

621.38(075)

И 265

Игнатов А. Н.

Оптоэлектроника и нанофотоника : учеб. пособие для вузов / А. Н. Игнатов. – Санкт-Петербург : Лань, 2011. – 538 с. : ил. – ISBN 9785811411368.

| | |
|--|----|
| 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 (Φ_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 τ_k и $\tau_{\text{к}}$ 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 φ и γ 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 стекловолокна 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 стекловолокнам | 89 |
| 3.14.Виды потерь оптических сигналов в стекловолокнах | 90 |
| 3.14.1.Потери, обусловленные материальной дисперсией | 90 |
| 3.14.2.Потери, связанные с рэлеевским рассеянием света в стекловолокне | 92 |
| 3.14.3.Потери, обусловленные наличием гидроксильных групп ОН в стекловолокнах | 92 |
| 3.14.4.Потери за счет комбинационного рассеяния света | 93 |
| 3.14.5.Потери, связанные с изгибом стекловолокон | 96 |
| 3.14.6.Термомеханические потери | 96 |
| 3.14.7.Дифракционные потери | 96 |
| 3.14.8.Оценка полных потерь оптического излучения в стекловолокнах | 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 стекловолокон | 104 |
| 3.18. Разрушение волоконных световодов под действием лазерного излучения | 105 |
| <i>Тестовые вопросы к главе 3</i> | |
| «Оптические волноводы» | 106 |
| <i>Глава 4</i> | |
| Приборы некогерентного излучения | 107 |
| 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 |
| <i>Глава 5</i> | |
| Приборы когерентного излучения | 137 |
| 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 |
| <i>Глава 6</i> | |
| Полупроводниковые фотоприемные приборы | 173 |

| | |
|---|-----|
| 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 <i>p-n</i> -перехода | 188 |
| 6.4. Фотодиоды с <i>p-i-n</i> -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 СБИС на основе МОП-транзисторов | 210 |
| 6.14. Пиротехнические фотоприемники | 214 |
| <i>Тестовые вопросы к главе 6</i> | |
| «Полупроводниковые фотоприемные приборы» | 217 |
| <i>Глава 7</i> | |
| Оптроны | 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 |
| <i>Глава 8</i> | |
| Индикаторные приборы | 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 многоразрядными 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 |
| Глава 9 | |
| Применение оптоэлектронных приборов | 270 |
| 9.1. Устройство и принцип действия оптоэлектронных генераторов | 270 |
| 9.1.1. Блокинг-генератор | 070 |
| 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 | |
| Волоконно-оптические системы связи | 319 |
| 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

| | |
|---|-----|
| Физические основы нанофотоники..... | 377 |
| 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

| | |
|--|-----|
| Нанофотонные приборы, устройства и системы..... | 408 |
| 12.1. Общие сведения | 408 |
| 12.2. Нанозлектронные лазеры..... | 409 |
| 12.2.1. Нанозлектронные лазеры с горизонтальными резонаторами..... | 409 |
| 12.2.2. Нанозлектронные лазеры с вертикальными резонаторами | 411 |
| 12.2.3. Оптические модуляторы..... | 417 |
| 12.3. Нанозлектронные 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 видеопрокторов..... | 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 нанозлектронные 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> | |
| «Нанопотонные приборы, устройства и системы» | 486 |
| Ответы на тестовые вопросы..... | 487 |
| Приложения..... | 489 |
| Список использованной литературы | 526 |