

Рабочая программа дисциплины

1. Введение в нанооптику.

2. Лекторы.

2.1. К.ф.-м.н., доцент, Коновко Андрей Андреевич, кафедра общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ, e-mail konovko@physics.msu.ru, тел. +7(495)939-30-92.

2.2. К.ф.-м.н., ассистент, Шутова Ольга Анатольевна, кафедра общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ, e-mail olya.shoutova@physics.msu.ru, тел. +7(495)939-30-92.

3. Аннотация дисциплины.

В настоящее время развитие науки и нанотехнологий стимулирует потребность в соответствующем инструментарии и теоретических подходах к описанию оптических явлений на нанометровом масштабе. В лекционном курсе обсуждаются, в частности, пределы фокусировки оптических пучков, оптическая микроскопия сверхвысокого (10 нм) разрешения, резонансный безизлучательный перенос энергии, фотонные кристаллы, микрорезонаторы, наноантенны, плазмоны, оптические пинцеты, квантовые точки, метаматериалы. Для описания оптических явлений привлекаются такие понятия как диадная функция Грина, функция рассеяния точки и локальная плотность состояний фотонов. Курс является теоретическим базисом к программам «Физика наносистем» и «Физика оптических явлений», а также к дисциплинам: «Основы фотоники и оптических технологий», «Оптика проводящих полимеров и наноматериалов», «Лазерная диагностика в биологии и медицине», «Нанoeлектроника и мезоскопика», «Сканирующая зондовая спектроскопия и основы нанoeлектроники», «Введение в интегральную и волоконную оптику» и «Оптические методы исследования конденсированных сред».

4. Цели освоения дисциплины.

Курс «Введение в нанооптику» является спецкурсом (по выбору) кафедры общей физики и волновых процессов охватывает блоки В-ПД и Б-ОН. В результате освоения дисциплины студенты, в частности, приобретают профессиональную компетенцию ПК-2: владение современными профессиональными знаниями в области (i) физики взаимодействия света с наночастицами и наноструктурированным веществом, (ii) математических подходов к решению задач физики взаимодействия света с наночастицами и наноструктурированным веществом.

5. Задачи дисциплины.

В задачи настоящего курса входят: (1) ознакомить студентов с современными достижениями в физике взаимодействия света с наноструктурированным веществом; (2) продемонстрировать принципиальные отличия оптических явлений на нанометровом масштабе от традиционной оптики; (3) раскрыть непосредственную связь нанооптики с такими разделами науки как квантовая физика, термодинамика, статистическая физика и материаловедение; (4) углубить понимание взаимосвязи различных отраслей физики.

6. Компетенции.

7.1. Компетенции, необходимые для освоения дисциплины.

10	Б-ОН	Математический анализ	ПК-2; ОНК-5; ОНК-6
11	Б-ОН	Аналитическая геометрия	ПК-2; ОНК-5; ОНК-6
12	Б-ОН	Линейная алгебра	ПК-2; ОНК-5; ОНК-6
13	Б-ОН	Теория функций комплексной переменной	ПК-2; ОНК-5; ОНК-6
14	Б-ОН	Дифференциальные уравнения	ПК-2; ОНК-5; ОНК-6
15	Б-ОН	Интегральные уравнения и вариационное исчисление	ПК-2; ОНК-5; ОНК-6
16	Б-ОН	Теория вероятностей	ПК-2; ОНК-5; ОНК-6
17	Б-ОН	Программирование и информатика	ИК-3; ИК-4; ПК-2; ОНК-5
18	Б-ОН	Основы математического моделирования	ИК-3; ИК-4; ПК-2; ОНК-5; ОНК-6
19	Б-ОН	Численные методы в физике	ИК-3; ИК-4; ПК-2; ОНК-5
21	Б-ПРОФ	Молекулярная физика	ПК-2; ОНК-5
22	Б-ПРОФ	Электромагнетизм	ПК-2; ОНК-5
23	Б-ПРОФ	Оптика	ПК-2; ОНК-5
24	Б-ПРОФ	Введение в квантовую физику	ПК-2; ОНК-5
26	Б-ПРОФ	Атомная физика	ПК-1; ПК-2; ПК-5; ПК-6; ОНК-5
29	Б-ПРОФ	Электродинамика	ПК-2; ОНК-5
30	Б-ПРОФ	Квантовая теория	ПК-2; ОНК-5
31	Б-ПРОФ	Термодинамика и статистическая физика	ПК-2; ОНК-5
32	Б-ПРОФ	Методы математической физики	ПК-2; ОНК-5; ОНК-6

7.2. Компетенции, формируемые в результате освоения дисциплины.

40	В-ПД	Спецкурс кафедры (по выбору)	ПК-2
1	Б-ОК	История и методология физики	ОНК-4; ПК-6; ПК-7
6	Б-ОН	Современные проблемы физики	ПК-2; ОНК-1; СК-3
9	В-ПД	Спецкурс кафедры (по выбору)	ПК-2

7. Требования к результатам освоения содержания дисциплины

В результате освоения дисциплины студент должен

- знать (i) основные физические явления, проявляющиеся при взаимодействии излучения с наночастицами и наноструктурированным веществом, (ii) основные принципы построения и работы современных оптических микроскопов высокого разрешения и иных приборов и устройств, предназначенных для управления светом на нанометровом масштабе, (iii) основные подходы к теоретическому описанию взаимодействия излучения с наночастицами и наноструктурированным веществом;
- уметь (i) использовать формализм диадной функции Грина для расчета полей в фокальной плоскости жестко фокусирующих оптических приборов и полей дипольных излучателей в области ближнего поля, (ii) применять полученные знания для расчета плазмонных резонансов сферических наночастиц, цилиндрических нанопроводов и нанорешеток прямоугольного профиля;
- владеть (i) такими понятиями как диадная функция Грина, эванесцентное поле, функция рассеяния точки; мультипольное разложение, ближнее поле, локальная плотность состояний фотонов, резонансный безизлучательный перенос энергии, плазмоны, (ii) основными подходами к теоретическому описанию взаимодействия излучения с наночастицами и наноструктурированным веществом;
- иметь опыт деятельности в решении базовых задач нанооптики.

8. Содержание и структура дисциплины.

Вид работы	Семестр	Всего
------------	---------	-------

	8	
Общая трудоёмкость, акад. часов	68	68
Аудиторная работа:	30	30
Лекции, акад. часов	30	30
Самостоятельная работа, акад. часов	38	38
Вид итогового контроля (зачёт, зачёт с оценкой, экзамен)	Зачет с оценкой	Зачет с оценкой

N раздела	Наименование раздела	Трудоёмкость (академических часов) и содержание занятий		Форма текущего контроля	
		Аудиторная работа			Самостоятельная работа
		Лекции			
1	Введение.	2 часа. О нанооптике вкратце. Исторический экскурс. Структура курса.	1 час. Ознакомление с литературой по курсу	Опрос	
2	Основы математического аппарата нанооптики	2 часа. Пространственное представление полей, зависящих от времени. Монохроматические поля. Комплексная диэлектрическая проницаемость. Граничные условия. Коэффициенты отражения и пропускания Френеля. Закон сохранения энергии. Диадная функция Грина. Эванесцентные поля. Угловое спектральное представление оптических полей. Угловое спектральное представление поля диполя.	2,5 часа. Интернет-ресурс лаборатории Теоретических проблем оптики: http://tpopt.org/education/nanooptics/ , часть 1, задачи 1-8.	Проверка Домашнего задания, опрос	
3	Распространение и фокусировка оптических полей	2 часа Пропагаторы поля. Параксиальное приближение для оптических полей. Поляризованные электрические и магнитные поля. Угловой спектр поля в дальней зоне. Фокусировка полей. Фокальные поля. Фокусировка лазерных мод высокого порядка. Передел слабой фокусировки. Фокусировка вблизи плоских поверхностей. Изображение фокального пятна в отраженном свете.	2,5 часа. Интернет-ресурс лаборатории Теоретических проблем оптики: http://tpopt.org/education/nanooptics/ , часть 1, задачи 9-16.	Проверка Домашнего задания, опрос	
4	Пространственное разрешение и качество позиционирования	2 часа Функция рассеяния точки. Селективное возбуждение. STED-микроскопия. Конфокальная микроскопия. Многофотонная микроскопия. Принципы микроскопии ближнего поля.	2,5 часа. Интернет-ресурс лаборатории Теоретических проблем оптики: http://tpopt.org/education/nanooptics/ , часть 1, задачи 17-22.	Проверка Домашнего задания, опрос	
5	Наноразмерная оптическая микроскопия	2 часа Нелинейная конфокальная микроскопия. Твердотельные иммерсионные линзы. Модуляционные техники, SIAM-микроскопия. STOM/PTSM - сканирующая туннельная оптическая микроскопия. FRET-микроскопия.	2,5 часа. Интернет-ресурс лаборатории Теоретических проблем оптики: http://tpopt.org/education/nanooptics/ , часть 1, задачи 23-25.	Проверка Домашнего задания, опрос	
6	Управление расстоянием между образцом и зондом	2 часа Методы сил скольжения (shear-force). Методы нормальных сил. Топографические артефакты.	2,5 часа. Интернет-ресурс лаборатории Теоретических проблем оптики: http://tpopt.org/education/nanooptics/ , часть 1, задачи 23-25.	Проверка Домашнего задания, опрос	

7	Методы создания оптических зондов, существующие проблемы и фундаментальные ограничения	2 часа Диэлектрические зонды. Распространение света в коническом диэлектрическом зонде. Апертурные зонды. Изготовление апертурных зондов. Оптические антенны: головки, рассеиватели, антенны "бабочка"	2,5 часа. Интернет-ресурс лаборатории Теоретических проблем оптики: http://tpopt.org/education/nanooptics/ , часть 1, задачи 30-32.	Проверка Домашнего задания, опрос
8	Излучение света и оптические взаимодействия в наноразмерном окружении	2 часа Мультипольное разложение. Излучение электрического диполя. Реакция излучения. Ближнее, промежуточное и дальнее поля. Спонтанная релаксация. Локальная плотность состояний. Диполь-дипольное взаимодействие и резонансный перенос энергии по механизму Фёрстера. Нелокальное возбуждение частиц. Перепутанные состояния.	3 часа. Интернет-ресурс лаборатории Теоретических проблем оптики: http://tpopt.org/education/nanooptics/ , часть 2, задачи к лекции 8, 1-12.	Проверка Домашнего задания, опрос
9	Квантовые излучатели	2 часа Флуоресцентные молекулы. Полупроводниковые квантовые точки. Сечение поглощения. Однофотонное излучение трехуровневой системы. Отдельные молекулы как зонды для локализованных полей.	2,5 часа. Интернет-ресурс лаборатории Теоретических проблем оптики: http://tpopt.org/education/nanooptics/ , часть 2, задачи к лекции 9, 1-4.	Проверка Домашнего задания, опрос
10	Дипольное излучение вблизи плоских границ раздела	2 часа «Разрешенный» и «запрещенный» свет. Диадная функция Грина для отраженного и прошедшего полей. Скорость спонтанной релаксации вблизи плоских границ.	2,5 часа. Интернет-ресурс лаборатории Теоретических проблем оптики: http://tpopt.org/education/nanooptics/ , часть 2, задачи к лекции 10, 1-5.	Проверка Домашнего задания, опрос
11	Фотонные кристаллы, микрорезонаторы.	2 часа Фотонные кристаллы. Микрорезонаторы. Метаматериалы.	2,5 часа. Интернет-ресурс лаборатории Теоретических проблем оптики http://tpopt.org/education/nanooptics/ , часть 2, задачи к лекции 11, 1-3.	Проверка Домашнего задания, опрос
12	Плазмоны	2 часа Объемные плазмоны. Поверхностные плазмоны-поляритоны. Локальные плазмоны. Плазмоны в линейной и нелинейной оптике. Гигантское комбинационное рассеяние света. Плазмоны и метаматериалы.	2,5 часа. Интернет-ресурс лаборатории Теоретических проблем оптики http://tpopt.org/education/nanooptics/ , часть 2, задачи к лекции 12, 1-7.	Проверка Домашнего задания, опрос
13	Силы в удерживающих полях	2 часа За пределами дипольного приближения. Оптические пинцеты.	2,5 часа. Интернет-ресурс лаборатории Теоретических проблем оптики http://tpopt.org/education/nanooptics/ , часть 2, задачи к лекции 13, 1-5.	Проверка Домашнего задания, опрос

14	Взаимодействия, обусловленные флуктуациями	2 часа Флуктуационно-диссипационная теорема. Излучение флуктуирующих источников. Когерентность, спектральный сдвиг и перенос тепла. Силы Ван-дер-Ваальса. Потенциал Казимира-Полдера. Электромагнитное трение.	3 часа. Интернет-ресурс лаборатории Теоретических проблем оптики http://tpopt.org/education/nanooptics/ , часть 2, задачи к лекции 14, 1-6.	Проверка Домашнего задания, опрос
15	Вычислительные методы в нанооптике	2 часа Метод разложения по мультиполям. Метод объемного интеграла. Метод множественных мультиполей. Метод связанных диполей. Метод разложения поля по собственным модам решетки. Метод решения векторного волнового уравнения Максвелла на основе рекуррентных выражений.	2,5 часа. Интернет-ресурс лаборатории Теоретических проблем оптики http://tpopt.org/education/nanooptics/ , часть 2, задачи к лекции 15, 1-4.	Проверка Домашнего задания, опрос

9. Место дисциплины в структуре ООП ВПО

1. Дисциплина является спецкурсом по выбору.
2. Вариативная часть, блок В-ПД, модуль «Теоретическая физика».
3. Курс охватывает большой круг проблем, относящихся к фундаментальной задаче взаимодействия излучения с веществом. Для успешного освоения настоящей дисциплины является необходимым освоение модулей «Общая физика» и «Математика», а также таких разделов модуля «Теоретическая физика» как «Теоретическая механика», «Электродинамика», «Квантовая теория» и «Термодинамика и статистическая физика». Курс является теоретическим базисом к таким программам как «Физика наносистем» и «Физика оптических явлений», а также к дисциплинам: «Основы фотоники и оптических технологий», «Оптика проводящих полимеров и наноматериалов», «Лазерная диагностика в биологии и медицине», «Наноэлектроника и мезоскопика», «Сканирующая зондовая спектроскопия и основы наноэлектроники», «Введение в интегральную и волоконную оптику» и «Оптические методы исследования конденсированных сред».
 - 3.1. Модули «Общая физика» и «Математика»; дисциплины «Теоретическая механика», «Электродинамика», «Квантовая теория» и «Термодинамика и статистическая физика».
 - 3.2. Программы «Физика наносистем» и «Физика оптических явлений»; дисциплины «Основы фотоники и оптических технологий», «Оптика проводящих полимеров и наноматериалов», «Лазерная диагностика в биологии и медицине», «Наноэлектроника и мезоскопика», «Сканирующая зондовая спектроскопия и основы наноэлектроники», «Введение в интегральную и волоконную оптику» и «Оптические методы исследования конденсированных сред».

10. Образовательные технологии

- применение компьютерных симуляторов,
- использование средств дистанционного сопровождения учебного процесса,
- использование электронных презентаций курса.

11. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации

Пример домашнего задания

1. Рассмотрите одномерный фотонный кристалл, изготовленный из двух различных диэлектрических слоев, которые обладают диэлектрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 , а также толщиной d_1 и d_2 соответственно. Выведите характеристическое уравнение для ТЕ- и ТМ-мод. Постройте дисперсионные кривые $k_x(\omega)$ для $\epsilon_1=17,88$, $\epsilon_2 = 2,31$ и $d_2/d_1 = 2/3$.
2. Оцените длину волны наиболее добротной моды микросферы радиусом $a = 50$ мкм и диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,31$. Определите межмодовое расстояние $\Delta\lambda$.
3. Для микросферы с $\epsilon = 2,31$ постройте численно правые части равенств характеристических уравнений ТЕ- и ТМ-моды в комплексной плоскости ka . Положив номер момента импульса равным $\ell = 10$, оцените величину ka для мод с радиальными номерами $\nu = 1, 2$ и 3 .

Список вопросов к зачету.

1. Диадная функция Грина. Математический формализм функции Грина. Функция Грина электрического поля. Нестационарная функция Грина.
2. Эванесцентные поля. Перенос энергии затухающим полем. Нарушенное полное внутреннее отражение.
3. Угловые распределения оптических полей. Угловое распределение поля диполя.

4. Пропагаторы поля. Параксиальное приближение для оптических полей. Гауссовы лазерные пучки. Лазерные моды более высокого порядка. Продольные поля в фокальной области.
5. Поляризованные электрические и магнитные поля. Угловой спектр поля в дальней зоне. Фокусировка полей. Фокальные поля. Фокусировка лазерных мод высокого порядка. Передел слабой фокусировки. Фокусировка вблизи плоских поверхностей.
6. Функция рассеяния точки. Предел(ы) разрешения. Повышение предела разрешения путем селективного возбуждения. Осевое разрешение.
7. Увеличение разрешения посредством насыщения. Принципы конфокальной микроскопии. Осевое разрешение в многофотонной микроскопии.
8. Принципы микроскопии ближнего поля. Передача информации из ближней зоны в дальнюю.
9. Излучение в дальнем поле и детектирование. Конфокальная микроскопия. Подсветка в ближнем поле и детектирование в дальнем поле. Апертурное сканирование в оптической микроскопии ближнего поля. Сильнопольная сканирующая оптическая микроскопия ближнего поля. Подсветка в дальнем поле и детектирование в ближнем поле. Сканирующая туннельная оптическая микроскопия. Многомодовая оптическая микроскопия ближнего поля. Подсветка в ближнем поле и детектирование в ближнем поле. Другие схемы: микроскопия на основе переноса энергии.
10. Мультипольное разложение. Классический гамильтониан «частица+поле». Мультипольное разложение гамильтониана взаимодействия.
11. Излучение электрического диполя. Поле электрического диполя в однородном пространстве. Дипольное излучение. Скорость диссипации энергии в неоднородной среде. Реакция излучения.
12. Спонтанная релаксация. КЭД спонтанной релаксации. Спонтанная релаксация и диадная функция Грина. Классическое время жизни и скорость релаксации. Однородное окружение. Неоднородное окружение. Сдвиг частоты. Квантовый выход.
13. Диполь-дипольное взаимодействие и перенос энергии. Мультипольное разложение кулоновского взаимодействия. Резонансный безызлучательный перенос энергии между двумя частицами (FRET). Делокализованные возбуждения (сильная связь). Перепутанные состояния.
14. Флуоресцентные молекулы. Возбуждение. Релаксация.
15. Полупроводниковые квантовые точки. Возбуждение. Лазеры на полупроводниковых квантовых точках. Когерентный контроль экситонов.
16. Сечение поглощения. Однофотонное излучение трехуровневой системы. Стационарное состояние. Нестационарный случай.
17. Волны на границе раздела сред. Моды утечки. «Разрешенный» и «запрещенный» свет. Угловой спектр диадной функции Грина. Разложение диадной функции Грина. Диадная функция Грина для отраженного и прошедшего полей.
18. Скорость спонтанной релаксации вблизи плоских границ.
19. Дальнее поле. Диаграмма направленности излучения. Магнитные диполи. Приближение диполя-изображения. Вертикальный диполь. Горизонтальный диполь. Включение запаздывания.
20. Фотонные кристаллы. Фотонные запрещенные зоны. Дефекты в фотонных кристаллах. Фотонные кристаллы как метаматериалы.
21. Оптические микрорезонаторы.
22. Оптические свойства благородных металлов. Теория Друде-Зоммерфельда. Межзонные переходы.

23. Поверхностные плазмоны-поляритоны на плоских границах раздела. Свойства поверхностных плазмонов-поляритонов. Возбуждение поверхностных плазмонов-поляритонов. Датчики на основе поверхностных плазмонов.
24. Локальные плазмоны, связанные с проводниками и частицами. Плазменные резонансы более сложных структур.
25. Гигантское комбинационное рассеяние света.
26. Тензор напряжений Максвелла. Давление излучения. Дипольное приближение. Сила, усредненная по времени. Монохроматические поля. Насыщение возбуждения вблизи резонанса.
27. Оптические пинцеты. Угловой момент и момент вращения. Силы в ближних оптических полях.
28. Флуктуационно-диссипационная теорема. Функция отклика системы. Белый шум. Диссипация, обусловленная флуктуациями внешних полей.
29. Нормальное и антинормальное упорядочивание. Излучение флуктуирующих источников. Излучение абсолютно черного тела. Когерентность, спектральный сдвиг и перенос тепла.
30. Флуктуационно-индуцированные силы. Потенциал Казимира-Полдера. Электромагнитное трение.
31. Метод разложения по мультиполям. Метод объемного интеграла. Объемное интегральное уравнение. Метод взаимодействующих мультиполей (МВМ). Метод связанных диполей (МСД). Эквивалентность МВМ и МСД.
32. Эффективная поляризуемость. Полная функция Грина.

12. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

Основная литература

1. Л. Новотный, Б. Хехт, «Основы нанооптики», Издательство ФИЗМАТЛИТ, Москва, Россия, 2009.
2. В.В. Климов, «Наноплазмоника», Издательство ФИЗМАТЛИТ, Москва, Россия, 2010.
3. «Растровая электронная микроскопия для нанотехнологий: методы и применение», под ред. У.Жу, Ж.Л.Уанга, Издательство БИНОМ, Москва, Россия, 2013
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. A.Zayats, D.Richards (editors), “Nano-optics and Near-field Optical Microscopy”, ARTECH HOUSE, INC., Boston/London, 2009

Дополнительная литература

1. Батыгин В.В., Топтыгин И.Н., «Современная электродинамика», Издательство: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Ижевск, Россия, 2005.
2. Мандель Л., Вольф Э. «Оптическая когерентность и квантовая оптика» Издательство ФИЗМАТЛИТ, Москва, Россия, 2000.
3. Борн М., Вольф Э. «Основы оптики» Издательство ФИЗМАТЛИТ, Москва. Россия, 2003.

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>

Программное обеспечение современных информационных компьютерных технологий

1. <http://www.wolfram.com/mathematica/>
2. <http://www.maplesoft.com/products/Maple/>
3. <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
4. <http://www.comsol.com/products/multiphysics/>
5. <http://maxima.sourceforge.net/>
6. <http://www.scipy.org/>

13. Материально-техническое обеспечение

В соответствии с требованиями п.5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика».

Малый конференц-зал КНО, конференц-зал КНО, 5-42, Н-9 и любая другая аудитория, оснащенная проекционным оборудованием с возможностью подключения к ноутбуку и интерактивной доской; также желательно наличие компьютеров.