



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
Программа дисциплины «Принципы и экспериментальные методы нанопотоники» для направления 03.06.01
Физика и астрономия, профиль 01.04.05 «Оптика» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

Правительство Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное

учреждение высшего профессионального образования

"Национальный исследовательский университет

"Высшая школа экономики"

**Программа дисциплины «Принципы и экспериментальные методы
нанопотоники»**

для направления 03.06.01 Физика и астрономия, профиль 01.04.05 «Оптика»

подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

-

Авторы программы:

Вайнер Юрий Григорьевич,

д.ф.м.н. , e-mail: vainer@isan.troitsk.ru

Москва - 2017



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
Программа дисциплины «Принципы и экспериментальные методы нанофотоники» для направления 03.06.01
Физика и астрономия, профиль 01.04.05 «Оптика» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

Настоящая программа не может быть использована другими подразделениями университета и другими вузами без разрешения разработчика программы.



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
Программа дисциплины «Принципы и экспериментальные методы нанопотоники» для направления 03.06.01
Физика и астрономия, профиль 01.04.05 «Оптика» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

1. Область применения и нормативные ссылки

Настоящая программа учебной дисциплины устанавливает минимальные требования к знаниям и умениям аспиранта по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия» профиля 01.04.05 «Оптика» и определяет содержание и виды учебных занятий и отчетности.

Программа предназначена для преподавателей, ведущих данную дисциплину, и аспирантов направления 03.06.01 Физика и астрономия, профиль 01.04.05 «Оптика».

Программа разработана в соответствии с:

Образовательным стандартом НИУ ВШЭ по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия»;

Образовательной программой «Физика и астрономия» подготовки аспиранта.

Учебным планом подготовки аспирантов по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия», профиль 01.04.05 «Оптика», утвержденным в 2017.

В основу Программы положена Программа-минимум кандидатского экзамена по специальности 01.04.05 «Оптика» по физико-математическим и техническим наукам, разработанная экспертным советом Высшей аттестационной комиссии Министерства образования Российской Федерации по физике при участии Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова, Института физики металлов Уро РАН, ФИАН им. П.Н.Лебедева и Института материаловедения им. А.А.Байкова РАН.

2. Цели освоения дисциплины:

- получение фундаментальных знаний в области взаимодействия электромагнитного излучения с веществом на наноуровне.
- углубление представлений об оптических эффектах и сопутствующих им физических явлениях в наночастицах и наноструктурированных объектах, находящихся в конденсированном состоянии.
- ознакомление с современными методами расчетов разнообразных эффектов взаимодействия электромагнитного излучения с веществом на наноуровне.
- знакомство с основными методами современной нанооптики и нанопотоники и практическими применениями разработанных на этой области приборов и методик, включая применения в области биофизики и медицины.

Кроме того, освоение дисциплины должно способствовать формированию профессиональных компетенций, определяемых профилем программы аспирантуры.



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
Программа дисциплины «Принципы и экспериментальные методы нанопотоники» для направления 03.06.01
Физика и астрономия, профиль 01.04.05 «Оптика» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

В результате освоения дисциплины аспирант должен:

- Знать основные принципы теории взаимодействия электромагнитного излучения с веществом на наноуровне.
- Овладеть современными методами расчетов эффектов взаимодействия электромагнитного излучения с веществом на наноуровне.
- Усвоить основные методы и подходы применяемые для решения задач современной нанооптики и нанопотоники, в том числе для целей практики.

В результате освоения дисциплины аспирант осваивает следующие компетенции:

Компетенция (указываются в соответствии с ОС НИУ ВШЭ)	Код по ОС НИУ ВШЭ	Дескрипторы – основные признаки освоения (показатели достижения результата)	Формы и методы обучения, способствующие формированию и развитию компетенции
Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях	УК-1	Демонстрирует способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях	Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников.
Готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-	УК-3	Демонстрирует готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению	Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников.



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Программа дисциплины «Принципы и экспериментальные методы нанофотоники» для направления 03.06.01

Физика и астрономия, профиль 01.04.05 «Оптика» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

образователь-ных задач.		научных и научно-образовательных задач.	
Готовность использовать современные методы и технологии научной коммуникации на государственном и иностранном языках.	УК-4	Демонстрирует готовность использовать современные методы и технологии научной коммуникации на государственном и иностранном языках.	Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников.
Способность выполнять экспериментальные исследования и расчеты в области экспериментальных методов нанооптики и нанофотоники.	ПК-1	Демонстрирует способность выполнять экспериментальные исследования и расчеты в области экспериментальных методов нанооптики и нанофотоники.	Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников.
Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в области экспериментальной физики с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий.	ОПК-1	Демонстрирует способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в области экспериментальной физики с использованием современных физических методов исследования и информационно-коммуникационных технологий.	Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников.
Способность к разработке новых методов исследования и их применению в самостоятельной профессиональной научно-исследова-	ОПК-2	Демонстрирует способность к разработке новых методов исследования и их применению в самостоятельной профессиональной научно-исследовательской	Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников.



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
 Программа дисциплины «Принципы и экспериментальные методы нанофотоники» для направления 03.06.01
 Физика и астрономия, профиль 01.04.05 «Оптика» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

тельской деятельности.		деятельности.	
------------------------	--	---------------	--

4. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Настоящая дисциплина относится к дисциплинам вариативной части, обязательной для профиля «Оптика».

Изучение данной дисциплины базируется на следующих базовых дисциплинах:

- Классическая электродинамика, включая электродинамику сплошных сред.
- Оптика, включая физическую оптику.
- Квантовая механика.
- Теория твердого тела.

5. Тематический план учебной дисциплины

№	Название темы	Всего часов	Аудиторные часы			Самостоятельная работа
			Лекции	Семинары	Практические занятия	
1	Введение в нанофотонику. Понятие ближнего и дальнего электромагнитного поля. Эванесцентные волны.	10	2			14
2	Основные понятия классической электродинамики, включая электродинамику сплошных сред.	20	4			16
3	Теоретические основы оптической микроскопии, Дальнеполевая микроскопия сверхвысокого пространственного разрешения. Оптический микроскоп ближнего поля.	20	4			16
4	Основы плазмоники и наноплазмоники. Поверхностные плазмоны. Локализованный	20	4			16



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
 Программа дисциплины «Принципы и экспериментальные методы нанофотоники» для направления 03.06.01
 Физика и астрономия, профиль 01.04.05 «Оптика» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

	плазмонный резонанс.					
5	Точечные квантовые излучатели.	20	4			14
6	Оптические микрорезонаторы и фотонные кристаллы. Скорость спонтанной релаксации.	20	4			16
7	Флуктуационно-диссипативная теорема. Флуктуации на наномасштабе.	10	2			6
8	Силы, вызываемые действием света. Оптический пинцет.	10	2			8
9	Наноструктуры биологической природы. Нанофотоника в биофизике и медицине	22	4			16
	Итого	152	30			122

6. Формы контроля знаний аспирантов

Тип контроля	Форма контроля	Полугодие	Параметры
		1	
Текущий	<i>Домашнее задание</i>		Задачи по материалу лекции, выдаваемые студентам на дом в конце лекции. Обсуждение этих задач в начале следующей лекции.
Итоговый по дисциплине	<i>Экзамен</i>		Беседа с преподавателем (всего 1,5-2 часа)

6.1 Критерии оценки знаний, навыков

Текущий контроль: за все домашние задания выставляется одна общая оценка по 10-ти балльной шкале, равная доле правильно решенных задач, умноженной на 10.

Экзамен оценивается по 10-ти балльной шкале и состоит из пяти теоретических вопросов. На каждый вопрос даётся десять-пятнадцать минут на подготовку. Студент в очной беседе с преподавателем отвечает на вопросы. Оценка, выставляемая за экзамен, равна количеству правильных ответов, умноженному на два. Время, отводимое на экзамен, — 1½ часа.



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Программа дисциплины «Принципы и экспериментальные методы нанопотоники» для направления 03.06.01

Физика и астрономия, профиль 01.04.05 «Оптика» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

6.2 Порядок формирования оценок по дисциплине

Оценка за курс является средним арифметическим оценки текущего контроля и оценки за экзамен.

7. Содержание дисциплины

7.1 Раздел 1. Введение в нанопотонику.

Физические явления и объекты, изучаемые в нанопотонике и нанооптике.

Что называют мезо- или нанообъектами или наноструктурами? Каков характерный масштаб указанных особенностей? Основные отличия оптических и физических свойств нанообъектов от свойств макроскопических тел и основные физические причины этих отличий.

Роль поверхности и поверхностных состояний, конфайнмент, характерный масштаб проявления квантовых эффектов и их роль. Ближнее электромагнитное поле и эванесцентные волны.

7.2 Раздел 2. Основные понятия классической электродинамики, включая электродинамику сплошных сред.

Уравнения Максвелла-Лоренца. Электромагнитное поле в веществе. Усреднение локальных полей в среде. Уравнения Максвелла. Уравнения связи и граничные условия. Пределы применимости системы уравнений связи. Пространственная и временная дисперсии. Волновые уравнения. Излучение гармонического колеблющегося диполя. Волновая зоны. Основные свойства и отличия ближнего и дальнего полей. Квазистатическое и квазистационарное поле. Диполь-дипольное взаимодействие. Резонансный безызлучательный перенос энергии Ферстера. Учет векторного характера электромагнитных полей в нанооптике. Формализм функции Грина. Монохроматические оптические поля. Комплексный показатель преломления. Полное внутреннее отражение. Нарушенное полное внутреннее отражение. Эванесцентные поля. Перенос энергии эванесцентным полем. Сдвиг Гуса-Хэнхена. Запрещенный свет. Гауссовы лазерные пучки, эрмитово-гауссовские и лаггеррово-гауссовские моды и их использование.

7.3 Раздел 3. Теоретические основы оптической микроскопии. Дальнеполевая микроскопия сверхвысокого пространственного разрешения. Оптический микроскоп ближнего поля.

Разложение электромагнитного поля в угловой фурье-спектр, пространственные частоты. Фурье оптика. Угловое спектральное представление поля электрического диполя. Предел разрешения в дальнем поле. Фокусировка излучения. Продольные поля в фокальной плоскости. Оптическая дальнеполевая микроскопии с субдифракционным пространственным разрешением,



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Программа дисциплины «Принципы и экспериментальные методы нанопотоники» для направления 03.06.01 Физика и астрономия, профиль 01.04.05 «Оптика» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

основанная на применении техники детектирования одиночных молекул. Однофотонные излучатели на флуоресцентных молекулах и квантовых точках.

7.4 Раздел 4. Основы плазмоники и наноплазмоники. Поверхностные плазмоны. Локализованный плазмонный резонанс.

Понятие объемного плазмона. Взаимодействие электронных возбуждений в металлах с электромагнитным излучением. Теория Друдэ-Зоммерфельда. Дисперсионные кривые. Вклад межзонных переходов. Поверхностный плазмонный резонанс. Возбуждение поверхностных плазмонов методом полного внутреннего отражения. Применения поверхностного плазмонного резонанса для аналитических целей. Микроскоп поверхностного плазмонного резонанса. Локализованный плазмонный резонанс. Возбуждение плазмонов в металлических наносферах и наночастицах. Применения локализованного плазмонного резонанса. Использование наночастиц из благородных металлов в качестве нанозондов. Наноматрицы. Плазмонная микроскопия. Поверхностные плазмоны и гигантское комбинационное рассеяние на шероховатостях поверхности и вблизи наночастиц благородных металлов.

7.5 Раздел 5. Точечные квантовые излучатели.

Полупроводниковые квантовые точки. Зависимость спектров излучения и поглощения от размеров нанокристаллов. Применения квантовых точек в качестве оптического нанозонда. Флуоресцентные молекулы. Спектр поглощения и излучения флуоресцентных молекул, внедренных в прозрачную твердотельную матрицу. Релаксация, взаимодействие с матрицей, времена продольной и поперечной релаксации, ширина линии. Статистика излучения одиночных молекул. Мерцающая люминесценция одиночных молекул. Спектроскопия одиночных молекул. Детектирование одиночных молекул. Использование одиночных флуоресцентных молекул в качестве спектрального и оптического нанозонда в задачах физики и нанопотоники, в частности биофизики.

7.6 Раздел 6. Оптические микрорезонаторы и фотонные кристаллы. Скорость спонтанной релаксации.

Оптические микрорезонаторы. Моды сферического микрорезонатора, моды “шепчущей” галереи. Теория Ми. Классификация фотонных кристаллов. Плотность фотонных состояний и зонная структура одномерного и многомерных фотонных кристаллов. Дифракция Брэгга и Лауэ. Методы изготовления фотонных кристаллов. Применение фотонных кристаллов. Просветляющие покрытия, диэлектрические зеркала. Градиентные фотонные кристаллы.

7.7 Раздел 7. Флуктуационно-диссипативная теорема. Флуктуации на наномасштабе. Диссипация энергии вызываемая флуктуациями. Механизмы возникновения диссипации.



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Программа дисциплины «Принципы и экспериментальные методы нанопотоники» для направления 03.06.01

Физика и астрономия, профиль 01.04.05 «Оптика» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

Функция отклика системы. Белый шум. Формула Найквиста. Излучение абсолютно черного тела. Флуктуационно-индуцированные силы. Дисперсионное взаимодействие. Электромагнитное трение. Сила Казимира.

7.8 Раздел 8. Силы, вызываемые действием света. Оптический пинцет.

Плотность потока электромагнитной энергии. Давление света в рамках электромагнитной теории света. Опыты Лебедева по измерению светового давления. Тензор напряжений Максвелла. Механическое действие света на наночастицы. Градиентная сила и сила рассеяния. Оптическая ловушка. Лазерное охлаждение атомов. Лазерный пинцет. Момент количества движения переносимый плоской световой волной. Спин и орбитальный момент количества движения фотона. Круговая поляризация света и “закрученный” свет. Получение и использование “закрученного” света.

7.9 Раздел 9. Наноструктуры биологической природы. Нанопотоника в биофизике и медицине.

Структура биологических сред на наноуровне. Первичная, вторичная, третичная и четвертичная структура белковых молекул, молекулярная и наноструктура углеводов и жиров. Сложные биологические структуры на основе белков, углеводов, липидов и др. молекул и атомов. Структура ДНК и РНК. Генетический код. Виды РНК. Репликация ДНК. Синтез белка. Вирусы. Состав клетки. Внутри клеточные микровезикулы и экзосомы и их роль в процессах внутри- и межклеточной передачи информации. Биомаркеры на основе флуоресцентных молекул, золотых и серебряных наночастиц, квантовых точек, апконвертирующих нанокристаллов и др. Использование нанокапсул для доставки лекарств. Оптическая нанодиагностика в биофизике и медицине. Оптическая микроскопия биологических сред с субдифракционным пространственным разрешением. Микроскопия со структурированным освещением, 4D-микроскопия. Фотодинамическая терапия с использованием апконвертирующих наночастиц.

8. Образовательные технологии

На лекции обсуждаются основные понятия и подходы в рамках разбираемой темы, даются определения, рассматриваются поучительные примеры. На дом даются задачи для самостоятельного решения, содержащие как упражнения для усвоения пройденного материала, так и нестандартные задачи, позволяющие проверить уровень общего понимания предмета и требующие изучения дополнительного материала.

9. Оценочные средства для текущего контроля и аттестации студента



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Программа дисциплины «Принципы и экспериментальные методы нанофотоники» для направления 03.06.01 Физика и астрономия, профиль 01.04.05 «Оптика» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

9.1 Тематика заданий текущего контроля

Примеры задач домашнего задания:

1. Как влияет направление дипольного момента излучающей одиночной флуоресцентной молекулы на форму изображения в фокальной плоскости линзы. Привести примеры формы распределения в изображении для нескольких направлений дипольного момента одиночной молекулы.
2. Определить величину усредненного потока энергии переносимой эванесцентной волной, возникающей при полном внутреннем отражении в плоскости раздела, в направлении перпендикулярном плоскости раздела.
3. Определить амплитуду тепловых колебаний камертона зондового микроскопа при комнатной температуре, зная константу упругости камертона в предположении равномерного распределения энергии по степеням свободы.

9.2 Вопросы для оценки качества освоения дисциплины

Примеры вопросов к экзамену:

1. Поверхностный плазмонный резонанс. Закон дисперсии плазмонных возбуждений на поверхности металла. Локализованный плазмонный резонанс.
2. Спонтанное излучение элементарных излучателей. Эффект Парселла. Микрорезонаторы.
3. Механическое действие оптического излучения на микро- и нанотела. Тензор напряжений Максвелла. Оптический пинцет.

10. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Основная литература:

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Курс теоретической физики, том VIII. Электродинамика сплошных сред. Москва, Наука, 2005.
2. Левич В.Г. Курс теоретической физики, том I, часть I. Москва, Наука, 1969.
3. Климов В.В. Наноплазмоника, Москва, Физматлит, 2010.
4. Новотный Л., Хехт Б. Основы нанооптики / Пер. с англ. Коновко А.А., Шутовой О.А. / Москва, Физматлит. 2009.
5. Semiconductor and metal nanocrystals. Edited by V.Klimov (2004). New York, Marcel Dekker Inc. Мандель Л., Вольф Э. Оптическая когерентность и квантовая оптика / Перев. с англ. Андрианова С.Н., Калачева А.,А., Лисина В.Н., Митрофановой Т.Г., Носкова М.И., Самарцева В.В., Харинцева С.С. / Москва. Наука, Физматлит, 2000.
6. Научные основы нанотехнологий и новые приборы. Учебник-монография под редакцией Келсалла Р., Хамли А., Геогегана М. / Пер. с англ. Калашникова А.Д. / Глава I. Интеллект, Долгопрудный, 2011.
7. Уэй Т. Физические основы молекулярной биологии / Пер. с англ. под ред. Яковенко Л.В. / Интеллект. Долгопрудный, 2010.



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
Программа дисциплины «Принципы и экспериментальные методы нанофотоники» для направления 03.06.01
Физика и астрономия, профиль 01.04.05 «Оптика» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

Дополнительная литература:

1. Майер С.А. Плазмоника. Теория и приложения / Пер. с англ. Нечаевой Т.С., Колесниченко Ю.В. / Москва, Ижевск, R&C Dynamics, 2011.
2. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Случайные поля. Москва. Наука, 1978.
3. Dmitrii E. Makarov, Single Molecule Science: Physical Principles and Models. CRC Press. NW. 2015.
4. Single-Molecule Optical Detection, Imaging and Spectroscopy. Ed. by T. Basche, W. E. Moerner, M. Orrit, U. P. Wild (1997). Weinheim, New York, Basel, Cambridge, Tokyo WCH.
5. Имри Й., «Введение в мезоскопическую физику», М.: Физматгиз 2004.

Программные средства

При решении некоторых задач нужно умение пользоваться программой «Математика».

11. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Для проведения лекций не используется специальное оборудование, кроме ноутбука и компьютерного проектора.