

Ю. Н. КУЛЬЧИН

СОВРЕМЕННАЯ  
ОПТИКА  
И ФОТОНИКА  
НАНО-  
И МИКРОСИСТЕМ



Ю. Н. КУЛЬЧИН

**СОВРЕМЕННАЯ  
ОПТИКА  
И ФОТОНИКА  
НАНО-  
И МИКРОСИСТЕМ**



МОСКВА  
ФИЗМАТЛИТ®  
2016

УДК 537.533.3: 621.3.049.76

ББК 22.3

К 90

Кульчин Ю. Н. **Современная оптика и фотоника нано- и микросистем.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. — 440 с. — ISBN 978-5-9221-1646-6.

Рассматриваются современные достижения в области исследования процессов линейного и нелинейного распространения непрерывного и импульсного лазерного излучения в объемных и фотонно-кристаллических средах. Приводятся результаты исследования и особенности функционирования волоконных лазеров, создаваемых живой природой фотонно-кристаллических объектов, а также фотонных информационных систем, основанных на применении динамических голографических фильтров. Дано описание распределенных волоконно-оптических измерительных систем, перспективных для создания систем мониторинга. Изложены физические основы сверхнизкого лазерного охлаждения атомов и рассмотрены области его практического применения. Развита теория оптических и нелинейно-оптических свойств гетерогенных наноструктурированных систем и приведены результаты их экспериментального исследования.

Книга рассчитана на широкий круг специалистов, занимающихся вопросами фотоники и нанофотоники, оптической обработки информации, оптических измерений и нанотехнологий, а также может быть полезна студентам и аспирантам соответствующих направлений подготовки.

ISBN 978-5-9221-1646-6

© ФИЗМАТЛИТ, 2016

© Ю. Н. Кульчин, 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |           |
|--|-----------|
| Введение . . . . .   | 9         |
| <b>Глава 1. Основы нелинейной оптики . . . . .</b>   | <b>11</b> |
| Введение . . . . .   | 11        |
| 1.1. Поляризация диэлектриков в постоянном электрическом поле . . . . .  | 17        |
| 1.2. Поляризация изотропного диэлектрика в световом поле . . . . .   | 20        |
| 1.3. Взаимодействие интенсивных электромагнитных волн с нелинейной средой . . . . .  | 24        |
| 1.3.1. Генерация второй гармоники . . . . .  | 26        |
| 1.3.2. Условие фазового синхронизма . . . . .  | 27        |
| 1.3.3. Генерация второй оптической гармоники (ГВГ) . . . . .   | 29        |
| 1.4. Эффект Керра в нелинейной среде . . . . .   | 32        |
| 1.4.1. Статический эффект Керра . . . . .  | 32        |
| 1.4.2. Динамический (оптический) эффект Керра . . . . .  | 34        |
| 1.5. Керровская самофокусировка света в нелинейной среде . . . . .   | 35        |
| 1.6. Плазменная самофокусировка . . . . .  | 40        |
| 1.7. Фазовая самомодуляция светового излучения . . . . .   | 41        |
| Список литературы к гл. 1 . . . . .  | 43        |
| <b>Глава 2. Явления филаментации и генерации суперконтинуума при распространении лазерных импульсов в нелинейной среде . . . . .</b> | <b>44</b> |
| Введение . . . . .   | 44        |
| 2.1. Генерация суперконтинуума при распространении импульсного излучения в конденсированных средах . . . . .                         | 46        |
| 2.2. Филаментация импульсного излучения в газообразных средах . . . . .  | 62        |
| 2.3. Филаментация лазерного излучения в атмосфере . . . . .  | 67        |
| Список литературы к гл. 2 . . . . .  | 70        |
| <b>Глава 3. Фотонные кристаллы . . . . .</b>   | <b>73</b> |
| Введение . . . . .   | 73        |
| 3.1. Запрещенные зоны фотонных кристаллов . . . . .  | 73        |
| 3.2. Дефекты в фотонных кристаллах . . . . .   | 82        |
| 3.3. Фотонно-кристаллические волоконные световоды . . . . .  | 89        |

|   |            |
|---|------------|
| 3.3.1. Брэгговские волоконные световоды . . . . .   | 92         |
| 3.3.2. 2D-фотонно-кристаллические волоконные световоды . . . . .  | 95         |
| Список литературы к гл. 3. . . . .  | 102        |
| <b>Глава 4. Нелинейная оптика волоконных световодов . . . . .</b>   | <b>104</b> |
| Введение . . . . .  | 104        |
| 4.1. Нелинейно-оптические процессы в волоконных световодах . . . . .  | 104        |
| 4.2. Волноводное усиление эффективности нелинейно-оптических процессов в волоконных световодах . . . . .  | 107        |
| 4.3. Фазовая самомодуляция излучения в волоконных световодах . . . . .  | 109        |
| 4.4. Влияние дисперсии на нелинейные процессы в волоконных световодах . . . . .   | 112        |
| 4.5. Фазовая кросс-модуляция импульсов в волоконных световодах . . . . .  | 115        |
| 4.6. Четырехволновое смешение волн . . . . .  | 117        |
| 4.7. Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) излучения в волоконных световодах . . . . .   | 119        |
| 4.8. Вынужденное рассеяние Манделъштама–Бриллюэна в волоконных световодах . . . . .   | 123        |
| 4.9. Распространение ультракоротких лазерных импульсов в волоконных световодах . . . . .  | 126        |
| 4.9.1. Накачка в области нормальной дисперсии . . . . .   | 128        |
| 4.9.2. Накачка в области аномальной дисперсии . . . . .   | 133        |
| 4.10. Генерация суперконтинуума в волоконных световодах . . . . .   | 136        |
| 4.11. Нелинейные свойства фотонно-кристаллических волоконных световодов . . . . .   | 138        |
| 4.11.1. Дисперсионные свойства микроструктурированных волоконных световодов . . . . .   | 141        |
| 4.11.2. Генерация суперконтинуума в МС-волоконных световодах, для которых длина волны импульса накачки лежит в области аномальной дисперсии . . . . . | 146        |
| 4.11.3. Генерация суперконтинуума в МС-волоконных световодах при накачке в области нормальной дисперсии . . . . .                                     | 158        |
| 4.11.4. Генерация суперконтинуума в МС-волоконных световодах, имеющих две длины волны нулевой дисперсии . . . . .                                     | 161        |
| 4.11.5. Нелинейно-оптические свойства дырчатых ФК-волоконных световодов . . . . .   | 167        |
| Список литературы к гл. 4. . . . .  | 171        |
| <b>Глава 5. Волоконные лазеры . . . . .</b>   | <b>173</b> |
| Введение . . . . .  | 173        |
| 5.1. Принцип работы волоконного лазера . . . . .  | 175        |
| 5.1.1. Активные волоконные световоды . . . . .  | 175        |
| 5.1.2. Резонаторы волоконных лазеров . . . . .  | 182        |
| 5.1.2.1. Резонаторы типа Фабри–Перо . . . . .   | 182        |

|   |     |
|---|-----|
| 5.1.2.2. Кольцевые волоконные резонаторы . . . . .  | 184 |
| 5.1.2.3. Резонатор на основе волоконных брэгговских решеток . . . . .   | 184 |
| 5.1.3. Особенности активных световодов как среды усиления излучения . . . . .   | 187 |
| 5.2. Непрерывные волоконные лазеры . . . . .  | 188 |
| 5.2.1. Волоконные лазеры на основе активных световодов, легированных ионами неодима ( $\text{Nd}^{3+}$ ) . . . . .            | 189 |
| 5.2.2. Лазеры на основе активных световодов, легированных ионами иттербия ( $\text{Yb}^{3+}$ ) . . . . .                      | 191 |
| 5.2.3. Волоконные лазеры на основе активных волоконных световодов, легированных ионами эрбия ( $\text{Er}^{3+}$ ) . . . . .   | 192 |
| 5.2.4. Волоконные лазеры на основе активных волоконных световодов, легированных ионами тулия ( $\text{Tm}^{3+}$ ) . . . . .   | 193 |
| 5.2.5. Волоконные лазеры на основе активных волоконных световодов, легированных ионами гольмия ( $\text{Ho}^{3+}$ ) . . . . . | 194 |
| 5.3. Волоконные лазеры на основе вынужденного комбинационного рассеяния излучения (волоконные ВКР-лазеры) . . . . .           | 195 |
| 5.3.1. Явление ВКР-рассеяния излучения в волоконных световодах . . . . .  | 196 |
| 5.3.2. Волоконные ВКР-лазеры . . . . .  | 200 |
| 5.3.2.1. Однокаскадные ВКР-лазеры . . . . .   | 200 |
| 5.3.2.2. Многокаскадные ВКР-лазеры . . . . .  | 202 |
| 5.3.2.3. Составные ВКР-лазеры . . . . .   | 203 |
| 5.3.2.4. Волоконные ВКР-лазеры со случайной распределенной обратной связью . . . . .  | 204 |
| 5.4. Импульсные волоконные лазеры . . . . .   | 210 |
| 5.4.1. Методы получения импульсного излучения волоконных лазеров . . . . .  | 210 |
| 5.4.1.1. Модуляция добротности волоконных лазеров . . . . .   | 210 |
| 5.4.1.2. Генерация импульсного излучения за счет синхронизации мод волоконного лазера . . . . .                               | 213 |
| 5.4.2. Компенсация дисперсионного расплывания импульсов в волоконных лазерах . . . . .  | 232 |
| 5.4.2.1. Призмённые компенсаторы дисперсии групповой скорости . . . . .   | 236 |
| 5.4.2.2. Решеточный компенсатор дисперсии групповой скорости . . . . .  | 239 |
| 5.4.2.3. Компенсатор дисперсии групповой скорости на основе интерферометра Жира-Турнуа . . . . .                              | 240 |
| 5.4.2.4. Компенсаторы дисперсии групповой скорости на основе чирпированных брэгговских зеркал . . . . .                       | 242 |
| 5.4.3. Усиление УКИ в волоконных лазерах . . . . .  | 249 |
| Список литературы к гл. 5. . . . .  | 251 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Глава 6. Фотоника наноструктурированных биоминеральных объектов и их биомиметических аналогов</b> . . . . .                            | 255 |
| Введение . . . . .  | 255 |
| 6.1. Морфология и физико-химические характеристики спикул глубоководных стеклянных морских губок . . . . .                                | 258 |
| 6.2. Роль фотонно-кристаллических свойств спикул глубоководных морских губок в процессе их метаболизма . . . . .                          | 265 |
| 6.3. Нелинейно-оптические свойства спикул глубоководных стеклянных морских губок . . . . .  | 268 |
| 6.4. Биомиметическое моделирование биосиликатного нанокompозитного материала спикул ГСМГ . . . . .  | 271 |
| 6.4.1. Золь-гель технологии химического моделирования биоминеральных нанокompозитных материалов и его оптические характеристики . . . . . | 271 |
| 6.4.2. 2-D и 3-D биомиметические нанокompозитные биоминеральные структуры для фотоники, биомедицины, катализа и сорбции . . . . .         | 274 |
| 6.5. Биосилификация в живых системах с использованием клонированных белков силикатеинов . . . . .   | 279 |
| Список литературы к гл. 6. . . . .  | 282 |
| <b>Глава 7. Динамическая голография и оптические Novelty-фильтры</b> . . . . .  | 285 |
| Введение . . . . .  | 285 |
| 7.1. Процесс взаимодействия двух плоских волн на динамических голограммах в фоторефрактивных кристаллах . . . . .                         | 287 |
| 7.2. Передаточная характеристика оптического Novelty-фильтра . . . . .  | 291 |
| 7.3. Особенности функционирования оптических Novelty-фильтров . . . . .   | 294 |
| 7.3.1. Низкочастотный и высокочастотный Novelty-фильтры . . . . .   | 294 |
| 7.3.2. Полосовой Novelty-фильтр . . . . .   | 296 |
| 7.4. Novelty-фильтры, основанные на использовании явления фанинга в фоторефрактивных кристаллах . . . . .                                 | 298 |
| 7.4.1. Функциональные Novelty-фильтры для обработки изображений на основе эффекта фанинга . . . . .                                       | 299 |
| 7.4.2. Высокочастотные корреляционные Novelty-фильтры реально-го времени . . . . .  | 302 |
| Список литературы к гл. 7. . . . .  | 305 |
| <b>Глава 8. Адаптивные оптоэлектронные системы SMART ГРИД-мониторинга физических полей и объектов</b> . . . . .                           | 308 |
| Введение . . . . .  | 308 |
| 8.1. Томографические РВОИС для реконструкции распределений скалярных и векторных физических полей . . . . .                               | 311 |
| 8.2. Протяженные ВОИЛ на основе ОМИ и методы адаптивной пространственной фильтрации . . . . .   | 316 |

|  |            |
|--|------------|
| 8.3. Методы мультиплексирования волоконно-оптических измерительных линий в СМАРТ ГРИД-системах мониторинга . . . . . | 320        |
| 8.3.1. Пространственное мультиплексирование . . . . .  | 324        |
| 8.3.2. Угловое мультиплексирование . . . . .   | 327        |
| 8.3.3. Спектральное мультиплексирование . . . . .  | 331        |
| Список литературы к гл. 8. . . . .   | 336        |
| <b>Глава 9. Лазерное охлаждение, пленение и управление атомами</b> . . . . .   | <b>342</b> |
| Введение . . . . .   | 342        |
| 9.1. Доплеровское охлаждение . . . . .   | 343        |
| 9.2. Зеemanовское охлаждение . . . . .   | 346        |
| 9.3. Остановка и пленение атомов. . . . .  | 350        |
| 9.3.1. Доплеровские ловушки . . . . .  | 350        |
| 9.3.2. Магнитооптические ловушки . . . . .   | 351        |
| 9.4. Сизифово охлаждение. . . . .  | 354        |
| 9.5. Лазерное охлаждение ниже уровня отдачи. . . . .   | 359        |
| 9.5.1. Охлаждение атомов на основе селективного по скоростям когерентного пленения их населенностей . . . . .        | 359        |
| 9.5.2. Испарительное охлаждение атомов . . . . .   | 361        |
| 9.6. Физика холодных атомов и ее приложения. . . . .   | 362        |
| 9.6.1. Однокомпонентная плазма . . . . .   | 364        |
| 9.6.2. Бозе-эйнштейновская конденсация атомов . . . . .  | 364        |
| 9.6.3. Атомный лазер . . . . .   | 367        |
| 9.6.4. Атомный фонтан и атомные часы . . . . .   | 370        |
| 9.6.5. Атомная оптика . . . . .  | 371        |
| 9.6.5.1. Методы построения элементов атомной оптики . . . . .  | 372        |
| 9.6.5.2. Атомнооптическая нанолитография . . . . .   | 376        |
| Список литературы к гл. 9. . . . .   | 380        |
| <b>Глава 10. Фотоника наноструктур</b> . . . . .   | <b>382</b> |
| Введение . . . . .   | 382        |
| 10.1. Энергетический спектр наноразмерных структур. . . . .  | 382        |
| 10.1.1. Объемная кристаллическая структура . . . . .   | 383        |
| 10.1.1.1. Энергетический спектр носителей заряда в объемной кристаллической структуре . . . . .                      | 383        |
| 10.1.1.2. Плотность состояний электронов в энергетической зоне . . . . .   | 384        |
| 10.1.2. Одномерная изолированная квантовая яма и квантовая нить . . . . .  | 386        |
| 10.1.2.1. Одномерная изолированная квантовая яма . . . . .   | 386        |
| 10.1.2.2. Квантовая нить . . . . .   | 388        |
| 10.1.2.3. Плотность состояний электронов для изолированной одномерной квантовой ямы . . . . .                        | 389        |
| 10.1.2.4. Плотность состояний для квантовой нити . . . . .   | 391        |
| 10.1.3. Квантовые точки и плотность состояний электронов в них . . . . .   | 392        |



---

|  |     |
|--|-----|
| 10.2. Экситонные состояния в полупроводниковых и диэлектрических материалах . . . . .                        | 394 |
| 10.2.1. Свободные экситоны, или экситоны Ванье–Мотта . . . . .   | 394 |
| 10.2.2. Связанные экситоны или экситоны Френкеля . . . . .   | 401 |
| 10.3. Влияние формы наночастиц на энергетическую подсистему носителей заряда . . . . .                       | 402 |
| 10.3.1. Одночастичные состояния в наночастицах сложной формы . . . . .                                       | 404 |
| 10.3.2. Двухчастичные (экситонные) состояния в наночастицах с неправильной геометрией формы . . . . .        | 407 |
| 10.4. Влияние окружающей среды на энергетический спектр экситонов в наночастицах . . . . .                   | 413 |
| 10.5. Низкоэнергетическая оптическая нелинейность жидких нанокompозитных сред на основе наночастиц . . . . . | 424 |
| Список литературы к гл. 10 . . . . .   | 433 |