

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:

Оптика метаматериалов

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:

д.ф.-м.н., профессор физического факультета МГУ А.А. Федянин

Аннотация к рабочей программе дисциплины

«Оптика метаматериалов»

В курсе изучаются физические процессы и явления при линейном и нелинейном взаимодействии оптического излучения, в том числе лазерного, с оптическими метаматериалами и фотонными кристаллами различной природы.

Проводится классификация линейных и нелинейных явлений в метаматериалах и фотонных кристаллах. Рассматривается основная проблематика оптических метаматериалов, их классификация, основные явления, наблюдаемые в метаматериалах, в том числе эффекты отрицательного преломления, линзы Веселаго и Пендри, явления фильтрации и локализации света в оптических метаматериалах. Рассматриваются вопросы, связанные со свойствами наноструктур с фотонной запрещенной зоной – фотонных кристаллов и микрорезонаторов, дается представление о базовых оптических и нелинейно-оптических эффектах в фотонных кристаллах и оптических сверхрешетках, дается представление об основных методах расчета зонной структуры фотонных кристаллов. Даны примеры применений метаматериалов и фотонных кристаллов в устройства интегральной фотоники на их основе.

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

Дисциплина «Оптика метаматериалов» реализуется на 2-ом курсе в 1-ом семестре и относится к вариативной части программы обучения.

В результате освоения дисциплины «Оптика метаматериалов» обучающийся кроме знаний предмета получает навыки применения ранее полученных знаний для решения новых научных и практических задач.

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:

Формируемые компетенции (код компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)
<ul style="list-style-type: none">Способность использовать знания современных проблем и новейших достижений в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики в своей научно-исследовательской деятельности (СПК-1).	<p>ЗНАТЬ основные законы и направления современных научных исследований в области лазерной нелинейной оптики и фотоники.</p> <p>УМЕТЬ на основе фундаментальных знаний в области лазерной 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 области лазерной нелинейной оптики и фотоники.</p>
<ul style="list-style-type: none">Способность организовать и планировать физические исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики 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 нелинейной оптики и фотоники.</p> <p>УМЕТЬ используя знания в области лазерной 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>
<ul style="list-style-type: none">Способность определять основные направления внедрения научных результатов в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и	<p>ЗНАТЬ основные направления инновационного развития в области лазерной нелинейной оптики и фотоники.</p> <p>УМЕТЬ проводить необходимый анализ современных тенденций научных инноваций в области лазерной нелинейной оптики и фотоники для подготовки предложений по внедрению полученных научных результатов.</p>

аттосекундной физики (СПК-3).	ВЛАДЕТЬ методами обоснования возможного применения полученных научных результатов с учетом современных достижений в области лазерной нелинейной оптики и фотоники.
-------------------------------	--

4. **Форма обучения:** очная

5. **Язык обучения:** русский

6. **Содержание дисциплины:**

Тема 1. Понятие об оптических метаматериалах и фотонных кристаллах.

Введение. Предмет и содержание курса. Понятие об оптических метаматериалах. Классификация метаматериалов. Явления фильтрации и локализации света в оптических метаматериалах. Проблема оптического магнетизма. Определение и базовые понятия о наноструктурах с фотонной запрещенной зоной - фотонная зона Бриллюэна, закон дисперсии, фотонная зонная структура, фотонная запрещенная зона. Модовая структура оптического поля внутри фотонных кристаллов - волновое уравнение и задача о модовой структуре поля, фазовая и групповая скорости, плотность фотонных состояний. Аналогии фотонных кристаллов с твердым телом. Дефекты (вакансии и примеси) в фотонных кристаллах. Поверхностные («таммовские») состояния.

Тема 2. Примеры оптических метаматериалов и фотонных кристаллов.

Материалы с отрицательным преломлением. Линза Веселаго, линза Пендри. Метаповерхности. Основные материалы для изготовления фотонных кристаллов. Примеры одномерных фотонных кристаллов - брэгговские зеркала, микрорезонаторы, одномерные волноводы. Двумерные фотонные кристаллы - дырчатые волокна, макропористый кремний, макропористый оксид алюминия. Трехмерные фотонные кристаллы - опалы, инвертированные опалы, самоагрегирующийся латекс.

Тема 3. Основные подходы к расчету оптических свойств метаматериалов и фотонных кристаллов.

Методы расчета оптических свойств метаматериалов. Методы расчета фотонной запрещенной зоны двумерных фотонных кристаллов. Метод конечных разностей, метод разложения по плоским волнам. Классификация фотонных мод двумерной квадратной и гексагональной решеток. Зонная структура одномерных фотонных кристаллов. Метод матриц распространения и рекуррентный метод. Формализм эффективной среды. Зонная структура трехмерных фотонных кристаллов. Метод разложения по сферическим волнам, расчет закона дисперсии и пропускания трехмерного массива диэлектрических сфер. Классификация фотонных мод трехмерной ГЦК решетки. Трехмерная дифракция света в фотонных кристаллах.

Тема 4. Оптические и нелинейно-оптические эффекты в метаматериалах и фотонных кристаллах.

Базовые оптические и нелинейно-оптические эффекты в метаматериалах, фотонных кристаллах и оптических сверхрешетках. Особенности спектров пропускания и отражения. Эффект Керкера. Управление фазой и поляризацией при прохождении и отражении от метаповерхностей. Особенности генерации второй и третьей оптических гармоник и четырехволновых нелинейных процессов в метаматериалах и фотонных кристаллах.

Тема 5. Локализованные фотонные состояния в оптических метаматериалах и фотонных кристаллах.

Дефектные моды оптических метаматериалов, метаповерхностей и фотонных кристаллов. Микрорезонаторы. Нульмерные (точечные) и одномерные (линейчатые) дефекты в двумерных фотонных кристаллах с квадратной и гексагональной решетками. Поверхностные («таммовские») состояния. Суперструктуры на основе фотонных кристаллов. Связанные микрорезонаторы. «Фотонные» молекулы. Эффекты локализации электромагнитного поля и управление фотонной запрещенной зоной. Локализация света в оптических метаматериалах фотонных кристаллах с дефектами.

Тема 6. Магнитооптические эффекты в оптических метаматериалах и фотонных кристаллах.

Магнитофотонные и магнитоплазмонные метаповерхности и фотонные кристаллы. Усиление эффекта Фарадея и магнитооптического эффекта Керра в магнитофотонных метаповерхностях, магнитофотонных кристаллах и микрорезонаторах. Распространение света в квазипериодичных фотонных кристаллах. Квазикристаллы типа Фибоначчи. Компрессия и декомпрессия сверхкоротких лазерных импульсов в квазикристаллах. Биение мод и аномально малая групповая скорость.

7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных	объем учебной нагрузки в ак. часах				
		Общая трудоемкость	в том числе ауд. занятий			Самостоятельная работа студентов
			Общая аудиторная нагрузка	Лекций	Семинаров	
Оптика метаматериалов	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 «Оптика метаматериалов» включает в себя лекции, на которых рассматривается теоретическое содержание курса, обсуждение вопросов, обозначенных в темах дисциплины; самостоятельную работу, заключающуюся в подготовке к лекционным и семинарским занятиям. Темы, рассматриваемые на лекциях, по вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации. Темы, рассматриваемые на лекциях и изучаемые самостоятельно, закрепляются на семинарских занятиях, 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	Понятие об оптических метаматериалах и фотонных кристаллах	12	3		3	6	Собеседование, опрос
2	Примеры оптических метаматериалов и фотонных кристаллов	12	3		3	6	
3	Основные подходы к расчету оптических свойств метаматериалов и фотонных кристаллов	12	3		3	6	
4	Оптические и нелинейно-оптические эффекты в метаматериалах и фотонных кристаллах	12	3		3	6	
5	Локализованные фотонные состояния в оптических метаматериалах и фотонных кристаллах	12	3		3	6	
6	Магнитооптические эффекты в оптических метаматериалах и фотонных кристаллах	8	3		3	2	
7	Промежуточная аттестация	4				4	зачет в устной форме
ИТОГО:		72	18	-	18	36	

9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Оптика метаматериалов» 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 «Оптика метаматериалов» проводится в форме зачета. Результаты сдачи экзамена оцениваются по шкале «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично». Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

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: принципы работы оптических	Отсутствие знаний принципов работы оптических	В целом успешные, но не систематическ	В целом успешное, но содержащее отдельные	Успешные и систематическ ие знания принципов

метаматериалов и фотонных кристаллов ОПК-3.Б 3-6	метаматериалов и фотонных кристаллов	ие знания принципов работы оптических метаматериалов и фотонных кристаллов	пробелы знания принципов работы оптических метаматериалов и фотонных кристаллов	работы оптических метаматериалов и фотонных кристаллов
УМЕТЬ: работать с методами расчета свойств оптических метаматериалов и фотонных кристаллов ОПК-3.Б У-6	Отсутствие умения работать с методами расчета свойств оптических метаматериалов и фотонных кристаллов	В целом успешное, но не систематическое умение работать с методами расчета свойств оптических метаматериалов и фотонных кристаллов	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение работать с методами расчета свойств оптических метаматериалов и фотонных кристаллов	Успешное и систематическое умение работать с методами расчета свойств оптических метаматериалов и фотонных кристаллов
ВЛАДЕТЬ: методами детектирования нелинейно-оптических эффектов в оптических метаматериалах и фотонных кристаллах ОПК-3.Б В-6	Отсутствие/фрагментарное владение методами детектирования нелинейно-оптических эффектов в оптических метаматериалах и фотонных кристаллах	В целом успешное, но не систематическое владение методами детектирования нелинейно-оптических эффектов в оптических метаматериалах и фотонных кристаллах	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение методами детектирования нелинейно-оптических эффектов в оптических метаматериалах и фотонных кристаллах	Успешное и систематическое владение методами детектирования нелинейно-оптических эффектов в оптических метаматериалах и фотонных кристаллах

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

Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся:

Пример:

1. Оценить спектральное положение фотонной запрещенной зоны фотонного кристалла, состоящего из четвертьволновых слоев оптической толщиной 250 нм.
2. Построить ход лучей от точечного источника в линзе Пендри, состоящей из плоскопараллельной пластины с показателем преломления, равным -1.

3. Найти спектральное положение магнито-дипольного резонанса кремниевой сферической Ми-резонансной частицы диаметром 100 нм.
4. Нарисовать примерный спектр фарадеевского угла при прохождении линейно-поляризованного излучения через магнитофотонный микрорезонатор.

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

Материалы промежуточного контроля успеваемости обучающихся в форме зачета:

1. Явления фильтрации и локализации света в оптических метаматериалах.
2. Определение и базовые понятия о наноструктурах с фотонной запрещенной зоной - фотонная зона Бриллюэна, закон дисперсии, фотонная зонная структура, фотонная запрещенная зона.
3. Модовая структура оптического поля внутри фотонных кристаллов - волновое уравнение и задача о модовой структуре поля, фазовая и групповая скорости, плотность фотонных состояний.
4. Аналогии фотонных кристаллов с твердым телом. Дефекты (вакансии и примеси) в фотонных кристаллах. Поверхностные («таммовские») состояния.
5. Материалы с отрицательным преломлением. Линза Веселаго, линза Пендри.
6. Основные понятия о метаповерхностях.
7. Основные материалы для изготовления фотонных кристаллов. Примеры одномерных фотонных кристаллов - брэгговские зеркала, микрорезонаторы, одномерные волноводы.
8. Двумерные фотонные кристаллы - дырчатые волокна, макропористый кремний, макропористый оксид алюминия.
9. Трехмерные фотонные кристаллы - опалы, инвертированные опалы, самоагрегирующийся латекс.
10. Методы расчета оптических свойств метаматериалов.
11. Методы расчета фотонной запрещенной зоны двумерных фотонных кристаллов. Метод конечных разностей, метод разложения по плоским волнам.
12. Зонная структура одномерных фотонных кристаллов. Метод матриц распространения и рекуррентный метод. Формализм эффективной среды.
13. Зонная структура трехмерных фотонных кристаллов. Метод разложения по сферическим волнам, расчет закона дисперсии и пропускания трехмерного массива диэлектрических сфер.
14. Классификация фотонных мод трехмерной ГЦК решетки. Трехмерная дифракция света в фотонных кристаллах.
15. Базовые оптические и нелинейно-оптические эффекты в метаматериалах, фотонных кристаллах и оптических сверхрешетках.
16. Эффект Керкера в оптических метаматериалах. Управление фазой и поляризацией при прохождении и отражении от метаповерхностей.
17. Особенности генерации второй и третьей оптических гармоник и четырехволновых нелинейных процессов в метаматериалах и фотонных кристаллах.
18. Дефектные моды оптических метаматериалов, метаповерхностей и фотонных кристаллов. Микрорезонаторы. Нульмерные (точечные) и одномерные (линейчатые) дефекты в двумерных фотонных кристаллах с квадратной и гексагональной решетками.
19. Связанные микрорезонаторы. «Фотонные» молекулы. Эффекты локализации электромагнитного поля и управление фотонной запрещенной зоной. Локализация света в оптических метаматериалах фотонных кристаллах с дефектами.
20. Магнитофотонные и магнитоплазмонные метаповерхности и фотонные кристаллы. Усиление эффекта Фарадея и магнитооптического эффекта Керра в магнитофотонных метаповерхностях, магнитофотонных кристаллах и микрорезонаторах.

21. Компрессия и декомпрессия сверхкоротких лазерных импульсов в квазикристаллах. Биение мод и аномально малая групповая скорость.

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

Основная литература.

Дополнительная литература.

Интернет-ресурсы.

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, управляющим компьютером, экраном и обычной учебной доской.