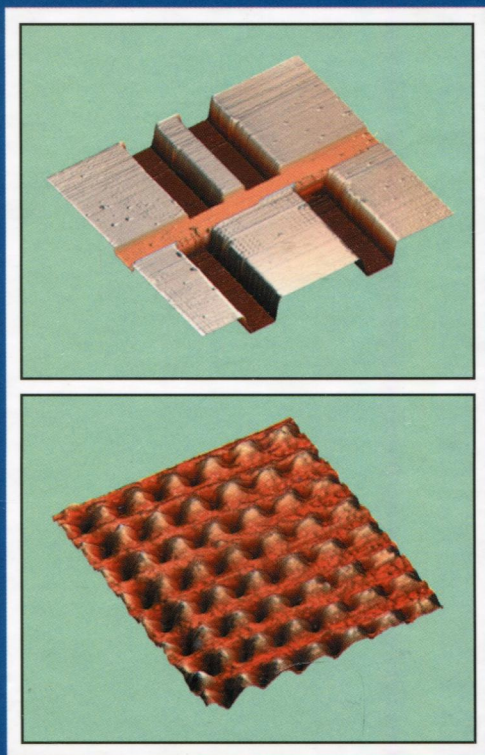


ДИФРАКЦИОННАЯ ОПТИКА И НАНОФОТОНИКА

Под редакцией
В.А. Сойфера



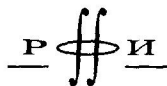
ДИФРАКЦИОННАЯ ОПТИКА И НАНОФОТОНИКА

Под редакцией В.А. Соифера



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2014

УДК 535.42
ББК 22.343.4
Д 50



*Издание осуществлено при поддержке
Российского фонда фундаментальных
исследований по проекту 13-07.07005,
не подлежит продаже*

Авторский коллектив:

Безус Е. А., Быков Д. А., Досколович Л. Л., Ковалев А. А., Котляр В. В.,
Налимов А. Г., Порфирьев А. П., Скиданов Р. В., Сойфер В. А.,
Стафеев С. С., Хонина С. Н.

Дифракционная оптика и нанофотоника / Под ред. В. А. Сойфера. —
М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. — 608 с. — ISBN 978-5-9221-1571-1.

Книга посвящена устройствам дифракционной оптики и нанофотоники, разработанным путем компьютерного решения прямых и обратных задач дифракции на основе уравнений Максвелла. Решения задач проводились как известными методами — методом конечных разностей во временной области и методом Фурье-мод, так и авторскими методами — методом согласованных синусоидальных мод и методом конечных разностей для тел вращения. Эти методы применяются для моделирования дифракции света на компонентах плазмоники, резонансных дифракционных решетках, фотонно-кристаллических компонентах, элементах микрооптики для острой фокусировки света, элементах для формирования и фокусировки сингулярных световых пучков, а также для оптического манипулирования микрообъектами, в том числе биологическими.

Для широкого круга научных работников, инженеров, работающих в области оптики, нанофотоники, лазерной физики, оптоинформационных технологий, оптического приборостроения. Книга также может быть полезна студентам старших курсов специальностей «Прикладная математика и физика», «Прикладная математика и информатика», «Оптика» и аспирантам, специализирующимся в этих областях.

ISBN 978-5-9221-1571-1

© ФИЗМАТЛИТ, 2014

© Коллектив авторов, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	7
Глава 1. Метод фурье-мод и его применения в плазмонике и теории резонансных дифракционных решеток	11
1.1. Метод фурье-мод решения задачи дифракции	13
1.1.1. Уравнение плоской волны (13). 1.1.2. Метод фурье-мод для двумерных периодических структур учета (16). 1.1.3. Метод фурье-мод для трехмерных периодических структур (37). 1.1.4. Метод фурье-мод для двумерных неперiodических структур (42).	
1.2. Методы расчета мод периодических дифракционных структур	55
1.2.1. Расчет мод на основе вычисления полюсов матрицы рассеяния (55). 1.2.2. Расчет мод на основе вычисления собственных значений матрицы прохождения (68).	
1.3. Резонансные дифракционные решетки для преобразования оптических импульсов	73
1.3.1. Интегрирование и дифференцирование оптических импульсов. Аномалии Вуда (74). 1.3.2. Типы решеток для интегрирования и дифференцирования импульсов (77). 1.3.3. Дробное интегрирование и дифференцирование оптических импульсов. Аномалии Рэлея–Вуда (78). 1.3.4. Примеры расчета дифференцирующих решеток (80). 1.3.5. Примеры расчета интегрирующих решеток (81).	
1.4. Дифракционные оптические элементы для управления распространением поверхностных плазмон-поляритонов	84
1.4.1. Дисперсионное соотношение и свойства поверхностных плазмон-поляритонов (85). 1.4.2. Фазовая модуляция поверхностных плазмон-поляритонов с помощью диэлектрических структур (97). 1.4.3. Подавление паразитного рассеяния поверхностных плазмон-поляритонов (101). 1.4.4. Расчет линз для фокусировки поверхностных плазмон-поляритонов (110). 1.4.5. Расчет брэгговских отражающих решеток для поверхностных плазмон-поляритонов (117).	
1.5. Формирование интерференционных картин затухающих электромагнитных волн с помощью дифракционных решеток	119
1.5.1. Теоретическое описание интерференционных картин затухающих дифракционных порядков решеток с одномерной и двумерной периодичностью (119). 1.5.2. Формирование интерференционных картин затухающих электромагнитных волн в металлодиэлектрических дифракционных решетках (130). 1.5.3. Формирование интерференционных картин затухающих электромагнитных волн в диэлектрических дифракционных решетках (143).	
Литература к главе 1	152
Глава 2. Компоненты на фотонных кристаллах	160
2.1. Одномерные и двумерные фотонные кристаллы	160
2.1.1. Фотонные запрещенные зоны (160). 2.1.2. Дифракция плоской волны на фотонном кристалле без дефектов (162). 2.1.3. Распространение света в фотонно-кристаллическом волноводе (163). 2.1.4. Фотонно-кристаллические коллиматоры (164).	
2.2. Двумерная фотонно-кристаллическая градиентная линза Микаэляна	166
2.2.1. Модовое решение для градиентной секансной среды (167). 2.2.2. Фотонно-кристаллическая градиентная линза (169). 2.2.3. Фотонно-кристаллическая линза для сопряжения двух волноводов (173).	

2.3. Моделирование трехмерного устройства нанوفотоники для ввода излучения в планарный волновод	185
2.3.1. Двумерное моделирование ввода света в планарный волновод с помощью решетки (186). 2.3.2. Трехмерное моделирование фотонно-кристаллической линзы Микаэляна для сопряжения двух волноводов (189). 2.3.3. Трехмерное моделирование всего устройства нанوفотоники (190).	
2.4. Фотонно-кристаллические световоды	192
2.4.1. Расчет мод фотонно-кристаллических световодов методом согласованных синусоидальных мод (ССМ) (196). 2.4.2. Метод согласованных синусоидальных мод в векторном случае (209). 2.4.3. Метод Крылова для решения нелинейной задачи на собственные значения (215). 2.4.4. Расчет мод ступенчатого световода (219). 2.4.5. Расчет мод фотонно-кристаллического световода (223). 2.4.6. Расчет мод с помощью программы Fimmwave (226).	
Литература к главе 2.	227
Глава 3. Острая фокусировка света компонентами микрооптики	234
3.1. Численные и экспериментальные методы исследования острой фокусировки света	234
3.1.1. BOR-FDTD-метод (234). 3.1.2. Векторные формулы Ричардса–Вольфа (247). 3.1.3. Сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия (253).	
3.2. Аксикон	254
3.2.1. Острая фокусировка света радиальной поляризации с помощью микроаксикона (255). 3.2.2. Дифракционный логарифмический микроаксикон (264). 3.2.3. Бинарные аксиконы с периодом 4, 6 и 8 мкм (272). 3.2.4. Бинарный аксикон с периодом 800 нм (284).	
3.3. Зонная пластинка Френеля	286
3.3.1. Сравнение с формулами Ричардса–Вольфа (287). 3.3.2. Симметрия интенсивности и потока мощности субволнового фокусного пятна (291).	
3.4. Фокусировка света с помощью градиентных линз	301
3.4.1. Механизм сверхразрешения в планарной гиперболической секансной линзе (301). 3.4.2. Градиентные элементы микрооптики для достижения сверхразрешения (309). 3.4.3. Построение увеличенного изображения со сверхразрешением с помощью планарных линз Микаэляна (322). 3.4.4. Гиперболическая секансная линза со щелью для субволновой фокусировки света (333). 3.4.5. Острая фокусировка радиально-поляризованного света 3D-гиперболической секансной линзой (338). 3.4.6. Оптимизация параметров планарной бинарной линзы для видимого диапазона излучения (340).	
3.5. Формирование фотонной наноструи с помощью сферы	347
3.5.1. Численное моделирование прохождения непрерывного излучения через микросферу (348). 3.5.2. Численное моделирование прохождения импульсного излучения через микросферу (352). 3.5.3. Эксперимент по фокусировке света микросферой (353).	
Литература к главе 3.	355
Глава 4. Фокусировка вихревых пучков и преодоление дифракционного предела	362
Введение.	362
4.1. Формирование вихревых лазерных пучков с помощью элементов сингулярной оптики	364

4.1.1. Теоретический анализ дифракции плоской волны и гауссова пучка на спиральной фазовой пластинке (364).	
4.1.2. Теоретический анализ дифракции плоской волны и гауссова пучка на спиральном аксиконе (371).	
4.1.3. Численное моделирование дифракции различных пучков на элементах сингулярной оптики (375).	
4.1.4. Выводы (379).	
4.2. Векторное представление поля в фокальной области для вихревой функции пропускания	380
4.2.1. Однородно-поляризованные пучки (линейная и круговая поляризация) (383).	
4.2.2. Цилиндрические векторные пучки (радиальная и азимутальная поляризации) (392).	
4.2.3. Обобщенная вихревая поляризация (398).	
4.2.4. Выводы (401).	
4.3. Применение аксиконов в высокоапертурной фокусирующей системе	402
4.3.1. Дополнение линзы аксиконом: параксиальная скалярная модель (404).	
4.3.2. Аподизация короткофокусной линзы аксиконом: непараксиальная векторная модель в приближении Дебая (407).	
4.3.3. Использование вихревых аксиконов для пространственного перераспределения компонент электрического поля в фокальной области (416).	
4.3.4. Выводы (417).	
4.4. Управление вкладом компонент векторного электрического поля в фокусе высокоапертурной линзы с помощью бинарных фазовых структур	420
4.4.1. Максимизация продольной компоненты для линейно-поляризованного излучения (420).	
4.4.2. Увеличение эффективности при фокусировке радиально-поляризованного излучения (426).	
4.4.3. Преодоление предела при азимутальной поляризации за счет поперечных компонент электрического поля (428).	
4.4.4. Выводы (429).	
4.5. Минимизация размера светового или теневого фокусного пятна с контролируемым ростом боковых лепестков	429
4.5.1. Скалярный дифракционный предел: теоретический анализ (430).	
4.5.2. Оптимизация функции пропускания фокусирующей системы (433).	
4.5.3. Минимизация светового пятна для радиально-поляризованного излучения (434).	
4.5.4. Формирование светового кольца субволнового радиуса при азимутальной поляризации лазерного излучения (439).	
4.5.5. Выводы (442).	
Заключение	443
Литература к главе 4.	444
Глава 5. Оптическое манипулирование микро- и нанообъектами	449
5.1. Методы расчета силы, действующей на микрообъект со стороны сфокусированного лазерного излучения	451
5.1.1. Электромагнитная сила для трехмерного случая (451).	
5.1.2. Электромагнитная сила для двумерного случая (ТЕ- и ТМ-поляризаций) (453).	
5.1.3. Расчет силы для плоской волны (454).	
5.1.4. Расчет силы для непараксиального гауссова пучка (показатель преломления объекта больше показателя преломления среды) (456).	
5.1.5. Расчет силы для объекта с показателем преломления объекта, меньшим показателя преломления среды (461).	
5.1.6. Геометрооптический метод расчета силы, действующей на микрообъект (468).	
5.1.7. Сравнение результатов расчетов силы в рамках геометрооптического и электромагнитного подходов (472).	
5.2. Вращение микрообъектов в вихревых световых пучках	474
5.2.1. Вращение микрообъектов в бесселевых пучках (474).	
5.2.2. Оптическое вращение с использованием многопорядковой спиральной фазовой пластины (486).	
5.2.3. Вращение микрообъектов в вихревом световом	

кольце, сформированном аксионом (489). 5.2.4. Оптическое вращение в двойном светлом кольце (490). 5.2.5. Формирование ДОЭ с помощью жидкокристаллического дисплея (492). 5.2.6. Вращение микрообъектов в гипергеометрических пучках и пучках, не обладающих орбитальным угловым моментом, с использованием динамического модулятора света (494). 5.2.7. Исследование параметров вращения микрообъектов в световых пучках с орбитальным угловым моментом (504).	
5.3. Вращение микрочастиц в световых пучках, рассчитанных и сформированных для получения максимального вращающего момента	511
5.3.1. Формирование световых пучков, состоящих из нескольких светлых колец (511). 5.3.2. Формирование суперпозиции оптических вихрей высоких порядков (518). 5.3.3. Экспериментальное формирование суперпозиций вихревых пучков (520).	
5.4. Световые пучки, специально сформированные для линейного перемещения и позиционирования микрообъектов	521
5.4.1. Кодирование амплитуды методом локального фазового скачка (522). 5.4.2. Модификация метода кодирования амплитуды для расчета световых полей со сложной структурой (524). 5.4.3. Фокусаторы для позиционирования микрообъектов (524). 5.4.4. Фокусаторы для перемещения микрообъектов по заданным траекториям (529). 5.4.5. Фокусаторы для сортировки и фильтрации микрообъектов (532). 5.4.6. Фокусаторы для фильтрации отдельных микрообъектов (534). 5.4.7. Экспериментальное исследование движения микрообъектов в световых полях с заданным амплитудно-фазовым распределением, сформированных бинарными фокусаторами (536). 5.4.8. Линейное перемещение микрообъектов в суперпозиции двух вихревых пучков (542).	
5.5. Формирование массивов световых «бутылок» с помощью ДОЭ.	546
5.5.1. Световые пучки Бесселя и их замечательные свойства (548). 5.5.2. Многомодовые пучки Бесселя (549). 5.5.3. Формирование световых «бутылок» за счет использования составных пучков Бесселя 0-го порядка (550). 5.5.4. Алгоритм повышения однородности формируемых световых ловушек на основе градиентной процедуры (554). 5.5.5. Формирование массивов световых «бутылок» (560). 5.5.6. Формирование массивов полых световых пучков (568). 5.5.7. Экспериментальное формирование массивов световых «бутылок» с помощью бинарных ДОЭ (573). 5.5.8. Захват прозрачных микрообъектов в системе световых «бутылок» (576). 5.5.9. Захват и перемещение металлических микрочастиц олова, форма которых близка к сферической (582). 5.5.10. Осаждение и позиционирование микрообъектов с помощью массивов полых световых пучков (583).	
5.6. Световые пучки, формируемые ДОЭ, для неповреждающего захвата биологических микрообъектов	585
5.6.1. Модификация гауссова пучка с целью оптимизации силовых характеристик оптической ловушки (587). 5.6.2. Измерения энергетической эффективности ДОЭ, образующих пучки-полумесяцы (590). 5.6.3. Эксперименты по оптическим манипуляциям клетками <i>saccharomyces cerevisiae</i> (591).	
Литература к главе 5.	595
Заключение.	605