

М.М. Михайлов

Электроматериаловедение

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 621.39
ББК 32
М11

М11 **М.М. Михайлов**
Электроматериаловедение / М.М. Михайлов – М.: Книга по Требованию, 2024. – 234 с.

ISBN 978-5-458-60398-0

ISBN 978-5-458-60398-0

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

ОСНОВЫ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА

	Стр.
§ 1. Предмет электроматериаловедения	5
§ 2. Строение атома	—
§ 3. Молекула	10
§ 4. Газообразное, твердое и жидкое состояние	12
§ 5. Проводники, полупроводники и диэлектрики	14

ОТДЕЛ ПЕРВЫЙ

ИЗОЛИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

Глава I. Электрические свойства изолирующих материалов	17
§ 6. Изолирующие материалы	—
§ 7. Диэлектрическая постоянная. Поляризация диэлектрика	18
§ 8. Уравнение Клаузиуса и Мосотти	19
§ 9. Диэлектрическая постоянная однородных диэлектриков	22
§ 10. Диэлектрическая постоянная неоднородных диэлектриков	25
§ 11. Электропроводность изолирующих материалов	26
§ 12. Электропроводность газов и жидкостей	28
§ 13. Электропроводность твердых диэлектриков	30
§ 14. Электропроводность гигроскопичных диэлектриков	32
§ 15. Диэлектрические потери	35
§ 16. Электрическая прочность	46
§ 17. Пробой газовой среды	48
§ 18. Явление пробоя в жидкости	50
§ 19. Пробой твердых изолирующих материалов	52
Глава II. Физические и механические свойства изолирующих материалов	59
§ 20. Гигроскопичность изолирующих материалов	—
§ 21. Тепловые свойства изолирующих материалов	64
§ 22. Механические свойства изолирующих материалов	68
§ 23. Связь свойств изолирующих материалов с их составом и строением	70
Глава III. Неорганические изолирующие материалы	72
§ 24. Классификация неорганических изолирующих материалов	—
§ 25. Каменные породы	—
§ 26. Слюда	76
§ 27. Азбест	79
§ 27. Стекла и керамика	81
§ 28. Стекла	—
§ 29. Керамические изолирующие материалы	85
§ 30. Микалекс	91
§ 31. Цементы. Азбест-цемент	92
§ 32. Оксидная изоляция	93
§ 33. Электролитический конденсатор	—

	Стр.
Глава IV. Органические изолирующие материалы	96
§ 34. Классификация органических изолирующих материалов	—
§ 35. Воскообразные вещества	—
§ 36. Битумы	99
§ 37. Высокомолекулярные вещества	101
§ 38. Искусственные смолы	102
§ 39. Естественные смолы	106
§ 40. Эфиры целлюлозы	109
§ 41. Масла	111
§ 42. Минеральные масла	113
§ 43. Совол	123
§ 44. Компаунды и заливочные массы	124
§ 45. Лаки изоляционные	130
§ 46. Озоностойкость лаков	139
§ 47. Волокнистые органические материалы	140
§ 48. Бумага	142
§ 49. Прессшпан. Изоляционные картоны	146
§ 50. Фибра	147
§ 51. Лакоткани и лакобумаги	148
§ 52. Дерево	150
§ 53. Каучук	154
§ 54. Пластические массы. Прессованные изделия	160
§ 55. Слоистые пластмассы. Картолиты и текстолиты	170
§ 56. Миканиты	174

ОТДЕЛ ВТОРОЙ

ПРОВОДНИКИ И МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Глава V. Проводники и полупроводники	178
§ 57. Проводниковые материалы	—
§ 58. Проводимость чистых металлов. Влияние примесей	182
§ 59. Механические свойства проводников	185
§ 60. Медь	187
§ 61. Алюминий	190
§ 62. Железо	192
§ 63. Вольфрам	193
§ 64. Платина, свинец	194
§ 65. Сплавы высокого сопротивления. Общие требования	196
§ 66. Сплавы для эталонов сопротивлений и измерительных приборов	197
§ 67. Сплавы для реостатов	198
§ 68. Сплавы для нагревательных приборов и электрических печей	199
§ 69. Электротехнический уголь	200
§ 70. Полупроводники	206
§ 71. Принцип работы сухих выпрямителей	208
§ 72. Саморегулирующиеся сопротивления. Общие требования	209
Глава VI. Магнитные материалы	211
§ 73. Основные типы магнитных материалов	—
§ 74. Природа ферромагнетизма	212
§ 75. Магнитно-мягкие материалы	217
§ 76. Листовая электротехническая сталь	219
§ 77. Магнитные свойства сплавов железа с никелем и кобальтом	222
§ 78. Высокочастотные магнитные материалы	223
§ 79. Немагнитные железные сплавы	225
§ 80. Сплавы для постоянных магнитов	226
Краткий предметный указатель	231

ВВЕДЕНИЕ

ОСНОВЫ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА

§ 1. Предмет электроматериаловедения

Материалы, применяемые при изготовлении различных электротехнических аппаратов, машин и сооружений, в соответствии со своим целевым назначением могут быть разделены на несколько групп: материалы конструкционные, электротехнические, отделочные и др. Группа электротехнических материалов объединяет материалы, играющие активную роль по отношению к различным электромагнитным процессам, происходящим в том или ином аппарате, машине и т. д. Так к электротехническим материалам могут быть отнесены:

- 1) материалы, служащие для проведения электрического тока — проводниковые материалы,
- 2) материалы изолирующие, ограничивающие пути тока — диэлектрики,
- 3) материалы, запасающие или проводящие магнитный поток — магнитные материалы и т. д.

Знакомство с главнейшими представителями электротехнических материалов, установление способов оценки их качества, изучение основ физических процессов, происходящих в них в электромагнитном поле, и составляет задачу электроматериаловедения. При объяснении этих процессов мы должны исходить из современных представлений о строении вещества. Предполагая, что приступающие к изучению электротехнических материалов знакомы с химией, физикой и теорией электричества и магнетизма в объеме первых двух курсов вузов, ограничимся только краткой сводкой некоторых упрощенных положений о строении материи.

§ 2. Строение атома

Каждое вещество может быть последовательно разложено на структурные элементы увеличивающейся степени дисперсности, причем полное понимание свойств вещества требует знания строения всех структурных его элементов и их взаимной связи. Рассмотрим, например, строение одного из представителей изолирующих материалов — мрамора. Мрамор представляет собой поликристаллический материал; первым структурным элементом, с которым мы встречаемся, изучая его строение, является элементарный кристаллик мрамора. Отдельные кристаллики связаны между собой так называемой аморфной прослойкой, а отчасти отделены воздушными каналами — капиллярами, проходящими во всей толще материала. Эти каналы и служат причиной низкой пробивной прочности мрамора и его гигроскопичности.

Размеры первичного кристаллика мрамора составляют от $3 \cdot 10^{-1}$ до 10^{-2} см. Чем меньше размеры первичного кристаллика поликристаллического тела, тем выше обычно его механическая прочность. Кристаллик построен из правильно расположенных молекул CaCO_3 . Размер молекулы CaCO_3 — порядка $3\text{--}4 \cdot 10^{-8}$ см. Ряд данных заставляет предполагать, что в пределах элементарного кристаллика молекулы упакованы не совершенно плотно, а разделены неплотностями (трещинами) толщиной порядка от 10^{-8} до 10^{-7} см. Наличием этих трещин можно объяснить ряд особенностей монокристалла и его, пониженные против расчетных, механические и электрические свойства.

От строения молекулы зависит основное в электрическом отношении поведение вещества, т. е. будет ли оно проводником, полупроводником или диэлектриком.

Молекула построена из атомов; строение атома объясняет ряд химических, магнитных и электрических свойств материала. К изложению основ строения атома мы и перейдем.

Согласно современным представлениям атом любого элемента представляет систему, состоящую из положительно заряженного ядра, окруженного электронами. Суммарный заряд этих электронов и заряд ядра равны между собой по величине и обратны по знаку, в силу чего каждый атом в электрическом отношении нейтрален. Размер ядра — порядка 10^{-12} см, в то время как размер всего атома в целом — порядка 10^{-8} см. Строение ядра, повидимому, весьма сложно, однако, мы его можем вовсе не касаться, поскольку магнитные и электрические характеристики атома определяются не ядром. Заряд ядра равен Ze , где e — заряд электрона, равный $4,774 \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц и Z — так называемый атомный номер, т. е. тот номер по порядку, который получит данный элемент, если все элементы расположить последовательно в порядке возрастающих атомных весов. Зная порядковый номер атома, мы, следовательно, можем сказать, сколько электронов содержит его атом. Так, например, медь имеет 29-й номер и, следовательно, атом ее содержит 29 электронов.

Н. Бор, первый подошедший к правильным взглядам на строение атома, предположил, что электроны вращаются вокруг ядра по круговым орбитам, причем количество возможных орбит не произвольно велико, а ограничено. Возможными являются только те орбиты, для которых момент количества движения электрона равен целому кратному от количества $\frac{h}{2\pi}$, где h — постоянная Планка, равная $6,55 \cdot 10^{-27}$ е/сек, т. е. для которых имеет место равенство:

$$m\omega r^2 = \frac{Nh}{2\pi}. \quad (1)$$

Здесь r — радиус орбиты; ω — угловая скорость электрона; N — так называемое квантовое число (N может принимать значения 1, 2, 3 ... и т. д.); m — масса электрона, равная $9,043 \cdot 10^{-28}$ грамм.

Кроме того, орбита определится равенством центростремительной и центробежной сил электрона:

$$\frac{Ze^2}{r^2} = \frac{m\omega^2}{r}, \quad (2)$$

где $u = 2\pi r\omega$ — линейная скорость электрона.

Уравнения (1) и (2) позволяют найти для любого числа N радиус орбиты и угловую скорость электрона, а именно, совместное решение этих уравнений дает:

$$r = N^2 \frac{h^2}{4\pi^2 m e^2 Z} \text{ см и } \omega = \frac{1}{N^3} \cdot \frac{4\pi^2 m e^4 Z^2}{h^3}.$$

Схема строения атома водорода по Бору представлена на рис. 1. Каждой орбите соответствует определенная энергия электрона. При сообщении электрону энергии извне, например при действии на него лучистой энергии, электрон переходит на другую, более удаленную орбиту с более высоким уровнем энергии, W_2 . При затрата некоторой энергии электрон может быть вовсе отнят от атома; такой атом называется ионизированным. Эту работу отрыва электрона можно выражать в электроновольтах ($W_1 = eV$), или, так как заряд электрона постоянен, то в вольтах. Эта работа будет разной для отрыва разных электронов одного и того же атома. Легче всего отрывается первый электрон. Например, последовательные значения ионизационных потенциалов для атома кислорода составляют:

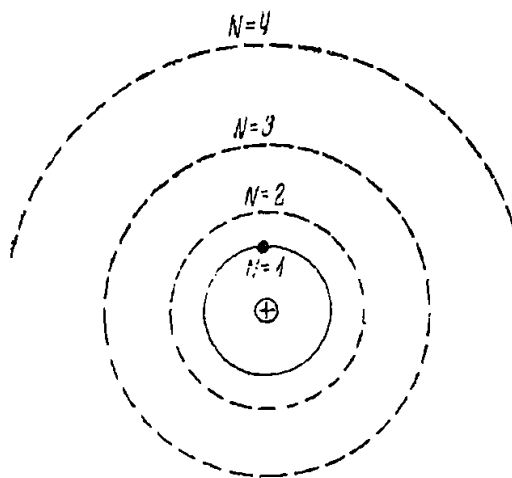


Рис. 1. Схема строения атома водорода.

Отрываемый электрон:

1 2 3 4 5 6 7 8

Ионизационный потенциал в вольтах:

13,6 34,9 54,9 77 109,2 137,5 733 866

Если взять ряд элементов, то энергия, требуемая для отрыва первого электрона для каждого элемента, будет разная. Наибольшее значение она приобретет для инертных газов, наименьшее — для одновалентных металлов (см. таблицу 1).

Т а б л и ц а 1

Элемент	Гелий	Неон	Аргон	Криптон	Литий	Натрий	Калий	Рубидий
Ионизационный потенциал атома в вольтах	24,5	21,5	15,7	13,9	5,4	5,1	4,3	4,2

Т а б л и
Электронные

Z	$n=$	1	2		3			4			
	$l=$	0	0	1	0	1	2	0	1	2	3
		K	L		M			N			
1 2	H He	1 2									
3 4 5 6 7 8 9 10	Li Be B C N O F Ne	2 2 2 2 2 2 2 2	1 2 2 2 2 2 2 2	 1 2 3 4 5 6							
11 12 13 14 15 16 17 18	Na Mg Al Si P S Cl Ar	2 2 2 2 2 2 2 2	2 2 2 2 2 2 2 2	6 6 6 6 6 6 6 6	1 2 2 2 2 2 2 2	 1 2 3 4 5 6					
19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36	K Ca Sc Ti V Cr Mn Fe Co Ni Cu Zn Ga Ge As Se Br Kr	2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6	2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6	 1 2 3 4 5 6 7 8 10 10 10 10 10 10 10 10	1 2 2 2 2 1 2 2 2 1 2 2 2 2 2 2 2	 1 2 3 4 5 6		

та 2
уровни в атомах

	$n=$ $l=$	1	2	3	4				5			6			7
					0	1	2	3	0	1	2	0	1	2	0
		K	L	M	N				O			P			Q
37	Rb	2	8	18	2	6			1						
38	Sr	2	8	18	2	6			2						
39	Y	2	8	18	2	6	1		2						
40	Zr	2	8	18	2	6	2		2						
41	Nb	2	8	18	2	6	4		1						
42	Mo	2	8	18	2	6	5		1						
43	Ma	2	8	18	2	6	5		2						
44	Ru	2	8	18	2	6	7		1						
45	Rh	2	8	18	2	6	8		1						
46	Pd	2	8	18	2	6	10								
47	Ag	2	8	18	2	6	10		1						
48	Cd	2	8	18	2	6	10		2						
49	In	2	8	18	2	6	10		2						
50	Sn	2	8	18	2	6	10		2	1					
51	Sb	2	8	18	2	6	10		2	3					
52	Te	2	8	18	2	6	10		2	4					
53	J	2	8	18	2	6	10		2	5					
54	X	2	8	18	2	6	10		2	6					
55	Cs	2	8	18	2	6	10		2	6		1			
56	Ba	2	8	18	2	6	10		2	6		2			
57	La	2	8	18	2	6	10		2	6	1	2			
58—71	—	2	8	18	2	6	10	14	11						
72	Hf	2	8	18	2	6	10	14	2	6	2	2			
73	Ta	2	8	18	2	6	10	14	2	6	3	2			
74	W	2	8	18	2	6	10	14	2	6	4	2			
75	Re	2	8	18	2	6	10	14	2	6	5	2			
76	Os	2	8	18	2	6	10	14	2	6	6	2			
77	Ir	2	8	18	2	6	10	14	2	6	7	2			
78	Pt	2	8	18	2	6	10	14	2	6	8	2			
79	Au	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	1			
80	Hg	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	2			
81	Tl	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	2	1		
82	Pb	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	2	2		
83	Bi	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	2	3		
84	Po	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	2	4		
85	—	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	2	5		
86	Ra	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	2	6		
87	—	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	2	6		1
88	Ra	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	2	6		2
89	Ac	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	2	6	1	2
90	Th	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	2	6	2	2
91	Pa	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	2	6	3	2
92	U	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	2	6	4	2

В дальнейшем теория строения атома несколько отошла от первоначальных взглядов Бора. Было установлено, что орбиты электрона являются не круговыми, а эллиптическими, кроме того, было выяснено, что электрон, двигаясь по орбите, в то же время вращается вокруг своей оси. Это вращение получило название спина.

Современная атомная теория для определения движения электрона пользуется уже четырьмя квантовыми числами. Из них:

1) главное квантовое число n определяет сумму обеих полуосей эллиптической орбиты, причем n может принимать значения от 1 до ∞ ;

2) орбитальное квантовое число l определяет отношение длин обеих полуосей эллипса, причем l может принимать значения от 0 до $n - 1$;

3) третье квантовое число m может принимать значения от $-l$ до $+l$ и является мерой проекции углового момента орбиты на некоторое определенное направление. Таким направлением может быть, например, направление внешнего магнитного поля;

4) четвертое квантовое число s — так называемое спиновое квантовое число — связанное с вращением электрона вокруг своей оси, определяет угловой момент этого вращения и может быть равно или $+\frac{1}{2}$ или $-\frac{1}{2}$.

Эти четыре квантовые числа определяют уровень энергии электронов атома. Для установления возможных уровней энергии электронов атома имеет важное значение дополнительное правило Паули, правило запрета, формулируемое следующим образом: в любом атоме, в одном и том же состоянии, определяемом четырьмя квантовыми числами, может одновременно находиться только один электрон; следовательно, на одной и той же орбите не может быть более двух электронов, из которых один имеет „правый“ спин, а другой — „левый“ спин.

В свободном уединенном состоянии атома все электроны занимают наинизшие уровни энергии (нормальные), причем их орбиты группируются по оболочкам. Оболочки эти называются K, L, M, N, O, P и Q соответственно главным квантовым числам $n=1, 2, 3, 4, 5, 6$ и 7 .

В таблице 2 дано расположение электронов по оболочкам для различных элементов. Из этой таблицы мы видим, что максимальное число электронов, могущее быть на внешней оболочке, составляет 8. При восьми электронах на внешней оболочке атом получается особо устойчивым. В основе химических реакций между атомами лежит стремление их доводить свою внешнюю оболочку до 8 электронов.

§ 3. Молекула

Отдельные атомы, взаимодействуя между собой или с другими атомами, образуют молекулы. Рассмотрим различные типы молекул, причем в основу их разделения по типам положим род связи между отдельными атомами в молекуле и степень симметрии строения молекулы.

1-й тип. *Ковалентная связь. Нейтральные молекулы.* Примером такой связи является молекула Cl_2 . В этом случае каждый из двух

реагирующих между собой атомов поставляет один электрон в общее владение, так что в молекуле Cl_2 каждый атом хлора обладает шестью отдельными внешними электронами и двумя общими (рис. 2). Если у образующейся таким образом молекулы центры тяжести положительных и отрицательных зарядов совпадают, то молекула называется нейтральной. Собственный электрический момент такой молекулы μ равен нулю. Другой пример нейтральной молекулы — метан CH_4 . Схема строения ее показана на рис. 3. Внешнее электрическое поле у нейтральной молекулы, очевидно, равно нулю.

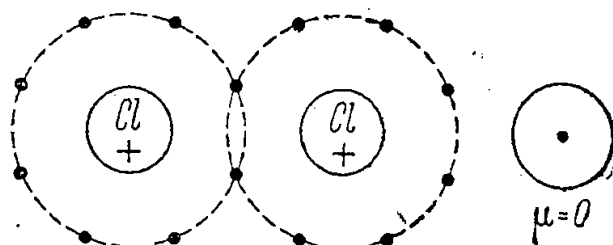


Рис. 2. Схема строения молекулы хлора.

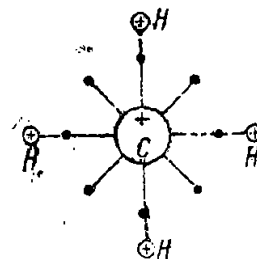


Рис. 3. Схема строения молекулы метана.

2-й тип. *Ковалентная связь. Дипольные молекулы.* Этот случай характеризуется отсутствием полной симметрии строения молекулы. Центры тяжести положительных и отрицательных зарядов молекулы уже не совпадают, молекула в целом имеет некоторый электрический момент, не равный нулю. Такие молекулы называются дипольными, и момент их $\mu = qa$ называется дипольным моментом. Так как величина q суммы зарядов — порядка 10^{-10} эл. ст. ед. и величина a — порядка

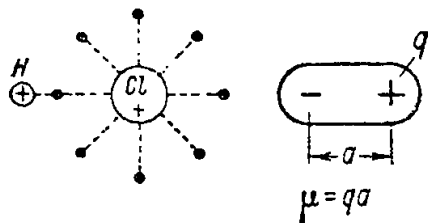


Рис. 4. Схема строения молекулы HCl .

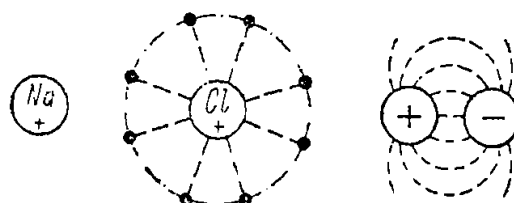


Рис. 5а. Схема строения NaCl .

10^{-8} см, то момент имеет величину порядка 10^{-18} электростатических единиц. Внешнее поле такой молекулы, очевидно, уже не равно нулю. Примером дипольной молекулы является молекула HCl . Схема ее строения представлена на рис. 4.

3-й тип. *Электровалентная связь. Ионные соединения.* В этом случае химическое соединение осуществляется путем передачи одним атомом своих валентных электронов другому. Примером такой реакции является соединение атома хлора с атомом натрия, образование NaCl (рис. 5а). В данном случае, в результате перехода электрона от одного атома к другому, образуются положительный и отрицательный ионы, удерживаемые вместе электростатическим притяжением.

Молекулы органических соединений построены, главным образом, по первым двум типам, неорганические — по третьему типу.

§ 4. Газообразное, жидкое и твердое состояние

Каждый из отдельных элементов и соединений, вообще говоря, может быть в трех состояниях: газообразном, жидком и твердом. Конечно, это возможно только в том случае, если тепловая энергия, необходимая для перевода данного вещества в газообразное или жидкое состояние, не разрушает самого соединения.

Газообразное состояние характеризуется свободным движением молекул или атомов друг относительно друга, тепловое движение превышает силы, стремящиеся фиксировать положение молекул. Если же силы междучастичных притяжений превышают силы тепловой диффузии, то вещество переходит в жидкое, а при дальнейшем охлаждении и в твердое, жестко фиксированное состояние.

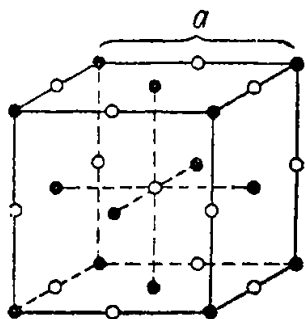


Рис. 56. Кристаллическая решетка хлористого натрия (темные кружки — Na, светлые — Cl).

Какова же природа междучастичных сил, удерживающих молекулы в твердом состоянии друг относительно друга, придающих телу прочность? В случае ионных соединений силы, связывающие отдельные ионы в кристалле, это, очевидно, те же силы электростатического притяжения. Пример кристаллической решетки ионного соединения представлен на рис. 56. Ввиду большей величины междуюнных сил, соединения эти по большей части весьма тугоплавки и прочны.

В случае молекул, образовавшихся за счет ковалентных связей, силы, связывающие отдельные молекулы в твердое тело, могут быть двух родов. Во-первых, отдельные связи между молекулами или атомами могут соединять их как бы в одну гигантскую молекулу. Примером такой связи может служить алмаз (рис. 6 и 7). Кристалл алмаза построен из атомов углерода, причем каждый атом окружен четырьмя другими атомами, расположенными в вершинах тетраэдра. Каждый атом углерода имеет четыре валентных электрона и вступает в совместное владение ими с четырьмя соседними атомами. Такая связь очень прочна.

Более распространенным видом связи молекул в твердом теле, для нейтральных и дипольных молекул, является связь через так называемые Ван-дер-Вальсовы силы. Природа этих сил заключается в следующем: если две нейтральных молекулы близко подходят друг к другу, то положительно заряженные ядра одной молекулы начинают притягивать электроны другой молекулы. Вещества, у которых молекулы в кристаллической решетке связаны Ван-дер-Вальсовыми силами, обычно бывают легкоплавкими и механически непрочными (пример — парафин).

Ковалентные соединения, имеющие дипольный момент (полярные ковалентные соединения) более прочны, чем соединения, имеющие нулевой дипольный момент, поскольку силами, удерживающими молекулы в кристаллической решетке, являются не только силы Ван-дер-Вальса, но также