

В. В. Климов

НАНОПЛАЗМОНИКА



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2010.

УДК 539.21, 621.3

ББК 30.3

К 49

Климов В. В. **Наноплазмоника**. — 2-е изд., испр. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. — 480 с. — ISBN 978-5-9221-1205-5.

Книга посвящена изложению новейших результатов в новой области нанотехнологий — наноплазмонике. Наноплазмоника является частью нанооптики и нанофотоники и имеет дело с колебаниями электронов проводимости в металлических наночастицах и наноструктурах. Важность и перспективность наноплазмоники заключается в том, что она позволяет совместить нанометровые размеры приборов и сенсоров с оптическими частотами их функционирования. Подробно излагаются современные методы описания плазмонных свойств наночастиц и приводятся основные расчетные формулы, позволяющие быстро провести оценки оптических свойств наночастиц самой различной формы. В книге также рассматриваются новейшие приложения наноплазмоники: от медицины до электроники и создания «плащей-невидимок» и «идеальных линз». Книга предназначена читателям, знакомым с электродинамикой в рамках университетского курса общей физики: студентам старшим курсов, аспирантам физико-химических и инженерных специальностей, и всем научным сотрудникам, желающим быстро войти в увлекательный мир нанооптики и наноплазмоники. Многие результаты, приведенные в книге, получены совсем недавно и могут быть полезны даже опытному специалисту в области нанооптики. Отдельные главы могут быть полезны и более широкому кругу читателей.

Научное издание

КЛИМОВ Василий Васильевич

526.266

НАНОПЛАЗМОНИКА

Редактор *С.А. Тюрина*

Редактор-организатор: *Т.Ю. Давидовская*

Оригинал-макет: *В.В. Затекин*

Оформление переплета: *Н.В. Гришина*

Подписано в печать 16.02.10. Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 30. Уч.-изд. л. 30. Тираж 700 экз. Заказ № 427

Издательская фирма «Физико-математическая литература»

МАИК «Наука/Интерпериодика»

117997, Москва, ул. Профсоюзная, 90

E-mail: fizmat@maik.ru, fmlsale@maik.ru;

<http://www.fml.ru>

Отпечатано в ООО «Чебоксарская типография № 1»
428019, г. Чебоксары, пр. И. Яковлева, 15

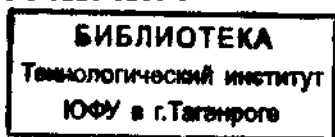
ISBN 978-5-9221-1205-5



© ФИЗМАТЛИТ, 2009, 2010

© В. В. Климов, 2009, 2010

ISBN 978-5-9221-1205-5



ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 1. Введение	9
Список литературы	15
Глава 2. Мир наночастиц	16
2.1. Роль микро и наночастиц в истории нашей цивилизации ..	16
2.2. Современные методы синтеза плазмонных наночастиц	22
2.2.1. Методы, основанные на химических реакциях в твердом теле (22). 2.2.2. Методы нанохимии (23). 2.2.3. Газофазный синтез наночастиц (30). 2.2.4. Нанолитографические способы производства металлических наночастиц и наноструктур (33). 2.2.5. Формирование произвольных трехмерных металлических наноструктур с помощью сфокусированных ионных пучков (37).	
2.3. Галерея наночастиц и наноструктур	37
Список литературы	47
Глава 3. Введение в электродинамику металлов	52
3.1. Уравнения Максвелла и распространение электромагнитных волн	52
3.2. Теория Друде–Зоммерфельда оптических свойств металлов	58
3.3. Оптические свойства реальных металлов	62
3.4. Диэлектрическая проницаемость малых частиц	64
3.5. Дисперсия в газе свободных электронов и объемные плазмоны	65
Список литературы	67
Глава 4. Поверхностные плазмоны	69
4.1. Двумерные поверхностные плазмоны	69
4.1.1. Плазмоны на плоской границе раздела «металл-диэлектрик» (70). 4.1.2. Поверхностные плазмоны в слоистых средах (75).	

4.2. Одномерные поверхностные плазмоны	79
4.2.1. Плазмоны в металлических проволоках круглого сечения (80). 4.2.2. Плазмоны в проволоках других сечений (82).	
4.3. Возбуждение поверхностных плазмонов	85
4.3.1. Методы, основанные на нарушенном полном внутреннем отражении (85). 4.3.2. Метод поверхностной дифракционной решетки (86). 4.3.3. Метод нанолокализованных источников света (88).	
4.4. Наблюдение поверхностных плазмонов	89
Список литературы	91
Глава 5. Теория плазмонных колебаний в наночастицах	93
5.1. « ϵ -метод» решения уравнений Максвелла для частиц произвольных размеров	94
5.2. « ϵ -метод» решения уравнений Максвелла для наночастиц.	100
5.3. Способы решения уравнений Максвелла в рамках « ϵ -метода»	104
5.3.1. Аналитические решения (104). 5.3.2. Решение уравнений « ϵ -метода» для наночастиц с помощью интегральных уравнений (104).	
5.4. Аналогия между спектрами локализованных плазмонов и спектрами атомов и молекул	109
Список литературы	111
Глава 6. Оптические свойства сферических частиц	113
6.1. Возбуждение сферической частицы дипольным источником излучения.	113
6.2. Оптические резонансы в сферических частицах произвольных размеров	118
6.3. Оптические свойства сферической частицы произвольных размеров.	123
6.4. Квазистатическая теория оптических свойств сферических наночастиц.	130
6.5. Влияние нелокальных эффектов на оптические свойства сферических частиц. Взаимодействие продольных и поперечных плазмонов.	136
6.6. Оптические свойства сферически слоистых структур	143
6.6.1. Оптические свойства слоистых наночастиц в однородном поле (143). 6.6.2. Спонтанное излучение атома в присутствии сферически слоистых частиц (145).	
Список литературы	147

Глава 7. Плазмонные свойства наносфероидов	149
7.1. Плазмонные резонансы в сфероидах (квазистатическое приближение)	151
7.1.1. Вытянутый сфероид (151). 7.1.2. Сплюснутый сфероид (155).	
7.2. Оптические свойства сфероидов	160
7.2.1. Поляризуемость сфероидов (160). 7.2.2. Сечения рассеяния и сечения поглощения сфероидальными частицами (163). 7.2.3. Скорости спонтанного излучения молекул вблизи сфероида (165).	
7.3. Плазмонные колебания в сфероидальных оболочках	170
7.4. Учет эффектов запаздывания в наночастицах сфероидальных и родственных форм	176
Список литературы	179
Глава 8. Оптические свойства трехосного наноэллипсоида	181
8.1. Общее решение квазистатической задачи о плазмонных колебаниях в трехосном наноэллипсоиде в рамках « ϵ -метода»	182
8.2. Явные выражения для плазмонных мод в декартовых координатах	184
8.3. Плазмонные резонансы в эллипсоиде конечных размеров (учет эффектов запаздывания)	193
8.4. Оптические свойства наноэллипсоида в однородном внешнем поле	197
8.5. Влияние металлического наноэллипсоида на спонтанное излучение атома	200
Список литературы	205
Глава 9. Локализованные плазмоны в многогранных наночастицах	206
9.1. Оптические свойства диэлектрических наночастиц в форме правильных многогранников (Платоновы тела)	208
9.2. Свойства локализованных плазмонов в наночастицах сложной формы	212
9.2.1. Нанокубик и родственные геометрии (212).	
9.2.2. Десятигранник и родственные геометрии (220).	
9.2.3. Тетраэдр, треугольная призма и родственные геометрии (226).	
9.3. Выводы	239
Список литературы	240

Глава 10. Локализованные плазмоны в кластерах наночастиц	242
10.1. Классификация плазмонных колебаний в кластере на основе плазмонных колебаний в составляющих его наночастицах.	243
10.1.1. Система линейных интегральных уравнений, описывающих плазмонные колебания в кластере наночастиц (243). 10.1.2. Свойства плазмонных колебаний в кластерах с большими расстояниями между наночастицами. Модель точечных диполей (245). 10.1.3. Сильно- и слаболокализованные плазмонные колебания в кластерах сильно-взаимодействующих наночастиц (250).	
10.2. Плазмоны в кластере из двух одинаковых наносфер	251
10.3. Усиление локальных полей в кластере из двух наносфер.	263
10.4. Плазмоны в частицах с несимметричными наноболочками и в кластере из двух различных наносфер.	264
10.5. Плазмоны в кластере из двух несферических наночастиц конечного объема	267
10.6. Плазмоны в области наноконтакта двух плазмонных тел неограниченного объема	270
10.7. Плазмонные колебания в кластере из более чем двух наночастиц	273
10.7.1. Плазмонные свойства линейных кластеров (273). 10.7.2. Плазмонные свойства самоподобных кластеров (282). 10.7.3. Плазмонные свойства звездообразных кластеров (284).	
10.8. Влияние плазмонных резонансов в кластерах наночастиц на излучение атомов и молекул	286
10.9. Силы ван дер Ваальса между плазмонными наночастицами	292
10.10. Возбуждение плазмонных резонансов в кластерах наночастиц.	296
Список литературы	302
Глава 11. Оптические свойства наночастиц, сделанных из «необычных» материалов	306
11.1. Оптика частиц с отрицательным показателем преломления	307
11.1.1. Основные свойства сред с отрицательным показателем преломления (307). 11.1.2. Экспериментальная реализация сред с отрицательным показателем преломления (313). 11.1.3. Плазмонные резонансы в сфере из материала с отрицательным показателем преломления и их влияние на излучение атомов и молекул (319).	
11.2. Оптические свойства киральных частиц	326

11.2.1. Основные свойства и способы реализации киральных сред (326).	11.2.2. Оптические свойства сферической киральной частицы (330).
Список литературы	338
Глава 12. Оптические свойства нанотверстий в металлических пленках	340
12.1. Оптические свойства круглого отверстия в бесконечно тонком-идеально проводящем экране (теория Бете-Боукампа)	341
12.2. Круглое отверстие в экране конечной толщины.	344
12.2.1. Локализованные плазмоны в нанотверстии (344).	
12.2.2. Локализованные поверхностные плазмоны и прохождение света через отверстие (349).	
12.3. Экстраординарное прохождение света через решетки из нанотверстий	351
12.4. Диаграмма направленности излучения, выходящего из нанотверстия	358
12.5. Флуоресценция атомов и молекул вблизи нанотверстия . .	361
12.5.1. Влияние круглого нанотверстия в идеально проводящем экране на спонтанное излучение атома или молекулы (361).	12.5.2. Экспериментальные исследования излучения молекул вблизи нанотверстий (367).
12.6. Заключение	371
Список литературы	371
Глава 13. Приложения наноплазмоники	376
13.1. Терапия и визуализация опухолей с помощью наночастиц. .	376
13.1.1. Золотые наночастицы (377).	13.1.2. Одностенные нанотрубки (380).
13.1.3. Ферромагнитные наночастицы (381).	
13.2. Биосенсоры на поверхностных плазмонах	382
13.3. Биосенсоры на локализованных плазмонах	384
13.3.1. Метод агломерации наночастиц (385).	13.3.2. Метод изменения локальной диэлектрической проницаемости (388).
13.4. Спектроскопия отдельных плазмонных наночастиц	390
13.5. Элементная база для интегральных схем на плазмонах. . .	392
13.5.1. Пассивные элементы (394).	13.5.2. Активные (динамические) элементы (400).
13.6. Приложения, основанные на влиянии наночастиц на излучение (флуоресценцию) атомов и молекул	403

13.7. Супер- и гиперлинзы на основе поверхностных плазмонов и метаматериалов	414
13.8. Покрытия-невидимки на основе плазмонных метаматериалов	422
Список литературы	433
Глава 14. Заключение	441
Приложение А1. Элементы теории спонтанного излучения и флюоресценции атомов и молекул в присутствии нанотел	443
А1.1. Влияние нанотел на скорость спонтанного излучения атома или молекулы	443
А1.2. Влияние нанообъектов на флюоресценцию молекул	446
Список литературы	451
Приложение А2. Популярные численные методы в наноптике и наноплазмонике	452
А2.1. Приближение дискретных диполей (DDA)	453
А2.2. Метод T -матрицы	455
А2.3. Метод множественных мультиполей (ММР)	457
А2.4. Метод конечных разностей во временной области (FDTD)	460
А2.5. Метод объемных интегральных уравнений	466
А2.6. Другие численные методы	468
А2.7. Заключение	468
Список литературы	469
Приложение А3. Часто используемые в наноплазмонике, наноптике и смежных областях науки акронимы и термины	472