

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
Филиал Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова
в городе Сарове

УТВЕРЖДАЮ



Директор филиала МГУ в г. Сарове
член-корреспондент РАН В.В.Воеводин

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Наименование дисциплины:

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫМИ
МАТЕРИАЛАМИ

Уровень высшего образования:

Магистратура

Направление подготовки:

03.04.02 Физика

Направленность (профиль) ОПОП:

Лазерная нелинейная оптика и фотоника

Квалификация «Магистр»

Форма обучения: Очная

Саров 2021 г.

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 Физика в редакции приказа по МГУ от 30 декабря 2020 г. №1366.

Авторы–составители:

К.ф.-м.н., доцент Коновко Андрей Андреевич, кафедра общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ

Аннотация к рабочей программе дисциплины

«Взаимодействие лазерного излучения с наноструктурированными материалами»

В курсе изучаются физические процессы и явления при линейном и нелинейном взаимодействии лазерного излучения с микро- и наноструктурированными материалами. Дисциплина читается на 2м году обучения в 1 ом семестре

Изложены физические основы оптики квантовых точек, металлических наночастиц, фотонных кристаллов, диэлектрических микрорезонаторов, гиперболических и других метаматериалов. Даны примеры использования наночастиц и наноструктурированных материалов в инженерии, биологии и медицине.

Рассмотрены различные модели эффективной среды. Проведена классификация поверхностных волн и представлены их дисперсионные свойства. Дана модель спазера – «плазмонного лазера».

Разделы рабочей программы

- 1.** Место дисциплины в структуре основной профессиональной образовательной программы высшего образования (ОПОП ВО).
- 2.** Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (при наличии)
- 3.** Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями
- 4.** Форма обучения.
- 5.** Язык обучения.
- 6.** Содержание дисциплины.
- 7.** Объем дисциплины
- 8.** Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий
- 9.** Текущий контроль и промежуточная аттестация.
- 10.** Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).
- 11.** Шкала оценивания.
- 12.** Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.
- 13.** Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.
- 14.** Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

В результате освоения дисциплины «Взаимодействие лазерного излучения с наноструктурированными материалами» обучающийся кроме знаний предмета получает навыки применения ранее полученных знаний для решения новых научных и практических задач.

Дисциплина читается в 3 семестре и относится к вариативной части программы

2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия

Освоение дисциплин «Электромагнетизм», «Электродинамика», «Оптика», «Математический анализ», «Квантовая механика», «Дифференциальные уравнения», «Теория колебаний», «Теория волн».

3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

4.

Формируемые компетенции (код компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)
Способность использовать знания современных проблем и новейших достижений в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники в своей научно-исследовательской деятельности (СПК-1)	<p>Знать основные законы и направления современных научных исследований в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p> <p>Уметь на основе фундаментальных знаний в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники, определять возможные направления научных исследований.</p> <p>Владеть необходимой информацией из современных отечественных и зарубежных источников по тематике избранного направления исследования в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p>
Способность организовать и планировать физические исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники и решать их с помощью современной аппаратуры, оборудования и информационных технологий (СПК-2)	<p>Знать базовые принципы организации научных исследований с использованием информационных технологий, основные методики работы на современном научном оборудовании в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p> <p>Уметь используя знания в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники проводить научные исследования.</p> <p>Владеть навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов, обобщения, оформления и публичного представления полученных результатов.</p>

<p>Способность определять основные направления внедрения научных результатов в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники (СПК-3).</p>	<p>Знать основные направления инновационного развития в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p> <p>Уметь проводить необходимый анализ современных тенденций научных инноваций в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники для подготовки предложений по внедрению полученных научных результатов.</p> <p>Владеть методами обоснования возможного применения полученных научных результатов с учетом современных достижений в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p>
---	---

5. **Форма обучения:** очная

6. **Язык обучения:** русский

7. **Содержание дисциплины:**

Тема 1. Композитные материалы и модель эффективной среды

Введение. Наночастицы, наноструктуры и метаматериалы: краткая хронология и области применения. Плазменная частота. Модель эффективной среды. Формулы Клаузиуса-Моссотти и Бруггемана. Эффективная диэлектрическая проницаемость и магнитная восприимчивость композитной среды. Дисперсия в окрестности резонансной частоты.

Тема 2. Плазмонные наночастицы и наноантенны

Квазистатические (локализованные на частицах) плазмоны. Мультипольные резонансы сферической плазмонной частицы. Пространственное распределение энергии поля в условиях плазмонного резонанса. Гидродинамическая модель. Плазмонные наноантенны. Эффекты запаздывания. Распространение поверхностного плазмонного поляритона. Диполь-дипольное взаимодействие и передача энергии ближними полями. Перенос энергии вдоль плазмонных линий передач. Эпсилон-метод. Поляризуемость сфероидальных частиц.

Тема 3. Диэлектрические сферические частицы

Теория рассеяния Ми. Резонансы Фано. Диэлектрические элементы метаматериалов. «Оптические топологические изоляторы».

Тема 4. Фотонные кристаллы и метаматериалы

Фотонные кристаллы. Оптические метаматериалы. Многослойные структуры металл-диэлектрик. Плазмонные фотонные кристаллы. Гиперболические материалы. Поверхностные электромагнитные волны: волны Фано, волны Ценнека, волны Дьяконова, волны Тамма. Метаповерхности. Обобщённый закон Снелла. Управление фазой с помощью резонансов в метаатомах. Металинзы. Среда Веселаго. Идеальные линзы Веселаго и Пендри. Диэлектрические метаматериалы.

Тема 5. Элементы нелинейной оптики наноструктурированных материалов

Полупроводниковые квантовые ямы, квантовые провода и квантовые точки. Экситоны. Классическая модель спазера. Решение для покрытой плазмонной оболочкой ядро из

усиливающей среды. Полуклассическая теория спазера. Осцилляции Раби. Спазер в поле внешней световой волны. Компенсация потерь. Электрические, магнитные и магнитоэлектрические нелинейности наноструктурированных материалов.

7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в ак. часах				
		Общая трудоемкость	в том числе ауд. занятий			Самостоятельная работа студентов
			Общая аудиторная нагрузка	Лекций	Семинаров	
Взаимодействие лазерного излучения с наноструктурированными материалами	2	72	36	18	18	36

8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Изучение курса «Взаимодействие лазерного излучения с наноструктурированными материалами» включает в себя лекции, на которых рассматривается теоретическое содержание курса, обсуждение вопросов, обозначенных в темах дисциплины; самостоятельную работу, заключающуюся в подготовке к лекционным занятиям, выполнения домашних заданий. По вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации.

№ темы	Наименование раздела дисциплины	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы					Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации
		Всего часов	Лекции	Научно- практические	Семинары	Самостоятельная работа	
1	Композитные материалы и модель эффективной среды	12	3	-	3	6	Собеседование, опрос
2	Плазмонные наночастицы и наноантенны	20	6	-	6	2	

3	Диэлектрические сферические частицы	12	3	-	3	6	
4	Фотонные кристаллы и метаматериалы	12	3	-	3	6	
5	Элементы нелинейной оптики наноструктурированных материалов	12	3	-	3	8	
6	Промежуточная аттестация	4	-	-		4	Зачет в устной форме
ИТОГО:		72	18		18	36	

9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Взаимодействие лазерного излучения с наноструктурированными материалами» осуществляется на лекциях и заключается в оценке активности слушателей, качества ответов на вопросы лектора, аргументированности позиции студента, оценивается широта используемых им теоретических знаний. В семестре в конце некоторых лекций проводятся несколько коротких контрольных работ (10 – 15 минут).

Промежуточная аттестация по дисциплине «Взаимодействие лазерного излучения с наноструктурированными материалами» проводится в форме зачета.

10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

Требования к структуре и содержанию фонда оценочных средств текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Перечень оценочных средств, применяемых на каждом этапе проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине, представлены в таблице

Наименование оценочного средства	Краткая характеристика оценочного средства	Представление оценочного средства в фонде
Оценочные средства текущего контроля		
Тематический опрос (в форме ответов на вопросы)	Средство контроля, организованное как короткий письменный ответ на поставленный вопрос по тематике предыдущей или текущей лекции, рассчитанное на выяснение объема и качества знаний, усвоенных обучающимися по определенному разделу, теме, проблеме.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Собеседование (в форме беседы, дискуссии по теме)	Средство контроля, организованное как свободная беседа, дискуссия по тематике изучаемой дисциплины, рассчитанное на выяснение объема знаний обучающегося по всем изученным разделам, темам; свободного использования терминологии для аргументированного выражения собственной позиции.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Оценочные средства промежуточной аттестации		

Короткая письменная работа	Средство, позволяющее оценить сформированность систематических представлений о методах научно-исследовательской деятельности.	Перечень вопросов к зачету
----------------------------	---	----------------------------

11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	2	3	4	5
ЗНАТЬ: принципов взаимодействия лазерного излучения с наноструктурированными материалами ОПК-3.Б З-6	Отсутствие знаний принципов взаимодействия лазерного излучения с наноструктурированными материалами	В целом успешные, но не систематические знания принципов взаимодействия лазерного излучения с наноструктурированными материалами	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания принципов взаимодействия лазерного излучения с наноструктурированными материалами	Успешные и систематические знания принципов взаимодействия лазерного излучения с наноструктурированными материалами
УМЕТЬ: применять принципы взаимодействия лазерного излучения с наноструктурированными материалами ОПК-3.Б У-6	Отсутствие умения применять принципы взаимодействия лазерного излучения с наноструктурированными материалами	В целом успешное, но не систематическое применение принципов взаимодействия лазерного излучения с наноструктурированными материалами	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение применять принципы взаимодействия лазерного излучения с наноструктурированными материалами	Успешное и систематическое применение принципов взаимодействия лазерного излучения с наноструктурированными материалами
ВЛАДЕТЬ: методами описания и расчета взаимодействия лазерного излучения с наноструктурированными материалами ОПК-3.Б В-6	Отсутствие/фрагментарное владение методами описания и расчета взаимодействия лазерного излучения с наноструктурированными материалами	В целом успешное, но не систематическое владение методами описания и расчета взаимодействия лазерного излучения с наноструктурированными материалами	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение методами описания и расчета взаимодействия лазерного излучения с наноструктурированными материалами	Успешное и систематическое владение методами описания и расчета взаимодействия лазерного излучения с наноструктурированными материалами

12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся:

Пример:

1. Получите выражение для частоты плазмонного резонанса наносферы.
2. Получите дисперсионное уравнение для поверхностного плазмонного поляритона на границе раздела металл-диэлектрик. Диэлектрическая проницаемость металла задана простейшей моделью Друде без затухания.
3. 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.
4. Получите оценку ширины фотонной запрещенной зоны и ее спектрального положения в видимом диапазоне частот для одномерного фотонного кристалла, диэлектрические слои которого обладают диэлектрическими проницаемостями $\varepsilon_1 = 17,88$, $\varepsilon_2 = 2,31$ и $d_1 = d_2 = 500$ нм.
5. Вычислите ширину запрещенной зоны в полупроводниковой квантовой точке в форме куба с ребром длиной 2 нм, CdTe, если ширина запрещенной зоны объемного материала составляет 1,45 эВ, а эффективная масса носителя заряда составляет $0.025m_0$.

13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.

Материалы промежуточного контроля успеваемости обучающихся в форме зачета:

1. Модель эффективной среды и расчёт эффективных диэлектрической проницаемости и магнитной восприимчивости.
2. Формулы Клаузиуса-Моссотти и Бругемана.
3. Плазменная частота. Объёмный плазмон. Модель Друде.
4. Плазмоны, локализованные на частицах. Частота плазмонного резонанса на металлической наносфере.
5. Мультипольные резонансы сферической плазмонной частицы.
6. Пространственное распределение энергии поля в условиях плазмонного резонанса. Коэффициент усиления локального поля.
7. Плазмонные наноантенны.
8. Эффекты запаздывания. Распространение поверхностного плазмонного поляритона.
9. Диполь-дипольное взаимодействие и передача энергии ближними полями.
10. Перенос энергии вдоль плазмонных линий передач.
11. Эпсилон-метод. Поляризуемость сфероидальных частиц.
12. Гидродинамическая модель электронного газа в металлических наночастицах.
13. Поверхностный плазмонный поляритон. Дисперсионные свойства. Способы возбуждения.
14. Теория рассеяния Ми.
15. Резонансы Фано.
16. Полупроводниковые квантовые точки. Плотность состояний. Возбуждение экситонов.

17. Фотонные кристаллы. Дисперсионное уравнение одномерного фотонного кристалла. Фотонная запрещенная зона.
18. Оптические свойства гиперболических метаматериалов.
19. Волны Дьяконова.
20. Волны Тамма.
21. Обобщенный закон Снелла.
22. Полуклассическая теория спазера.
23. Гигантское комбинационное рассеяние света.
24. Оптические свойства наноантенн.
25. Оптические свойства нанорешеток. Метаповерхности.
26. Среда Веселаго. Идеальные линзы Веселаго и Пендри.
27. Электрические, магнитные и магнитоэлектрические нелинейности наноструктурированных материалов.

14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

Основная литература.

1. В.В. Климов, «Наноплазмоника», Издательство ФИЗМАТЛИТ, Москва, Россия, 2010.
2. Ю.Н. Кульчин, «Современная оптика и фотоника нано- и микросистем», Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2016.
3. Е.С. Андрианов, А.П. Виноградов, А.В. Дорофеев, А.А. Зябловский, А.А. Лисянский, А.А. Пухов, «Квантовая наноплазмоника», Издательский дом «Интеллект», Долгопрудный, 2015.
4. Л. Новотный, Б. Хехт, «Основы нанооптики», Издательство ФИЗМАТЛИТ, Москва, Россия, 2009.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. «Теоретическая физика. Том 8. Электродинамика сплошных сред.» Изд. 4., М.:ФИЗМАТЛИТ, 2016.

Дополнительная литература.

1. Сарычев А., Шалаев В. «Электродинамика метаматериалов», М.:Научный мир, 2011.
2. О.А. Акципетров, И.М. Баранова, К.Н. Евтюхов «Нелинейная оптика кремния и кремниевых наноструктур», ФИЗМАТЛИТ, Москва, Россия, 2012.
3. L. Solymar, E. Shamonina, “Waves in Metamaterials”, Oxford University Press, Oxford, UK, 2009
4. М. Б. Виноградова, О. В. Руденко, А. П. Сухоруков. Теория волн. Изд. 2-е, доп. Наука Москва, 1990.
5. Батыгин В.В., Топтыгин И.Н., «Современная электродинамика», Издательство: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Ижевск, Россия, 2005.
6. Борн М., Вольф Э. «Основы оптики» Издательство ФИЗМАТЛИТ, Москва. Россия, 2003.
7. Лундквист С., Марч Н. (ред.). Теория неоднородного электронного газа, Москва, Изд-во Мир, 1987, 400 с.
8. John A. Polo Jr., Tom G. Mackay, Akhlesh Lakhtakia, “Electromagnetic Surface Waves A Modern Perspective”, Elsevier Inc., London, 2013.

9. Ilya V. Shadrivov, Mikhail Lapine, Yuri S. Kivshar Editors, “Nonlinear, Tunable and Active Metamaterials”, Springer International Publishing Switzerland, 2015.
10. Wenshan Cai, Vladimir Shalaev , “Optical Metamaterials Fundamentals and Applications”, Springer Science+Business Media, LLC, 2010.

Интернет-ресурсы.

- <http://tpopt.org/>
- <https://nanohub.org/>

Материально-техническое обеспечение

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

Для лекционной части курса требуются аудитория, оборудованная мультимедийным проектором, интерактивной доской, и управляющим компьютером. Также необходимо наличие экрана и обычной учебной доски.