

**Л. Новотный
Б. Хехт**

ОСНОВЫ НАНООПТИКИ

*Перевод с английского
А.А. Коновко, О.А. Шутовой*

Под редакцией профессора В.В. Самарцева



**МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2009**

УДК 517.958, 533.9

ББК 22.34

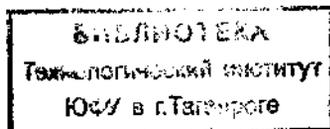
Н 76

Новотный Лукас, Хехт Берт. **Основы нанооптики**: Пер. с англ. / Под ред. В. В. Самарцева. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 484 с. — ISBN 978-5-9221-1095-2.

Нанооптика представляет собой раздел науки, в котором исследуются оптические явления и технологии на нанометровом масштабе, то есть вблизи дифракционного предела света и даже ниже. Стремительное развитие нанонауки и нанотехнологий в целом обуславливает и быстрое становление нанооптики, что требует формирования адекватного инструментария и идейного аппарата для описания явлений на наномасштабах, создания наноструктур и управления с их помощью светом. В книге «Основы нанооптики» авторами предложен всеобъемлющий обзор теоретических понятий и экспериментальных идей, необходимых для того, чтобы понимать нанооптику и получать собственные результаты. Широта затронутых тем охватывает практически все оптические явления, связанные с наномасштабом, от квантовой оптики до биофизики, при этом приводятся и подробно описываются все значимые методики.

Книга представляет собой первый в истории учебник по нанооптике. Авторы адресуют свой труд студентам старших курсов, которые хотят познакомиться с предметом, и для лучшего понимания приводят в конце каждой главы набор задач. Книга может быть также полезна исследователям и преподавателям.

524.006



ISBN 0-521-53988-9 (англ.)
ISBN 978-5-9221-1095-2 (русск.)

© Cambridge University Press, 2006
© ФИЗМАТЛИТ, 2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

От научного редактора перевода и переводчиков	13
Предисловие	15
Глава 1. Введение	17
1.1. О нанооптике кратко	19
1.2. Исторический экскурс	20
1.3. Структура книги	23
Список литературы	26
Глава 2. Теоретическое введение	28
2.1. Макроскопическая электродинамика	28
2.2. Волновые уравнения	29
2.3. Материальные уравнения	30
2.4. Пространственное представление полей, зависящих от времени	31
2.5. Монохроматические поля	32
2.6. Комплексная диэлектрическая проницаемость	32
2.7. Случай кусочно-однородной среды	33
2.8. Граничные условия	33
2.8.1. Коэффициенты отражения и пропускания Френеля (35).	
2.9. Закон сохранения энергии	36
2.10. Двудная функция Грина	38
2.10.1. Математический формализм функции Грина (38). 2.10.2. Функция Грина электрического поля (40). 2.10.3. Нестационарная функция Грина (43).	
2.11. Эванесцентные поля	43
2.11.1. Перенос энергии эванесцентным полем (46). 2.11.2. Нарушенное полное внутреннее отражение (47).	
2.12. Угловое спектральное представление оптических полей	50
2.12.1. Угловое спектральное представление поля диполя (52).	
Задачи	53
Список литературы	54
Глава 3. Распространение и фокусировка оптических полей	55
3.1. Пропагаторы поля	55
3.2. Параксиальное приближение для оптических полей	56

3.2.1. Гауссовы лазерные пучки (57). 3.2.2. Лазерные моды более высокого порядка (59). 3.2.3. Продольные поля в фокальной области (60).	
3.3. Поляризованные электрические и магнитные поля	62
3.4. Угловой спектр поля в дальней зоне	63
3.5. Фокусировка полей	65
3.6. Фокальные поля	68
3.7. Фокусировка лазерных мод высокого порядка	73
3.8. Предел слабой фокусировки.	78
3.9. Фокусировка вблизи плоских поверхностей	79
3.10. Изображение фокального пятна в отраженном свете	83
Задачи	90
Список литературы	92
Глава 4. Пространственное разрешение и качество позиционирования	93
4.1. Функция рассеяния точки	93
4.2. Предел разрешения	99
4.2.1. Повышение предела разрешения путем селективного возбуждения (101).	
4.2.2. Осевое разрешение (102). 4.2.3. Увеличение разрешения посредством насыщения (104).	
4.3. Принципы конфокальной микроскопии	107
4.4. Осевое разрешение в многофотонной микроскопии	111
4.5. Точность позиционирования.	112
4.5.1. Теоретические основания метода (113). 4.5.2. Оценка ошибки подгоночных параметров (115).	
4.6. Принципы микроскопии ближнего поля.	121
4.6.1. Передача информации из ближней зоны в дальнюю (124).	
Задачи	129
Список литературы	131
Глава 5. Наноразмерная оптическая микроскопия	133
5.1. Излучение в дальнем поле и детектирование	133
5.1.1. Конфокальная микроскопия (133).	
5.2. Подсветка в ближнем поле и детектирование в дальнем поле	145
5.2.1. Апертурное сканирование в оптической микроскопии ближнего поля (146).	
5.2.2. Сильнопольная сканирующая оптическая микроскопия ближнего поля (147).	
5.3. Подсветка в дальнем поле и детектирование в ближнем поле	155
5.3.1. Сканирующая туннельная оптическая микроскопия (155). 5.3.2. Многомодовая оптическая микроскопия ближнего поля (160).	
5.4. Подсветка в ближнем поле и детектирование в ближнем поле	161
5.5. Другие схемы: микроскопия на основе переноса энергии	162
5.6. Заключение	165
Задачи	166
Список литературы	166

Глава 6. Зонды для микроскопии ближнего поля	169
6.1. Диэлектрические зонды	169
6.1.1. Оптические головки, сходящие на конус (169). 6.1.2. Тетраэдрические головки (174).	
6.2. Распространение света в коническом диэлектрическом зонде.	175
6.3. Апертурные зонды	177
6.3.1. Передача мощности излучения через апертурный зонд (178). 6.3.2. Распределение поля вблизи малых отверстий (182). 6.3.3. Распределение ближнего поля апертурных зондов (187). 6.3.4. Усиление пропускания и направленности (188).	
6.4. Изготовление апертурных зондов	190
6.4.1. Формирование апертуры бомбардировкой ионным пучком (192). 6.4.2. Электрохимические открывающиеся и закрывающиеся апертуры (194). 6.4.3. Пробивка отверстий (195). 6.4.4. Зонды, полученные в результате микропроизводства (195).	
6.5. Оптические антенны: головки, рассеиватели, антенны-«бабочка»	200
6.5.1. Твердотельные металлические головки (200). 6.5.2. Корпускулярно-плазмонные зонды (207). 6.5.3. Антенна-«бабочка» как зонд (209).	
6.6. Заключение	211
Задачи	211
Список литературы	212
Глава 7. Управление расстоянием между образцом и зондом	216
7.1. Методы сил скольжения	217
7.1.1. Оптическое волокно как резонирующий стержень (217). 7.1.2. Камертонные сенсоры (220). 7.1.3. Модель эффективного гармонического осциллятора (222). 7.1.4. Время отклика (224). 7.1.5. Эквивалентный электрический контур (225).	
7.2. Методы нормальных сил	227
7.2.1. Камертон в режиме нормальных сил (228). 7.2.2. Изогнутые волоконные зонды (228).	
7.3. Топографические артефакты	229
7.3.1. Феноменологическая теория артефактов (231). 7.3.2. Примеры артефактов в ближнем поле (233). 7.3.3. Обсуждение (234).	
Задачи	235
Список литературы	236
Глава 8. Излучение света и оптические взаимодействия в наноразмерном окружении	238
8.1. Мультипольное разложение	238
8.2. Классический гамильтониан «частица+поле»	242
8.2.1. Мультипольное разложение гамильтониана взаимодействия (245).	
8.3. Излучение электрического диполя	247
8.3.1. Поле электрического диполя в однородном пространстве (247). 8.3.2. Дипольное излучение (251). 8.3.3. Скорость диссипации энергии в неоднородной среде (251). 8.3.4. Реакция излучения (253).	
8.4. Спонтанная релаксация.	254
8.4.1. КЭД спонтанной релаксации (255). 8.4.2. Спонтанная релаксация и диадная функция Грина (257). 8.4.3. Локальная плотность состояний (259).	
8.5. Классическое время жизни и скорость релаксации	261

8.5.1. Однородное окружение (261).	8.5.2. Неоднородное окружение (264).
8.5.3. Сдвиг частоты (265).	8.5.4. Квантовый выход (266).
8.6. Диполь-дипольное взаимодействие и перенос энергии	266
8.6.1. Мультипольное разложение кулоновского взаимодействия (267).	8.6.2. Перенос энергии между двумя частицами (268).
8.7. Делокализованные возбуждения (сильная связь)	275
8.7.1. Перепутанные состояния (278).	
Задачи	280
Список литературы	282
Глава 9. Квантовые излучатели	284
9.1. Флуоресцентные молекулы	284
9.1.1. Возбуждение (284).	9.1.2. Релаксация (286).
9.2. Полупроводниковые квантовые точки	288
9.2.1. Пассивация поверхности (289).	9.2.2. Возбуждение (290).
9.2.3. Когерентный контроль экситонов (291).	
9.3. Сечение поглощения	293
9.4. Однофотонное излучение трехуровневой системы	295
9.4.1. Стационарный случай (296).	9.4.2. Нестационарный случай (297).
9.5. Отдельные молекулы как зонды для локализованных полей	301
9.5.1. Распределение поля в фокусе лазерного излучения (303).	9.5.2. Зондирование сильнолокализованных полей (304).
9.6. Заключение	307
Задачи	308
Список литературы	308
Глава 10. Дипольное излучение вблизи плоских границ раздела	310
10.1. Разрешенный и запрещенный свет	311
10.2. Спектральное угловое представление диадной функции Грина	312
10.3. Разложение диадной функции Грина	313
10.4. Диадная функция Грина для отраженного и прошедшего полей	314
10.5. Скорость спонтанной релаксации вблизи плоских границ	316
10.6. Дальнее поле	319
10.7. Диаграмма направленности излучения	322
10.8. Куда уходит излучение?	325
10.9. Магнитные диполи	327
10.10. Приближение диполя-изображения	328
10.10.1. Вертикальный диполь (329).	10.10.2. Горизонтальный диполь (329).
10.10.3. Включение запаздывания (330).	
Задачи	330
Список литературы	331
Глава 11. Фотонные кристаллы и резонаторы	333
11.1. Фотонные кристаллы	333
11.1.1. Фотонная запрещенная зона (334).	11.1.2. Дефекты в фотонных кристаллах (337).

11.2. Оптические микрорезонаторы	339
Задачи	344
Список литературы	344
Глава 12. Поверхностные плазмоны	346
12.1. Оптические свойства благородных металлов	347
12.1.1. Теория Друде–Зоммерфельда (347). 12.1.2. Межзонные переходы (348).	
12.2. Поверхностные плазмоны-поляритоны на плоских границах раздела	350
12.2.1. Свойства поверхностных плазмонов-поляритонов (353). 12.2.2. Возбуждение поверхностных плазмонов-поляритонов (354). 12.2.3. Датчики на основе поверхностных плазмонов (358).	
12.3. Поверхностные плазмоны в нанооптике	359
12.3.1. Плазмоны, связанные с проводниками и частицами (364). 12.3.2. Плазмонные резонансы более сложных структур (371). 12.3.3. Гигантское комбинационное рассеяние света (373).	
12.4. Выводы	376
Задачи	377
Список литературы	378
Глава 13. Силы в удерживающих полях	381
13.1. Тензор напряжений Максвелла	382
13.2. Давление излучения	385
13.3. Дипольное приближение	385
13.3.1. Сила, усредненная по времени (387). 13.3.2. Монохроматические поля (387). 13.3.3. Насыщение возбуждения вблизи резонанса (389). 13.3.4. За пределами дипольного приближения (391).	
13.4. Оптические пинцеты	392
13.5. Угловой момент и момент вращения	395
13.6. Силы в ближних оптических полях	395
13.7. Выводы	400
13.8. Задачи	400
Список литературы	401
Глава 14. Взаимодействия, обусловленные флуктуациями	403
14.1. Флуктуационно-диссипационная теорема	403
14.1.1. Функция отклика системы (404). 14.1.2. Белый шум (408). 14.1.3. Диссипация, обусловленная флуктуациями внешних полей (409). 14.1.4. Нормальное и антинормальное упорядочивание (410).	
14.2. Излучение флуктуирующих источников	411
14.2.1. Излучение абсолютно черного тела (413). 14.2.2. Когерентность, спектральный сдвиг и перенос тепла (414).	
14.3. Флуктуационно-индуцированные силы	415
14.3.1. Потенциал Казимира–Полдера (417). 14.3.2. Электромагнитное трение (420).	
14.4. Выводы	424
Задачи	424
Список литературы	425

Глава 15. Теоретические методы в нанооптике	427
15.1. Метод множественных мультиполей	427
15.2. Метод объемных интегральных уравнений	433
15.2.1. Объемное интегральное уравнение (434). 15.2.2. Метод моментов (ММ) (439). 15.2.3. Метод связанных диполей (МСД) (440). 15.2.4. Эквивалентность ММ и МСД (441).	
15.3. Эффективная поляризуемость.	442
15.4. Полная функция Грина	443
15.5. Выводы и перспективы	445
Задачи	445
Список литературы	446
Приложение А. Полуаналитический вывод атомной поляризуемости	448
А.1. Стационарная поляризуемость в слабых возбуждающих полях.	451
А.2. Квазирезонансное возбуждение в отсутствие релаксации	453
А.3. Квазирезонансное возбуждение с релаксацией	455
Приложение Б. Спонтанное излучение в режиме слабой связи	457
Б.1. Теория Вайскопфа–Вигнера	457
Б.1.1. Неоднородная окружающая среда (459).	
Список литературы	460
Приложение В. Поле диполя, расположенного вблизи слоистой подложки	461
В.1. Вертикальный электрический диполь	461
В.2. Горизонтальный электрический диполь	462
В.3. Определение коэффициентов A_j , B_j и C_j	464
Приложение Г. Функция Грина дальнего поля	467
Предметный указатель	469