарастание тока вследствие резкого уменьшения сопротивления этого участка в диэлектрике. Процесс нарастания тепла будет продолжаться до тех пор, пока не произойдет тепловое разрушение материала (расплавление, науглероживание) по всей его толщине – по ослабленному месту.

Характерными признаками теплового пробоя твердых диэлектриков являются:

пробой наблюдается в месте наихудшего теплоотвода от диэлектрика в окружающую среду;

пробивное напряжение диэлектрика снижается с повышением температуры окружающей среды;

пробивное напряжение снижается с увеличением длительности приложенного напряжения;

электрическая прочность уменьшается с увеличением толщины диэлектрика;

электрическая прочность твердого диэлектрика уменьшается с ростом частоты приложенного переменного напряжения.

При пробое твердых диэлектриков часто наблюдаются случаи, когда до определенной температуры имеет место электрический пробой, а затем в связи с дополнительным нагревом диэлектрика наступает процесс теплового пробоя диэлектрика.



### 3.2. Характеристики электроизоляционных материалов

*Жидкие и полужидкие диэлектрики* – к ним относятся минеральные масла (трансформаторное, конденсаторное и др.), растительные масла (касторовое) и синтетические жидкости (совол, совтол, ПЭС-Д и др.), вазелины.

Минеральные масла являются продуктами перегонки нефти. Отдельные виды минеральных электроизоляционных масел отличаются друг от друга вязкостью и уровнем электрических характеристик в связи с лучшей очисткой некоторых из них (конденсаторное, кабельное). Остальные же характеристики масел находятся практически на одинаковом уровне.

Касторовое масло получают из семян растения клещевины.

Совол и совтол – негорючие синтетические жидкости. Совол получают в результате хлорирования кристаллического вещества – дифенила.

Совол представляет собой прозрачную вязкую жидкость. Совол токсичен, раздражает слизистые оболочки, поэтому работа с ним требует соблюдения правил техники безопасности. Совтол является смесью совола и трихлорбензола, вследствие чего он имеет значительно меньшую вязкость. Совол и совтол применяются для пропитки бумажных конденсаторов для установок постоянного тока и переменного тока промышленной частоты.

ПЭС-Д является жидким кремнийорганическим диэлектриком и обладает повышенной нагревостойкостью и морозостойкостью. Кремнийорганические жидкости нетоксичны, не обладают коррозионной активностью.

Вазелины представляют собой полужидкие массы. Применяются для пропитки бумажных конденсаторов.

*Высокополимерные органические диэлектрики* состоят из молекул, образованных десятками, сотнями тысяч молекул исходного вещества – мономера. Полимеры могут быть природными (натуральный каучук, янтарь и

др.) и синтетическими. Характерной особенностью высокополимерных материалов являются их высокие диэлектрические свойства.

*Воскообразные диэлектрики:* парафин, церезин и другие представляют собой вещества поликристаллического строения с отчетливо выраженной температурой плавления.

*Электротехнические пластмассы* – пластические массы (пластмассы) представляют собой композиционные материалы, состоящие из какого-либо связывающего вещества (смолы, полимеры), наполнителей, пластифицирующих и стабилизирующих веществ и красителей.

По отношению к нагреву различают терморезистивные и термопластичные пластмассы. Первые в процессе горячего прессования или последующего нагрева становятся неплавкими и нерастворимыми. Термопластичные пластмассы (термопласты) после нагрева в процессе прессования способны размягчаться при последующем нагревании.

*Электроизоляционные бумаги и картоны* относятся к волокнистым материалам, получаемым из химически обработанных растительных волокон: древесины и хлопка.

Электрокартоны для работы в воздушной среде обладают более плотной структурой по сравнению с картонами, предназначенными для работы в масле.

Фибра – монолитный материал, получаемый прессованием листов бумаги, предварительно обработанных раствором хлористого цинка. Фибра поддается всем видам механической обработки и штамповки. Листовая фибра поддается формированию после размягчения ее заготовок в горячей воде.

*Слоистые электроизоляционные пластмассы* – к ним относятся гетинакс, текстолит и стеклотекстолит. Эти материалы представляют собой слоистые пластмассы, в которых в качестве связывающего вещества применяются бакелитовые (резольные) или кремнийорганические смолы, переведенные в неплавкое и нерастворимое состояние.

В качестве наполнителей в слоистых электроизоляционных материалах применяют специальные сорта пропиточной бумаги (гетинакс), а также хлопчатобумажные ткани (текстолит) и бесщелочные стеклянные ткани (стеклотекстолит).

*Заливочные и пропиточные электроизоляционные составы (компаунды).* Компаундами называются электроизоляционные составы, жидкие в момент их применения, которые затем отверждаются и в конечном (рабочем) состоянии представляют собой твердые вещества.

Согласно своему назначению компаунды делятся на пропиточные и заливочные. Первые применяются для пропитки обмоток электрических машин и аппаратов, вторые – для заливки полостей в кабельных муфтах, а также в корпусах электрических аппаратов и приборов (трансформаторы, дроссели и др.).

Компаунды могут быть термореактивными, не размягчающимися после своего отверждения, или термопластичными, размягчающимися при последующих нагревах. К термопластичным относятся компаунды на основе эпоксидных, полиэфирных и некоторых других смол. К термопластичным – компаунды на основе битумов, воскообразных диэлектриков и термопластичных полимеров (полистирол, полиизобутилен и др.).

Широкое применение получили компаунды на основе битумов как наиболее дешевые и химически инертные вещества, обладающие высокой стойкостью к воде и хорошими электрическими характеристиками.

#### *Электроизоляционные лаки и эмали.*

Лаки представляют собой растворы пленкообразующих веществ: смол, битумов, высыхающих масел (льняное, тунговое), эфиров целлюлозы или композиций этих материалов в органических растворителях. В процессе сушки лака из него испаряются растворители, а в лаковой основе происходят физико-химические процессы, приводящие к образованию лаковой пленки.

Пропиточные лаки применяются для пропитки обмоток электрических машин и аппаратов с целью цементации их витков, увеличения

коэффициента теплопроводности обмоток и повышения их влагостойкости. С помощью покровных лаков создают защитные влагостойкие, маслостойкие и другие покрытия на поверхности обмоток или пластмассовых и других изоляционных деталей. Клеящие лаки предназначены для склеивания листочков слюды друг с другом или с бумагой и тканями (миканиты, микаленты), а также для склеивания пленочных материалов с бумагой, картоном, тканями и для других целей.

Эмали представляют собой лаки с введенными в них пигментами – неорганическими наполнителями (окись цинка, двуокись титана, железный сурик). Пигментирующие вещества вводятся с целью повышения твердости, механической прочности, влагостойкости, дуговой стойкости и других свойств эмалевых пленок. Эмали являются покровными материалами.

По способу сушки различают лаки и эмали горячей (печной) и холодной (воздушной) сушки. Первые требуют для своего отверждения 80 – 180°С, а вторые высыхают при комнатной температуре.

*Электроизоляционные лакированные ткани (лакоткани)* представляют собой гибкие материалы, состоящие из ткани, пропитанной лаком или каким-либо жидким электроизоляционным составом. Лак или другой пропиточный состав после отвердевания образует гибкую пленку, которая обеспечивает электроизоляционные свойства лакотканям.

В зависимости от тканевой основы лакоткани делятся на хлопчатобумажные, шелковые, капроновые и стеклянные (стеклолакоткани). В качестве пропиточных составов для лакотканей применяются масляные, масляно-битумные, полиэфирные. Эскапоновые или кремнийорганические лаки, а также растворы латексов кремнийорганических каучуков или суспензии фторопластов.

Липкие стеклоткани и резиностеклоткани, пропитанные терморезистивными составами с повышенной липкостью, обеспечивают монолитность изоляции, выполненной из этих материалов.

Основными областями применения лакотканей являются: электрические машины, аппараты и приборы низкого напряжения. Лакоткани применяются для гибкой межвитковой и пазовой изоляции, а также в качестве различных электроизоляционных прокладок.

Для изолирования лобовых частей обмоток и других токоведущих элементов неправильной формы применяют лакотканые ленты, вырезанные под углом  $45^\circ$  по отношению к основе лакоткани.

*Пленочные электроизоляционные материалы* представляют собой тонкие (от 10 до 200 мкм) гибкие пленки, бесцветные или окрашенные.

Применение пленочных материалов для пазовой изоляции в электрических машинах позволяет уменьшить толщину изоляции. Пленочные электроизоляционные материалы получают преимущественно из синтетических высокомолекулярных диэлектриков (лавсан, фторопласт-4 и др.).

Электроизоляционные слюды. Для электрической изоляции применяется преимущественно природная слюда. Из синтетических слюд находит применение фторфлогопит.

Слюды представляют собой вещества с характерным листовым сложением. Это позволяет расщеплять кристаллы слюды на тонкие листочки – от 6 до 45 мкм и более. Из всех природных слюд в качестве диэлектриков применяются только мусковит и флогопит. Эти слюды хорошо расщепляются и обладают высокими электрическими свойствами.

В электротехнике применяются следующие разновидности слюд.

Щипаная слюда – тонкие листочки произвольного контура. В зависимости от площади прямоугольника, который можно вписать контур листочка, щипаная слюда делится на девять размеров. По толщине листочков щипаную слюду делят на четыре группы. Щипаная слюда применяется для изготовления клееных слюдяных электроизоляционных материалов (миканиты, микафолий, микаленты и др.).

Конденсаторная слюда – листочки прямоугольной формы, получаемые штампованием (вырубкой) из пластинок слюды (полборы). Конденсаторная слюда применяется в производстве слюдяных конденсаторов в качестве основного диэлектрика, а также в качестве защитных пластин.

Слюда для электровакуумных приборов – плоские детали разной формы, снабженные заданными отверстиями. Эти изделия получают вырубкой из пластинок слюды мусковит. Толщина слюдяных деталей находится в пределах 0,1 – 0,5 мм.

Гильотиновая слюда – пластины прямоугольной формы различной площади и толщиной 0,08 – 0,6 мм. Этот род слюдяных изделий применяется в качестве различного рода электроизоляционных прокладок в электрических машинах и аппаратах малой мощности.

*Электроизоляционные материалы на основе слюды* изготавливаются из щипаной слюды и связывающих веществ; миканиты, микафолы и микаленты. Они представляют собой композиционные материалы, состоящие из листочков слюды, склеенных друг с другом с помощью какой-либо смолы или лака. Основной областью применения клееных слюдяных материалов является изоляция обмоток электрических машин высокого напряжения (пазовая, витковая и др.), а также машин низкого напряжения нагревостойкого исполнения.

*Слюдинитовые и слюдопластовые электроизоляционные материалы* – при разработке природной слюды и изготовлении электроизоляционных материалов на основе щипаной слюды образуется около 90% различных отходов. Утилизация отходов привела к получению новых электроизоляционных материалов – слюдинитов и слюдопластов.

Слюдинитовые материалы получают из слюдинитовой бумаги или картона, предварительно обработанных каким-либо связывающим составом (смолы, лаки).

Для получения слюдинитовой бумаги отходы слюды в виде чистых обрезков подвергают термической обработке при 750 – 800°C. В результате

этого они претерпевают значительное вспучивание и делятся на мелкие частицы. После промывания их водой образуется слюдяная суспензия, из которой изготавливают слюдяную бумагу и картон.

*Электрокерамические материалы* представляют собой твердые вещества, получаемые в результате термической обработки – обжига исходных керамических масс, состоящих из различных минералов, взятых в определенном соотношении.

Основной частью многих электрокерамических материалов (фарфор, стеатит и др.) являются природные глинистые вещества (глины, каолины). Кроме глинистых материалов в электрокерамические массы вводят кварц, полевой шпат (электрофарфор), а также тальк, углекислый барий или углекислый кальций (стеатит) и др.

## Заключение

До создания квантовой механики проводимость веществ объясняли, рассматривая движение электронного газа. Частицы этого газа – электроны – сталкиваются с ионами кристаллической решетки вещества. По квантовой теории проводимости, которая рассматривает движение электронов сквозь кристаллическую решетку как распространение электронных волн де Бройля, узлы решетки не могут быть для электронной волны преградой. Квантовая теория проводимости твердых тел основывается на зонной теории. В твердых телах электроны принимают только определенные значения энергии. Каждое такое значение представлено энергетическим уровнем. Уровни группируются в зоны, отделенные друг от друга энергетическими промежутками, принадлежащими зоне.

У металлов зоны либо перекрываются между собой, либо не целиком заполнены электронами. И в металле под действием электрического поля электрон свободно переходит с уровня на уровень. Легкая возможность перехода с уровня на уровень и означает свободное движение электрона.

В полупроводниках и изоляторах заполненная зона отделяется от свободной энергетической щелью. Через эту запрещенную зону электроны могут переходить за счет тепловой энергии. Вероятность таких переходов увеличивается с ростом температуры. Поэтому с повышением температуры проводимость полупроводников и диэлектриков возрастает – это важнейшее их отличие от металлов.



## Список литературы

Синдеев Ю.Г., Грановский В.Г. Электротехника. Учебник для студентов педагогических и технических вузов. Ростов-на-Дону: «Феникс», 1999.

Лихачев В.Л. Электротехника. Справочник. Том 1./В.Л. Лихачев. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003.

Жданов Л.С., Жданов Г.Л. Физика для средних специальных учебных заведений: Учебник. – 4-е изд., испр. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984.

Ремизов А.Н. Курс физики: Учебник для ВУЗов / А.Н. Ремизов, А.Я. Потапенко. – М.: Дрофа, 2002.

Дмитриева В.Ф. Физика: Учебное пособие для техникумов./Под ред. В.Л. Прокофьева, – 4-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2001.

Грибов Л.А., Прокофьева Н.И. Основы физики: Учебник. – 2-е изд. – М.: Наука. Физматлит, 1995.

Яворский Б.М., Пинский А.А. Основы физики: Учебное пособие. В двух томах: Т.1. – 3-е изд. перераб. – М.: Наука. Физматлит, 1981.