

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА И НАНОСИСТЕМ

ОДОБРЕНО УМС ЛАПЛАЗ

Протокол № 1/08-577

от 29.08.2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ  
ЭЛЕКТРОДИНАМИКА МЕТАМАТЕРИАЛОВ

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 12.03.03 Фотоника и оптоинформатика

| Семестр | Трудоемкость,<br>кред. | Общий объем<br>курса, час. | Лекции, час. | Практич.<br>занятия, час. | Лаборат. работы,<br>час. | В форме<br>практической<br>подготовки/ В | СРС, час. | КСР, час. | Форма(ы)<br>контроля,<br>экз./зач./КР/КП |
|---------|------------------------|----------------------------|--------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------------------|-----------|-----------|------------------------------------------|
| 7       | 3                      | 108                        | 8            | 24                        | 0                        |                                          | 31        | 0         | Э                                        |
| Итого   | 3                      | 108                        | 8            | 24                        | 0                        | 0                                        | 31        | 0         |                                          |

## АННОТАЦИЯ

В курсе изучаются основные явления электродинамики искусственно созданных сред – метаматериалов. Рассмотрены основные конструкции элементов, образующих метаматериал, линейные и нелинейные характеристики метаматериалов. Рассмотрены явления, в которых проявляются необычные свойства метаматериалов с отрицательным преломлением: это параметрические взаимодействия волн и волны в направляющих структурах (граница раздела двух диэлектрических сред, тонкая пленка нелинейного вещества на границе раздела двух сред, планарный оптический волновод, направляющие ответвители).

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Учебные задачи курса – проиллюстрировать на примерах точно решаемых задач основные понятия и эффекты, присущие электродинамике метаматериалов, научить общим теоретическим методам описания разнообразных эффектов, связанных со взаимодействием прямых и обратных волн, с поверхностными и направленными волнами в таких средах.

### 2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Дисциплина логически и содержательно-методически связана со следующими дисциплинами: избранные главы общей физики, физика твердого тела, взаимодействие излучения с веществом, фотоника, полупроводниковые квантовые генераторы.

### 3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

| Код и наименование компетенции | Код и наименование индикатора достижения компетенции |
|--------------------------------|------------------------------------------------------|
|--------------------------------|------------------------------------------------------|

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

| Задача профессиональной деятельности (ЗПД)                                                                                 | Объект или область знания                                                                             | Код и наименование профессиональной компетенции;<br>Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)                   | Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| научно-исследовательский                                                                                                   |                                                                                                       |                                                                                                                              |                                                                                                                  |
| Разработка лазерных и оптических технологий; анализ поставленной задачи исследований в области фотоники и оптоинформатики; | Лазерные технологии, элементы в составе лазерных систем, оптические материалы и детали, дифракционные | ПК-1 [1] - способен к анализу поставленной задачи исследований в области фотоники и оптоинформатики<br><br><i>Основание:</i> | 3-ПК-1[1] - Знать современное состояние развития фотоники и оптоинформатики ;<br>У-ПК-1[1] - уметь анализировать |

|                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| экспериментальные исследования в области фотоники и оптоинформатики новых явлений, материалов, систем и устройств                                                                                                                                                            | оптические элементы, голограммы                                      | Профессиональный стандарт: 29.004                                                                                                                                                                                                                                | исходные требования при решении задач в области фотоники и оптоинформатики проводить поиск научнотехнической информации по теме решаемой задачи уточнять и корректировать требования к решаемой задаче в области фотоники и оптоинформатики ; В-ПК-1[1] - Владеть навыками анализа простых исследовательских задач в области фотоники и оптоинформатики                                                                                                                           |
| проектно-конструкторский                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Проектирование и конструирование оптических технологий передачи, приема, обработки, хранения и отображения информации; участие в монтаже, наладке, испытаниях и сдаче в эксплуатацию опытных образцов изделий, узлов, элементов приборов и систем фотоники и оптоинформатики | Элементная база фотоники и оптоинформатики и цифровые методы анализа | ПК-4 [1] - способен к анализу, расчету, проектированию и конструированию в соответствии с техническим заданием типовых систем, приборов, деталей и узлов на схемотехническом и элементном уровнях;<br><br><i>Основание:</i><br>Профессиональный стандарт: 06.007 | З-ПК-4[1] - Знать основные правила разработки проектной и рабочей технической документации, правила оформления конструкторской документации принципы и методы расчета и проектирования деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием. ; У-ПК-4[1] - Уметь анализировать технические требования, предъявляемые к разрабатываемым узлам и элементам рассчитывать и проектировать детали и узлы приборов и установок, разрабатывать проекты технических |

|  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|--|--|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  | <p>описаний установок и приборов, проводить концептуальную и проектную проработку типовых систем, приборов, деталей и узлов на схемотехническом и элементном уровнях ;</p> <p>В-ПК-4[1] - Владеть методами анализа и расчета, навыками конструирования и проектирования в соответствии с техническим заданием типовых систем, приборов, деталей и узлов на схемотехническом и элементном уровнях, методами расчета и проектирования деталей и узлов приборов и установок с использованием стандартных средств автоматизации</p> |
|--|--|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

#### 4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

| Направления/цели воспитания | Задачи воспитания (код)                                                                                                                                                                                      | Воспитательный потенциал дисциплин                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Профессиональное воспитание | Создание условий, обеспечивающих, формирование научного мировоззрения, культуры поиска нестандартных научно-технических/практических решений, критического отношения к исследованиям лженаучного толка (В19) | <p>1.Использование воспитательного потенциала дисциплин/практик «Научно-исследовательская работа», «Проектная практика», «Научный семинар» для:</p> <p>- формирования понимания основных принципов и способов научного познания мира, развития исследовательских качеств студентов посредством их вовлечения в исследовательские проекты по областям научных исследований. 2.Использование воспитательного потенциала дисциплин "История науки и инженерии", "Критическое мышление и основы научной</p> |

|                             |                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                             |                                                                                                                                                                  | <p>коммуникации", "Введение в специальность", "Научно-исследовательская работа", "Научный семинар" для:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- формирования способности отделять настоящие научные исследования от лженаучных посредством проведения со студентами занятий и регулярных бесед;</li> <li>- формирования критического мышления, умения рассматривать различные исследования с экспертной позиции посредством обсуждения со студентами современных исследований, исторических предпосылок появления тех или иных открытий и теорий.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Профессиональное воспитание | Создание условий, обеспечивающих, формирование творческого инженерного/профессионального мышления, навыков организации коллективной проектной деятельности (B22) | <p>1.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для развития навыков коммуникации, командной работы и лидерства, творческого инженерного мышления, стремления следовать в профессиональной деятельности нормам поведения, обеспечивающим нравственный характер трудовой деятельности и неслужебного поведения, ответственности за принятые решения через подготовку групповых курсовых работ и практических заданий, решение кейсов, прохождение практик и подготовку ВКР.</p> <p>2.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для: - формирования производственного коллективизма в ходе совместного решения как модельных, так и практических задач, а также путем подкрепление рационально-технологических навыков взаимодействия в проектной</p> |

|                                    |                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                    |                                                                                                                                                              | <p>деятельности эмоциональным эффектом успешного взаимодействия, ощущением роста общей эффективности при распределении проектных задач в соответствии с сильными компетентностными и эмоциональными свойствами членов проектной группы.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <p>Профессиональное воспитание</p> | <p>Создание условий, обеспечивающих, формирование культуры безопасности при работе с лазерным излучением (B27)</p>                                           | <p>1.Использование воспитательного потенциала профильных дисциплин и всех видов практик для: - формирования культуры лазерной безопасности посредством тематического акцентирования в содержании дисциплин и учебных заданий, подготовки эссе, рефератов, дискуссий, а также в ходе практической работы с лазерным оборудованием. - формирования культуры безопасности при работе на экспериментальных и промышленных установках высокой мощности и имеющими повышенный уровень опасности через выполнение студентами практических и лабораторных работ, в том числе на оборудовании для исследования высокотемпературной плазмы.</p> |
| <p>Профессиональное воспитание</p> | <p>Создание условий, обеспечивающих, формирование культуры безопасности при работе на экспериментальных и промышленных установках высокой мощности (B28)</p> | <p>1.Использование воспитательного потенциала профильных дисциплин и всех видов практик для: - формирования культуры лазерной безопасности посредством тематического акцентирования в содержании дисциплин и учебных заданий, подготовки эссе, рефератов, дискуссий, а также в ходе практической работы с лазерным оборудованием. - формирования культуры безопасности при работе на экспериментальных и промышленных установках высокой мощности и</p>                                                                                                                                                                               |

|  |  |                                                                                                                                                                               |
|--|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  | имеющими повышенный уровень опасности через выполнение студентами практических и лабораторных работ, в том числе на оборудовании для исследования высокотемпературной плазмы. |
|--|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## 5. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Разделы учебной дисциплины, их объем, сроки изучения и формы контроля:

| № п.п | Наименование раздела учебной дисциплины     | Недели | Лекции/ Практи. (семинары) / Лабораторные работы, час. | Обязат. текущий контроль (форма*, неделя) | Максимальный балл за раздел** | Аттестация раздела (форма*, неделя) | Индикаторы освоения компетенции                |
|-------|---------------------------------------------|--------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------|
|       | <i>7 Семестр</i>                            |        |                                                        |                                           |                               |                                     |                                                |
| 1     | Первый раздел                               | 1-8    | 4/12/0                                                 |                                           | 25                            | КИ-8                                | 3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4 |
| 2     | Второй раздел                               | 9-16   | 4/12/0                                                 |                                           | 25                            | КИ-16                               | 3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4 |
|       | <i>Итого за 7 Семестр</i>                   |        | 8/24/0                                                 |                                           | 50                            |                                     |                                                |
|       | <b>Контрольные мероприятия за 7 Семестр</b> |        |                                                        |                                           | 50                            | Э                                   | 3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4 |

\* – сокращенное наименование формы контроля

\*\* – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

| Обозначение | Полное наименование |
|-------------|---------------------|
| КИ          | Контроль по итогам  |

|   |         |
|---|---------|
| Э | Экзамен |
|---|---------|

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

| Недели     | Темы занятий / Содержание                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Лек.,<br>час.          | Пр./сем.,<br>час. | Лаб.,<br>час. |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------|---------------|
|            | <i>7 Семестр</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 8                      | 24                | 0             |
| <b>1-8</b> | <b>Первый раздел</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 4                      | 12                | 0             |
| 1          | <b>Тема 1. Электромагнитные волны в диэлектрических средах.</b><br>Макроскопические уравнения Максвелла. Модели, описывающие поляризуемость и намагниченность метаматериалов. Прямые и обратные электромагнитные волны. Электромагнитные волны в изотропных и анизотропных средах. Среда с пространственной дисперсией: гиротропные и киральные среды.                                                                                                                                                                                                                                    | Всего аудиторных часов |                   |               |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 1                      | 1                 | 0             |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Онлайн                 |                   |               |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0                      | 0                 | 0             |
| 2          | <b>Тема 2. Поля вблизи границы раздела сред.</b><br>Электромагнитные волны около границы раздела однородных сред (случай резкой границы). ТЕ- и ТМ-волны. Преломление ТЕ- и ТМ -волн на границе раздела. Положительное и отрицательное преломление. Геометрическая оптика метаматериалов. Суперлинза. Полное внутреннее отражение ТЕ- и ТМ -волн от границы раздела диэлектрических сред. Эффект Гуса-Хенгена (положительный и отрицательный). Боковой сдвиг Федорова на границе раздела «левых» и «правых» сред. Преломление на градиентной границе раздела диэлектрика и метаматериала. | Всего аудиторных часов |                   |               |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 1                      | 1                 | 0             |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Онлайн                 |                   |               |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0                      | 0                 | 0             |
| 3          | <b>Тема 3. Поверхностные волны</b><br>Поверхностные ТЕ и ТМ волны. Отсутствие поверхностной ТЕ-волны на границе раздела диэлектриков. Поверхностные поляритоны для случая линейных сред. ТМ -волн и поверхностные плазмоны. Поверхностные волны на границе положительно и отрицательно преломляющих сред.                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Всего аудиторных часов |                   |               |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0                      | 3                 | 0             |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Онлайн                 |                   |               |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0                      | 0                 | 0             |
| 4          | <b>Тема 4. Поверхностные волны на границе раздела линейной и нелинейной сред.</b><br>Поверхностные волны на границе раздела линейной и нелинейной сред (положительно или/и отрицательно преломляющих). Дисперсионное соотношение. Зависимость постоянной распространения от мощности, переносимой волной. Волны на границе раздела металл-нелинейный диэлектрик.                                                                                                                                                                                                                          | Всего аудиторных часов |                   |               |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0                      | 3                 | 0             |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Онлайн                 |                   |               |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0                      | 0                 | 0             |
| 5 - 6      | <b>Тема 5. Преломление волн на границе диэлектрических сред, содержащей тонкую пленку метаматериала.</b><br>Модель Лоренца для электрических и магнитных осцилляторов. Полное внутреннее отражение. Нелинейные отклики тонкой пленки (генерация гармоник, фотонное эхо). Оптическая бистабильность.                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Всего аудиторных часов |                   |               |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 1                      | 2                 | 0             |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Онлайн                 |                   |               |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0                      | 0                 | 0             |
| 7 - 8      | <b>Тема 6. Нелинейные поверхностные волны, на границе</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Всего аудиторных часов |                   |               |

|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                        |    |   |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----|---|
|         | <b>диэлектрических сред, содержащей тонкую пленку метаматериала</b><br>Стационарные уединенные волны (нелинейное уравнение Шредингера и солитоны). Нелинейные поверхностные плазмоны - поляритонные волны в проводящей пленке.                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 1                      | 2  | 0 |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Онлайн                 |    |   |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0                      | 0  | 0 |
| 9-16    | <b>Второй раздел</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 4                      | 12 | 0 |
| 9       | <b>Тема 7. Планарные волноводы из сред с положительным и отрицательным преломлением.</b><br>Планарные волноводы. Эффективный показатель преломления, эффективная толщина волновода. Универсальные выражения дисперсионных соотношений для ТЕ- и ТМ-волн. Частота отсечки, число направленных мод.                                                                                                                                                                                                                          | Всего аудиторных часов |    |   |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1                      | 2  | 0 |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Онлайн                 |    |   |
| 10 - 11 | <b>Тема 8. Нелинейные планарные волноводы.</b><br>Нелинейный планарный волновод: линейная пленка на нелинейной подложке. Дисперсионное соотношение. Поверхностные волны и направленные моды нелинейного планарного волновода. Краткий обзор различных примеров нелинейных планарных волноводов (нелинейная пленка на линейной подложке, нелинейное покрытие линейного волновода и так далее).                                                                                                                              | Всего аудиторных часов |    |   |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0                      | 2  | 0 |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Онлайн                 |    |   |
| 12      | <b>Тема 9. Направляющие двухканальные ответвители.</b><br>Направляющие двухканальные ответвители: линейный ответвитель и нелинейный ответвитель в случае положительно преломляющих сред. Линейный антинаправляющий ответвитель в случае отрицательно преломляющих среды одного из каналов. Щель в спектре линейных волн. Нелинейный антинаправляющий ответвитель в случае отрицательно преломляющих среды одного из каналов. Бистабильность. Щелевой солитон. Линейка волноводов с чередующимися показателями преломления. | Всего аудиторных часов |    |   |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0                      | 2  | 0 |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Онлайн                 |    |   |
| 13      | <b>Тема 10. 1D фотонные кристаллы – периодические среды</b><br>Одномерные фотонные кристаллы – брэгговский волновод или распределенная обратная связь (РОС-структура). Зависимость коэффициента отражения от постоянной распространения - фильтр. РОС структура, содержащая отрицательно преломляющие среды. РОС-структура в нелинейном волноводе. Поверхностные (таммовские) волны в одномерных (двумерных) фотонных кристаллах. Отрицательный эффект Гуса-Хенгена.                                                       | Всего аудиторных часов |    |   |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1                      | 2  | 0 |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Онлайн                 |    |   |
| 14 - 15 | <b>Тема 11. Параметрические явления в метаматериалах</b><br>Параметрические явления в средах с отрицательным преломлением. Генерация второй гармоники (фазовый синхронизм, непрерывное излучение). Обратный синхронизм. Генерация второй гармоники – квадратичный солитон. Генерация третьей гармоники (непрерывное излучение, сравнение с ГВГ). Взаимодействие трех волн.                                                                                                                                                 | Всего аудиторных часов |    |   |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1                      | 2  | 0 |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Онлайн                 |    |   |
| 16      | <b>Тема 12. Гиперболические метаматериалы</b><br>Анизотропные метаматериалы. Многослойные среды как пример анизотропной среды. Обзор электромагнитных                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Всего аудиторных часов |    |   |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1                      | 2  | 0 |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Онлайн                 |    |   |

|  |                                                                   |   |   |   |
|--|-------------------------------------------------------------------|---|---|---|
|  | явлений в гиперболических метаматериалах. Перспективы применения. | 0 | 0 | 0 |
|--|-------------------------------------------------------------------|---|---|---|

Сокращенные наименования онлайн опций:

| Обозначение | Полное наименование              |
|-------------|----------------------------------|
| ЭК          | Электронный курс                 |
| ПМ          | Полнотекстовый материал          |
| ПЛ          | Полнотекстовые лекции            |
| ВМ          | Видео-материалы                  |
| АМ          | Аудио-материалы                  |
| Прз         | Презентации                      |
| Т           | Тесты                            |
| ЭСМ         | Электронные справочные материалы |
| ИС          | Интерактивный сайт               |

## 6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При освоении данной дисциплины основную роль играют аудиторные занятия и самостоятельная работа студентов, заключающаяся в выполнении домашнего задания, изучении литературы и прослушанного материала.

Рекомендуется посещение студентами научных семинаров и конференций, в том числе, проводимых в НИЯУ МИФИ, а также в других московских университетах и институтах.

## 7. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

| Компетенция | Индикаторы освоения | Аттестационное мероприятие (КП 1) |
|-------------|---------------------|-----------------------------------|
| ПК-1        | З-ПК-1              | Э, КИ-8, КИ-16                    |
|             | У-ПК-1              | Э, КИ-8, КИ-16                    |
|             | В-ПК-1              | Э, КИ-8, КИ-16                    |
| ПК-4        | З-ПК-4              | Э, КИ-8, КИ-16                    |
|             | У-ПК-4              | Э, КИ-8, КИ-16                    |
|             | В-ПК-4              | Э, КИ-8, КИ-16                    |

## Шкалы оценки образовательных достижений

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

| Сумма баллов | Оценка по 4-ех балльной шкале | Оценка ECTS | Требования к уровню освоению учебной дисциплины                                                                                                                                                                                                                                                             |
|--------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 90-100       | 5 – «отлично»                 | A           | Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.                                     |
| 85-89        | 4 – «хорошо»                  | B           | Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.                                                                                                                                         |
| 75-84        |                               | C           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 70-74        |                               | D           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 65-69        | 3 – «удовлетворительно»       | E           | Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.                                        |
| 60-64        |                               |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Ниже 60      | 2 – «неудовлетворительно»     | F           | Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине. |

## 8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ П 99 Волновые бесселевы пучки : учебное пособие, Пятницкий Л. Н., Москва: Физматлит, 2012
2. ЭИ Р 64 Диссипативные оптические и родственные солитоны : учебное пособие, Розанов Н. Н., Москва: Физматлит, 2021
3. ЭИ А 44 Нелинейная оптика кремния и кремниевых наноструктур : учебное пособие, Баранова И. М., Евтюхов К. Н., Акципетров О. А., Москва: Физматлит, 2012
4. ЭИ Г 13 Оптика сред со случайным близким к нулю показателем преломления. Фундаментальные основы, нанотехнологии и применение : учебное пособие, Ушаков Н. М., Гадамский О. Н., Санкт-Петербург: Лань, 2020

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 535 М24 Когерентная и нелинейная оптика фотонных кристаллов : , Манцызов Б.И., Москва: Физматлит, 2009
2. 681.7 А 25 Применение нелинейной волоконной оптики : учебное пособие, Агравал Г. П., Санкт-Петербург: Лань, 2011
3. 539.1 Б43 Фотонные кристаллы и другие метаматериалы : , Звездин А.К., Белотелов В.И., Москва: Бюро Квантум, 2006
4. 537 А 91 Электромагнитные процессы в среде, наноплазмоника и метаматериалы : , Астапенко В. А., Долгопрудный: Интеллект, 2012

#### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

#### LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

<https://online.mephi.ru/>

<http://library.mephi.ru/>

### **9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

### **10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ**

Студентам предлагаются темы для самостоятельной работы:

Тема 1. Поля вблизи границы раздела диэлектрических сред.

Прочитать главу 3 в книге С.Г. Раутиан, Введение в физическую оптику, - М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2009

Прочитать главу 8 в книге М.И. Рязанов, Введение в электродинамику конденсированного вещества, М.: Физматлит, 2002.

Прочитать параграф 9.7 и 11.12 в книге Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. М.: Мир, 1987.

Тема 2. Отрицательное преломление

Прочитать обзорные статьи: Веселаго В. Г // УФН. 1967. Т.92. С.517

Pendry J. B. // Contemporary Physics. 2004. V.45. P.191

Ramakrishna S. A. Physics of negative refractive index materials // Rep. Prog. Phys. 2005. V.68. P. 449-521

Агранович В. М., Гартштейн Ю. Н. Пространственная дисперсия и отрицательное преломление света // УФН. 2006. Т.176. С.1051-1068

Прочитать главу в книге Natalia M. Litchinitser, Ildar R. Gabitov, Andrei I. Maimistov, Vladimir M. Shalaev, Negative Refractive Index Metamaterials in Optics, Progress in Optics, ed. E. Wolf, v 51, 1-68 (2008)

Тема 3. Направляющие структуры (волноводы, ответвитель)

Прочитать главу 11 в книге Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. М.: Мир, 1987.

Прочитать и воспроизвести результаты из статьи: E.M. Conwell, Modes in Optical Waveguides Formed by Diffusion. Appl.Phys.Lett. 23, №6, 328-329 (1973)

Прочитать параграф 6.4 в книге Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. М.: Мир, 1987.

Прочитать статью: S.M.Jensen, The Nonlinear Coherent Coupler IEEE J.Quant.Electron. QE-18, №10, 1580-1583 (1982)

Тема 4. Нелинейные волны.

Прочитать главу 1 и 3 в книге Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики. М.: Наука, 1989

Прочитать статью: Andrei I. Maimistov, Ildar R. Gabitov, Nonlinear optical effects in artificial materials, Eur. Phys. J. Special Topics 147, №1, 265–286 (2007) “Nonlinear waves in complex systems: energy flow and geometry” (Springer, 2007)

Тема 5. Нелинейные волны в волноводах.

Прочитать статью: Д.Михалаке, Р.Г.Назмитдинов, В.К.Федянин, Нелинейные оптические волны в слоистых структурах. Физ.ЭЧАЯ 20, №1, 198-253 (1989), касающуюся направленных волн.

Тема 6. Поверхностные линейные и нелинейные волны.

Прочитать часть статьи: Д.Михалаке, Р.Г.Назмитдинов, В.К.Федянин, Нелинейные оптические волны в слоистых структурах. Физ.ЭЧАЯ 20, №1, 198-253 (1989), касающуюся поверхностных волн.

## **11. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ**

Курс ведётся по следующей схеме. Вначале необходимо напомнить особенности уравнений Максвелла в диэлектрических средах, роль поляризуемости и намагниченности, наличие дисперсии.

Далее вводится граница раздела сред и записываются соответствующие дифференциальные уравнения и граничные условия. Обсуждается преломление волн на границе. Выводятся ТЕ- и ТМ-волны.

Вводится понятие метаматериала как искусственно созданной среды, имеющей отрицательный показатель преломления в определенном диапазоне длин волн. Записываются необходимые уравнения, демонстрирующие особенности преломления на границе метаматериала.

Далее следует ввести поверхностные волны - на границе линейных и нелинейных сред, металла и нелинейного диэлектрика, поверхностные плазмоны и т.д. Записать дисперсионное соотношение.

Обсудить нелинейные явления, в частности влияние интенсивности волны.

Обсудить нелинейные поверхностные волны на границе, содержащей тонкую пленку метаматериала, а также на границе между средами с положительным и отрицательным коэффициентом преломления.

Вторая половина курса посвящена применению развитых знаний и моделей на примере планарных волноводов и ответвителей. Следует обсудить основные экспериментальные аспекты, применения, основные нелинейные эффекты: солитоны, генерацию гармоник и параметрические явления. В конце курса следует дать обзор электромагнитных явлений в современных метаматериалах и новые данные о применениях и перспективах.

Автор(ы):

Маймистов Андрей Иванович, д.ф.-м.н., профессор