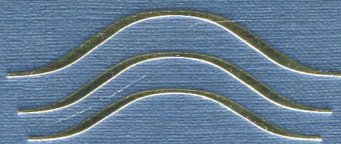


Ю. Н. КУЛЬЧИН

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 проблемами 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 Манделштама–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 решето к . . . . .	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, леги рованных ионами неодима ( $\text{Nd}^{3+}$ ) . . . . .	189
5.2.2. Лазеры на основе активных световодов, легированных иона ми иттербия ( $\text{Yb}^{3+}$ ) . . . . .	191
5.2.3. Волоконные лазеры на основе активных волоконных светово дов, легированных ионами эрбия ( $\text{Er}^{3+}$ ) . . . . .	192
5.2.4. Волоконные лазеры на основе активных волоконных светово дов, легированных ионами тулия ( $\text{Tm}^{3+}$ ) . . . . .	193
5.2.5. Волоконные лазеры на основе активных волоконных светово дов, легированных ионами гольмия ( $\text{Ho}^{3+}$ ) . . . . .	194
5.3. Волоконные лазеры на основе вынужденного комбинационного рас сеяния 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 распределен ной обратной связью . . . . .	204
5.4. Импульсные волоконные лазеры . . . . .	210
5.4.1. Методы получения импульсного излучения волоконных ла зеров . . . . .	210
5.4.1.1. Модуляция добротности волоконных лазеров . . . . .	210
5.4.1.2. Генерация импульсного излучения за счет синхрони зации мод волоконного лазера . . . . .	213
5.4.2. Компенсация дисперсионного расплывания импульсов в во локонных лазерах . . . . .	232
5.4.2.1. Призмные компенсаторы дисперсии групповой ско рости . . . . .	236
5.4.2.2. Решеточный компенсатор дисперсии групповой ско рости . . . . .	239
5.4.2.3. Компенсатор дисперсии групповой скорости на основе интерферометра Жира-Турнуа . . . . .	240
5.4.2.4. Компенсаторы дисперсии групповой скорости на ос нове chirпированных 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 реального 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. Зеемановское 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 нанокomпозитных сред на основе наночастиц . . . . .	424
Список литературы к гл. 10 . . . . .	433