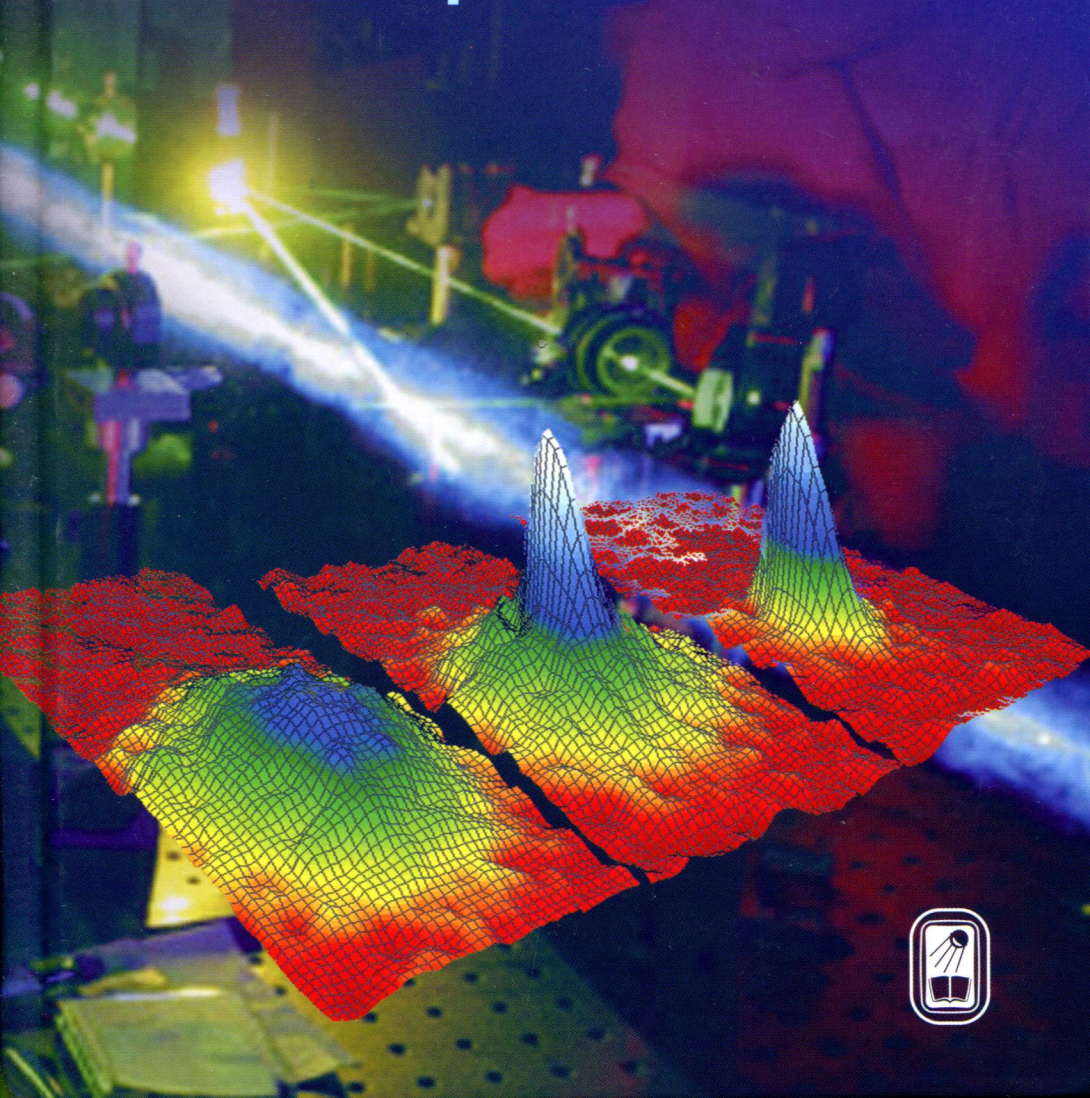


Нелинейности в периодических структурах и метаматериалах



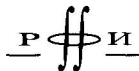
Нелинейности в периодических структурах и метаматериалах

**Под редакцией
Ю.С. Кившаря и Н.Н. Розанова**



**МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2014**

УДК 583.9
ББК 22.37
Н 49



*Издание осуществлено при поддержке
Российского фонда фундаментальных
исследований по проекту 14-02-07010,
не подлежит продаже*

Нелинейности в периодических структурах и метаматериалах /
Под ред. проф. Ю.С. Кившаря, проф. Н.Н. Розанова — М.: ФИЗМАТЛИТ,
2014. — 384 с. — ISBN 978-5-9221-1593-3.

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований нелинейных эффектов для волн, распространяющихся в средах с периодическим пространственным изменением характеристик. Для оптического и СВЧ-излучений такие среды — это цепочки молекул и цепочки металлических наночастиц, фотонные кристаллы и наборы световодов, плазмонные решетки и метаматериалы, то есть искусственные среды, формируемые периодически повторяющимся набором субволновых элементов — «метаатомов». Для волн атомной материи — конденсатов Бозе-Эйнштейна — родственными системами являются наведенные светом периодические решетки. Сочетание периодичности структуры и нелинейности отклика приводит к целому ряду ярких квантовых и классических эффектов, таких как разнообразные нелинейные резонансы, самоканалирование, обеспечивающее волноводное распространение излучения в линейно однородной среде, и локализованные (солитоноподобные) структуры.

Для научных сотрудников, аспирантов и студентов, изучающих нелинейную физику, а также исследователей, ищущих пути к созданию миниатюрных фотонных чипов с перестраиваемыми (управляемыми) характеристиками.

ISBN 978-5-9221-1593-3

© ФИЗМАТЛИТ, 2014

© Ю. С. Кившарь, Н. Н. Розанов, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|-----------|
| Предисловие | 11 |
| Введение. Физика нелинейных периодических систем: современное состояние и перспективы (Ю. С. Кившарь, Н. Н. Розанов) | 13 |
| 1. Коллективные возбуждения в молекулярных цепочках | 14 |
| 2. Бозе-эйнштейновский конденсат в периодическом потенциале | 18 |
| 3. Нелинейная локализация в цепочке световодов | 21 |
| 4. Локализованные волны и солитоны в нелинейных фотонных решетках | 23 |
| 5. Нелинейные эффекты в цепочках плазмонных наночастиц | 24 |
| 6. Нелинейные эффекты в метаматериалах | 27 |
| 7. Заключение и перспективы | 34 |
| Литература к введению | 36 |

Часть I. Нелинейные эффекты в структурах с ограниченной размерностью: от наборов волноводов к «медленному» свету

| | |
|---|-----------|
| Глава 1. Нелинейные эффекты в одномерных фотонных решетках (Д. Кип, М. Степич) | 40 |
| 1.1. Введение | 40 |
| 1.2. Линейные свойства и формирование набора волноводов | 41 |
| 1.2.1. Зонная структура и моды Флоке–Блоха в одномерных решетках (41). 1.2.2. Изготовление наборов нелинейных волноводов (43). | |
| 1.3. Локализация света и решеточные солитоны | 45 |
| 1.3.1. Решеточные солитоны (45). 1.3.2. Дискретная модуляционная неустойчивость (46). 1.3.3. Дискретные векторные солитоны (47). 1.3.4. Решеточные солитоны высших порядков (49). 1.3.5. Дискретные темные солитоны (49). | |
| 1.4. Взаимодействие световых пучков в одномерных фотонных решетках | 51 |
| 1.4.1. Взаимодействие с дефектами (52). 1.4.2. Взаимодействие блокирования (52). 1.4.3. Коллинеарное взаимодействие (52). | |
| Литература к главе 1 | 55 |

| | |
|---|-----|
| Глава 2. Нелинейные оптические волны в жидкокристаллических решетках (<i>Г. Ассанто, А. Фраталоччи</i>) | 60 |
| 2.1. Введение | 60 |
| 2.2. Фотонные решетки в нематических жидких кристаллах | 61 |
| 2.3. Дискретная динамика | 64 |
| 2.3.1. Дискретные солитоны в НЖК (64). 2.3.2. Нелинейное управление в НЖК-решетках (66). | |
| 2.4. Динамика решетки | 69 |
| 2.4.1. Многозонные решеточные солитоны (69). 2.4.2. Управляемое светом туннелирование Ландау–Зинера (71). | |
| 2.5. Заключение | 75 |
| Литература к главе 2 | 77 |
| Глава 3. Нелинейная оптика и солитоны в фотонно-кристаллических световодах (<i>Д. В. Скрябин, В. Дж. Вэдсворс</i>) | 79 |
| 3.1. Введение | 79 |
| 3.2. Генерация суперконтинуума и преобразование частоты: методы и приложения | 81 |
| 3.2.1. Фемтосекундный суперконтинуум (81). 3.2.2. Суперконтинуум длинных импульсов (83). | |
| 3.3. Солитоны в ФКС с твердой сердцевиной и их роль в генерации суперконтинуума | 85 |
| 3.3.1. Расщепление солитонов и внутриимпульсное комбинационное рассеяние (85). 3.3.2. Резонансное излучение солитонов (87). 3.3.3. Смещение солитонов с дисперсным излучением, радиационный захват и коротковолновый край суперконтинуума (87). 3.3.4. Красный сдвиг излучения и подавление самосдвига частоты солитонов (90). 3.3.5. Другие солитонные эффекты в ФКС с твердой сердцевиной (92). | |
| 3.4. Компрессия импульсов в ФКС | 92 |
| 3.5. Нелинейная и квантовая оптика в ФКС с полой сердцевиной | 93 |
| 3.6. Заключение | 95 |
| Литература к главе 3 | 96 |
| Глава 4. Пространственное переключение медленного света в периодических фотонных структурах (<i>А. А. Сухоруков</i>) | 101 |
| 4.1. Введение | 101 |
| 4.2. Дисперсия и управление скоростью света в нелинейных периодических структурах | 103 |
| 4.3. Переключение медленного света в связанных световодах | 106 |
| 4.3.1. Полностью оптическое переключение в связанных световодах с брэгговскими решетками (106). 4.3.2. Туннелирование медленного света в фотонно-кристаллических связанных световодах (112). | |
| 4.4. Медленные оптические пули | 115 |
| 4.5. Заключение | 117 |
| Литература к главе 4 | 120 |

Часть II. Нелинейные эффекты в многомерных решетках: солитоны и локализация света

| | |
|--|-----|
| Глава 5. Введение в физику солитонов в фотонных решетках (Н. К. Эфремидис, Дж. В. Флейшер, Г. Бартал, О. Коен, Х. Булжан, Д. Кристофидис, М. Сегев) | 124 |
| 5.1. Введение в физику оптических периодических систем | 124 |
| 5.2. Оптически индуцированные решетки | 126 |
| 5.3. Теория связанных мод | 130 |
| 5.4. Линейные свойства | 131 |
| 5.5. Одномерные решеточные солитоны | 137 |
| 5.6. Двумерные решеточные солитоны | 144 |
| 5.7. Вихревые солитоны в решетках | 148 |
| 5.8. Решеточные солитоны со случайной фазой | 150 |
| Литература к главе 5 | 152 |
| Глава 6. Сложные нелинейные фотонные решетки: от неустойчивостей к управлению (Й. Имброк, Б. Терхалл, П. Розе, Ф. Яндер, С. Коке, К. Денц) | 158 |
| 6.1. Введение | 158 |
| 6.2. Оптически индуцированные решетки в фоторефрактивных средах | 160 |
| 6.3. Анизотропия в нелинейных фотонных решетках | 165 |
| 6.3.1. Ориентационная анизотропия (165). 6.3.2. Поляризационная анизотропия (166). | |
| 6.4. Двумерные дискретные солитоны в нелинейных фотонных решетках | 167 |
| 6.5. Гибридные решетки | 171 |
| 6.6. Многопериодические решетки | 172 |
| 6.7. Распространение сложных пучков в сложных решетках | 175 |
| 6.8. Управление неустойчивостями распространяющихся во встречных направлениях солитонов с помощью оптически индуцированных фотонных решеток | 178 |
| 6.9. Заключение | 185 |
| Литература к главе 6 | 186 |
| Глава 7. Локализация света на дефектах в оптически-наведенных фотонных структурах (Дж. Янг, Х. Ванг, Дж. Ванг, Ж. Чен) | 189 |
| 7.1. Введение | 189 |
| 7.2. Оптически наведенные решетки и дефекты | 190 |
| 7.3. Линейные дефектные моды в одномерных решетках | 193 |
| 7.4. Линейные дефектные моды в двумерных квадратных решетках | 196 |
| 7.5. Линейные дефектные моды в двумерных кольцевых решетках | 199 |
| 7.6. Нелинейные дефектные моды | 201 |
| 7.7. Заключение | 206 |
| Литература к главе 7 | 207 |

| | |
|--|-----|
| Глава 8. Локализация полихроматического света в периодических структурах (<i>Д. Н. Нешев, А. А. Сухоруков, В. З. Кроликовский, Ю. С. Кившарь</i>) | 210 |
| 8.1. Введение | 210 |
| 8.2. Полихроматический свет в периодических структурах | 212 |
| 8.3. Нелинейная локализация полихроматического света | 214 |
| 8.3.1. Коллективные нелинейные взаимодействия в средах с медленной нелинейностью (215). 8.3.2. Полихроматические щелевые солитоны (216). | |
| 8.4. Экспериментальные исследования полихроматического самозахвата | 217 |
| 8.4.1. Экспериментальная установка (217). 8.4.2. Нелинейное спектрально-пространственное преобразование пучков (220). 8.4.3. Генерация полихроматических щелевых солитонов (222). 8.4.4. Взаимодействие с наведенным дефектом (224). 8.4.5. Пространственно-спектральное преобразование при взаимодействии с поверхностью (225). | |
| 8.5. Заключение | 229 |
| Литература к главе 8 | 230 |

Часть III. Периодические структуры для волн материи: от решеток к рэчетам

| | |
|---|-----|
| Глава 9. Бозе-эйнштейновский конденсат в одномерных решетках: нелинейность и спектры Ванье–Штарка (<i>Э. Аримондо, Д. Чиампини, О. Морцц</i>) | 234 |
| 9.1. Введение | 234 |
| 9.2. Оптическая решетка | 235 |
| 9.3. Анализ интерференционной картины | 240 |
| 9.4. Нелинейная оптическая решетка | 241 |
| 9.5. Осцилляции Блоха | 243 |
| 9.6. Туннелирование Ландау–Зинера | 244 |
| 9.7. Резонансно усиленное квантовое туннелирование | 246 |
| 9.8. Заключение | 249 |
| Литература к главе 9 | 250 |
| Глава 10. Перенос холодных атомов в оптических решетках с рэчетами: механизмы и симметрия (<i>С. Денисов, С. Флах, П. Хангги</i>) | 252 |
| 10.1. Введение | 252 |
| 10.2. Динамика единственной частицы | 253 |
| 10.3. Симметрия | 254 |
| 10.3.1. Симметрия периодической функции с нулевым средним значением (254). 10.3.2. Симметрия уравнений движения (255). 10.3.3. Случай квазипериодических функций (256). | |

| | |
|---|-----|
| 10.4. Динамические механизмы выпрямления: гамильтонов предел | 258 |
| 10.5. Резонансное усиление переноса в случае квантовых рэчетов | 260 |
| 10.6. Заключение | 264 |
| Литература к главе 10 | 265 |
| Глава 11. Атомный бозе-эйнштейновский конденсат в оптических решетках с переменной пространственной симметрией (<i>С. Клинг, Т. Салгер, К. Геккелер, Г. Ритт, Й. Плумхоф, М. Вайц</i>) | 268 |
| 11.1. Введение | 268 |
| 11.2. Основы оптических многофотонных решеток | 270 |
| 11.3. Экспериментальные методы | 272 |
| 11.4. Измерения и результаты | 273 |
| 11.5. Квантовые рэчеты | 275 |
| Литература к главе 11 | 277 |
| Глава 12. Симметрия и перенос в качающемся рэчете для холодных атомов (<i>Ф. Ренцони</i>) | 279 |
| 12.1. Введение | 279 |
| 12.2. Симметрия качающегося рэчета | 280 |
| 12.2.1. Консервативный случай (280). 12.2.2. Слабая диссипация (282). 12.2.3. Квазипериодическое воздействие (282). | |
| 12.3. Диссипативные оптические решетки | 283 |
| 12.4. Качающийся рэчет для холодных атомов | 284 |
| 12.4.1. Бигармоническое воздействие (285). 12.4.2. Многочастотное воздействие (286). | |
| 12.5. Заключение | 289 |
| Литература к главе 12 | 290 |
| Глава 13. Оптические метаматериалы: невидимость в видимом диапазоне и нелинейность для обратных направлений (<i>Н. М. Литчиничер, В. М. Шалаев</i>) | 291 |
| 13.1. Введение | 291 |
| 13.2. Оптические метаматериалы: новые степени свободы | 293 |
| 13.3. Путь к невидимости | 295 |
| 13.3.1. Трансформационный метод (297). 13.3.2. Устройства невидимости: от СВЧ-излучения к оптике (298). | |
| 13.4. Нелинейная оптика с обратными волнами в МОПП | 303 |
| 13.4.1. Генерация второй гармоники (305). 13.4.2. Оптическое параметрическое усиление: компенсация потерь в МОПП (307). 13.4.3. Бистабильность в разветвителях (309). 13.4.4. Бистабильность в слоистых структурах (311). 13.4.5. Солитоны в резонансных плазмонных структурах (313). | |
| 13.5. Заключение | 314 |
| Литература к главе 13 | 316 |

| | |
|---|-----|
| Глава 14. Нелинейные метаматериалы (<i>И. В. Шадривов</i>) | 323 |
| 14.1. Введение | 323 |
| 14.2. Нелинейный отклик метаматериалов. Теория | 324 |
| 14.2.1. Нелинейная магнитная проницаемость (325). 14.2.2. Нелинейная диэлектрическая проницаемость (327). | |
| 14.3. Нелинейные метаматериалы: эксперименты | 328 |
| 14.4. Пропускание, управляемое нелинейностью | 329 |
| 14.5. Электромагнитные пространственные солитоны в метаматериалах | 333 |
| 14.6. Квадратичные нелинейные эффекты в метаматериалах | 334 |
| 14.7. Заключение | 339 |
| Литература к главе 14 | 341 |
| | |
| Глава 15. Модель электрического контура для усиления в метаматериалах (<i>А. Д. Бордман, Н. Кинг, Ю. Рапопорт</i>) | 343 |
| 15.1. Введение | 343 |
| 15.2. Структуры с отрицательным сопротивлением | 344 |
| 15.3. Включение диодов | 345 |
| 15.4. Обсуждение устойчивости | 349 |
| 15.5. Численный анализ | 353 |
| 15.6. Заключение | 356 |
| Литература к главе 15 | 358 |
| | |
| Глава 16. Дискретные бризеры и солитоны в метаматериалах (<i>Г. Циронис, Н. Лазаридес, М. Элефтериу</i>) | 360 |
| 16.1. Введение | 360 |
| 16.2. Магнитные бризеры | 363 |
| 16.2.1. Гамильтоновы дискретные бризеры (365). 16.2.2. Диссипативные дискретные бризеры (366). | |
| 16.3. Магнитные солитоны | 369 |
| 16.4. Электромагнитные солитоны | 371 |
| 16.5. Заключение | 375 |
| Литература к главе 16 | 377 |
| | |
| Предметный указатель | 379 |