

Л. В. ЖУРАВЛЕВА

# ЭЛЕКТРОМАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

## УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

*Допущено*

*Экспертным советом по профессиональному образованию Минобрнауки России  
в качестве учебного пособия для образовательных учреждений,  
реализующих программы начального профессионального образования*

4-е издание, переработанное и дополненное



Москва  
Издательский центр «Академия»  
2006

УДК 621.3(075.32)  
ББК 32.843я722  
Ж911

Рецензенты:

проректор по учебной работе Института социального и образовательного менеджмента, канд. пед. наук *Г. В. Ярочкина*;  
начальник лаборатории информационных технологий НПП ВНИИЭМ, канд. техн. наук *С. Г. Семенов*

**Журавлева Л. В.**

Ж911 Электроматериаловедение : учеб. пособие для нач. проф. образования / Л. В. Журавлева. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательский центр «Академия», 2006. — 352 с.

ISBN 5-7695-2434-0

Рассмотрены основные свойства различных классов электрорадиоматериалов, используемых в производстве радиоэлектронной аппаратуры: проводников, полупроводников, диэлектриков, магнитных материалов. Изложены основы физических явлений, происходящих в них, требования, предъявляемые к этим материалам, и области их применения. Приведены новые данные о используемых в промышленности и разрабатываемых материалах, для получения которых применяются современные технологии. 1-е издание вышло в 2001 г.

Для учащихся учреждений начального профессионального образования.

УДК 621.3(075.32)  
ББК 32.843я722

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

© Журавлева Л. В., 2001

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2006

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2006

ISBN 5-7695-2434-0

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	3
<b>Глава 1. Общие сведения о строении материалов .....</b>	<b>4</b>
1.1. Виды связи .....	4
1.2. Кристаллические материалы .....	8
1.3. Аморфные и аморфно-кристаллические материалы .....	13
1.4. Нанокристаллические материалы .....	14
1.5. Фазовый состав материалов .....	16
<b>Глава 2. Классификация электрорадиоматериалов .....</b>	<b>19</b>
2.1. Классификация материалов по электрическим свойствам .....	20
2.2. Классификация материалов по магнитным свойствам .....	23
<b>Глава 3. Проводниковые материалы .....</b>	<b>29</b>
3.1. Классификация проводниковых материалов .....	29
3.2. Основные свойства и характеристики проводниковых материалов .....	33
3.2.1. Электрические свойства .....	33
3.2.2. Механические свойства .....	34
3.2.3. Тепловые свойства .....	40
3.2.4. Физико-химические свойства .....	41
3.2.5. Технологические свойства .....	42
3.3. Материалы с высокой проводимостью .....	43
3.3.1. Медь и ее сплавы .....	44
3.3.2. Алюминий и его сплавы .....	48
3.3.3. Железо и его сплавы .....	50
3.3.4. Натрий .....	51
3.4. Материалы с высоким сопротивлением .....	52
3.4.1. Проводниковые резистивные материалы .....	52
3.4.2. Пленочные резистивные материалы .....	55
3.4.3. Материалы для термпар .....	59
3.5. Проводниковые материалы и сплавы различного применения .....	60
3.5.1. благородные металлы .....	60
3.5.2. Тугоплавкие металлы .....	62
3.5.3. Металлы различного применения .....	67
3.6. Сверхпроводники и криопроводники .....	71
3.6.1. Сверхпроводники .....	71
3.6.2. Криопроводники .....	74
3.7. Неметаллические проводниковые материалы .....	74
3.7.1. Материалы для электроугольных изделий .....	74
3.7.2. Проводящие и резистивные композиционные материалы .....	78

3.7.3. Контактотолы .....	83
3.8. Материалы для подвижных контактов .....	85
3.8.1. Материалы для скользящих контактов .....	86
3.8.2. Материалы для размыкающих контактов .....	87
3.9. Припой .....	91
3.10. Металлокерамика .....	96
3.11. Металлические покрытия .....	98
3.12. Проводниковые изделия .....	101
<b>Глава 4. Полупроводниковые материалы .....</b>	<b>116</b>
4.1. Свойства полупроводников .....	117
4.2. Простые полупроводники .....	130
4.2.1. Германий .....	132
4.2.2. Кремний .....	137
4.2.3. Селен .....	145
4.2.4. Теллур .....	148
4.3. Полупроводниковые соединения .....	149
4.3.1. Сложные полупроводники типа $A^{IV}B^{IV}$ .....	149
4.3.2. Сложные полупроводники типа $A^{III}B^V$ .....	151
4.3.3. Сложные полупроводники типа $A^{II}B^{VI}$ .....	157
4.3.4. Сложные полупроводники типа $A^{IV}B^{VI}$ (халькогениды свинца) .....	160
4.3.5. Сложные полупроводники типа $A_2^VB_3^{VI}$ .....	161
4.3.6. Оксидные полупроводники .....	161
4.3.7. Стеклообразные полупроводники .....	163
4.3.8. Органические полупроводники .....	164
<b>Глава 5. Диэлектрические материалы .....</b>	<b>167</b>
5.1. Свойства диэлектриков .....	167
5.1.1. Электрические свойства .....	168
5.1.2. Механические свойства .....	177
5.1.3. Тепловые свойства .....	179
5.1.4. Влажностные свойства .....	183
5.1.5. Физико-химические свойства .....	186
5.2. Твердые органические диэлектрики .....	188
5.2.1. Полимеризационные синтетические полимеры .....	190
5.2.2. Поликонденсационные синтетические полимеры .....	199
5.2.3. Электроизоляционные пластмассы .....	205
5.2.4. Слоистые пластики и фольгированные материалы .....	209
5.2.5. Пленочные электроизоляционные материалы .....	213
5.2.6. Электроизоляционные материалы на основе каучуков .....	216
5.2.7. Лаки и эмали .....	220
5.2.8. Компаунды .....	232
5.2.9. Флюсы .....	235
5.3. Твердые неорганические диэлектрики .....	236
5.3.1. Стекло .....	236
5.3.2. Ситаллы .....	241
5.3.3. Керамика .....	243

5.3.4. Неорганические электроизоляционные пленки .....	249
5.3.5. Слюда и материалы на ее основе .....	253
5.4. Жидкие диэлектрики .....	256
5.5. Газообразные диэлектрики .....	264
5.6. Активные диэлектрики .....	273
5.6.1. Сегнетоэлектрики .....	273
5.6.2. Пьезоэлектрики .....	277
5.6.3. Электреты .....	281
5.6.4. Диэлектрики для оптической генерации .....	283
5.6.5. Электрооптические материалы .....	289
<b>Глава 6. Магнитные материалы</b> .....	<b>295</b>
6.1. Основные характеристики магнитных материалов .....	296
6.2. Классификация магнитных материалов .....	299
6.3. Магнитотвердые материалы .....	301
6.4. Магнитомягкие материалы .....	308
6.4.1. Магнитомягкие материалы для постоянных и низкочастотных магнитных полей .....	309
6.4.2. Магнитомягкие материалы для высокочастотных магнитных полей .....	313
6.5. Магнитные материалы специального назначения .....	319
<b>Глава 7. Материалы для изделий электронной техники</b> .....	<b>325</b>
7.1. Материалы для полупроводниковых интегральных схем .....	325
7.2. Материалы для гибридно-пленочных и многокристальных больших интегральных схем .....	340
7.3. Материалы для устройств с печатным монтажом .....	344
Список литературы .....	348

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Радиоэлектроника является одной из наиболее быстро развивающихся областей техники, требующих большого разнообразия новых электрорадиоматериалов. Под *электрорадиоматериалами* понимают применяемые в радиоэлектронике материалы, у которых первостепенное значение имеют их свойства и характеристики в электрических и магнитных полях. Применение этих материалов позволяет получать изделия с высокой надежностью, быстрым действием, устойчивостью к воздействиям окружающей среды, агрессивных сред, ударам, ионизирующим излучениям, магнитным полям.

Использование высоких технологий при производстве элементной базы радиоэлектронных устройств и средств вычислительной техники становится возможным благодаря не только созданию специальных производственных условий и разработке специализированного оборудования и оснастки, но и внедрению новых основных и вспомогательных материалов.

Особенностью производства радиоэлектронной аппаратуры является выпуск большой номенклатуры приборов, интегральных схем и радиоэлементов различного назначения в больших количествах и высокого качества, так как они служат элементной базой для многих изделий во всех областях техники.

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

Монтажник должен не только иметь соответствующую техническую подготовку, но и знать свойства используемых электрорадиоматериалов, так как без этого невозможно понять практические вопросы современного производства.

**ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СТРОЕНИИ МАТЕРИАЛОВ**

Электрорадиоматериалы обладают разнообразными свойствами, благодаря которым их применяют в изделиях радиоэлектронной аппаратуры. От этих свойств зависят такие процессы, протекающие в элементах радиоприборов, как передача, генерация, выпрямление и модуляция электрического тока, преобразование электрических сигналов в звуковые или световые и т. д. В зависимости от свойств электрорадиоматериалов изготавливают такие разные по функциональному назначению, конструктивному исполнению и размерам изделия, как провода, волноводы, трансформаторы, магниты, электронные лампы, лазеры и мазеры, приемники света, полупроводниковые интегральные схемы и т. д. Для правильного выбора и эффективного использования этих материалов необходимо знание не только их свойств, но и причин их разнообразия, которые связаны со строением вещества.

*Вещество* — это вид материи, обладающей массой покоя. В технике вместо понятия «вещество» используют понятие «материал». Техническое значение материалов зависит от их строения. Строение материалов характеризуется их структурой.

*Структура* — это совокупность устойчивых связей материала, обеспечивающих его целостность и сохранение основных свойств при внешних и внутренних изменениях. Особенности материалов выражаются в их свойствах.

*Свойство* — это философская категория, которая отражает различие или общность материалов и обнаруживается при их сравнении. Связь между структурой и свойствами материалов является предметом изучения материаловедения.

**1.1. Виды связи**

Все вещества состоят из атомов. *Атом* — это наименьшая частица химического элемента, обладающая его свойствами. Атом представляет собой систему, состоящую из положительно заряженного ядра, вокруг которого вращаются отрицательно заряженные электроны. Электроны притягиваются к ядру и отталкиваются друг от друга. Расположенные ближе к ядру электроны подвержены большему притяжению; они ослабляют притяжение внешних электронов, которые находятся на большем расстоянии от

ядра. Внешние электроны могут отрываться от одного атома и присоединяться к другому атому, изменяя число его внешних электронов. Такие электроны называются *валентными*. У разных веществ атомы содержат разное число валентных электронов. Атом, потерявший один или несколько электронов, становится положительно заряженным. Атом, который присоединил к себе свободные электроны, становится отрицательно заряженным. Образовавшиеся таким образом положительные и отрицательные частицы называются *ионами*.

Из атомов строятся молекулы. *Молекула* является наименьшей частицей вещества, которая сохраняет его химические свойства. В состав молекул входит от двух до многих сотен и тысяч атомов. Молекулы полимеров называются *макромолекулами*. Молекулы имеют размеры порядка  $10^{-1} \dots 10^6$  нм и находятся в непрерывном движении. Энергия молекулы складывается в основном из энергий ее поступательного движения и вращения, взаимодействия электронов и ядер, колебательного движения ядер. Структура молекулы каждого вещества не зависит от способа его получения. Молекулы изображают структурными формулами, которые отражают последовательность и порядок связей между атомами. Молекулы с одинаковой формулой могут различаться расположением атомов в пространстве.

Одинаковые по составу и молекулярной массе, но отличающиеся по строению и физическим и химическим свойствам химические соединения называются *изомерами*. Связи, благодаря которым происходит объединение атомов в молекулы, называются *химическими*.

Способность атомов вступать в соединения с атомами других веществ и образовывать молекулы определяет химические свойства вещества. Химические связи между атомами вещества подразделяются на ковалентные (атомные), ионные, металлические и молекулярные.

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

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

Если двухатомная молекула состоит из атомов различных элементов, то электронная пара может быть смещена к одному из атомов. В этом случае ковалентную связь называют *полярной*, а молекулы с полярной связью, у которых центры положительных