

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
электроники, фотоники и  
молекулярной физики  
А.С. Батурин**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Современные направления фотоники
<b>по направлению:</b>	Электроника и нанoeлектроника
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: микро- и нанoeлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра микро- и нанoeлектроники
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

- лекции: 60 час.
- семинары: 0 час.
- лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: М.Ю. Барабаненков, д-р физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры микро- и нанoeлектроники 03.03.2023

## Аннотация

Курс "Современные направления фотоники" предусматривает формирование специальных знаний в области традиционных материалов и элементов планарных интегральных оптоэлектронных структур и новых искусственных электромагнитных материалов с нетипичными электромагнитными свойствами в заданных диапазонах частот электромагнитного излучения и умении конструировать такие материалы при разработке различного рода электромагнитных устройств. Основу второй части курса составляют: физические основы и математические методы единообразного описания поверхностного и объёмного рассеяния классических волновых полей; метод матричного уравнения Риккати расчета частотных спектров отражения и прохождения одномерных дифракционных решеток и двумерных фотонных кристаллов произвольной топологии элементарного рассеивателя; методы численного моделирования оптических задач широкого профиля; методы волноводной оптики применительно к задачам о планарных волноводах интегральной оптики; рассмотрение основных типов метаматериалов и эффектов резонансного рассеяния электромагнитных волн на малых в масштабе рабочей длины волны элементарных блоках метаматериалов, обуславливающих их электромагнитные свойства; резонансные и волноводные эффекты, составляющие основу физики и техники оптики ближнего поля.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- формирование специальных знаний в области традиционных материалов и элементов планарных интегральных оптоэлектронных структур и новых искусственных электромагнитных материалов с нетипичными электромагнитными свойствами в заданных диапазонах частот электромагнитного излучения и умении конструировать такие материалы при разработке различного рода электромагнитных устройств.

### Задачи дисциплины

- рассмотрение физических основ и математических методов единообразного описания поверхностного и объёмного рассеяния классических волновых полей;
- рассмотрение метода матричного уравнения Риккати расчета частотных спектров отражения и прохождения одномерных дифракционных решеток и двумерных фотонных кристаллов произвольной топологии элементарного рассеивателя;
- рассмотрение методов численного моделирования оптических задач широкого профиля;
- рассмотрение методов волноводной оптики применительно к задачам о планарных волноводах интегральной оптики;
- рассмотрение основных типов метаматериалов и эффектов резонансного рассеяния электромагнитных волн на малых в масштабе рабочей длины волны элементарных блоках метаматериалов, обуславливающих их электромагнитные свойства;
- рассмотрение резонансных и волноводных эффектов, составляющих основу физики и техники оптики ближнего поля.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности

ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценить качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- зависимость угловых спектров дифракционной решетки от соотношения длины волны и периода решетки;
- физический смысл индексов и коэффициентов уравнения Риккати;
- зависимость частотного сдвига полосы непропускания электромагнитного кристалла от его геометрических характеристик;
- радиальное распределение электрического поля электромагнитной волны в малых цилиндрических и сферических частицах при резонансном рассеянии;
- основные типы планарных интегральных волноводов, электромагнитных кристаллов и метаматериалов;
- о возможности гомогенизации неоднородных сред и использовании эффективных параметров сред;
- основы апертурной и безапертурной оптики ближнего поля.

уметь:

- применять уравнение Риккати для задачи об отражении и прохождении плоской электромагнитной волны от однородного плоского слоя;
- рассчитывать спектры прохождения брегговских зеркал;
- выбирать наиболее эффективный метод численного расчета конкретной оптической задачи;
- классифицировать метаматериалы.

владеть:

- Первичными навыками расчета частотных спектров дифракционных решеток и электромагнитных кристаллов;
- Первичными навыками расчета планарных диэлектрических и плазмонных волноводов;
- Первичными навыками использования эффективных параметров неоднородных сред;
- Физическими основами апертурной и безапертурной оптики ближнего поля.

### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Вводная лекция	2			1
2	История развития представлений об искусственных волновых материалах	2			1
3	Усреднение микроскопических уравнений Максвелла – Лоренца	2			1

4	От плато Дарвина к фотонным кристаллам	2			1
5	Формулы Клаузиуса — Моссотти и Лоренц – Лорентца	2			1
6	Уравнения Максвелла в веществе	2			1
7	Пространственная дисперсия и появление новых типов волн	2			1
8	Электромагнитные волны в анизотропных средах	2			1
9	Электромагнитное поле в немагнитной одномерно неоднородной среде	2			1
10	Геометрическая оптика неоднородной среды	2			1
11	Практическая задача геометрической оптики неоднородной среды	2			1
12	Средняя плотность электромагнитной энергии в диспергирующей среде	2			1
13	Отражение и преломление электромагнитных волн на границе двух сред	2			1
14	Сдвиг Гуса-Хенхен: теория и практические приложения	2			1
15	Пространственная дисперсия, отрицательное преломление и отрицательная групповая скорость	2			1
16	Понятие о трансформационной оптике. Фотонные кристаллы. Условия формирования частотной полосы непропускания.	2			2
17	Периодические структуры: на пути к единому методу описания поверхностного и объемного рассеяния классических волновых полей. От дифракционных решеток к фотонным кристаллам	2			2
18	Расчет частотных спектров отражения и прохождения одномерных дифракционных решеток и двумерных фотонных кристаллов методом матричного уравнения Риккати	2			2
19	Интегрально-оптические устройства	2			2
20	Методы численного моделирования оптических задач	2			2
21	Метод конечных элементов	2			2
22	Методы конечных разностей	2			2
23	Оптика одномерных многослойных структур	2			2
24	Волноводная оптика	2			2
25	Геометрическое и волновое описание волноводов	2			2
26	Метод распространения пучка	2			2
27	История и классификация метаматериалов	2			2
28	Типы метаматериалов	2			2
29	Резонансное рассеяние: резонансы Ми, Фрёлихера, Фано	2			2
30	Резонансные и волноводные эффекты оптики ближнего поля	2			2

Итого часов	60			45
Подготовка к экзамену	30 час.			
Общая трудоёмкость	135 час., 3 зач.ед.			

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

##### Семестр: 1 (Осенний)

##### 1. Вводная лекция

Развитие представлений о фотонике и связанных с ней технологий. Фотоника как подотрасль до 1980 года - оптические приборы, управляемые электроникой. Новые направления фотоники 1990 – 2000 годов – микрофотоника, нанооптика, плазмоника, радиофотоника, однофотоника, оптические искусственные материалы. Примеры: волноводы и дифракционные решетки микрофотоники, плазмоники, оптические искусственные материалы. Пояснения: уравнения Максвелла, частота и длина ЭМ волны в среде, уравнения Максвелла в веществе, граница раздела сред «знает» частоту волны, но не «знает» длину волны. Структуры и материалы микрофотоники и нанооптики. Пояснения: бианизотропные среды и их свойства. Метаматериалы. Определение. Области применения искусственных ЭМ материалов.

##### 2. История развития представлений об искусственных волновых материалах

История ЭМ материалов: высвечивание паров ртути. Спонтанное излучение в резонаторе. Диполь в открытом резонаторе. Искусственные периодические волновые структуры. Типы метаматериалов и метаповерхностей. Примеры: биосенсоры на основе 10 нм частиц Au и Ag, волноводы из наночастиц Au, метаповерхности с заданным спектром отражения, наноантенны.

##### 3. Усреднение микроскопических уравнений Максвелла – Лоренца

Основная задача и уравнения электродинамики (ЭД). Приближение электро- магнитостатики. Полная система уравнений для электромагнитного (ЭМ) поля и его связи с зарядами и токами. Уравнения для фурье-компонент по времени и алгебраическая система уравнений для фурье-образов. Приближения для усреднения микроскопических уравнений - разделение зарядов на свободные и связанные; слабое действие поля на вещество; усреднение по физически бесконечно малому объему плотности микротоков и зарядов; пренебрежение флуктуациями плотности токов и зарядов. Усреднение микроскопических уравнений Максвелла – Лоренца в высокочастотном пределе. Два метода описания ЭМ поля в веществе в области больших частот. Область применимости уравнений в области больших частот. Более полная теория ЭМ явлений без ограничения частоты снизу. Электрическое смещение и электрическая индукция. Введение макроскопического магнитного поля и система уравнений Максвелла в веществе. Отсутствие единообразия в терминах свободные и связанные заряды.

##### 4. От плато Дарвина к фотонным кристаллам

От плато Дарвина к фотонным кристаллам. Дифракция рентгеновских лучей в кристалле. Фурье-компоненты поляризуемости среды. Оценка величины Фурье-компоненты поляризуемости на примере кристалла Si. Приближенное решение микроскопического уравнения Максвелла с не усреднённым по физически бесконечно малому объему распределением концентрации электронов. Приближение однократного рассеяния. Кинематическое приближение и динамическая дифракция. Граничные условия. Глубина проникновения излучения в геометрии Брегга и применимость метода последовательных приближений. Плато Дарвина. Оптически слабые и сильные структуры. 3D фотонный кристалл в рентгене.

## 5. Формулы Клаузиуса — Моссотти и Лоренц – Лорентца

Формула Клаузиуса — Моссотти. Формула Лоренц - Лорентца. Семинар 3. Упражнения: плоская эванесцентная волна; отличие ряда Фурье от интеграла Фурье; по поводу отрицательных частот. Тензор диэлектрической проницаемости. Пространственно однородная и стационарная среда. Дисперсионное уравнение. Без пространственной дисперсии. Пространственная дисперсия. Вывод формулы общего вида связи тока и поля в линейной ЭД. ЭМ волны в однородной среде без пространственной дисперсии.

## 6. Уравнения Максвелла в веществе

Уравнения Максвелла в веществе без пространственной дисперсии. Решение в веществе без пространственной дисперсии. Дисперсионное уравнение для поперечного электрического поля. Решение в веществе с пространственной дисперсией. Частотная и пространственная дисперсия. Физический смысл. ЭМ волна в непроводящей среде. Учет проводимости среды. ЭМ волны в диэлектриках и проводниках. Скин слой. Среда как проводник или диэлектрик при разных частотах ЭМ излучения. Поверхностные ЭМ волны на границе вакуум – диэлектрик. Поляризация поверхностной волны. Закон дисперсии поверхностной волны для случая холодной плазмы. Энергия поверхностной электромагнитной волны

## 7. Пространственная дисперсия и появление новых типов волн

Ионные кристаллы. Общее представление Поляризуемость ионных кристаллов. Пояснение: ЭМ поле диполя. Атомная поляризуемость ионных кристаллов. “Поляризуемость смещения” ионных кристаллов. Оценки атомной поляризуемости и “поляризуемости смещения” ионных кристаллов. Поляритоны в ионном кристалле. Анализ решения биквадратного уравнения. Две ветви закона дисперсии. Дисперсия поляритонов в однородной и изотропной среде. Немагнитные среды. “Правые” поляритонные волны. Решение биквадратного уравнения для “правых” поляритонных волн. Решение биквадратного уравнения для “левых” поляритонных волн («отрицательные» ЭМ волны). Групповая скорость правых и левых поляритонных волн. Дисперсионные зависимости для «правых» и «левых» ЭМ волн

## 8. Электромагнитные волны в анизотропных средах

Свободное электромагнитное поле в однородном анизотропном веществе. Прохождение света через холерический жидкий кристалл. Закон дисперсии и типы электромагнитных волн в одноосном кристалле. Направление вектора потока энергии необыкновенной волны, распространяющейся в одноосном кристалле с волновым вектором под углом к оптической оси.

## 9. Электромагнитное поле в немагнитной одномерно неоднородной среде

ЭМ поле в немагнитной неоднородной среде. 1D неоднородность вдоль оси  $z$ . Эффективный размер неоднородности среды. Приближенное решение. Решение около точек  $f = 0$ . Уравнение Пуассона. Уравнение Лапласа. Графики первых полиномов Лежандра. Проводящий шар в постоянном однородном электрическом поле. Диэлектрический шар в постоянном однородном электрическом поле. Точечные заряды, разделенные шаром. Полная энергия двух заряженных металлических шаров.

## 10. Геометрическая оптика неоднородной среды

Геометрическая оптика неоднородной среды. Разложение по степеням малого параметра в виде отношения длины волны к характерному размеру неоднородности. Первое приближение. Условие существования продольных и поперечных волн в неоднородной среде. Волновой фронт и луч в эйкональном приближении. Интенсивность и оптическая длина луча

## 11. Практическая задача геометрической оптики неоднородной среды

Практическая задача геометрической оптики неоднородной среды (слайд. Дифракция света. Определения. Области дифракции Френеля и Фраунгофера. Дифракция Френеля. Схематическое изображение областей дифракции. Приближенный переход к параболическому уравнению. Решение. Уравнение для двухчастотной коррелятивной функции. Характерные параметры лазерного пучка. Влияние регулярной и турбулентной атмосферы на распространение светового импульса. Описание оптических свойств немагнитных материалов. Диэлектрическая функция. Нормальная и аномальная дисперсия. Модель Лорентца. Поправки Лоренца – Лорентца. Формула Клаузиуса — Москотти. Ансамбль N осцилляторов Модель Друде

## 12. Средняя плотность электромагнитной энергии в диспергирующей среде

Средняя плотность ЭМ энергии в непоглощающей среде с дисперсией. Метод М.Л. Левина. Физический смысл средней по времени плотности энергии. Средняя плотность ЭМ энергии в диспергирующей среде. Общий случай. Почему рассматриваем дисперсию волн на примере плазмы? Тензор диэлектрической проницаемости холодной плазмы во внешнем магнитном поле; Холодная плазма без внешнего магнитного поля; Диэлектрическая проницаемость в высокочастотном случае

## 13. Отражение и преломление электромагнитных волн на границе двух сред

Отражение плоскополяризованной ЭМ волны от плоской поверхности среды. Плоскость поляризации ЭМ волны: s – и p – волны. Полубесконечные среды - граничные условия. Прозрачные среды - отражение, преломление. Амплитуды падающей, отраженной и преломленной волн. Поляризация волны при отражении. Фаза волны при отражении и преломлении. Амплитуда и фаза волны при отражении Угловая зависимость коэффициента отражения волн разной поляризации. Примеры: преломление волны из более плотной среды – внешняя эффективность светоизлучающих диодов (СИД); сканирование неоднородной волны, появляющейся при полном внутреннем отражении; эффект Фёдорова - Имберта: спиновый эффект Холла для света. Ограничения применимости формул Френеля.

## 14. Сдвиг Гуса-Хенхен: теория и практические приложения

Эффект Гуса-Хенхен, проявляющийся в продольном сдвиге пучка по отношению к предсказываемой геометрической оптикой траектории распространения оптического пучка, испытывающего полное внутреннее отражение при падении из более плотной в менее плотную среду Связь сдвига с возбуждением поверхностных волн, экспоненциально затухающих в менее плотной среде. Способы усиления эффекта.

## 15. Пространственная дисперсия, отрицательное преломление и отрицательная групповая скорость

Пространственная дисперсия, отрицательное преломление и отрицательная групповая скорость. Леонид Исаакович Мандельштам, Лекции 1944 года: волновой вектор, групповая скорость, принцип причинности. Граничная задача и правило отбора преломленной волны. Граничная задача и принцип причинности для импульса с передним амплитудным фронтом. Неоднозначность решения граничной задачи для плоской монохроматической волны. Выбор констант на примере s поляризации волны. Универсальная формулировка правил отбора преломленной волны. Выбор знака поперечной компоненты волнового вектора в среде преломления: три энергетических соображения при выборе знака поперечной компоненты волнового вектора в среде преломления. Фундаментальное соотношение Д.В. Сивухина, связывающее среднюю по времени объёмную плотность энергии ЭМ поля со средним по времени значением вектора Пойнтинга, волновым вектором и групповой скоростью. Важные факторы среды и волны в проблеме законов преломления и групповой скорости: искусственные среды и отрицательная групповая скорость

Семестр: 2 (Весенний)

## 16. Понятие о трансформационной оптике. Фотонные кристаллы. Условия формирования частотной полосы непропускания.

О возможности отрицательного преломления. Инженерия оптического пространства (трансформационная оптика). Преобразование неоднородной волны полного внутреннего отражения в распространяющуюся волну. История вопроса: опыт Квинке и последующие исследования. Положительный коэффициент преломления. Эффект супер – призмы. 2D фотонные кристаллы. «Стопка» дров. Условия формирования полосы не пропускания в 3D фотонных кристаллах и её устойчивость при нарушении идеальности структуры. Оптимальная толщина слоя 2D инверсного фотонного кристалла. Частотные спектры 2D фотонных кристаллов из стержней или пор. Частотные фильтры, поворотные зеркала, волноводы, смесители – делители, согласователи (taper) на основе 2D фотонных кристаллов. Слой 2D фотонного кристалла. Типичный спектр прозрачности 2D системы стержней. Формирование частотных полос не пропускания. Макроскопическое нерезонансное многократное рассеяние брегговского типа на периодическом потенциале и микроскопическое резонансное рассеяние на уединенном потенциале. Резонансное рассеяние Ми на бесконечном круговом цилиндре. Почему основная полоса?. Основная полоса и монополюсное рассеяние. Плотная упаковка эффективных цилиндров и полоса не пропускания. Дополнительная полоса не пропускания с всплесками. Поведение полосы не пропускания при изменении диэлектрического контраста, угла падения волны, деформации элементарных рассеивателей структуры (на примере стержней). Полоса не пропускания. Частотная подстройка.

17. Периодические структуры: на пути к единому методу описания поверхностного и объемного рассеяния классических волновых полей. От дифракционных решеток к фотонным кристаллам

Два типа задач многократного рассеяния классических волновых полей: рассеяние на поверхности и объемное рассеяние. Элементарные представления об уравнениях Фредгольма и Вольтерра. Единообразное описание поверхностного и объемного многократного рассеяния ЭМ волн. Периодические структуры: на пути к единому методу описания поверхностного и объемного рассеяния. Постановка задачи рассеяния ЭМ волны на 3D неоднородной изотропной среде со скалярной диэлектрической проницаемостью. Понятие о Т операторе рассеяния непрерывной и дискретной сред. Представление угловых спектральных амплитуд. Операторные волновые коэффициенты отражения и прохождения системы элементарных слоев при виртуальном расслоении слоя среды. Иллюстрация правила Ватсона композиции операторов рассеяния системы рассеивателей. Смешанная система точных операторных уравнений для волновых коэффициентов отражения и прохождения системы из  $n$  элементарных слоев. Рекуррентные уравнения для системы  $n-1$  элементарных слоев при добавлении  $n$ -ого элементарного слоя. Фундаментальная трансфер матрица. Операторное уравнение Риккати и ассоциированное с ним уравнение в конечных разностях. Периодическая поверхностная и объемная структуры: примеры. Решение уравнения Риккати для однородного плоского слоя. Отражение и прохождение однородного плоского слоя. Угловые спектральные порядки 1D решетки. От дифракционных решеток к фотонным кристаллам.

18. Расчет частотных спектров отражения и прохождения одномерных дифракционных решеток и двумерных фотонных кристаллов методом матричного уравнения Риккати

Уравнение Риккати для матричного волнового коэффициента отражения. ТЕ поляризация. Физический смысл индексов. «Начальные» условия. Физический смысл коэффициентов. Функция трансформации волн.  $Y$  – компонента поля и плотность отраженного потока энергии. Уравнение для матричного волнового коэффициента прохождения. Уравнение Риккати для матричного волнового коэффициента отражения. ТН поляризация. Уравнение для матричного волнового коэффициента прохождения. ТН поляризация. Примеры расчетов на основе уравнения Риккати и ассоциированного с ним уравнения. Брегговские зеркала на основе пористого кремния. Оптический мониторинг. Контроль формы решеток при наномпринтной литографии (NanoImprint Lithography NIL). Рефлектометрия стопки ленточных решеток. 2D инверсные фотонные структуры: разупорядочение элементарной ячейки. Элементы фотонных интегральных структур (ФИС). Схемы волноводов с двумя 1D и 2D дифракционными решетками на базе структур КНИ

19. Интегрально-оптические устройства



Интегрально-оптические устройства. Пассивные и активные элементы. Волоконные световоды. Волноводы с фотонно – кристаллической структурой. Волоконные световоды с брэгговскими решетками. Сенсоры на основе оптических волноводов с фотонно-кристаллической структурой. Скорость передачи и системы обработки данных. Иерархия длин межсоединений. Оптические межсоединения. Схема ФИС на основе Si с элементами плазмоники. Потери и усиление в децибелах. Волоконно-оптический соединитель. Планарные диэлектрические волноводы. Потери на изгибах. Волновод в инверсной фотонной структуре. Линия задержки: активное электрическое управление скоростью света. Полосковый плазмонный волновод. Волноводы из нанопроволок благородных металлов. Трехслойные структуры (сендвич). Компактные устройства спектрального уплотнения каналов (WDM). Частотный фильтр и линия задержки на кольцах. Моде шепчущей галереи. Фотодетектор. Пример элементов Si ФИС. Способы ввода/вывода ЭМ излучения. Примеры расчетов на основе уравнения Риккати. Резонансное рассеяние на 1D дифракционных решетках. Аномалии Вуда релеевского типа. Коэффициент отражения усеченной структуры. Аномалии Вуда-Палме. Роль эванесцентных мод. Периодические структуры из полых трубок. Спектры отражения структур из полых трубок SiO<sub>2</sub> и металл-диэлектрических трубок. Зеркало и поляризатор из «ничего».

## 20. Методы численного моделирования оптических задач

Численное моделирование. Простейшая линейная краевая задача. Структура поля и краевые условия. Метод прогонки. Метод инвариантного погружения. Основные методы численного моделирования оптических задач. Полноволновые и приближенные методы. Метод конечных разностей во времени, FDTD. Разностный вид уравнений Максвелла. Рекуррентная формула. Условие Куранта. 2D фотонный кристалл: ТМ и ТЕ поляризация. 1D структуры. Диэлектрическая функция, FDTD. Начальные, граничные условия FDTD. Условия на границах области вычислений, FDTD. FDTD, программная реализация. Метод S матрицы рассеяния. Метод разложения по собственным модам. Метод распространения пучка. Метод плоских волн. Метод трансфер (передачи) T матрицы. Метод конечных элементов. Выбор численного метода для моделирования фотонных кристаллов. Примеры моделирования оптического разветвителя методами FDTD и FEM. Дискретная модель головы и сотового телефона, FDTD. Пример моделирования волновода методом BPM.

## 21. Метод конечных элементов

Численное моделирование – коммерческие пакеты и свободные программы. Обзор свободных программ и пакетов. Свободные пакеты для численных расчетов. Метод конечных элементов. Пакеты конечно-элементного анализа. Семинар 7. Свободные пакеты для численных расчетов. OpenFOAM. Impact. Elmer. Физические модели. «Решатели» COMSOL и Elmer. Расчёты в Elmer и сравнение с Comsol. Численные методы решения волновых задач. Краткие основы метода конечных элементов. Проекционные методы. Вариационный метод. Последовательность шагов МКЭ.

## 22. Методы конечных разностей

Методы конечных разностей. Конечные разности. Функции. Частные производные первого порядка по времени и пространству. Уравнения Максвелла. Дискретизация уравнений Максвелла по времени. Разностные уравнения Максвелла в 1D случае. Начало расчёта. Уравнения Максвелла в 2D случае. TE и ТМ моды. Дискретизация по пространству и времени. TE и ТМ моды. Уравнения Максвелла в 3D случае. 3D ячейка Yee.

## 23. Оптика одномерных многослойных структур

Резонаторы Фабри – Перо. Брегговские отражатели.

## 24. Волноводная оптика

Моды волноводов. Свойства мод волноводов. Волноводная оптика и оптика многослойных структур. Пример: симметричный планарный волновод. Волноводная оптика и квантовая механика. Дисперсия волновода. Групповая скорость в волноводе. Потери в волноводе. Потери в материале волновода. Потери вследствие оптических утечек. Потери при рассеянии на шероховатости. Потери и диэлектрический контраст волновода. Геометрия волноводов. Оптоволокно. Типы полосковых волноводов. Характерные потери в металлических проводах, оптических и плазмонных волноводах. Спектральные области пропускания оптических волноводов. Электро-оптические характеристики оптических материалов.

## 25. Геометрическое и волновое описание волноводов

Три этапа решения волноводных задач. Дисперсия мод волновода. Диссипативные и недиссипативные системы. Активные и реактивные моды в недиссипативных системах. Некоторые формулы о переносимой модами мощности. Закрытый волновод без потерь. Структура поля вне закрытого планарного волновода без потерь. Поперечное распределение поля  $m$ -ой моды. Геометрическое описание волноводов. Волновое описание волноводов.

## 26. Метод распространения пучка

Оптическое взаимодействие между волноводами. Теория связанных мод.

## 27. История и классификация метаматериалов

История и классификация метаматериалов. Метаматериалы с отрицательной диэлектрической или (и) магнитной проницаемостью; среда Веселаго; гиперболические метаматериалы; метаматериалы с близкой к нулю эффективной диэлектрической проницаемостью; баллистические метаматериалы; фотонные гиперкристаллы. Наличие некоторых свойств метаматериалов у природных веществ. Плёнка серебра как плоская суперлинза Пендри (J. Pendry) с разрешением 64 нм. Метаматериалы с предельно малым эффективным коэффициентом преломления (UltraLow refractive-Index Metamaterials, ULIM) в видимом диапазоне. Аналогия с рентгеновским излучением. Возможность построения маскирующей оболочки: неединственность решения задачи Кальдерона для уравнений Максвелла; сингулярное высвечивание дефектов оболочки; визуализация оболочки черенковским излучением быстрых электронов.

## 28. Типы метаматериалов

Метаматериалы. Типы метаматериалов “из радиотехнических элементов”. Искусственная плазма из металлических проволок. Отрицательное преломление. Среда Веселаго. Преломление вакуум - среда Веселаго. Перенос энергии и прирост фазы волны. Линза обыкновенная. Слой левостороннего материала (LHM) – линза Веселаго. Неоднородная линза Веселаго. Положительный коэффициент преломления. Дважды отрицательные и магнито отрицательные среды. Пример - магнитная восприимчивость проводящего проволочного кольца с индуктивностью и ёмкостью. Изотропные метаматериалы и оболочки на резонансах Ми. Ансамбли и структуры из малых частиц. Диа- парамагнитный пик около плазмонного резонанса. Динамический магнитный отклик частиц Si. Возбуждение более одной моды Ми. Мода шепчущей галереи. Структура поля и добротность МШГ.

## 29. Резонансное рассеяние: резонансы Ми, Фрёлихера, Фано

Резонансы в наночастицах. Плазмонные рассеиватели. Кольцевые резонаторы. Волноводы и резонаторы из наночастиц. Поглотители на плазмонных эффектах

## 30. Резонансные и волноводные эффекты оптики ближнего поля

Физические основы апертурной и безапертурной оптики ближнего поля

## **5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)**

Необходимое оборудование для лекций: учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

## **6. Перечень рекомендуемой литературы**

### **Основная литература**

1. М. Борн, Э. Вольф, Основы оптики, М.: Наука, 1973, 719 стр
2. К. Борен, Д. Хафмен, Поглощение и рассеяние света малыми частицами, М.: Мир, 1986, 664 стр.
3. Барыбин А. А., Электродинамика волноведущих структур. Теория возбуждения и связи волн. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007
4. Городецкий М. Л. Основы теории оптических микрорезонаторов, Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, 2010

### **Дополнительная литература**

1. Ярив А. Оптические волны в кристаллах. Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 616 с
2. О.В. Иванов, Распространение электромагнитных волн в анизотропных и бианизотропных слоистых структурах, Монография УлГТУ, 2010, 264 стр
3. А.К. Сарычев, В.М. Шалаев, Электродинамика метаматериалов, Перевод с англ. В.Г. Аракчеев, Ю.В. Владимирова, Научный мир, 2011

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

Не используются

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

[https://www.photonics.com/Articles/What\\_Is\\_Photonics/a65926](https://www.photonics.com/Articles/What_Is_Photonics/a65926)  
<http://www.metamorphose-vi.org/research/metamaterialsdefinition>  
<https://faculty.sites.iastate.edu/soukouli/publications-1995-2004>  
<https://www.yumpu.com/en/document/view/43446692/silicon-integrated-nanophotonics-road-from-researcher-ibm>

## **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Электроника и нанoeлектроника
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: микро- и нанoeлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра микро- и нанoeлектроники
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Экзамен

**Разработчик:** М.Ю. Барабаненков, д-р физ.-мат. наук

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценить качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Современные направления фотоники» обучающийся должен:

### знать:

- зависимость угловых спектров дифракционной решетки от соотношения длины волны и периода решетки;
- физический смысл индексов и коэффициентов уравнения Риккати;
- зависимость частотного сдвига полосы непропускания электромагнитного кристалла от его геометрических характеристик;
- радиальное распределение электрического поля электромагнитной волны в малых цилиндрических и сферических частицах при резонансном рассеянии;
- основные типы планарных интегральных волноводов, электромагнитных кристаллов и метаматериалов;
- о возможности гомогенизации неоднородных сред и использовании эффективных параметров сред;
- основы апертурной и безапертурной оптики ближнего поля.

### уметь:

- применять уравнение Риккати для задачи об отражении и прохождении плоской электромагнитной волны от однородного плоского слоя;
- рассчитывать спектры прохождения брегговских зеркал;
- выбирать наиболее эффективный метод численного расчета конкретной оптической задачи;
- классифицировать метаматериалы.

### владеть:

- Первичными навыками расчета частотных спектров дифракционных решеток и электромагнитных кристаллов;
- Первичными навыками расчета планарных диэлектрических и плазмонных волноводов;
- Первичными навыками использования эффективных параметров неоднородных сред;
- Физическими основами апертурной и безапертурной оптики ближнего поля.

## 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

В начале каждой лекции проводится краткий опрос по теме предыдущего занятия

#### **4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся**

Вопросы к дифференцированному зачету:

1. Электромагнитные кристаллы и их основные свойства.
2. Метаматериалы и их отличие от электромагнитных кристаллов.
3. Формулы Клаузиуса — Моссотти и Лоренц - Лорентца.
4. Четыре приближения при выводе макроскопических уравнений Максвелла.
5. Физический смысл пространственной дисперсии.
6. Одноосный кристалл.
7. Формулы Френеля. Отрицательное преломление.
8. Полное внутреннее отражение и сдвиг Гуса-Хенхен.

Вопросы к экзамену:

1. Зависимость угловых спектров дифракционной решетки от соотношения длины волны и периода решетки. Диэлектрическая проницаемость и энергетическое наполнение угловых спектров.
2. Однородные и неоднородные моды в спектре отражения электромагнитного кристалла.
3. Макроскопическое резонансное рассеяние брегговского типа и микроскопическое рассеяние Ми в периодических электромагнитных структурах.
4. Моды шепчущей галереи.
5. Классификация метаматериалов по их эффективным параметрам.
6. Основные методы численного расчета оптических задач.
7. Основные идеи волнового и геометрического описания волноводов.
8. Два основных метода оптики ближнего поля.

Примеры экзаменационных билетов.

Пример 1.

1. Моды шепчущей галереи.
2. Основные методы численного расчета оптических задач.

Пример 2.

1. Зависимость угловых спектров дифракционной решетки от соотношения длины волны и периода решетки. Диэлектрическая проницаемость и энергетическое наполнение угловых спектров.
2. Два основных метода оптики ближнего поля.

#### **Критерии оценивания**

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Оценка за осенний семестр выставляется по результатам устного дифференцированного зачета. Опрос не должен превышать 40 минут.

Оценка за весенний семестр выставляется по результатам устного экзамена. Опрос студента на экзамене не должен превышать одного астрономического часа.