

К. К. АЛТУНИН

# ОПТИКА НАНОСТРУКТУР И НАНОМАТЕРИАЛОВ

ЧАСТЬ 1  
МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ  
УРАВНЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ



К. К. Алтунин

**ОПТИКА НАНОСТРУКТУР  
И НАНОМАТЕРИАЛОВ.  
ЧАСТЬ 1.  
МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ  
УРАВНЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ**



Москва2014

УДК 535.3  
ББК В22.31  
А52

*Печатается по решению Редакционно-издательского совета  
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего  
профессионального образования "Ульяновский государственный  
педагогический университет имени П. Н. Ульянова"*

Рецензенты:

*В. А. Сергеев* — профессор, д.т.н.  
*В. М. Журавлёв* — профессор, д. ф.-м. н.  
*С. В. Червои* — профессор, д. ф.-м. н.

### **Алтунин К. К.**

**А52** Оптика наноструктур и наноматериалов. Часть 1.  
Микроскопические уравнения электродинамики:  
учебное пособие. 2-е изд. / К. К. Алтунин. — М.: Директ-  
Медиа, 2014. — 82 с.

ISBN 978-5-4475-0322-2

Учебное пособие посвящено современным представлениям о нелокальных уравнениях электродинамики, которые могут быть применены вместо уравнений Максвелла при решении различных граничных задач оптики. Вывод нелокальных уравнений производится на основе полуклассического и квантово-электродинамического подходов. С учётом различных типов квантовых переходов в спектре взаимодействующих атомов получены различные нелокальные уравнения распространения электромагнитных волн в спиновых системах, в диэлектриках и в металлах. Нелокальные полевые уравнения применены для решения ряда типовых граничных задач оптики в полубесконечных средах и в малых объектах, линейные размеры которых значительно меньше длины световой волны. Особое внимание уделено оптическим ближнепольным резонансам, которые образуются в наноструктурных системах. Рассмотрены приложения полученных результатов в оптической ближнепольной микроскопии.

Учебное пособие предназначено для студентов и аспирантов физических специальностей университетов. Книга может быть также полезна исследователям и преподавателям.

УДК 535.3  
ББК В22.31

© Алтунин К. К., текст, 2014  
ISBN 978-5-4475-0322-2 © Издательство «Директ-Медиа», макет, оформление, 2014

# Оглавление

Введение .....	5
Глава 1. Проблема двух электронов и нелокальные уравнения электродинамики .....	11
1. Введение.....	11
2. Матрица эффективной энергии взаимодействия двух водородоподобных атомов, находящихся на произвольном расстоянии друг от друга.....	16
3. Переход к двухкомпонентным волновым функциям .....	25
4. Роль внешнего поля во взаимодействии двух атомных электронов.....	30
4.1. Учёт промежуточных состояний с отрицательной энергией.....	32
4.2. Промежуточные состояния с положительными энергиями .....	36
5. Поляризуемые поля в системе водородоподобных атомов, излучающих или поглощающих фотоны.....	36
5.1. Интегральные уравнения распространения фотонов в электродипольной оптической среде .....	43
5.2. Интегральное уравнение распространения фотонов в системе электронных спинов .....	45
6. Полуклассический метод вывода нелокальных уравнений .....	50

6.1. Интегральные уравнения распространения электромагнитных волн в диэлектриках.....	52
6.2. Уравнения распространения электромагнитных волн в квадрупольных и магнитодипольных средах.....	58
6.3. Интегральные уравнения распространения электромагнитных волн в проводящей среде .....	60
Приложение А.....	67
Приложение В. Полевые уравнения микроскопической электродинамики .....	69
Приложение С. Поле электрического диполя.....	75
Список литературы.....	79

## Введение

Основной целью настоящей работы является представление единого теоретического подхода для решения широкого круга задач, встречающихся в оптике наноструктурных систем. В настоящей работе будет показано, что адекватность этого теоретического подхода подтверждается прецизионными экспериментами. В настоящей работе дан строгий вывод основных уравнений, на основе которых решены различные граничные задачи оптики наноструктурных систем. При этом конечные формулы имеют ясный физический смысл и могут быть рекомендованы для теоретического расчёта различных приборов и устройств на основе наноструктурных систем.

Конструирование любого оптического прибора или устройства основано на формулах Френеля, которые связывают между собой амплитуды внешней, отражённой и преломлённой волн. Поражает воображение точность этих формул, которая подтверждается многими прецизионными экспериментами и нарушаются эти формулы лишь в небольшой окрестности угла Брюстера  $\theta_B$ , определяемого из равенства  $\operatorname{tg} \theta_B = n$ , где  $n$  — показатель преломления оптической среды. Для объяснения этого расхождения с формулами Френеля в настоящей работе представлена микроскопическая теория переходного слоя на поверхности изотропного непоглощающего диэлектрика.

Эта теория позволяет объяснить многочисленные прецизионные эксперименты по брюстеровскому отражению света, и основана эта теория на решении нелокальных уравнений электродинамики, представленных в настоящей работе. Таким образом, на решении оптической задачи был апробирован представленный в настоящей работе теоретический подход, что позволяет применять его для решения и других оптических задач. К таким задачам, безусловно, можно отнести граничные задачи оптики, в которых учитывается влияние дискретного распределения атомов и наночастиц на границе раздела двух сред и в слоистых средах. Решению такого рода задач и посвящена настоящая работа.

Среди многообразия известных в настоящее время наноструктурных систем особое место занимают двухатомные объекты, например, димеры на поверхности твёрдых тел, атом-зонд вблизи атома образца и т.д. Взаимодействие атомов при межатомных расстояниях порядка 1 нм во внешнем поле излучения необходимо исследовать без теории возмущений, учитывая большие внутренние поля, которые могут значительно превышать внешние поля, а также выделяя определённый тип квантовых переходов с соответствующими квантовыми правилами отбора. Глубокое исследование двухатомных наноструктурных объектов в значительной степени определяет понимание оптических свойств многоатомных наноструктурных объектов.

В системе двух взаимодействующих дипольных осцилляторов во внешнем поле оптического излучения возникают два или четыре оптических размерных резонанса в зависимости от того, являются ли дипольные осцилляторы одинаковыми или разными, а также в зависимости от поляризации внешнего излучения по отношению к оси наноструктурного двухатомного объекта. Частоты оптических размерных резонансов сильно зависят от межатомного расстояния. При этом на малых, порядка 1 нм, расстояниях частоты оптических размерных резонансов отличаются от собственных частот дипольных осцилляторов на величину, значительно (примерно в  $10^5$  раз) превышающую времена затухания осцилляторов. При больших межатомных расстояниях, сравнимых с длиной волны внешнего оптического излучения, частоты оптических размерных резонансов отличаются от собственных частот осцилляторов на величину порядка времени затухания осцилляторов. Взаимодействие двухатомного наноструктурного объекта с внешним оптическим излучением характеризуется диагональным тензором эффективной поляризуемости, который отличается от классической поляризуемости изолированных атомов, составляющих наноструктурный объект, как по величине, так и зависимостью от частоты. Оптические размерные резонансы образуются и в трёхатомных наноструктурных объектах.