

Оптические явления в наномире

Лекторы: А.А. Коновко, О.А. Шутова

Аннотация дисциплины

Курс посвящен проблеме взаимодействия оптического излучения с объектами, масштаб которых лежит в нанометровом диапазоне. Это и биологические объекты, такие как клетки, субклеточные структуры, бактерии, вирусы, высокомолекулярные соединения, и неорганические структуры, такие как фотонные кристаллы, микрорезонаторы, устройства хранения и передачи информации и даже отдельные молекулы. Курс знакомит студентов с современными достижениями в физике взаимодействия света с наноструктурированными материалами; демонстрирует отличия оптических явлений на нанометровом масштабе от традиционной оптики макроскопически неоднородных сред; раскрывает непосредственную связь нанооптики с такими разделами науки как квантовая физика, термодинамика, статистическая физика и материаловедение; углубляет понимание взаимосвязи различных отраслей физики и ее приложений в телекоммуникационных технологиях, биологии и медицине.

В настоящее время развитие науки и нанотехнологий стимулирует потребность в соответствующем инструментарии и теоретических подходах к описанию оптических явлений на нанометровом масштабе. К началу XX века в классической оптике сложилось представление о предельном разрешении, с которым мы можем визуализировать объекты при помощи электромагнитного излучения видимого диапазона. Этот предел составил приблизительно 100 нм и казался непреодолимым. В XX веке развивались альтернативные способы визуализации с использованием других видов излучений и процессов, многие из которых связаны с разрушающим воздействием на биологические объекты. Использование видимого диапазона для визуализации является для человека природным механизмом и именно поэтому дает нам уникальную информацию об окружающем мире. Развитие оптической микроскопии во второй половине XX – начале XXI века привело к преодолению дифракционного предела и позволило подойти вплотную к пределу разрешения порядка 1 нм, что дает основание в ближайшем будущем надеяться получить оптическими – а значит, неразрушающими – методами изображения таких мельчайших частиц как вирусы в их естественной динамике. В лекционном курсе обсуждаются, в частности, пределы фокусировки оптических пучков, оптическая микроскопия сверхвысокого (1-10 нм) разрешения, резонансный безизлучательный перенос энергии, фотонные кристаллы, микрорезонаторы, наноантенны, плазмоны, оптические пинцеты, квантовые точки, метаматериалы.

Курс нацелен на формирование качественного понимания явлений и не требует специальных знаний из области высшей математики теоретической физики. Курс сопровождается электронными презентациями лекций и набором задач по каждой теме.

Оптические явления в наномире

Лекторы: доцент к.ф.-м.н. А.А. Коновко, ассистент к.ф.-м.н. О.А. Шутова

Программа курса.

Лекция 1. История оптической микроскопии.

Классический двухлинзовый микроскоп: от первой реализации прибора в конце XV в. к наилучшим принципиально возможным приборам конца XIX в. Формулировка дифракционного предела в построении изображений. Направления развития микроскопии после формулировки предела. Обзор всех существующих оптических методов микроскопии дальнего и ближнего поля. Недостатки и преимущества разных схем.

Лекция 2. Дифракционный предел: фундаментальные причины и следствия этого явления.

Дифракционный предел: физика явления. Критерий Релея. Предел по Аббе. Связь с соотношением неопределенности Гейзенберга. Разрешающая способность оптических приборов. Обобщение понятия разрешающей способности. Понятие об эванесцентной волне и ее роли в дифракционном пределе.

Лекция 3. Выход за пределы скалярной оптики: острая фокусировка, малое отверстие, зонд.

Распределение поля в фокусе острофокусирующей линзы за пределами геометрической оптики. Продольное поле. Вихревые пучки света со сложным состоянием поляризации. Поляризационное хранение информации. Прохождение света через малое отверстие. Решение Бёте-Баукэмпта для ближней зоны. Усиление поля вблизи кончика зонда. Оптическая антенна: в чем ее отличие от радиоантенны и в чем сходство.

Лекция 4. Ближнепольная микроскопия.

Принципы микроскопии ближнего поля. Модуляционные техники, сканирующая интерференционная безапертурная микроскопия. Радиофизические методы в оптике. Сканирующая туннельная оптическая микроскопия. Микроскопия на основе фёрстеровского переноса энергии.

Лекция 5. Наноразмерная оптическая дальнепольная микроскопия.

Микроскопия на основе вынужденного истощения накачки. Метод конфокальной микроскопии. Метод структурированной подсветки. Метод локализационной микроскопии на основе фотопереключаемых флуоресцентных белков. Метод локализационной микроскопии на основе оптической реконструкции.

Лекция 6. Микроскопия на основе метаматериалов.

Понятие о метаматериалах. Идеальная линза Пендри. Практическая реализация линзы Пендри – суперлинза Фанга. Понятие об анизотропных метаматериалах. Гиперлинза. Линза на основе массива отверстий: камера-обскура XXI в.

Лекция 7. Поле классического диполя и безызлучательный перенос энергии.

Поле классического диполя. Резонансный безызлучательный перенос энергии и его применение в биологии. Дипольное излучение вблизи многослойной подложки. Поверхностные волны. Разрешенный и запрещенный свет. Скорость спонтанной релаксации вблизи плоских границ. Дальнее поле. Диаграмма направленности излучения.

Лекция 8. Квантовые источники излучения.

Флуоресцентные молекулы. Возбуждение. Релаксация. Полупроводниковые квантовые точки. Квантовые ямы и квантовые точки. Оптические свойства квантовых точек. Лазеры на полупроводниковых квантовых точках. Металлические наноразмерные кластеры.

Лекция 9. Фотонные кристаллы, микрорезонаторы, метаматериалы.

Кристаллы и фотонные кристаллы. Фотонные запрещенные зоны. Фотонные кристаллы в живой природе. Дефекты в фотонных кристаллах. Применение фотонных кристаллов для оптической передачи данных. Фотонные кристаллы и метаматериалы. Гиперболические материалы. Оптические микрорезонаторы и их приложения.

Лекция 10. Основы плазмоники.

Оптические свойства благородных металлов. Теория Друде-Зоммерфельда. Межзонные переходы. Поверхностные плазмоны-поляритоны. Возбуждение поверхностных плазмонов. Плазмонные резонансы проводов и частиц. Локализация света. Плазмоны в нанооптике. Датчики на основе поверхностных плазмонов. Плазмонный резонанс и метаматериалы. Гигантское комбинационное рассеяние света. Спазер.

Лекция 11. Оптическое пленение частиц.

Пондеромоторные силы. Давление излучения. Дипольное приближение. Оптические пинцеты. Угловой момент и момент вращения. Силы в ближних оптических полях.

Лекция 12. Взаимодействия, обусловленные флуктуациями.

Флуктуационно-диссипационная теорема. Излучение флуктуирующих источников. Излучение абсолютно черного тела. Когерентность, спектральный сдвиг и перенос тепла. Флуктуационно-индуцированные силы. Силы Казимира. Электромагнитное трение.

Рекомендуемая литература:

1. Л. Новотный, Б. Хехт, «Основы нанооптики», Издательство ФИЗМАТЛИТ, Москва, Россия, 2009.
2. В.В. Климов, «Наноплазмоника», Издательство ФИЗМАТЛИТ, Москва, Россия, 2010.
3. Г.С.Жданов, М.Н.Либенсон, Г.А.Марциновский. «Ближнепольная оптика». - СПб: СПб ГУ ИТМО, 2007.

4. S.A. Maier «Plasmonics: Fundamentals and Applications», Springer, Berlin, Heidelberg, Germany, 2007.
5. L. Solymar, E. Shamonina, «Waves in Metamaterials», Oxford University Press, Oxford, UK, 2009.
6. Батыгин В.В., Топтыгин И.Н., «Современная электродинамика», Издательство: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Ижевск, Россия, 2005.
7. Мандель Л., Вольф Э. «Оптическая когерентность и квантовая оптика» Издательство ФИЗМАТЛИТ, Москва, Россия, 2000.
8. Борн М., Вольф Э. «Основы оптики» Издательство ФИЗМАТЛИТ, Москва. Россия, 2003.
9. Манцызов Б.И. «Когерентная и нелинейная оптика фотонных кристаллов». Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2009.
10. A.Zayats, D.Richards (editors), «Nano-optics and Near-field Optical Microscopy», ARTECH HOUSE, INC., Boston/London, 2009
11. О.А. Акципетров, И.М. Баранова, К.Н. Евтюхов, «Нелинейная оптика кремния и кремниевых наноструктур», ФИЗМАТЛИТ, Москва, Россия, 2012.
12. M. A. Noginov, G. Dewar, M. W. McCall, N. I. Zheludev (editors) «Tutorials in complex photonic media». SPIE PRESS, Bellingham, Washington USA, 2009.

Периодическая литература:

1. <http://pubs.acs.org/journal/nalefd>
2. <http://www.nature.com/nnano/index.html>
3. <http://www.nature.com/nphoton/index.html>
4. <http://www.nature.com/nmat/index.html>
5. <http://publish.aps.org/>

Интернет-ресурсы:

1. <http://library.wolfram.com/infocenter/BySubject/Science/Physics/>
2. <http://tpopt.org>
3. <http://nanohub.org/>
4. <http://pubs.acs.org/journal/nalefd>
5. <http://www.nature.com/nnano/index.html>
6. <http://www.nature.com/nphoton/index.html>
7. <http://www.nature.com/nmat/index.html>

Оптические явления в наномире

Лекторы: доцент к.ф.-м.н. А.А. Коновко, ассистент к.ф.-м.н. О.А. Шутова

Вопросы к зачету

1. Дифракционный предел разрешающей способности оптических систем.
2. Устройство классического двухлинзового микроскопа. Иммерсионный объектив.
3. Осевое разрешение. Ширина и глубина поля.
4. Эванесцентная волна: ее происхождение и роль в микроскопии. Полное внутреннее отражение и нарушенное полное внутреннее отражение.
5. Случай острой фокусировки света: изменение геометрии поля.
6. Вихревые пучки света.
7. Поляризационное хранение информации.
8. Построение карты ориентаций диполей.
9. Особенности прохождения света через очень малое отверстие.
10. Усиление поля вблизи острия (зонда).
11. Поле электрического диполя в однородном пространстве. Дипольное излучение. Скорость диссипации энергии в неоднородной среде. Реакция излучения.
12. Диполь-дипольное взаимодействие и перенос энергии. Реактивные компоненты поля диполя (ближнее поле) и их интерференция.
13. Резонансный безызлучательный перенос энергии между двумя частицами.
14. Флуоресцентные молекулы. Возбуждение. Релаксация.
15. Функция рассеяния точки. Пределы разрешения. Повышение предела разрешения путем селективного возбуждения.
16. Увеличение разрешения посредством вынужденного истощения накачки.
17. Принципы конфокальной микроскопии. Осевое разрешение в многофотонной микроскопии.
18. Принципы микроскопии ближнего поля. Передача информации из ближней зоны в дальнюю.
19. Апертурное сканирование в оптической микроскопии ближнего поля.
20. Сканирующая туннельная оптическая микроскопия.
21. Понятие об оптической антенне. Основные отличия оптической антенны от радиоантенны.
22. Микроскопия на основе безызлучательного переноса энергии.
23. Понятие о метаматериале.
24. Микроскопия на основе метаматериалов. Суперлинза.
25. Понятие об анизотропном метаматериале. Гиперлинза.
26. Поглощение энергии диполем: полуклассический подход. Поток энергии в окрестности наведенного диполя. Сечение поглощения.
27. Классическое время жизни и скорость релаксации. Однородное окружение. Неоднородное окружение. Сдвиг частоты. Квантовый выход.
28. Полупроводниковые квантовые точки. Возбуждение. Лазеры на полупроводниковых квантовых точках.
29. Металлические нанокластеры. Особенности плазмонного резонанса металлических наночастиц.
30. Фотонные кристаллы. Фотонные запрещенные зоны. Дефекты в фотонных кристаллах. Фотонные кристаллы как метаматериалы.
31. Оптические микрорезонаторы.
32. Оптические свойства благородных металлов.
33. Поверхностные плазмоны-поляритоны на плоских границах раздела. Дисперсионное уравнение. Свойства поверхностных плазмонов-поляритонов.

34. Возбуждение поверхностных плазмонов-поляритонов. Датчики на основе поверхностных плазмонов.
35. Локальные плазмоны тонких проводов и сферических частиц.
36. Давление излучения. Сила, усредненная по времени. Монохроматические поля. Насыщение возбуждения вблизи резонанса.
37. Угловой момент и момент вращения. Силы в ближних оптических полях.
38. Оптические пинцеты.