# Введение

Лекционный курс «Электротехнические материалы и технология электромонтажных работ» является первой специальной дисциплиной для студентов электротехнической специальности 6-05-0715-09 «Системы обеспечения движения поездов». За более 200 лет развития электротехники и более 100 лет электроники мы научились использовать движение электричества для передачи и преобразования энергии, передачи и обработки информации, а также для изменения свойств вещества с помощью электротехнологических процессов. Постоянно появляются новые электрические и электронные устройства, характеристики существующих непрерывно улучшаются; применение новых материалов является одним из основных способов повышения производительности, надёжности и эффективности электрооборудования и электронной аппаратуры.

Инженер-электрик в области разработки и эксплуатации телекоммуникационных систем должен знать важнейшие свойства проводниковых, полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов, используемых как при изготовлении отдельных элементов и деталей, так и при соединении их между собой. Для долговременной и безаварийной эксплуатации электрооборудования и электронной аппаратуры необходимо также знать, как правильно проложить электрические линии, качественно выполнить электрические соединения и обеспечить надежную изоляцию.

# 1 КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Электротехническими называют материалы, применяемые в технике с учетом их свойств по отношению к воздействию на них электрических, магнитных и переменных электромагнитных полей.

По поведению **в электрическом поле** материалы подразделяют на проводники, полупроводники и диэлектрики.

*Проводниками*называют материалы, обеспечивающие прохождение электрического тока – электропроводность. Основным электрическим параметром проводников является *удельное объёмное электрическое сопротивление* ρv – это сопротивление куба с ребром 1 м при протекании тока от одной грани к противоположной, единица измерения Ом·м. Часто используют обратную величину – *удельную объёмную электропроводность*, γ*v* = 1*/*ρ*V*, единица измерения См*/*м (сименс на метр). Условно к проводникам относят материалы с удельным электрическим сопротивлением ρ*v* < 10–**5** Ом·м. Это металлы и сплавы, углеродные материалы, растворы (электролиты), расплавы, ионизированный газ (плазма), некоторые оксиды и другие химические соединения, а также композиционные материалы.

*Полупроводниками* называют материалы, электропроводностью которых можно управлять путём воздействия электрических и магнитных полей, света, температуры и других энергетических факторов. Удельное сопротивление полупроводников ρ*v* находится в пределах от 10–**5** до 10**8** Ом·м.

Полупроводниковые свойства проявляют двенадцать элементов из правой части таблицы Менделеева – B(бор),C(углерод),Si(кремний), P(фосфор),S(сера), Ge(германий), As(мышьяк),Se(селен),α*-*Sn (альфа-олово)*,* Sb(сурьма), Te (теллур), I(йод), а также множество химических соединений, в том числе и органических.

*Диэлектрическими*называют материалы с ρ*v* > 10**8** Ом·м, которые практически не проводят электрический ток. Под действием электрического поля в них происходит *поляризация* – смещение связанных электрических зарядов. Способность вещества к поляризации характеризуется значением относительной диэлектрической проницаемости **ε**, которая показывает, во сколько раз вещество, поляризуясь, ослабляет внешнее электрическое поле по сравнению с вакуумом; во столько же раз возрастает ёмкость конденсатора, если пространство между его обкладками заполнить веществом.

Диэлектрики, применяемые для целей электрической изоляции материалов, называют *пассивными.* Качество изоляции характеризуется пробивным напряжением, а также электрической прочностью, которая представляет собой отношение пробивного напряжения к толщине материала. Потери при работе изоляции в переменных полях характеризуются тангенсом угла диэлектрических потерь **tgδ**, который показывает, какая часть от энергии, запасаемой при поляризации диэлектрика, выделяется в виде тепла. *Активными*называют диэлектрики, свойствами которых можно управлять, и таким образом использовать их для электрических, электромеханических, электрооптических и других преобразований энергии, а также для запоминания и визуального представления информации.

Границы, устанавливаемые между классами материалов по значениям удельного электрического сопротивления, несколько условны; многие полупроводники при низких температурах ведут себя подобно диэлектрикам, а некоторые проявляют свойство сверхпроводимости; у некоторых диэлектриков при сильном нагревании появляется значительная электропроводность.

По поведению *в магнитном поле* материалы подразделяют на сильномагнитные (магнитные) и слабомагнитные (немагнитные). Более подробная классификация рассматривает 5 групп веществ: диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики. Основным магнитным параметром является относительная магнитная проницаемость μ, которая показывает, во сколько раз вещество изменяет магнитное поле по сравнению с вакуумом (если μ > 1, то усиливает, если μ < 1, то ослабляет).

Металлические магнитные материалы проводят электрический ток. В переменных полях в них возникают вихревые токи, которые усиливаются с повышением частоты, поэтому частотный диапазон их использования ограничен устройствами постоянного тока, а также тока промышленной и звуковой частоты. Для использования в высокочастотных и сверхвысокочастотных (СВЧ) устройствах обработки и передачи информации применяют полупроводниковые и диэлектрические магнитныематериалы, которые отличаются малой электропроводностью и малыми потерями энергии на перемагничивание и переполяризацию.

Электромагнитные свойства вещества определяются строением электронных оболочек атомов, из которых оно состоит.

## 1.1 Заселение электронами оболочек атомов и свойства химических элементов

Долгое время для образного представления атомов использовали планетарную модель. В ней электроны обращаются вокруг ядра по строго определённым круговым либо эллиптическим орбитам таким образом, что центробежные силы уравновешивают силы электрического притяжения. Одновременно каждый электрон вращается вокруг собственной оси, т. е. имеет спин (англ. *spin* – вращение). Орбиты электронов, имеющих одинаковый уровень энергии, образуют электронные оболочки; в первой может поместиться 2 электрона, во второй – 8, в третьей – 18, в четвертой – 32. Планетарная модель хорошо сочетается с квантовыми представлениями об энергетическом состоянии атомов. Электрон внутри атома может иметь только строго определённые разрешённые значения энергии, промежуточные энергетические состояния для него запрещены. При получении определённой порции энергии электрон переходит на более высокую разрешённую орбиту, этот процесс называют возбуждением. Возвращаясь на исходную орбиту, электрон отдаёт строго определённую порцию энергии, называемую *квантом*. Эта энергия либо испускается в виде *фотона* определённого цвета, либо передаётся атомам (ионам, молекулам) кристаллического тела в виде кванта упругих колебаний – *фонона*– определённой частоты. В результате спектр излучения нагретых атомов каждого химического элемента содержит определённый набор линий, это используют при анализе химического состава вещества.

Наглядным представлением планетарной модели является система круговых и эллиптических орбит, окружающих атомное ядро (рисунок 1.1, *а*). Это изображение стало эмблемой атомного века.

В процессе осознания природы электрона обнаружено, что он имеет двойственный корпускулярно-волновой характер, и в некоторых случаях проявляет себя как частица, а в некоторых – как электромагнитная волна. Движущийся электрон не имеет чётких границ и распределён в пространстве, ему соответствует так называемая волна вероятности, для которой квадрат модуля смещения пропорционален плотности вероятности обнаружения электрона в данной точке пространства. В настоящее время атом условно изображают в виде ядра, окружённого облаком вероятности присутствия электронов (см. [рисунок 1.1, *б*](#Рис1_1)). Однако такая «туманная» модель не подчёркивает ни квантового характера изменения энергетического состояния атома, ни различия в свойствах химических элементов, поэтому мы будем продолжать пользоваться понятием электронных оболочек, представляя их как условные поверхности максимальной вероятности присутствия электронов, имеющих одинаковый уровень энергии.

Рисунок 1.1 – Условное изображение оболочки атома: планетарная (*а*) и вероятност-

ная (*б*) модели

*а*)

Периодическая система химических элементов Дмитрия Ивановича Менделеева является иллюстрацией процесса заселения электронных оболочек по мере увеличения заряда ядра и количества электронов. Современный вариант таблицы представлен в [приложении](file:///C:\Users\vikut\Downloads\Пер%20Сист%20Хим.doc) А. Она соответствуют длинному варианту (длиннопериодной форме), утверждённому [Международным союзом теоретической и прикладной химии](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D0%B6%D0%B4%D1%83%D0%BD%D0%B0%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%81%D0%BE%D1%8E%D0%B7_%D1%82%D0%B5%D0%BE%D1%80%D0%B5%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B9_%D0%B8_%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4%D0%BD%D0%BE%D0%B9_%D1%85%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D0%B8) (*IUPAC*) в качестве основного.

Раскраска групп и семейств в таблице также соответствует рекомендациям ИЮПАК, однако она несколько усовершенствована. Способом заливки фона различными цветами обозначены слева направо: щелочные металлы (фиолетовый); щелочноземельные металлы (синий); переходные металлы (голубой); постпереходные металлы (зелёный); полуметаллы или металлоиды (жёлто-зелёный); другие неметаллы (жёлтый); галогены (оранжевый); благородные газы (красный). Внизу показаны лантаниды (светло-бирюзовый) и актиниды (бирюзовый). Такая раскраска позволяет глубже понять связь химических свойств элементов с их положением в Периодической системе и строением электронных оболочек. Изменение раскраски слева-направо соответствует цветам спектра от фиолетового до красного, что позволило сделать её доступной для восприятия даже людям с нарушениями цветового зрения (дальтоникам), количество которых составляет 8–9 % населения. Для обозначения радиоактивности использован серый цвет букв и символов.

Информация по каждому элементу: атомная масса; электроотрицательность по Полингу; номер, символ, характерные и возможные степени окисления, русское название. Для электроотрицательности использована таблица из англоязычной Википедии. Это самая свежая информация, которая регулярно проверяется и подновляется ведущими мировыми специалистами. Однако эта таблица не содержит информации по гелию, неону, аргону. Эта информация восполнена из таблицы русскоязычной Википедии. Степени окисления приведены в соответствии с англоязычной Википедией в порядке убывания, за исключением некоторых случаев, когда требовалось подчеркнуть характерные отрицательные; например хлор: **-1753**6…0. Здесь большие жирные цифры показывают характерные, а остальные – возможные степени окисления.

Атом водорода 1H имеет один электрон, который не в состоянии окружить протон одновременно со всех сторон, поэтому атом водорода активно стремится объединиться с другим атомом (водорода или иного элемента), также имеющим неполную оболочку. При объединении получается общая оболочка, так образуются молекулы. У гелия 2He два электрона, его оболочка полностью завершена и он не проявляет никакой активности. Гелий существует только в атомарном виде и возглавляет группу благородных газов. Он конденсируется только при 4,2 К, а затвердевает при 0,5 К; в жидком гелии атомы так слабо связаны между собой, что он обладает сверхтекучестью. Незаполненная оболочка атома 1H побуждает водород к химическим связям, а заполненная оболочка атома гелия 2He обеспечивает ему инертность.

Атом лития 3Li имеет три электрона, два из которых образуют первую оболочку, а третий находится на втором, более высоком разрешённом энергетическом уровне. Литий стремится избавиться от внешнего электрона и превратиться в шарик-ион, это проявление металлических свойств, а литий – очень активный (щелочной) металл. У бериллия 4Be два электрона находятся на верхнем уровне, однако чтобы заселить вторую оболочку этого недостаточно; бериллию легче отдать электроны, чем принять. По мере увеличения количества электронов на втором энергетическом уровне металлические свойства элементов ослабевают, и начинается заселение второй оболочки. У атомов бора 5B стремления отдать свои электроны и заполучить чужие выражены в равной мере. У углерода 6C вторая оболочка заселена наполовину, в ней не хватает 4 электронов, поэтому атом углерода стремится объединить свои электроны с электронами других атомов. Атом углерода может образовать 4 связи с другими атомами; благодаря способности углерода к образованию сложных молекул он является основой жизни. Азот 7N способен образовать 3 связи, что обеспечивает особую прочность и слабую химическую активность молекул N2. По мере заселения второй оболочки возрастают неметаллические свойства элементов, т. е. стремление достроить оболочку за счёт чужих электронов. Кислород 8O активно образует связи почти со всеми элементами. У фтора 9F во второй оболочке не хватает всего одного электрона, он является самым активным из неметаллов.

У неона 2 + 8 = 10Ne на втором уровне 8 электронов, его вторая оболочка заполнена. Октет электронов делает неон благородным газом c температурой кипения 27,2 К, плавления 24,5 К.

Третья оболочка от натрия 2 + 8 + 1 = 11Na до аргона 2 + 8 + 8 = 18Ar формируется аналогичным образом; металлические свойства элементов постепенно уменьшаются, а неметаллические – возрастают. У аргона внешняя оболочка представляет собой октет электронов, что делает его благородным газом с температурой кипения 87,5 К, плавления 84 К.

Возрастание заряда ядра и появление последующих электронов делают калий 19K щелочным, а кальций 20Ca– щелочноземельным металлами. Начиная со скандия 21Sc, увеличение числа электронов приводит к возможности уплотнения третьей оболочки и проявлению переменной валентности, что является общим свойством переходных элементов. Всего переходных элементов 68, часть их получены искусственно, все они металлы, т. о. большинство химических элементов – переходные металлы. Скандий возглавляет семейство из 32 редкоземельных металлов, самое многочисленное, включающее в себя подгруппы из 14 лантанидов и 14 актинидов. Окисление скандия, титана, ванадия, хрома и марганца возможно до тех пор, пока в третьей оболочке не останется октет из 8 электронов, у марганца 25Mn возможная степень окисления доходит до +7. Если внешние электроны этих металлов не участвуют в химических связях, они уплотняют третью оболочку. У железа 26Fe и остальных элементов группы железа (кобальта 27Co и никеля 28Ni) способность к окислению меньше, зато эти металлы способны сильно намагничиваться. У меди 2 + 8 + 18 +1 = 29Cu три оболочки заполнены, а внешний электрон обеспечивает высокую электропроводность. На цинке 30Zn переход заканчивается и с галлия 31Ga происходит последовательное заселение четвёртой оболочки с уменьшением металлических и увеличением неметаллических свойств. У криптона 2 + 8 + 18 + 8 = 36Kr внешняя оболочка – октет электронов. Он является благородным газом, однако при низких температурах способен соединяться с фтором.

Пятый период аналогичен четвёртому, начиная с циркония 40Zr, проявляется переменная валентность за счёт уплотнения четвёртой оболочки. У рутения 44Ru степень окисления может доходить до +8, вместе с тем, благодаря своей инертности он является первым из драгоценных металлов платиновой группы; в пятом периоде за ним следуют родий и палладий. У серебра 2 + 8 + 18 + 18 + 1 = 47Ag три оболочки заполнены, в четвёртой – 18 электронов и один внешний. Такая конфигурация делает серебро чемпионом по электропроводности. На кадмии 48Cd переход заканчивается и с индия 49In происходит последовательное заселение пятой оболочки. У ксенона 2 + 8 + 18 + 18 + 8 = 54Хе три оболочки заполнены, четвёртая состоит из 18 электронов, внешняя пятая – октет. Ксенон считается благородным газом, хотя некоторые его соединения с фтором устойчивы до температуры 180 °С.

Шестой период начинается с цезия и бария, переходит к лантану, а затем, начиная с церия 58Се, уплотняется 4-я оболочка, на которой может поместиться 32 электрона. В процессе уплотнения четвёртой оболочки образуется группа из 14 редкоземельных металлов, близких по свойствам и имеющих общее название «лантаниды». Здесь возможна конкуренция между 4 и 5 оболочками, благодаря чему редкоземельные металлы обладают особыми свойствами в отношении магнетизма, люминесценции и сверхпроводимости. После заполнения 4-й оболочки, начиная с гафния 72Hf, происходит заселение пятой до тех пор, пока у золота 79Au на ней не окажется 18 электронов. На ртути 80Hg переход заканчивается и происходит заселение шестой оболочки, сопровождаемое соответствующим изменением химических свойств, однако после висмута 83Bi все элементы радиоактивны и распадаются из-за нестабильности ядра. У радона четыре оболочки заполнены 2 + 8 + 18 + 32 + 18 + 8 = 86Rn, пятая состоит из 18 электронов, а внешняя шестая – октет. Этот газ тоже считается благородным, хотя образует соединения с фтором состава RnF*n*, где *n* = 4, 6, 2.

Анализируя заполнение оболочек неона, аргона, криптона, ксенона и радона, можно заметить, что инертность этих газов обеспечена 8-электронной внешней оболочкой, причём внутренние оболочки могут быть незаполненными, но содержать 18 электронов. Если в атомах благородных газов есть 18-электронные оболочки, то сверхактивный фтор способен «поживиться» их электронами, достраивая свой октет. Очевидно, что причина устойчивости электронной оболочки заключается в её объёмной симметрии. Наибольшей симметрией обладает сфера, однако следует учесть, что оболочка образуется отдельными электронами, т. е. за её модель можно принять многогранник, в котором каждый электрон обеспечивает своим присутствием одну грань. Особая устойчивость оболочки проявляется в том случае, если её поверхность распределена между электронами поровну, т. е. многогранник должен быть правильным. Правильный восьмигранник называется октаэдром, он изображен на рисунке 1.2, *а*.

*а*) *б*)

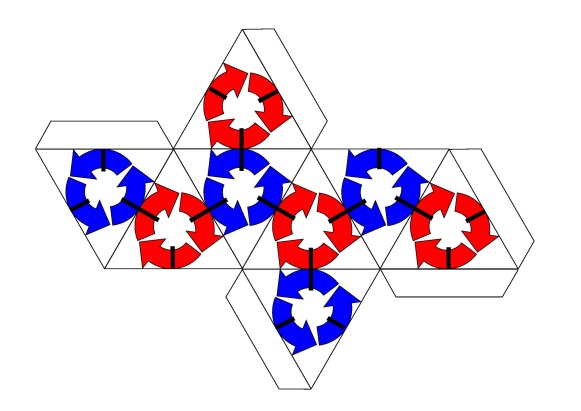
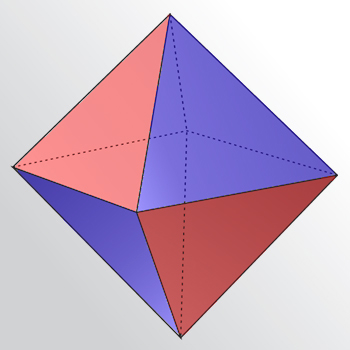


Рисунок 1.2 – Октаэдр (*а*) и модель октета электронов на его гранях (*б*)

Октаэдр, моделирующий октет, является уникальной фигурой. Он единственный из правильных многогранников обеспечивает чередование цветов на его гранях, моделирующее магнитное притяжение (синий цвет – северный магнитный полюс, красный – южный). Мы считаем, что именно симметрия октета, отнюдь не кубическая, а октаэдрическая, делает его особо устойчивым к химическим воздействиям и обеспечивает инертность благородных газов. Причиной является магнитное притяжение между соседними электронами, имеющими разные направления вращения (спины); оно обеспечивает инертность октета. Это притяжение показано на [рисунке 1.2, *б*](#Рис1_2) чёрными полосками.

Периодическая система химических элементов с физическими свойствами представлена в [приложении](file:///C:\Users\vikut\Downloads\ПЕР%20СИСТ%20ФИЗ.doc) Б. Здесь применены различные цвета и различные способы раскраски.

Цвета заливки фона.

Светло-коричневый – ферромагнетики (по цвету ржавчины на железе). Это железо, никель, кобальт, а также 5 редкоземельных металлов, проявляющих магнитные свойства при пониженной температуре: гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий.

Бледно-зелёный – полупроводники, их 12. В порядке возрастания ширины запретной зоны: альфа-олово, сурьма, теллур, германий, бор, кремний, мышьяк, йод, чёрный фосфор, селен, сера, углерод.

Светло-жёлтый – благородные (драгоценные) металлы (по цвету золота). Это золото, серебро, платина, а также металлы платиновой группы – палладий, иридий, родий, рутений и осмий.

Сиреневый – сверхпроводники. Здесь приведены только элементы с температурой перехода в сверхпроводящее состояние выше 4,2 К (температура кипения гелия). При меньших температурах, особенно вблизи 0 К, в сверхпроводящее состояние может быть переведено большинство металлов. Сиреневым раскрашены: ниобий, свинец, ванадий, технеций, лантан, тантал, кремний (в тонких плёнках), ртуть.

Бледно-голубой – жидкости и элементы с температурой плавления ниже 100 ºС. Это щелочные металлы: натрий, калий, рубидий, цезий, франций, а также галлий, бром и ртуть.

Светло-бирюзовый – газы (газы бледнее, чем жидкости). Это водород, гелий, азот, кислород, фтор, неон, хлор, аргон, криптон, ксенон и радон.

Цветные буквы и рамки.

Синие буквы – температура плавления ниже 1000 ºС; синие буквы совместно с синей рамкой – легкоплавкие элементы (температура плавления ниже 300 ºС); чем больше синего, тем ниже температура плавления.

Красные буквы – тугоплавкие (температура плавления выше 1524 ºС – плавление железа); красные буквы совместно с красной рамкой – температура плавления выше 3000 ºС; чем больше красного, тем выше температура плавления.

Элементы с температурой плавления от 1000 ºС до 1524 ºС оставлены чёрными.

Серые буквы (на тёмном фоне белые) – радиоактивность (для элементов с периодом полураспада более суток – в названии элемента, менее суток – в обозначении латинского символа; чем больше серого, тем выше радиоактивность).

Цветная раскраска применена своя для каждого химического элемента периодической системы в зависимости от его физических свойств. При сочетании свойств цвета также сочетаются (например, ртуть и жидкость и сверхпроводник; фон залит сверху бледно-голубым, снизу – сиреневым).

Условная граница между металлами и неметаллами проведена чёрной штриховой линией.

Несимметрия незаполненных внутренних оболочек переходных металлов является причиной магнетизма. Первой теорией магнетизма была гипотеза Ампера, который считал его проявлением внутримолекулярных токов. Изучение молекул и кристаллов показало, что они состоят из атомов. Таким образом, речь должна идти о внутриатомных движениях электронов, которые можно рассматривать как замкнутые электрические токи, при этом каждый электрон создаёт собственное магнитное поле. В заполненной электронной оболочке магнитные поля отдельных электронов компенсируют друг друга. Электроны внешней оболочки (валентные) компенсируют свои магнитные поля за счёт электронов других атомов, в результате большинство веществ практически немагнитны. Магнетизм является отклонением от этого принципа компенсации. Магнитные атомы представляют собой очень маленькие, но сильные магниты, в которых магнитные поля отдельных электроновне компенсируются, а наоборот, складываются. Это возможно, когда электронные оболочки не заполнены, что характерно для переходных элементов. Сильные магнитные свойства проявляют железо, кобальт и никель, а также (при пониженных температурах) пять редкоземельных металлов – гадолиний, диспрозий, гольмий, эрбий и тербий. Перечисленные элементы способны проявлять магнитные свойства не только сами по себе, но и в соединениях, в том числе с немагнитными элементами. Однако присутствие атомов перечисленных металлов не является обязательным условием магнетизма. Известны сплавы Гейслера, элементы которых по отдельности не проявляют магнитных свойств, однако, в процессе соединения в виде сплава, у некоторых из них происходит перестройка оболочек, в результате которой весь сплав становится магнитным.

## 1.2 Зависимость электропроводности вещества от вида химических связей между его атомами

Электрический ток представляет собой упорядоченное движение носителей зарядов. Электротехника использует вещества в твёрдом, жидком и газообразном состоянии.

В *жидкостях* заряд переносят ионы (греч. *ion* – идущий). В растворе или расплаве металлы избавились от валентных электронов, они превратились в положительно заряженные ионы и «спешат» к минусу; неметаллы захватили недостающие электроны, заполнили свои оболочки, превратились в отрицательно заряженные ионы и стремятся к плюсу. Таким образом, протекание постоянного электрического тока по жидкости сопровождается переносом вещества.

В ионизированном газе – *плазме* – двигаться могут как ионы, так и свободные электроны. В *твёрдом веществе* ионы связаны, электрические заряды переносятся электронами. В зависимости от способа, которым электроны обеспечили связи между атомами, возможны два механизма их перемещения под действием электрического поля:

1) электроны свободны, и могут продвигаться сквозь вещество, теряя, однако, энергию при столкновениях с атомами или ионами;

2) электроны связаны и могут переходить из оболочки одного атома в оболочку другого, соседнего, если там есть место.

Оба эти процесса регламентированы квантовой теорией, однако в процессе объединения атомов в молекулы или кристаллы происходит перегруппировка их электронных оболочек; разрешённые уровни смещаются и расщепляются. Из-за взаимодействия атомов друг с другом число разрешённых уровней многократно возрастает, а промежутки между ними уменьшаются настолько, что расщеплённый уровень, размываясь, превращается в *зону*. В твердом веществе, в отличие от одиночного атома, уровень энергии электрона должен быть в пределах *зоны разрешённых энергетических состояний.*

Рассмотрим, как влияет вид химической связи между атомами вещества на его электропроводность с точки зрения разрешённых и запрещённых энергетических состояний электрона.

У атомов *металлов* один или несколько внешних электронов не могут образовать оболочку. Они стремятся избавиться от этих электронов, отдавая их в «коллективное пользование», и превращаясь в идеальные положительно заряженные шарики – ионы. Металлический предмет можно представить как совокупность положительно заряженных шариков-ионов, в промежутках между которыми находятся отрицательно заряженные электроны, скрепляя их кулоновскими силами электростатического притяжения ([рисунок 2.1](#Рис2_1)). Такую связь называют *металлической;* при ней каждый из внешних валентных электронов в равной мере принадлежит окружающим его ионам и, под действием малейшего электрического напряжения, легко «протекает» между ними, обеспечивая перенос электрического заряда и энергии. Эта простая модель наглядно объясняет хорошую электропроводность, теплопроводность и ковкость металлов. Подчёркивая свободу перемещения электронов по металлу, используют термин «электронный газ».

Диаграмма энергетических состояний электронов показана на рисунке 1.3.

Рисунок 1.3 – Расщепление в проводнике разрешённых энергетических уровней на зоны

Основное состояние

Возбуждённые

состояния

зона

Зона

эВ

свободной

проводимости

Проводник

Э

н

е

р

г

и

я

Валентная

Иначе она называется *энергетическая диаграмма* проводника.

Слева показаны разрешённые энергетические состояния одиночного атома. При образовании межатомных связей основные разрешённые уровни энергии расщепляясь образуют зону заполненных энергетических уровней валентных электронов, или *валентную*зону.

Разрешённые уровни энергии возбуждённых электронов также расщепляются, перекрываются, и образуют общую зону разрешённых энергетических состояний, называемую зоной свободной*проводимости*. Граница между зоной проводимости и валентной зоной у проводников отсутствует, эти зоны частично перекрываются, поэтому валентные электроны могут легко передвигаться по металлу, перенося заряд и энергию.

У *неметаллов* для завершения внешней оболочки не хватает одного или нескольких электронов. Эта недостача компенсируется за счёт привлечения электронов из оболочек соседних атомов и создания устойчивых пар, принадлежащих обоим соседям. Такую связь называют *ковалентной*. При образовании пары энергия валентных электронов снижается так резко, что у неметалла, в промежутке между зоной проводимости и валентной зоной, появляется зона запрещённых энергетических состояний, или *запретная*зона шириной Δ*W* (рисунок 1.4). Если запретная зона не очень широка, то вещества можно использовать в качестве полупроводника; при ширине запретной зоны более 6 эВ – это диэлектрики.

Ковалентная связь соединяет между собой атомы органических молекул. Вместе с тем она может наблюдаться и у неорганических веществ, если их кристаллические решётки состоят из атомов. Примерами подобных веществ являются алмаз, кремний, германий, карбид кремния и другие полупроводниковые кристаллы, твёрдость и высокая температура плавления которых являются примерами прочности ковалентной связи. Если ковалентная связь соединяет одинаковые атомы, то центр отрицательного электрического заряда объединённой электронной оболочки находится точно посередине между ядрами и совпадает с центром их положительного заряда. Такую связь называют ковалентной*неполярной*. Если ковалентная связь соединяет разные атомы, то электронная оболочка оказывается стянутой в сторону одного из них, здесь образуется отрицательный полюс; второе ядро частично оголяется, здесь образуется положительный полюс. Молекулы такого вещества представляют собой электрические диполи, а связь называют ковалентной *полярной.*

Валентная

проводимости

Зона

зона

Эн

е

р

г

и

я

эВ

Запретная

зона

Δ*W*

Рисунок 1.4 – Запретная зона на энергетической диаграмме полупроводников и диэлектриков

При соединении атомов *металлов* с атомами *неметаллов* предоставляется прекрасная возможность одновременного превращения в шарики как тех, так и других, путём перехода электронов от металлов к неметаллам. При этом атомы металла превращаются в положительные ионы, а атомы неметалла – в отрицательные. Разноименно заряженные частицы притягиваются, образуя ионные кристаллы; такая связь называется *ионной* и является предельным случаем ковалентной полярной связи. Заполняя электронную оболочку неметалла, валентный электрон, ранее принадлежавший металлу, резко уменьшает свою энергию; верхняя граница валентной зоны резко опускается, на энергетической диаграмме вещества появляется широкая запретная зона, поэтому ионные кристаллы – диэлектрики.

## 1.3 Конструкционные и эксплуатационные свойства электротехнических материалов

В процессе изготовления и монтажа электрооборудования и электронной аппаратуры материалы подвергаются механическим, тепловым, химическим и другим воздействиям технологического оборудования. Во время эксплуатации электрических устройств материалы подвергаются совместному воздействию механических усилий, тепла и других факторов окружающей среды. Устойчивость материалов к этим воздействиям обеспечивает длительную и безаварийную эксплуатацию электрооборудования. Для оценки конструкционных и эксплуатационных свойств электротехнических материалов используют физические и химические характеристики.

Значения пределов *механической прочности* твёрдых материалов при статических нагрузках – сжатии, растяжении, изгибе, кручении – выражаются в паскалях (мегапаскалях), 1 Па = 1 Н/м2. Для оценки пластичности материала используют значение относительного удлинения при разрыве ∆*l/l* в процентах. *Хрупкость* материала оценивают по стойкости к динамическим нагрузкам (ударам), здесь применяют понятие «*ударная вязкость*», единица измерения – джоуль на квадратный метр (Дж/м2). *Кинематическую вязкость* жидкостей измеряют в квадратных метрах на секунду (м2*/*с), а *динамическую* – в паскалях, умноженных на секунду (Па∙с).

Тепловые свойства материалов характеризуются *теплоёмкостью****,*** *теплопроводностью, температурными коэффициентами линейного и объёмного расширения,* а также значениями температуры *размягчения*(застывания)**,** *плавления и кипения*. Для твёрдой изоляции очень важна оценка *нагревостойкости и холодостойкости*; для горючих изоляционных жидкостей важнейшими тепловыми характеристиками являются *температура вспышки паров и температура воспламенения.*

Для оценки устойчивости изоляции к воздействию воды пользуются понятиями «*влажность*», «*влагопроницаемость*». В ряде случаев следует позаботиться об *устойчивости* материалов к*коррозии***,** особенно при совместном воздействии воды и химически активных веществ (кислотные дожди, морская вода), а также к воздействию плесени, грибков, термитов *(тропикостойкость)*. Важна также стойкость изоляции к воздействию лучей солнечного*света*и других *ионизирующих излучений.*

## 1.4 Влияние структуры материала на его свойства

Твёрдые электроматериалы могут иметь различную структуру – кристаллическую, аморфную, композиционную.

*a* = *b* = *c*;

α = β = γ = 90°

*a* ≠ *b* ≠ *c*;

α = β = γ = 90°

*a* = *b* ≠ *c*;

α = β = γ = 90°

*a* ≠ *b* ≠ *c*;

α ≠ β ≠ γ

*b* ≠ *c*; γ = 120°

α = β = 90°

*a* ≠ *b* = c;

α = β = 90° ≠ γ

Рисунок 1.5 – Формы кристаллов:

*а* **–** кубическая; *б* **–** моноклинная;

*в* **–** тетрагональная; *г* **–** триклинная;

*д* **–** ромбическая; *е* **–** гексагональная

α

γ

β

*a*

*b*

*c*

*а*)

*б*)

*в*)

*г*)

*д*)

*е*)

*Кристаллы*характеризуются строгим повторением одинаковых пространственных ячеек и периодичностью электростатического поля. Кристаллы – это пример чистоты и порядка в мире атомов, они различаются формой пространственных решёток и обладают различными видами симметрии. Выделяют 6 кристаллических систем ([рисунок 1.5](#Рис1_5)) – кубическая, моноклинная, тетрагональная, триклинная, ромбическая, гексагональная. Атомы могут находиться в вершинах, в центрах граней, а также в центре объёмного тела. Образование каким-либо элементом или соединением определённой пространственной формы кристаллической решётки в основном зависит от размеров атомов и их валентности. Кристаллическая структура возможна при любом виде химической связи – ковалентной, ионной, металлической. У некоторых веществ, состоящих из ковалентных молекул, также можно заметить кристаллическую структуру. Слабую связь, возникающую между соседними молекулами при согласованном (синхронном) движении пар валентных электроновназывают*молекулярной*или связью Ван-дер-Ваальса. Молекулярные кристаллы отличаются малой прочностью и низкой температурой плавления (у парафина *t*пл = 50–52 °С).

Кристаллические тела могут быть в виде отдельных крупных *монокристаллов* или состоять из совокупности большого числа мелких зёрен – *кристаллитов*. Монокристаллы обладают анизотропией; их реакции на электрические, магнитные, световые, механические и другие воздействия зависят от направления этих воздействий относительно кристаллографи­ческих плоскостей и осей кристалла.

*Поликристаллические* вещества обычно изотропны, в пределах каждого зерна атомы расположены периодически, но при переходе от одного зерна к другому, на границах раздела, регулярное расположение частиц нарушается и, в общем случае, свойства вещества одинаковы во всех направлениях. Однако с помощью специальной обработки – *текстурирования* – по­ликристаллическому материалу может быть придана *текстура* – преимущественная ориентация составляющих их кристаллитов в одном направлении. Текстурированные материалы анизотропны и по некоторым свойствам приближаются к монокристаллическим.

*Полиморфизм.* Некоторые твёрдые вещества обладают способностью образовывать не одну, а две и более кристаллические структуры, устойчивые при различных температурах и давлениях. Такое свойство материалов называют полиморфизмом, а кристаллические структуры – полиморфными формами или аллотропными модификациями вещества. Модификацию, устойчивую при наиболее низкой температуре, принято обозначать греческой буквой α; модификации, устойчивые при более высоких температурах, обозначают буквами β, γ и т. д.

Классическим примером полиморфизма является превращение на морозе белого олова (β-Sn) в серое (α-Sn), известное в технике как «оловянная чума». Особый интерес представляет полиморфизм углерода – существование его в виде алмаза или графита. В обычных условиях более устойчивой модификацией является графит, однако при повышении давления устойчивость алмаза растет, а графита падает. Если при высоком давлении повысить температуру, чтобы увеличить подвижность атомов, то графит можно перевести в алмаз. Кроме этого, атомы углерода могут образовывать нити – карбины, плоские плёнки – графены, шаровые структуры – фуллерены, а также углеродные нанотрубки.

Особая чистота и правильное строение кристаллов обеспечивают наилучшие условия для проявления характерных свойств вещества, будь то проводник, полупроводник, диэлектрик либо магнитный материал. Однако в процессе затвердевания вещества атомы не всегда имеют благоприятную возможность располагаться упорядоченно, особенно, если охлаждение происходит быстро. Твёрдые тела, которые характеризуются случайным, хаотичным расположением частиц, называют *аморфными.* В отличие от кристаллов аморфные тела изотропны по свойствам, не имеют определённой температуры плавления и при нагреве постепенно размягчаются, теряя прочность.

Наглядным примером аморфных веществ могут служить стёкла и многие пластики. Несмотря на отсутствие периодичности в строении в стёклах можно наблюдать определённый ближний порядок*,* т. е. закономерное расположение ближайших соседей относительно каждого атома. При нагреве с последующим медленным остыванием (отжиге) может происходить «расстекловывание» материала, т. е. переход из аморфного в более устойчивое кристаллическое состояние. Такой материал называют ситаллом.

*Композиционные материалы* объединяют компоненты различной структуры, используя их достоинства и компенсируя недостатки. В них сочетаются механическая прочность, эластичность, тепловая или химическая стойкость одних составляющих с высокими электрическими и/или магнитными характеристиками других. Примером удачной композиции является конденсаторная керамика, представляющая собой смесь мелких кристаллов, соединённых аморфным стекловидным связующим. Ещё пример – пропитанная волокнистая изоляция, которая сочетает прочность волокон и высокие диэлектрические характеристики пропитки; это справедливо и для текстолита (стеклотекстолита), в котором связующий материал полимеризован, т. е. переведен в твёрдое состояние. В медно-графитных щётках сочетаются нагревостойкость и неприхватываемость графита с электропроводностью меди. В магнитодиэлектриках сочетаются магнитные свойства металлических порошков и изоляционные свойства связующей смолы. Соединением мелких кристаллов полупроводника карбида кремния с помощью связующего стекла получают вилит – материал, способный под действием импульса напряжения переходить в проводящее состояние, а после окончания импульса – восстанавливать свои изоляционные свойства.

Сведения о структуре электротехнического материала не менее важны, чем знание его химического состава. В электротехнике и электронике используются достоинства как кристаллических, так и аморфных материалов, однако создание композиций является наиболее интересным и перспективным направлением материаловедения.

**Контрольные вопросы**

1 По каким признакам и как классифицируют электроматериалы?

2 Что такое разрешённые уровни энергетического состояния электрона?

3 Как зависят от строения электронных оболочек атомов физико-химические, электрические и магнитные свойства элементов?

4 Объясните механизмы основных видов химической связи атомов:

а) металлической; б) ковалентной; в) ионной.

5 Что называют валентной зоной и зоной проводимости?

6 Чем различаются запретные зоны полупроводника и диэлектрика?

7 Назовите основные конструкционные и эксплуатационные свойства электротехнических материалов.

8 В чём различия между кристаллическими и аморфными материалами?

9 Что такое текстура? В чём польза текстурирования?

10 Что такое полиморфизм? Приведите примеры полиморфных веществ.

11 В чём особенности и достоинства композиционных материалов?