

А. С. ЯСТРЕБОВ, М. Ю. ВОЛОКОБИНСКИЙ, А. С. СОТЕНКО

# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, ЭЛЕКТРОРАДИОМАТЕРИАЛЫ И РАДИОКОМПОНЕНТЫ

## Учебник

*Рекомендовано  
Федеральным государственным учреждением  
«Федеральный институт развития образования»  
в качестве учебника для использования в учебном процессе  
образовательных учреждений, реализующих программы  
среднего профессионального образования по специальностям  
«Электроника и микроэлектроника», «Радиотехника»,  
«Телекоммуникации»*

*Регистрационный номер рецензии 433 от 28 ноября 2010 г. ФГУ «ФИРО»*



Москва  
Издательский центр «Академия»  
2011

УДК 621.396.6(075.8)  
ББК 32я73  
Я854

Рецензенты:

преподаватель Московского техникума космического приборостроения *Л. М. Новоселова*;  
генеральный директор ЗАО «Авангард-Микросенсор», д-р техн. наук, проф. *Ю. З. Бубнов*;  
директор колледжа телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, канд. техн. наук *С. П. Бахарев*

**Ястребов А. С.**

Я854 Материаловедение, электрорадиоматериалы и радиокомпоненты : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / А. С. Ястребов, М. Ю. Волокобинский, А. С. Сотенко. — М. : Издательский центр «Академия», 2011. — 160 с.  
ISBN 978-5-7695-6917-3

Изложены физико-химические основы материаловедения. Описано строение материалов и их свойства. Рассмотрены методы измерения параметров и свойств материалов. Дана характеристика проводниковых, полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов, показаны их свойства и особенности применения в радиоэлектронной аппаратуре. Рассмотрены эксплуатационные свойства конструкционных, электротехнических и радиотехнических материалов.

Учебник может быть использован при изучении общепрофессиональной дисциплины ОП.07 «Материаловедение, электрорадиоматериалы и радиокомпоненты» в соответствии с ФГОС СПО для специальности 210413 «Радиоаппаратостроение».

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.

УДК 621.396.6(075.8)  
ББК 32я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом без согласия правообладателя запрещается*

© Ястребов А. С., Волокобинский М. Ю., Сотенко А. С., 2011  
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2011  
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2011  
ISBN 978-5-7695-6917-3

Современный этап развития радиотехники и радиоэлектроники характеризуется широким применением новых материалов с малоизученными свойствами и постоянным улучшением характеристик и рабочих параметров известных материалов и приборов.

Вопрос выбора материалов для тех или иных радиоэлектронных систем за последнее время значительно усложнился в связи с усилением требований к рабочим характеристикам и надежности элементной базы. В частности, повышается удельная мощность, рабочая температура, частоты, уменьшаются массогабаритные показатели, ужесточаются требования к точности и стабильности; во многих случаях аппаратура работает в условиях повышенной влажности, воздействия химически активных веществ, проникающего излучения, ударов и вибрации.

Необходимость создания материалов и изделий, работающих на новых физических принципах, вызывает интерес к новому классу материалов — к наноматериалам, к которым относят дисперсные и массивные материалы, содержащие структурные элементы, геометрические размеры которых хотя бы в одном измерении не превышают 100 нм, и обладающие качественно новыми функциональными и эксплуатационными характеристиками.

Необходимость разработки и внедрения наноматериалов обусловлена стремлением к миниатюризации изделий и уникальными свойствами наноматериалов.

Наука о наноструктурном состоянии формируется на базе последних достижений физики твердого тела, квантовой электроники, химии, физической химии, полупроводниковой электроники.

Среди основных составляющих науки о наноматериалах можно выделить фундаментальные исследования закономерностей, физико-химических, электронных и оптических свойств материалов и разработку технологии создания наноразмерных структур и их интеграцию в различные отрасли промышленности.

Исследования в области наноматериалов важны для разработки сверхминиатюрных супербыстродействующих систем электроники, химии материалов, биологии, медицины.

В настоящем учебнике излагаются физико-химические основы материаловедения; описывается строение и свойства материалов; основы материаловедения электротехнических и радиотехнических материалов; сведения о проводниковых, полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалах, их свойствах, областях и особенностях применения материалов и приборов на их основе, являющихся составной частью радиоэлектронной аппаратуры, сведения об эксплуатационных свойствах и характеристиках электротехнических и радиотехнических материалов, основных компонентах электрических и радиотехнических цепей.

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

### 1.1. ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТРОЕНИИ МАТЕРИИ

**Дискретный энергетический уровень.** Дискретный энергетический уровень атома может быть занят одним или двумя электронами (рис. 1.1). Интервалы между энергетическими уровнями не заняты (запрещены). Энергетические зазоры между уровнями уменьшаются с увеличением расстояния между электроном и ядром. Когда энергия электрона достигает значения, называемого энергией ионизации, электрон отрывается от атома, переходит в ионизованное (свободное) состояние. Выше энергии ионизации энергетический спектр электрона становится непрерывным. Энергия электрона может принимать любое значение.

Основное состояние реализуется, когда электроны занимают самые глубокие энергетические уровни, а расположенные выше разрешенные энергетические уровни остаются пустыми.

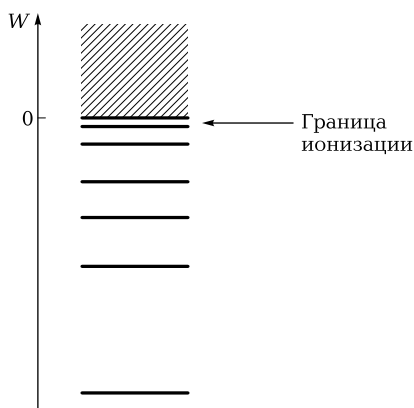


Рис. 1.1. Энергетическая диаграмма изолированного атома

В реальности не каждый глубокий энергетический уровень оказывается заполненным. Под внешним электрическим или температурным воздействием часть электронов переходит на вышележащие уровни, но данное состояние (возбужденное состояние) оказывается нестабильным, так как электроны возвращаются с верхних уровней на нижние, отдавая полученную ранее энергию.

**Строение атома.** Представление об атоме как о мельчайшей неделимой частице вещества связывают с именем Демокрита, и оно сохранялось в химии на протяжении многих веков. Сведения о сложной структуре атомов были получены позднее.

Э. Резерфорд, экспериментально изучая рассеяние положительных частиц (названных  $\alpha$ -частицами), испускаемых при распаде радия, выяснил, что основная масса атома сосредоточена в его центре (ядре) и несет положительный заряд.

Атом в целом нейтрален, поскольку атом содержит столько электронов, сколько протонов в ядре.

Дальнейшее развитие теории строения атома получено в модели Бора, согласно которой отрицательные частицы (электроны) вращаются вокруг ядра по круговым орбитам, радиусы которых можно вычислить.

А. Зоммерфельд допустил, что электроны в атоме движутся как по круговым, так и по эллиптическим орбитам.

Позднее экспериментально было установлено, что электроны помимо свойств частицы обладают волновыми свойствами — взаимодействуют с веществом как волны.

Описание движения частиц, обладающих волновыми свойствами, предложил Э. Шредингер. Движущийся в атоме электрон можно представить в виде облака, окружающего атомное ядро: движение описывается с помощью волновой функции, квадрат модуля которой характеризует вероятность нахождения электрона в данной области.

Энергетическое состояние электрона в атоме, молекуле, химическом соединении характеризует орбиталь.

Развитием теории атома занимался В. Гейзенберг, который показал, что хотя электрон и обладает волновыми свойствами, но переходы его между различными состояниями в атоме сопровождаются поглощением или выделением энергии в дискретных количествах — к в а н т а х. В. Гейзенберг назвал свою теорию квантовой механикой.

**Квантовые состояния электрона в атоме.** Квантовая механика вводит для энергетической характеристики электронов четыре квантовых числа:

- главное квантовое число  $n$ , определяющее радиус круговой орбиты, или большую полуось эллиптической орбиты;  $n$  принимает значения  $1, 2, 3, \dots$ ; энергия электрона, соответствующая состоянию с данным  $n$ , называется энергетическим уровнем;
- орбитальное квантовое число  $l$ , определяющее эксцентриситет орбиты;  $l$  может быть равно  $1, 2, 3, \dots, (n - 1)$ ; поскольку одному  $n$  может соответствовать несколько  $l$ , вводится понятие энергетического подуровня: для  $l = 0$  —  $s$ -подуровень,  $l = 1$  —  $p$ -подуровень,  $l = 2$  —  $d$ -подуровень;  $l = 0$  отвечает круговой орбите,  $l = 1$  — эллиптической,  $l = 2$  или  $3$  — орбиталам более сложной формы;
- магнитное квантовое число  $m$ , определяющее пространственную ориентацию эллиптических орбиталей;  $m$  может иметь значения  $-l, \dots, -2, -1, 0, +1, +2, \dots, +l$ ; при  $n = 1, l = 0$  магнитное квантовое число  $m = 0$ ; при  $n = 2, l = 1$  магнитное квантовое число  $m = -1, 0, +1$ ; таким образом, любому квантовому числу  $l$  соответствует  $(2l + 1)$  различным образом ориентированных орбиталей; например, при  $l = 0$  существует одна атомная орбиталь ( $s$ -орбиталь), при  $l = 1$  — три  $p$ -орбитали;
- спиновое квантовое число  $s$ , определяющее момент количества движения электрона вокруг своей оси, вектор спина может быть параллелен ( $\uparrow\uparrow$ ) или антипараллелен ( $\uparrow\downarrow$ ) вектору орбитального момента; проекция вектора собственного момента количества движения электрона на направление вектора напряженности магнитного поля принимает значения  $+1/2$  или  $-1/2$ , которые и считаются значениями спинового квантового числа  $s$ ; в отсутствие магнитного поля спин ориентирован произвольно.

На подуровнях с данным  $n$  число возможных состояний равняется  $2n^2$ . Эти состояния могут быть полностью или частично заняты электронами или свободны.

Распределение электронов в атоме по атомным орбиталам можно объяснить, основываясь на важнейших положениях:

принципе наименьшей энергии;

правиле Клечковского;

принципе Паули;

правиле Гунда и на применении представлений о квантовых числах.

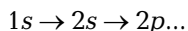
Согласно *принципу наименьшей энергии* электроны в атоме заполняют атомные орбитали таким образом, чтобы их суммарная энергия была наименьшей.

По *правилу Клечковского* состояниям с минимальной энергией соответствует минимальная сумма главного и орбитального квантовых чисел. Сначала заполняются подуровни с наименьшим значением суммы  $n + l$ ; если для двух подуровней эти суммы равны, то заполняется подуровень с меньшим  $n$  (из этого правила есть исключение).

Согласно *принципу Паули* в атоме не может быть электронов с одним и тем же набором четырех квантовых чисел. Поэтому на атомной орбитали с конкретным набором квантовых чисел  $n, l, m$  имеется два места со значениями  $s$ . Графически электроны с антипараллельными спинами изображаются противоположно направленными стрелками.

*Правило Гунда* указывает, что электроны занимают разрешенные энергетические состояния в атоме таким образом, чтобы их суммарный спин был максимален; спины всех электронов в атоме складываются. Электроны заполняют вначале такие состояния, чтобы их спин был ориентирован в одном направлении, а суммарный спин электронной оболочки приобретал наибольшее значение. Когда все состояния с одинаковой ориентацией спинов заняты, электроны занимают состояния с противоположной ориентацией спинов. Правило Гунда относится к невозбужденным атомам, в которых электроны занимают состояния с минимальной энергией.

Порядок заполнения электронами энергетических уровней и подуровней следующий:



Электронная формула в кратком виде отражает распределение электронов в атоме по атомным орбиталям, или электронную конфигурацию атомов.

Распределение по состояниям записывают, указывая цифрой главное квантовое число занятого состояния (энергетический уровень), буквой — орбитальное квантовое число (энергетический подуровень); верхним индексом — число электронов, находящихся на данном подуровне. Например, электронные формулы атомов: водорода —  $1s^1$ , гелия —  $1s^2$ , лития —  $1s^2 2s^1$ , бериллия —  $1s^2 2s^2$ , бора —  $1s^2 2s^2 2p^1$ , углерода —  $1s^2 2s^2 2p^2$ , неона —  $1s^2 2s^2 2p^6$ .

Сумма всех верхних индексов равняется числу электронов в атоме.

Электронная оболочка имеет слоистое строение. Электроны с  $n = 1$  образуют внутреннюю, наиболее близко к ядру расположенную *K*-оболочку, или *K*-слой; с  $n = 2$  — *L*-слой, с  $n = 3$  — *M*-слой. Электроны в состоянии с  $n = 1$  значительно прочнее связаны с ядром, чем электроны в состояниях с  $n = 2$  или  $n = 3$ .



**Зонная структура.** Когда два атома соприкасаются столь близко, что внешние электроны начинают взаимодействовать (образуют химическую связь), то энергия этих электронов не будет одинаковой, и согласно принципу Паули происходит расщепление имеющегося энергетического уровня на два новых (рис. 1.2).

При взаимодействии большого количества атомов, например, в твердом теле, разрешенные уровни отдельных атомов расщепляются на близко расположенные энергетические уровни, образующие широкий спектр разрешенных состояний, называемых *разрешенными зонами* (на рис. 1.2 заштрихованы). *Запрещенные зоны* располагаются между разрешенными энергетическими зонами. Электроны внутренних оболочек мало расщепляются.

С точки зрения электропроводности наибольшее значение имеют две разрешенные зоны: валентная зона и зона проводимости.

От энергетического спектра и распределения электронов в валентной зоне и зоне проводимости (рис. 1.3) зависит подразделение на металл, диэлектрик или полупроводник.

В *металлах* при 0 К зона проводимости примыкает (рис. 1.3, *а*) или перекрывается с валентной зоной (рис. 1.3, *б*) (занятые состояния заштрихованы), и энергетический зазор между занятыми и свободными состояниями отсутствует. Электроны, находящиеся на занятых уровнях, могут покинуть свой энергетический уровень и последовать в направлении действия силы электрического поля, что приведет к возникновению проводимости металлов.

В *диэлектриках* (рис. 1.3, *в*) при 0 К валентная зона, включая ее верхний энергетический уровень  $W_v$ , полностью занята, а зона проводимости с нижнего уровня  $W_c$  полностью свободна. Энергетический зазор (ширина запрещенной зоны  $\Delta W$ ) между валентной зоной и зоной проводимости превышает 3 эВ. При повышении температуры энергия некоторой части электронов превосходит ширину запре-

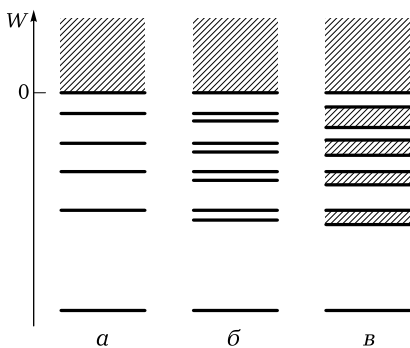


Рис. 1.2. Структура зонной диаграммы:

*а* — одноатомная; *б* — двухатомная; *в* — многоатомная

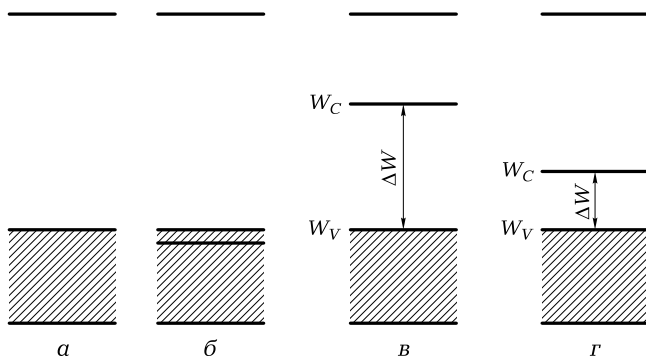


Рис. 1.3. Зонная структура:  
 а, б — металла; в — диэлектрика; г — полупроводника

щенной зоны и они могут переходить из валентной зоны в зону проводимости, где занимать свободные энергетические состояния.

В *полупроводниках* (рис. 1.3, г) границы занятых и свободных состояний располагаются также между валентной зоной и зоной проводимости, при 0 К все состояния в валентной зоне заняты, а состояния в зоне проводимости полностью свободны. К полупроводникам относят вещества, у которых ширина запрещенной зоны не превышает 3 эВ (исключение составляет карбид кремния). При низких температурах полупроводники подобно диэлектрикам имеют малую электропроводность.

В полупроводниках с ростом температуры электроны занимают свободные энергетические состояния в зоне проводимости, количество электронов в зоне проводимости возрастает, что приводит к росту электропроводности. Вследствие переходов электронов в зону проводимости в валентной зоне образуются свободные места (дырки), которые могут перемещаться внутри валентной зоны, что приводит к возникновению дырочной проводимости.

## 1.2. ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

Периодическая система элементов Д. И. Менделеева дает следующую информацию о строении атома элемента:

- заряд ядра атома;
- атомная масса ядра;

- номер периода и группы;
- значение главного квантового числа  $n$ , равного номеру элемента;
- строение электронных оболочек атомов.

*Заряд ядра атома  $q$*  равен главному квантовому числу  $n$ , умноженному на абсолютную величину заряда электрона  $|e|$ ;  $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл:

$$q = n \cdot |e|.$$

*Атомная масса ядра* указывается в относительных единицах атомной единицы массы (а. е. м.), равной  $1/12$  массы изотопа углерода с массовым числом 12; а. е. м. =  $1,6604 \cdot 10^{-27}$  кг.

*Номер периода* (от 1 до 7) определяет число электронных оболочек атома. Номер периода указан в левом столбце периодической системы элементов Д. И. Менделеева. Периоды подразделяются на короткие и длинные; короткие периоды (1, 2 и 3); 1 период содержит всего 2 элемента, 2 и 3 периоды — по 8 элементов. Длинные периоды (с 4 по 7) содержат больше 8 элементов: 4 и 5 периоды — по 18 элементов, 6 период — 32 элемента, 7 период включает 6 существующих в природе и 26 короткоживущих элементов, полученных искусственным путем. Элементы, входящие в периоды, разбиваются на группы (от I до VIII). Группы делятся на подгруппы: *A* — основную и *B* — побочную. Элементы 2 и 3 периодов, а также стоящие под ними элементы 6 и 7 периодов образуют основные подгруппы. Элементы длинных периодов, над которыми во 2 и 3 периодах нет элементов, образуют побочные *B* подгруппы. Существует 8 основных и 10 побочных подгрупп.

Элементы каждой основной подгруппы имеют одинаковую конфигурацию внешних *s*- и *p*-электронных оболочек (орбиталей).

*Значение главного квантового числа  $n$*  внешних *s*- и *p*-электронных оболочек равно номеру периода.

Закономерности, проявляющиеся в изменении свойств химических элементов, обусловлены строением электронных оболочек атомов.

Рассмотрим, как застраиваются электронные оболочки атомов по мере роста порядкового номера химического элемента в Периодической системе элементов Д. И. Менделеева. В первом периоде в атоме водорода имеется один электрон на орбитали  $1s$  с произвольной ориентацией спина; в атоме гелия — два электрона с противоположными спинами.

Во втором периоде у элементов (начиная с бора) происходит заполнение орбитали  $2p$ . У неона все возможные  $2p$ -орбитали полностью заняты.

У элементов третьего периода заполняются сначала  $3s$ , затем  $3p$ -орбитали.

Для первых трех периодов переход от каждого предыдущего элемента к последующему внутри периода сопровождается увеличением числа протонов в ядре на единицу. Одновременно на внешней электронной оболочке атома становится на один электрон больше.

Периодическая повторяемость структуры внешних электронных оболочек обуславливает периодическую повторяемость химических свойств элементов.

Элементы I и II основных подгрупп, часть элементов III—V подгрупп, а также всех побочных подгрупп — металлы. Металлические свойства возрастают при перемещении по периодам влево, по подгруппам — вниз в пределах основных подгрупп. Большинство переходных металлов находятся только в связанном состоянии в виде оксидов, солей и комплексов.

Особенности переходных металлов:

- в образовании химических связей принимают участие  $s$ -,  $p$ - и  $d$ -атомные орбитали, которые образуют различные типы связей, в том числе ковалентные, полярные;
- все переходные металлы проявляют переменную степень окисления (кроме Zn и Cd);
- оксиды переходных металлов низших степеней окисления проявляют основной характер, средних — амфотерный, высших — кислотный;
- гидриды переходных металлов — кристаллические вещества, обладают свойствами металлических проводников.

*Лантаноиды* — это 14 элементов, следующих за лантаном, с порядковыми номерами 58... 71. В атомах этих элементов заполняется  $4f$ -подуровень, поскольку химические свойства элементов зависят главным образом от внешних (валентных) электронов, а на  $5d$ - и  $6s$ -подуровнях у всех лантаноидов имеется одинаковое число электронов. Все металлы, кроме ртути, — твердые вещества при комнатной температуре и нормальном давлении.

Элементарные полупроводники и элементы, из которых образованы полупроводники, располагаются в центральной части Периодической системы элементов Д. И. Менделеева. Элементарные полупроводники — твердые тела при нормальных условиях.

Диэлектрические свойства возрастают при перемещении по периодам вправо, по подгруппам — вверх в пределах основных подгрупп. Диэлектрики при нормальных условиях являются твердыми телами, жидкостями или газами.

Название *редкоземельные элементы* включает еще три элемента: скандий, иттрий и лантан, относящиеся к побочной подгруппе III группы. Объединение 17 элементов под одним названием связано сходством Sc, Y и La по химическим свойствам.

*Актиноиды* — семейство из 14 разноактивных элементов 7 периода, начиная с 90-го по 103 элемент. Элементы этой группы, следующие за ураном, называют трансурановыми элементами (искусственно полученными элементами).

### 1.3. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ

---

**Агрегатное состояние вещества.** Представляет собой состояние вещества, определяемое природой и величиной сил, действующих между атомами, характеризуемое взаимным расположением частиц в пространстве и их способностью к перемещению. В зависимости от температуры и давления вещества могут находиться в твердом (кристаллическом, аморфном, стеклообразном), жидком, газообразном и плазменном состояниях:

- твердое состояние вещества — агрегатное состояние вещества, характеризующееся стабильностью формы и характером теплового движения атомов, которые совершают малые колебания относительно положения равновесия. Кристаллическое состояние — равновесное состояние твердых тел, характеризующихся периодичностью расположения и чередования химических частиц в трехмерном пространстве. Стеклообразное состояние — это состояние «твердой жидкости» (силикатные стекла, многие искусственные материалы); аморфное состояние вещества — состояние вещества, характеризующееся отсутствием периодичности пространственного расположения частиц и статичностью их положения;
- жидкое состояние — одно из агрегатных состояний вещества, являющееся промежуточным между газообразным и твердым; в жидкости взаимное притяжение атомов и молекул еще достаточно, чтобы удерживать их вместе;
- газообразное состояние — агрегатное состояние вещества, при котором атомы и молекулы движутся свободно и совершают беспорядочные перемещения;

- плазменное состояние вещества — агрегатное состояние вещества, при котором ионы движутся свободно.

**Кристаллическая структура вещества.** Твердые тела можно условно разделить на кристаллические и некристаллические. В кристаллическом теле, как показывает рентгеноструктурный анализ, частицы расположены с определенной закономерностью.

Всякое кристаллическое вещество состоит из зерен или кристалликов, которые имеют различную форму и размеры от долей микрометра до метра. Твердые тела в большинстве имеют поликристаллическое строение и состоят из кристалликов. В полупроводниковой электронике используют только монокристаллы, т. е. материалы, весь объем которых состоит из одного кристалла.

Кристаллы разных веществ различаются по форме элементарной ячейки. Например, элементарная ячейка кристалла NaCl имеет форму куба.

В кристаллическом состоянии атомы, молекулы или ионы расположены в строгом порядке. Упорядоченная трехмерная структура твердого вещества, обладающая правильной повторяемостью расположения частиц, описывается с помощью терминов кристаллическая решетка и элементарная ячейка.

Кристаллическая решетка — это пространственная решетка с упорядоченным расположением частиц (атомов, ионов, молекул).

Параллелепипед минимального размера, при переносах которого получается полная структура кристалла, называется элементарной ячейкой. Иными словами, элементарная ячейка — это мельчайшая часть кристаллической решетки, имеющая все геометрические характеристики решетки (тип решетки, расстояние между частицами, углы). Частицы расположены в строго определенных местах элементарной ячейки (в углах, в середине граней, в центре и т. д.). Размер элементарной ячейки называется периодом идентичности.

**Структура кристаллов.** В соответствии с геометрической формой элементарной ячейки кристаллы могут быть отнесены к одной из семи кристаллографических систем (сингоний): кубической, гексагональной, тетрагональной, тригональной (ромбоэдрической), моноклинной, триклинной, ромбической. Отдельные виды кубической решетки и гексагональной решетки показаны на рис. 1.4.

Для определения типа кристаллической решетки и периода идентичности применяется рентгеновское излучение, обладающее определенной длиной волны.

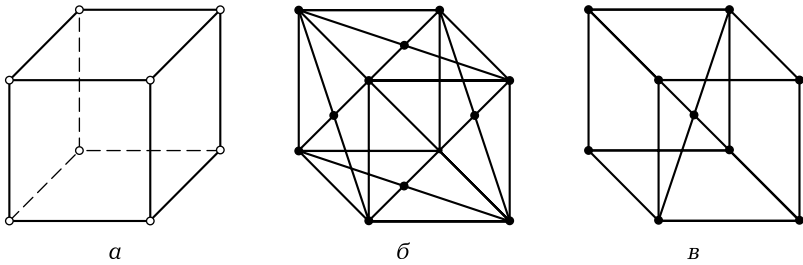


Рис. 1.4. Кристаллические решетки:

*a* — простая кубическая; *б* — кубическая границентрированная; *в* — кубическая объемно-центрированная; *г* — гексагональная решетка

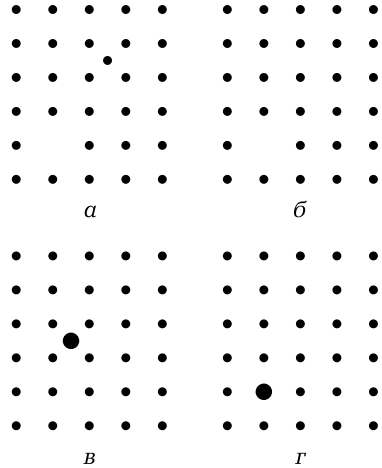
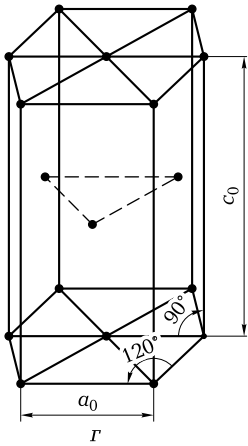


Рис. 1.5. Дефекты:

*a* — Френкеля; *б* — Шоттки; *в* — химический дефект, атом примеси в междузлии; *г* — химический дефект, атом примеси в узле решетки

Уравнение Вульфа—Брэгга является основным уравнением для определения периода идентичности  $d$ , мкм:

$$d = n\lambda = 2d\sin\vartheta,$$

где  $n$  — целое число;  $\lambda$  — длина волны рентгеновского излучения, мкм;  $\vartheta$  — угол отражения волны рентгеновского излучения, град.

Кристаллические плоскости — плоские сечения, в которых расположены узлы кристаллической решетки.