

УДК 621.38:620.22(075.8)  
ББК 32.85:30.3я73-1  
М268

Под общей редакцией  
доктора химических наук, профессора В. Ф. Маркова

Рецензенты

О. В. Бушкова, доктор химических наук,  
заведующая лабораторией источников тока  
(Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН);  
А. В. Шнайдер, кандидат технических наук, доцент,  
начальник кафедры пожарной автоматики  
(Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России)

**Марков, В. Ф.**

М268 Материалы современной электроники : [учеб. пособие] /  
В. Ф. Марков, Х. Н. Мухамедзянов, Л. Н. Маскаева ; [под общ.  
ред. В. Ф. Маркова] ; М-во образования и науки Рос. Федера-  
ции, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та,  
2014. – 272 с.

ISBN 978-5-7996-1186-6

Представлены общие сведения о материалах, используемых в современной электронике, и физике явлений, происходящих в проводниковых, полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалах. Рассмотрены электрические и магнитные свойства материалов. Показаны технологии производства важнейших материалов и их применение. Изложены физические принципы, положенные в основу материалов и технологий нанoeлектроники.

Пособие предназначено для студентов вузов, специализирующихся в области химической технологии материалов и изделий электронной техники.

УДК 621.38:620.22(075.8)  
ББК 32.85:30.3я73-1

© Уральский федеральный университет, 2014

© Марков В. Ф., Мухамедзянов Х. Н.,  
Маскаева Л. Н., 2014

ISBN 978-5-7996-1186-6

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>От авторов .....</b>	<b>8</b>
<b>1. Этапы развития электронной техники.</b>	
<b>Классификация материалов .....</b>	<b>9</b>
1.1. Развитие электроники .....	9
1.2. Классификация материалов .....	11
<b>2. Физические основы электронного материаловедения .....</b>	<b>16</b>
2.1. Основные типы взаимодействий между атомами .....	16
2.2. Виды химической связи в соединениях .....	17
2.2.1. Ионная связь .....	17
2.2.2. Ковалентная связь .....	18
2.2.3. Ван-дер-Ваальсова, или молекулярная, связь .....	21
2.2.4. Металлическая связь .....	22
2.3. Образование в твердом теле объемных разрешенных энергетических зон. Принцип Паули .....	23
2.4. Элементы зонной теории твердых тел .....	26
2.5. Влияние агрегатного состояния на электрические свойства веществ .....	29
2.6. Особенности строения твердых тел .....	30
<b>3. Проводящие материалы .....</b>	<b>34</b>
3.1. Физическая природа электропроводности металлов .....	34
3.2. Зависимость электропроводности металлов от температуры .....	37
3.3. Электрические свойства металлических сплавов .....	40
3.4. Сопротивление проводников на высоких частотах .....	41
3.5. Сопротивление тонких металлических пленок. Размерный эффект .....	42
3.6. Контактные явления в металлах .....	44
3.7. Медь .....	45
3.8. Алюминий .....	47
3.9. Сверхпроводящие металлы и сплавы .....	48

3.10. Специальные сплавы .....	51
3.11. Сплавы для термопар .....	52
3.12. Сплавы для корпусов приборов .....	52
3.13. Тугоплавкие металлы .....	53
3.14. Благородные металлы .....	55
3.15. Припои .....	56
3.16. Неметаллические проводящие материалы .....	57
<b>4. Полупроводники .....</b>	<b>58</b>
4.1 Классификация полупроводниковых материалов .....	58
4.2. Собственные и примесные полупроводники .....	60
4.3. Температурная зависимость концентрации носителей заряда .....	62
4.4. Подвижность носителей заряда в полупроводниках .....	63
4.5. Электрофизические явления в полупроводниках .....	64
4.5.1. Фотопроводимость .....	64
4.5.2. Люминесценция .....	66
4.5.3. Термоэлектродвижущая сила .....	67
4.5.4. Эффект Холла .....	67
4.5.5. Эффект Ганна .....	68
4.6. Кремний .....	68
4.6.1. Получение кремния .....	68
4.6.2. Свойства кремния .....	71
4.6.3. Марки кремния .....	72
4.7. Германий .....	74
4.7.1. Получение германия .....	74
4.7.2. Свойства германия .....	75
4.8. Карбид кремния .....	76
4.9. Полупроводниковые соединения $A^{III}B^V$ .....	77
4.10. Твердые растворы на основе соединений $A^{III}B^V$ .....	80
4.11. Полупроводниковые соединения $A^{II}B^{VI}$ и ТРЗ на их основе .....	83
4.12. Полупроводниковые соединения $A^{IV}B^{VI}$ и ТРЗ на их основе .....	85
<b>5. Диэлектрики .....</b>	<b>89</b>
5.1. Классификация и основные свойства диэлектриков .....	89
5.2. Электропроводность диэлектриков .....	95
5.3. Потери в диэлектриках .....	97
5.4. Пробой диэлектриков .....	99
5.5. Полимеры в электронной технике .....	103

5.6. Композиционные пластмассы и пластики .....	105
5.7. Электроизоляционные компаунды .....	106
5.8. Неорганические стекла .....	107
5.9. Ситаллы .....	109
5.10. Керамики .....	110
5.11. Активные диэлектрики .....	112
5.11.1. Сегнетоэлектрики .....	112
5.11.2. Пьезоэлектрики .....	115
5.11.3. Пироэлектрики. Пироэлектрический эффект .....	116
5.12. Электреты .....	117
5.13. Жидкие кристаллы .....	117
5.14. Материалы для твердотельных лазеров .....	120
<b>6. Магнитные материалы .....</b>	<b>121</b>
6.1. Классификация магнитных материалов .....	121
6.2. Магнитомягкие материалы .....	124
6.3. Магнитотвердые материалы .....	126
<b>7. Способы получения монокристаллических материалов .....</b>	<b>128</b>
7.1. Выращивание монокристаллов из расплавов .....	129
7.2. Выращивание монокристаллов из растворов .....	135
7.3. Выращивание монокристаллов из газовой среды .....	139
<b>8. Пленочные технологии .....</b>	<b>141</b>
8.1. Методы получения тонких пленок .....	141
8.2. Термическое вакуумное напыление .....	142
8.3. Катодное вакуумное распыление .....	149
8.4. Ионно-плазменное распыление .....	152
8.5. Магнетронное распыление .....	155
8.6. Лазерное распыление .....	156
8.7. Эпионные технологии .....	157
8.8. Эпитаксиальные процессы в технологии материалов электронной техники .....	158
8.8.1. Молекулярно-лучевая эпитаксия .....	160
8.8.2. Газофазная эпитаксия .....	162
8.8.3. Жидкофазная эпитаксия .....	163
8.8.4. Автоэпитаксия кремния .....	163
8.8.5. Гетероэпитаксия кремния .....	165

8.8.6. Эпитаксия полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$ и ТРЗ на их основе .....	166
8.8.7. Эпитаксия карбида кремния .....	169
8.9. Химические методы осаждения пленок .....	170
8.9.1. Электрохимическое осаждение .....	170
8.9.2. Анодное электрохимическое окисление .....	171
8.9.3. Пиролитическое осаждение .....	172
8.9.4. Химическая металлизация .....	172
8.9.5. Гидрохимическое осаждение .....	174
<b>9. Технологии подготовки и обработки полупроводниковых материалов .....</b>	<b>175</b>
9.1. Резка полупроводниковых материалов .....	175
9.2. Шлифование и полирование полупроводниковых пластин .....	178
9.3. Химическая обработка поверхности полупроводников .....	180
9.4. Методы очистки поверхности .....	184
9.5. Фотолитография (операции, материалы) .....	186
<b>10. Материалы нанoeлектроники: физические принципы, свойства, технологии .....</b>	<b>194</b>
10.1. Предпосылки перехода от микро- к нанoeлектронике .....	194
10.2. Понятие наноматериалов и их виды .....	196
10.3. Размерные эффекты .....	199
10.4. Внутренние размерные эффекты и их проявление .....	201
10.5. Изменение объемных свойств наноматериалов .....	209
10.5.1. Зависимость теплоемкости, параметров кристаллической решетки, температуры фазовых переходов от размера частиц .....	209
10.5.2. Электрические свойства наноматериалов .....	214
10.5.3. Магнитные и ферромагнитные характеристики наноматериалов .....	216
10.5.4. Оптические характеристики наносред .....	217
10.5.5. Механические характеристики дисперсных сред .....	218
10.5.6. Химические свойства наноматериалов .....	220
10.5.7. Нанокатализ .....	221
10.5.8. Биологически активные свойства наноматериалов ....	222
10.6. Методы получения наноматериалов .....	223
10.6.1. Методы механического диспергирования. Измельчение	224

10.6.2. Методы интенсивной пластической деформации.	
Механическое воздействие различных сред .....	226
10.6.3. Механохимический синтез .....	228
10.6.4. Детонационный синтез и электровзрыв .....	229
10.6.5. Методы физического диспергирования. Распыление расплавов. Метод испарения-конденсации .....	230
10.6.6. Вакуум-сублимационные технологии получения наноматериалов .....	236
10.6.7. Газофазный синтез .....	238
10.6.8. Плазмохимический синтез .....	242
10.6.9. Получение наноматериалов с использованием химических реакций .....	242
10.6.10. Термическое разложение и восстановление .....	245
10.6.11. Коллоидно-химическое осаждение .....	246
10.6.12. Электрохимический метод .....	246
10.6.13. Метод Ленгмюра – Блоджетт .....	247
10.6.14. Биологические методы получения наноразмерных материалов .....	248
10.6.15. Технологии получения консолидированных наноструктурных материалов .....	248
10.7. Методы исследования и аттестации наноматериалов .....	251
10.8. Технологии получения, функциональные свойства и применение изделий нанoeлектроники .....	257
10.8.1. Формирование квантовых точек посредством эпитаксии .....	257
10.8.2. Методы литографии .....	257
10.8.3. Методы получения нанотрубок .....	260
10.8.4. Формирование нанопроволок. Свойства и применение нанопроводов .....	261
10.8.5. Материалы и изделия нанoфотоники .....	262
10.9. Материалы и устройства молекулярной электроники .....	264
10.9.1. Молекулы-проводники и молекулы-изоляторы .....	264
10.9.2. Молекулы-диоды .....	265
10.9.3. Молекулы-транзисторы .....	265
10.9.4. Молекулярные элементы памяти .....	266
Список рекомендуемой литературы .....	268