



Издательский Дом  
ИНТЕЛЛЕКТ

Е.С. АНДРИАНОВ, А.П. ВИНОГРАДОВ, А.В. ДОРОФЕЕНКО,  
А.А. ЗЯБЛОВСКИЙ, А.А. ЛИСЯНСКИЙ, А.А. ПУХОВ

# КВАНТОВАЯ НАНОПЛАЗМОНИКА

**ФИЗТЕХОВСКИЙ УЧЕБНИК**

---

**Е.С. АНДРИАНОВ, А.П. ВИНОГРАДОВ, А.В. ДОРОФЕЕНКО,  
А.А. ЗЯБЛОВСКИЙ, А.А. ЛИСЯНСКИЙ, А.А. ПУХОВ**

# **КВАНТОВАЯ НАНОПЛАЗМОНИКА**



**ДОЛГОПРУДНЫЙ  
2015**

**Е.С. Андрианов, А.П. Виноградов, А.В. Дорофеев, А.А. Зябловский, А.А. Лисянский, А.А. Пухов**

Квантовая наноплазмоника: Учебное пособие / Е.С. Андрианов, А.П. Виноградов, А.В. Дорофеев, А.А. Зябловский, А.А. Лисянский, А.А. Пухов – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2015. – 368 с., цв.вкл.

ISBN 978-5-91559-203-1

Учебное пособие является введением в новую область оптики – квантовую плазмонику.

Первая часть издания представляет собой введение в квантовую теорию лазерной генерации. Представлен материал по квантовой теории лазера в полуклассическом и полностью квантовом приближении. Ясно и доступно обсуждается природа явления лазерной генерации. Подробно анализируются квантовые эффекты в структурах нанометровых размеров, функционирующих на оптических частотах. Обсуждается место квантовой теории лазеров в общем контексте новейших проблем нанотехнологий.

Во второй части книги рассматриваются вопросы как классической, так и квантовой плазмоники. Подробно изложены современные методы описания плазмонных свойств наночастиц. Представлены новейшие приложения плазмоники, связанные с созданием наноструктур и их управлением с помощью света.

Третья часть посвящена взаимодействию плазмонных структур с активными включениями.

Основное содержание пособия дополнено задачами для самостоятельного решения.

Книга предназначена научным работникам, студентам старших курсов, аспирантам и преподавателям, которые хотят познакомиться с предметом.

ISBN 978-5-91559-203-1

- © 2014, Е.С. Андрианов,  
А.П. Виноградов, А.В. Дорофеев,  
А.А. Зябловский, А.А. Лисянский,  
А.А. Пухов  
© 2015, ООО «Издательский Дом  
«Интеллект», оригинал-макет,  
оформление

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Список обозначений .....	7
Предисловие .....	9
Введение .....	11
<b>Глава 1</b>	
<b>КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ЛАЗЕРА</b> .....	13
1.1. Скоростные уравнения .....	13
1.1.1. Вывод скоростных уравнений .....	13
1.1.2. Порог генерации лазера, «выход» фотонов .....	15
1.1.3. Релаксационные (пиковые) колебания .....	16
1.1.4. Применимость скоростных уравнений .....	17
1.2. Уравнения Максвелла—Блоха .....	18
1.2.1. Полуклассическая теория лазера без формул .....	18
1.2.2. Приближение медленно меняющихся амплитуд .....	19
1.2.3. Уравнения Максвелла—Блоха .....	20
1.2.4. Одномодовые уравнения Максвелла—Блоха .....	23
1.2.5. Стационарная лазерная генерация .....	28
1.2.6. Классификация лазеров .....	29
1.2.7. Сведение уравнений Максвелла—Блоха к скоростным уравнениям .....	31
1.2.8. Область применимости полуклассической теории .....	32
1.2.9. Заключение .....	32
1.3. Уравнения Гейзенберга—Ланжевена .....	34
1.3.1. Зачем нужна квантовая теория лазера? .....	34
1.3.2. Гамильтониан и основные уравнения лазера .....	35
1.3.3. Квантовые шумы и потери .....	38
1.3.4. Форма спектральной линии лазера .....	43



## Глава 2

### ПЛАЗМОНИКА И МЕТАОПТИКА ..... 49

2.1. Введение .....	49
2.2. Квазистатические (локализованные) плазмоны от Ленгмюра до Фереля .....	50
2.2.1. Частота плазмонного резонанса .....	50
2.2.2. Описание плазмонного резонанса в терминах диэлектрической проницаемости .....	52
2.2.3. Мультипольные резонансы плазмонной частицы .....	54
2.2.4. Плазмонный резонанс в системе частиц (плазмонная нанополость) .....	56
2.2.5. Пространственное распределение энергии поля в условиях плазмонного резонанса .....	58
2.2.6. Решение Фереля для плазмона на тонкой пленке .....	61
2.2.7. Усиление поля в безапертурном SNOme .....	63
2.3. Эффекты запаздывания (делокализованные плазмоны) .....	67
2.3.1. Поверхностные моды (история вопроса) .....	68
2.3.2. Распространение поверхностной волны вдоль раздела сред с отрицательной и положительной диэлектрическими проницаемостями .....	68
2.3.3. Распространение плазмона вдоль металлической пленки, окруженной диэлектриком: система «диэлектрик—металл—диэлектрик» (ДМД) .....	77
2.3.4. Распространение поверхностной волны вдоль слоя диэлектрика, окруженного металлом: система «металл—диэлектрик—металл» (МДМ) .....	79
2.3.5. Поверхностные моды, распространяющиеся вдоль цилиндрической поверхности .....	83
2.3.6. Плазмонная антенна .....	86
2.3.7. Линии передач на поверхностных модах в канавке .....	89
2.4. Передача энергии ближними полями .....	95
2.4.1. Перенос энергии ближними полями вдоль плазмонных линий передач .....	96
2.4.2. Среда Веселаго .....	100
2.4.3. Идеальные линзы Веселаго и Пендри .....	102
2.4.4. Влияние потерь на изображение, формируемое линзой Пендри .....	107
2.4.5. Плазмонные фотонные кристаллы .....	111

## Глава 3

### СПАЗЕРЫ ..... 117

Введение .....	117
----------------	-----



3.1. Классическая модель спазера. «Toy model» .....	121
3.1.1. Описание усиливающей среды с помощью диэлектрической проницаемости .....	121
3.1.2. Точное решение для «Toy model» спазера — покрытое плазмонной оболочкой ядро из усиливающей среды .....	126
3.1.3. Магнитооптический спазер .....	137
3.2. Элементарные процессы квантовой плазмоники .....	142
3.2.1. Квантование плазмонов .....	142
3.2.2. Взаимодействие КТ с дипольным плазмоном НЧ .....	148
3.2.3. Многомодовая релаксация возбужденной КТ вблизи плазмонной сферы с диэлектрической проницаемостью .....	151
3.2.4. Спектр резонансной флуоресценции ДУС .....	157
3.2.5. Парселл-фактор .....	160
3.3. Полуклассическая теория спазера .....	168
3.3.1. Стационарные решения, бифуркация Хопфа .....	168
3.3.2. Осцилляции Раби в спазере .....	170
3.3.3. Спазер в поле внешней оптической волны, синхронизация спазера, язык Арнольда .....	175
3.3.4. Компенсация потерь выше порога спазирования .....	182
3.3.5. Компенсация потерь ниже порога спазирования .....	185
3.3.6. Бистабильность спазера .....	194
3.4. Коллективные эффекты в системе спазеров .....	198
3.4.1. Теория спазера с двумя квантовыми точками .....	198
3.4.2. Синхронизация двух спазеров .....	206
3.4.3. Гармоническая плазмонная автоволна в линейке спазеров .....	209
3.4.4. Оптическая бистабильность цепочки спазеров: волны переключения и структуры .....	217
3.4.5. Плазмонные планарные лазеры .....	220
3.4.6. Плазмонные лазеры с распределенной обратной связью .....	236
3.4.7. Плазмонное лазерование в режиме «остановленного» света .....	238
3.4.8. Фазированная решетка спазеров .....	241
3.5. Спазерная спектроскопия .....	255
3.6. Квантовые флуктуации в спазере .....	262
3.6.1. Влияние наночастицы на спектр резонансной флуоресценции. Учет квантовых флуктуаций ближнего поля наночастицы .....	262
3.6.2. Влияние квантовых флуктуаций на порог генерации спазера .....	272



3.6.3. Второй порог генерации для распределенного и субволнового спазеров .....	282
3.6.4. Превалирование когерентного отклика ближнего поля над некогерентным при компенсации потерь .....	287
<b>Приложение 1</b>	
<b>ОСЦИЛЛЯЦИИ РАБИ И СКОРОСТЬ СПОНТАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ .....</b>	<b>295</b>
<b>Приложение 2</b>	
<b>ИЗЛУЧЕНИЕ ДУС В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ. ТЕОРИЯ ВАЙСКОПФА—ВИГНЕРА .....</b>	<b>308</b>
<b>Приложение 3</b>	
<b>ТЕОРЕМА ВИНЕРА—ХИНЧИНА ДЛЯ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ. СТАНДАРТНЫЙ ВАРИАНТ ТЕОРЕМЫ ВИНЕРА—ХИНЧИНА .....</b>	<b>313</b>
<b>Приложение 4</b>	
<b>КВАНТОВАЯ ТЕОРЕМА РЕГРЕССИИ .....</b>	<b>318</b>
<b>Приложение 5</b>	
<b>ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ .....</b>	<b>321</b>
<b>Приложение 6</b>	
<b>ЗАВИСИМОСТЬ МОДУЛЯЦИИ СПАЗЕРА ОТ ЧАСТОТЫ МОДУЛЯЦИИ НАКАЧКИ .....</b>	<b>324</b>
<b>Приложение 7</b>	
<b>ПЕРЕХОД К МЕДЛЕННЫМ АМПЛИТУДАМ ПРИ НАЛИЧИИ ВРЕМЕННОЙ ДИСПЕРСИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ .....</b>	<b>328</b>
<b>Приложение 8</b>	
<b>ФАКТОР ПАРСЕЛЛА ДЛЯ ДИПОЛЯ, НАХОДЯЩЕГОСЯ ВБЛИЗИ ПЛАЗМОННОЙ НАНОЧАСТИЦЫ .....</b>	<b>330</b>
<b>Задачи для самостоятельного решения .....</b>	<b>337</b>
<b>Список литературы .....</b>	<b>346</b>