

А. Н. ИГНАТОВ

# ОПТОЭЛЕКТРОНИКА И НАНОФОТОНИКА

*Рекомендовано Сибирским региональным отделением Учебно-методического объединения высших учебных заведений РФ по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации для межвузовского использования в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлениям подготовки «Электроника и наноэлектроника» и «Телекоммуникации»*



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ · МОСКВА · КРАСНОДАР  
2011

ББК 32.86я73

И 26

Игнатов А. Н.

**И 26** Оптоэлектроника и нанофотоника: Учебное пособие. — СПб.: Издательство «Лань», 2011. — 544 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

ISBN 978-5-8114-1136-8

Изложены физические основы работы оптоэлектронных и нанофотонных приборов, рассмотрены основные типы излучающих, фотоприемных и индикаторных приборов, а также вопросы применения оптоэлектронных приборов в аналоговых и цифровых устройствах.

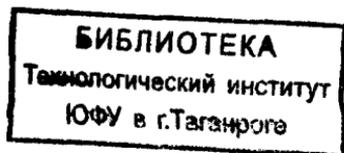
Основное внимание уделено полупроводниковым оптоэлектронным приборам, устройствам и системам, предназначенным для использования в микроэлектронной и наноэлектронной аппаратуре инфокоммуникационных систем. Пособие ориентировано на студентов технических специальностей вузов телекоммуникаций и информатики, а также родственных вузов, где изучаются курсы «Физика», «Физические основы электроники», «Электроника», «Приборы СВЧ и оптического диапазона», «Квантовая и оптическая электроника», и студентов всех форм обучения направлений «Радиотехника», «Проектирование и технологии радиоэлектронных средств», «Телекоммуникации» и «Нанотехнология».

ББК 32.86я73

**Рецензенты:**

**В. И. СЕРЫХ** — кандидат технических наук, доцент НГТУ;  
**А. М. КОПЫЛОВ** — кандидат технических наук, доцент МТУСИ

528.594



Обложка  
Л. А. АРНДТ

*Охраняется законом РФ об авторском праве.  
Воспроизведение всей книги или любой ее части  
запрещается без письменного разрешения издателя.  
Любые попытки нарушения закона  
будут преследоваться в судебном порядке.*

© Издательство «Лань», 2011  
© А. Н. Игнатов, 2011  
© Издательство «Лань»,  
художественное оформление, 2011

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	5
Введение .....	6
 <i>Глава 1</i>	
Введение в оптоэлектронику .....	7
1.1. Введение в волоконную оптику .....	7
1.2. Особенности оптической электроники .....	9
1.3. История развития оптоэлектроники .....	12
1.4. Современное состояние оптоэлектронной элементной базы .....	17
1.5. Система обозначений оптоэлектронных приборов индикации .....	19
1.6. Система обозначений фотоприемных приборов и оптронов .....	20
<i>Тестовые вопросы к главе 1</i>	
«Введение в оптоэлектронику» .....	21
 <i>Глава 2</i>	
Физические основы оптоэлектроники .....	22
2.1. Различие фотометрических и энергетических характеристик .....	22
2.2. Фотометрические характеристики оптического излучения .....	23
2.2.1. Функция видности и ее зависимость от длины электромагнитной волны .....	23
2.2.2. Телесный угол, световой поток и механический эквивалент света .....	24
2.2.3. Сила света ( $I_V$ ) .....	25
2.2.4. Освещенность поверхности ( $E$ ) .....	26
2.2.5. Закон освещенности .....	26
2.2.6. Светимость излучающей поверхности ( $M$ ) .....	26
2.2.7. Яркость светящейся поверхности ( $L$ ) .....	27
2.2.8. Закон Ламберта .....	27
2.2.9. Световая экспозиция ( $H_V$ ) .....	28
2.3. Энергетические характеристики оптического излучения .....	28
2.3.1. Энергетическая экспозиция ( $H_e$ ) .....	28
2.3.2. Поток излучения ( $\Phi_e$ ) .....	28

2.3.3. Энергетическая светимость (интегральная излучательная способность $M_e$ )	29
2.3.4. Облученность поверхности ( $E_e$ )	29
2.4. Энергетические и световые параметры	29
2.5. Колориметрические параметры	30
2.6. Когерентность оптического излучения	33
2.6.1. Монохроматическая электромагнитная волна	33
2.6.2. Особенности излучения электромагнитных волн в ультрафиолетовом (УФ), видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах	34
2.6.3. Взаимосвязь $\tau_k$ и $l_k$ с реальными параметрами оптического излучения	36
2.7. Квантовые переходы и вероятности излучательных переходов	36
2.7.1. Энергетические уровни и квантовые переходы	36
2.7.2. Спонтанные переходы	38
2.7.3. Вынужденные переходы	39
2.7.4. Соотношения между коэффициентами Эйнштейна	41
2.7.5. Релаксационные переходы	42
2.8. Ширина спектральной линии	43
2.9. Использование вынужденных переходов для усиления электромагнитного поля	46
2.10. Механизм генерации излучения в полупроводниках	50
2.11. Прямозонные и непрямозонные полупроводники	54
2.12. Внешний квантовый выход и потери излучения	58
2.13. Излучатели на основе гетероструктур	61
2.14. Поглощение света в твердых телах	63
2.15. Типы переходов и характеристики излучающих полупроводниковых структур	67
2.16. Параметры оптического излучения	71
<i>Тестовые вопросы к главе 2</i>	
«Физические основы оптоэлектроники»	73

### Глава 3

Оптические волноводы	74
3.1. Абсолютный показатель преломления	74
3.2. Законы отражения и преломления света	74
3.2.1. Общие положения	74
3.2.2. Условие полного внутреннего отражения света от границы раздела двух сред	75
3.3. Конструкция планарного симметричного оптического волновода	76
3.4. Эффект Гуса–Хенхена	76
3.5. Условие поперечного резонанса для планарного волновода	78
3.6. Мода оптического излучения	79
3.7. Конструкция цилиндрического диэлектрического волновода — стекловолокна (СВ)	79
3.8. Номинальная числовая апертура стекловолокна	80
3.9. Квантование углов $\phi$ и $\gamma$ в стекловолокне	81
3.10. Уширение импульсных сигналов в стекловолокне	82

3.10.1. Уширение импульсного оптического сигнала, обусловленное расходимостью светового пучка . . . . .	82
3.10.2. Уширение импульсного оптического сигнала, обусловленное материальной дисперсией . . . . .	83
3.11. Свойства градиентных световолокон . . . . .	85
3.11.1. Рефракция света в световолокне . . . . .	85
3.11.2. Градиентные световолокна как способ понижения межмодовой дисперсии . . . . .	85
3.12. Стационарное волновое уравнение электрической компоненты поля $E$ световой волны и его решение . . . . .	88
3.13. Предельное число мод, способных распространяться по световолокнам . . . . .	89
3.14. Виды потерь оптических сигналов в световолокнах . . . . .	90
3.14.1. Потери, обусловленные материальной дисперсией . . . . .	90
3.14.2. Потери, связанные с рэлеевским рассеянием света в световолокне . . . . .	92
3.14.3. Потери, обусловленные наличием гидроксильных групп ОН в световолокнах . . . . .	92
3.14.4. Потери за счет комбинационного рассеяния света . . . . .	93
3.14.5. Потери, связанные с изгибом световолокон . . . . .	96
3.14.6. Термомеханические потери . . . . .	96
3.14.7. Дифракционные потери . . . . .	96
3.14.8. Оценка полных потерь оптического излучения в световолокнах . . . . .	97
3.15. Влияние оптического волокна на характеристики сетей связи . . . . .	100
3.16. Фотонно-кристаллическое волокно . . . . .	102
3.17. Сравнительная характеристика коаксиальных медных кабелей и световолокон . . . . .	104
3.18. Разрушение волоконных световодов под действием лазерного излучения . . . . .	105
<i>Тестовые вопросы к главе 3</i>	
«Оптические волноводы» . . . . .	106

## Глава 4

<b>Приборы некогерентного излучения . . . . .</b>	<b>107</b>
4.1. Источники искусственного света . . . . .	107
4.2. Основные характеристики и параметры светодиодов . . . . .	108
4.2.1. Параметры светодиодов . . . . .	108
4.2.2. Характеристики светодиодов . . . . .	113
4.2.3. Определение и оценка параметров светодиодов . . . . .	114
4.2.4. Схемы возбуждения, обеспечивающие высокую световую эффективность светодиодов . . . . .	117
4.2.5. Влияние температуры на параметры СИД . . . . .	118
4.2.6. Срок службы СИД . . . . .	118
4.2.7. Ограничение тока СИД . . . . .	119
4.2.8. Достоинства твердотельных излучателей . . . . .	120
4.3. Конструкции светодиодов . . . . .	120
4.4. Основные схемы возбуждения светодиодов . . . . .	121
4.5. Выбор типа светодиода . . . . .	123

4.5.1. Основы выбора типа светодиода .....	123
4.5.2. Памятка разработчику электронной аппаратуры с использованием СИД .....	125
4.6. Электрическая модель светодиода .....	126
4.7. Светодиоды инфракрасного излучения .....	128
4.8. Светодиодные источники повышенной яркости и белого света .....	129
<i>Тестовые вопросы к главе 4</i>	
«Приборы некогерентного излучения» .....	135

## Глава 5

<b>Приборы когерентного излучения .....</b>	<b>137</b>
5.1. Физические основы усиления и генерации лазерного излучения .....	137
5.2. Структурная схема лазера .....	140
5.3. Лазеры на основе кристаллических диэлектриков .....	145
5.4. Жидкостные лазеры .....	147
5.5. Газовые лазеры .....	150
5.6. Устройство и принцип действия полупроводникового инжекционного монолазера .....	152
5.7. Устройство и принцип действия полупроводниковых лазеров с гетероструктурами .....	154
5.8. Волоконно-оптические усилители и лазеры .....	159
5.8.1. Волоконные усилители .....	159
5.8.2. Волоконные лазеры .....	160
5.8.3. Волоконные лазеры на основе вынужденного комбинационного рассеяния .....	161
5.9. Светоизлучающие диоды для волоконно-оптических систем .....	164
5.10. Сравнительная характеристика лазеров и светодиодов .....	169
<i>Тестовые вопросы к главе 5</i>	
«Приборы когерентного излучения» .....	171

## Глава 6

<b>Полупроводниковые фотоприемные приборы .....</b>	<b>173</b>
6.1. Принцип работы фотоприемных приборов .....	173
6.2. Характеристики, параметры и модели фотоприемников .....	176
6.2.1. Характеристики фотоприемников .....	176
6.2.2. Параметры фотоприемников .....	177
6.2.3. Параметры фотоприемника как элемента оптопары .....	178
6.2.4. Глаз как фотоприемник с уникальными свойствами .....	179
6.2.5. Шумовые параметры фотоприемников .....	180
6.2.6. Электрические модели фотоприемников .....	183
6.2.7. Шумовые модели фотоприемников .....	185
6.3. Фотодиоды на основе $p-n$ -перехода .....	188
6.4. Фотодиоды с $p-i-n$ -структурой .....	191
6.5. Фотодиоды Шоттки .....	193
6.6. Фотодиоды с гетероструктурой .....	196
6.7. Лавинные фотодиоды .....	197
6.8. Фототранзисторы .....	199

6.9. Фототиристоры .....	202
6.10. Фоторезисторы .....	203
6.11. Основные характеристики и параметры фоторезистора .....	206
6.12. ПЗС-приемные фотоприборы .....	208
6.13. Фотодиодные СВИС на основе МОП-транзисторов .....	210
6.14. Пиротехнические фотоприемники .....	214
<i>Тестовые вопросы к главе 6</i>	
«Полупроводниковые фотоприемные приборы» .....	217
 <b>Глава 7</b>	
<b>Оптроны</b> .....	219
7.1. Устройство и принцип действия оптронов .....	219
7.2. Структурная схема оптрона .....	222
7.3. Классификация и параметры оптронов .....	224
7.4. Электрическая модель оптрона .....	227
7.5. Резисторные оптопары .....	229
7.6. Диодные оптопары .....	231
7.7. Транзисторные оптопары .....	232
7.8. Тиристорные оптопары .....	234
<i>Тестовые вопросы к главе 7</i>	
«Оптроны» .....	236
 <b>Глава 8</b>	
<b>Индикаторные приборы</b> .....	238
8.1. Жидкокристаллические индикаторы .....	238
8.1.1. Общие сведения .....	238
8.1.2. Ячейки на основе эффекта динамического рассеяния (ДР-ячейки) .....	241
8.1.3. Ячейки на основе твист-эффекта .....	242
8.1.4. Основные типы и параметры ЖКИ .....	244
8.1.5. Схемы включения ЖКИ .....	249
8.1.6. Схемы управления многорядными индикаторами .....	252
8.2. Электролюминесцентные индикаторы (ЭЛИ) .....	255
8.2.1. Устройство и принцип действия ЭЛИ .....	255
8.2.2. Типы и параметры ЭЛИ .....	256
8.2.3. Схемы включения ЭЛИ .....	257
8.3. Плазменные панели и устройства на их основе .....	259
8.4. Электрохромные индикаторы .....	263
8.5. Отображение информации индикаторными приборами .....	265
<i>Тестовые вопросы к главе 8</i>	
«Индикаторные приборы» .....	268
 <b>Глава 9</b>	
<b>Применение оптоэлектронных приборов</b> .....	270
9.1. Устройство и принцип действия оптоэлектронных генераторов .....	270
9.1.1. Блокинг-генератор .....	270
9.1.2. Генератор линейно изменяющегося напряжения .....	272
9.1.3. Генератор с мостом Вина .....	273

9.2. Применение оптоэлектронных приборов в аналоговых ключах и регуляторах .....	274
9.3. Применение оптронов для выполнения логических функций .....	276
9.4. Применение оптронов как аналогов электрорадиокомпонентов .....	278
9.5. Устройство и принцип действия оптоэлектронных усилителей .....	280
9.6. Устройство и принцип действия оптоэлектронных цифровых ключей .....	281
9.7. Применение оптоэлектронных приборов для измерения высоких напряжений и управления устройствами большой мощности .....	284
9.8. Принцип действия оптических устройств записи информации .....	286
9.9. Принцип лазерно-оптического считывания информации .....	289
9.10. Принципы цифровой оптической записи и воспроизведения информации с компакт-дисков .....	291
9.10.1. Устройство компакт-диска .....	291
9.10.2. Запись на компакт-диски .....	292
9.10.3. Отличие дисков CD-R/CD-RW от штампованных .....	294
9.10.4. Маркировка дисков .....	295
9.10.5. Надежность дисков CD-R/RW в сравнении со штампованными .....	296
9.10.6. Изготовление и тиражирование компакт-дисков .....	297
9.10.7. Воспроизведение компакт-диска .....	299
9.10.8. Устройство накопителей на CD-ROM .....	301
9.10.9. Представление и параметры звукового сигнала на CD .....	303
9.10.10. Джиттер .....	306
9.11. Оптоэлектронные сенсорные системы взаимодействия человека с электронной техникой .....	307
<i>Тестовые вопросы к главе 9</i>	
«Применение оптоэлектронных приборов» .....	317

## Глава 10

<b>Волоконно-оптические системы связи .....</b>	<b>319</b>
10.1. Общие сведения .....	319
10.2. Волоконно-оптические системы распределения .....	320
10.2.1. Классификация волоконно-оптических систем распределения .....	320
10.2.2. Схемы волоконно-оптических систем распределения .....	321
10.3. Оптические передатчики .....	323
10.4. Приемники волоконно-оптических систем связи .....	327
10.4.1. Приемники оптического излучения .....	327
10.4.2. Приемные оптоэлектронные модули .....	332
10.5. Цифровые волоконно-оптические системы связи .....	334
10.6. Аналоговые волоконно-оптические системы связи .....	347
10.7. «Умные» соединители на основе смартлинков .....	348

10.7.1. Технические решения смартлинков . . . . .	348
10.7.2. Самоформирующиеся компьютеры . . . . .	356
10.7.3. Оптоволоконные нейроинтерфейсы . . . . .	357
10.8. Волоконно-оптические технологии для сетей доступа . . . . .	359
10.8.1. Общие сведения . . . . .	359
10.8.2. Тенденции мирового развития сетей доступа . . . . .	360
10.8.3. Технологии оптических сетей доступа . . . . .	362
10.8.4. Категории оптических сетей доступа . . . . .	365
10.8.5. Волокно до бизнеса — FTTBusiness . . . . .	367
10.8.6. Волокно до дома — FTTH . . . . .	367
10.8.7. Волокно до многоквартирного дома — FTTB . . . . .	372
10.8.8. Волокно до сельского района . . . . .	375
<i>Тестовые вопросы к главе 10</i>	
«Волоконно-оптические системы связи» . . . . .	376

## Глава 11

<b>Физические основы нанофотоники . . . . .</b>	<b>377</b>
11.1. Введение в нанофотонику . . . . .	377
11.2. Классификация низкоразмерных объектов . . . . .	382
11.3. Квантовые эффекты в полупроводниках . . . . .	383
11.4. Оптические свойства наноматериалов . . . . .	386
11.4.1. Общие сведения . . . . .	386
11.4.2. Оптические свойства металлических нанокластеров . . . . .	391
11.4.3. Оптические свойства полупроводниковых нанокластеров . . . . .	393
11.4.4. Фотонные нанокристаллы . . . . .	396
11.4.5. Оптические свойства квантовых ям . . . . .	398
11.4.6. Оптические свойства квантовых точек . . . . .	401
11.5. Использование квантово-размерных эффектов для разработок лазеров . . . . .	404
<i>Тестовые вопросы к главе 11</i>	
«Физические основы нанофотоники» . . . . .	407

## Глава 12

<b>Нанофотонные приборы, устройства и системы . . . . .</b>	<b>408</b>
12.1. Общие сведения . . . . .	408
12.2. Нанoeлектронные лазеры . . . . .	409
12.2.1. Нанoeлектронные лазеры с горизонтальными резонаторами . . . . .	409
12.2.2. Нанoeлектронные лазеры с вертикальными резонаторами . . . . .	411
12.2.3. Оптические модуляторы . . . . .	417
12.3. Нанoeлектронные устройства и системы на основе жидких кристаллов . . . . .	419
12.3.1. Общие сведения . . . . .	419
12.3.2. Электрооптический модулятор . . . . .	423
12.3.3. Светоклапанные модуляторы . . . . .	425
12.3.4. Плоские телевизоры, дисплеи и светоклапанные модуляторы видеопроекторов . . . . .	425

12.3.5. Жидкокристаллические дисплеи широкого применения . . . . .	429
12.4. Излучающие приборы на основе органических наноматериалов . . . . .	432
12.4.1. Общие сведения . . . . .	432
12.4.2. Органические светодиоды . . . . .	433
12.4.3. Технологии получения органических светодиодов . . . . .	439
12.4.4. Получение цветного изображения в OLED-дисплеях . . . . .	442
12.4.5. Использование MEMS-ключей вместо транзисторов в AMOLED . . . . .	444
12.4.6. Состояние разработок устройств и систем на основе органических светодиодов . . . . .	446
12.5. Источники света на основе эффекта автоэмиссии углеродных волокон . . . . .	450
12.5.1. Общие сведения . . . . .	450
12.5.2. Катодолюминесцентные дисплеи с автоэлектронными эмиттерами . . . . .	454
12.6. Фотоприемные наноэлектронные приборы . . . . .	459
12.6.1. Фотоприемники на квантовых ямах . . . . .	459
12.6.2. Фотоприемники на основе квантовых точек . . . . .	462
12.7. Фотоматрицы широкого применения . . . . .	467
12.7.1. Общие сведения . . . . .	467
12.7.2. Характеристики матриц . . . . .	468
12.7.3. Типы матриц по применяемой технологии . . . . .	471
12.7.4. Методы получения цветного изображения в фотоматрицах . . . . .	471
12.8. Лазерный микропроектор со спиральной разверткой для мобильных устройств . . . . .	473
12.9. Квантовая нанотехнология и ее продукция . . . . .	474
12.9.1. Общие сведения . . . . .	474
12.9.2. Разработки квантовых компьютеров . . . . .	476
12.9.3. Разработки в квантовой криптографии . . . . .	483
<i>Тестовые вопросы к главе 12</i>	
«Нанофотонные приборы, устройства и системы» . . . . .	486
<b>Ответы на тестовые вопросы . . . . .</b>	<b>487</b>
<b>Приложения . . . . .</b>	<b>489</b>
<b>Список использованной литературы . . . . .</b>	<b>526</b>