

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского»**

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДАЮ

Декан радиофизического факультета

_____ В.В. Матросов

“ ____ ” _____ 2021 г.

Рабочая программа дисциплины

Терагерцовая оптика

Направление подготовки
03.06.01 Физика и астрономия

Направленность подготовки
01.04.21 Лазерная физика

Квалификация выпускника
Исследователь. Преподаватель-исследователь

Форма обучения
Очная

Нижний Новгород
2021

1. Место дисциплины в структуре основной профессиональной образовательной программы (ОПОП)

Дисциплина "Терагерцовая оптика" относится к числу профессиональных дисциплин, является дисциплиной выбора и изучается на 2 году обучения, в 3 семестре.

Освоение курса опирается на знания, умения, навыки и компетенции, сформированные на двух предшествующих уровнях образования в курсах математического анализа, дифференциальных уравнений, общей физики, электродинамики, фемтосекундной оптики.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения ОПОП (компетенциями выпускников)

Таблица 1

Планируемые результаты обучения по дисциплине

Код формируемой компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций
<i>ПК-1</i> (базовый этап)	<i>З1 Знать</i> Основные концепции современной лазерной физики и нелинейной оптики <i>У1 Уметь</i> Работать на современном оптическом, лазерном и измерительном оборудовании, включая фемтосекундные лазеры, средства измерения параметров лазерных импульсов, терагерцовые спектрометры <i>В1 Владеть</i> Современными теоретическими и экспериментальными методами исследований в области оптики и лазерной физики
<i>ПК-2</i> (базовый этап)	<i>З1 Знать</i> Современное состояние исследований в области лазерной физики, нелинейной оптики, а также по терагерцовой тематике <i>У1 Уметь</i> Определять наиболее актуальные направления исследований <i>В1 Владеть</i> Навыками формулирования задач для членов исследовательской группы

3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 3 зачетные единицы, всего 108 часов, из которых 36 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (18 часов – занятия лекционного типа, 18 – часов занятия семинарского типа (семинары и научно-практические занятия)), 72 часа составляет самостоятельная работа обучающегося.

Таблица 2

Структура дисциплины

Наименование раздела дисциплины	Всего, часов	В том числе					
		Контактная работа, часов					Самостоятельная работа обучающегося, часов
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Консультации	Всего	
Источники и приемники терагерцового излучения	10	3	3			6	4
Генерация и детектирование терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами	52	9	9			18	34
Терагерцовая спектроскопия во временной области и терагерцовый имиджинг	16	3	3			6	10
Практическое руководство по созданию и настройке терагерцовой спектроскопической схемы	22	3	3			6	16
Аттестация по дисциплине (зачет)	8						8
Итого	108	18	18			36	72

Таблица 3

Содержание дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела	Форма проведения занятия	Форма текущего контроля
1	Источники и приемники терагерцового излучения	Свойства терагерцового излучения. История развития терагерцовых технологий. Источники когерентного терагерцового излучения: синхротроны, лазеры на свободных электронах, компактные электронные приборы, квантово-каскадные лазеры, полупроводниковые приборы, оптико-терагерцовые преобразователи. Приемники терагерцового излучения.	занятия лекционного типа, семинарского типа	Обзорный доклад; доклад на выбранную тему
2	Генерация и детектирование терагерцового	Метод «накачка-зонд» (pump-probe). Генерация и детектирование за счет линейных эффектов в полупроводниках: фотопроводящие антенны,	занятия лекционного типа, семинар-	Домашнее задание: аналити-

	излучения ультракороткими лазерными импульсами	встроенное поле и эффект Дембера. Применение леммы Лоренца для расчета терагерцового поля излучения заданного источника. Генерация и детектирование в газах. Нелинейный отклик среды в модели ангармонического осциллятора. Нелинейно-оптическое выпрямление. Свойства тензора нелинейной восприимчивости второго порядка. Зависимость направления вектора нелинейной поляризации от поляризации накачки. Синхронизованный, черенковский и нестационарный режимы генерации при нелинейно-оптическом выпрямлении. Электродинамическое рассмотрение генерации терагерцового излучения движущимся светоиндуцированным источником. Модифицированные формулы Френеля для импульсов вынужденного излучения. Методы увеличения эффективности генерации – лазерный импульс со скошенным фронтом интенсивности, квазисинхронизм, генерация в волноводах. Детектирование методом электрооптического стробирования.	ского типа	ческое решение задачи генерации/регистрации терагерцового излучения
3	Терагерцовая спектроскопия во временной области и терагерцовый имиджинг	Терагерцовая спектроскопия во временной области и терагерцовый имиджинг. Принципы терагерцовой спектроскопии во временной области. Динамический диапазон терагерцового спектрометра. Терагерцовый имиджинг	занятия лекционного типа, семинарского типа	Доклад на выбранную тему
4	Практическое руководство по созданию и настройке терагерцовой спектроскопической схемы	Создание и настройка терагерцовой спектроскопической схемы. Принципиальная схема установки. Требования к лазерной системе. Настройка пучка накачки. Настройка зондирующего пучка. Окончательная настройка. Оценки эффективности генерации и абсолютная калибровка схемы.	занятия лекционного типа, семинарского типа	Домашнее задание: численные оценки величин

4. Образовательные технологии

Лекции, консультации, активные лекции в сочетании с внеаудиторной работой.

5. Формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся

Виды самостоятельной работы: в читальном зале библиотеки и в домашних условиях с доступом к ресурсам Интернет.

Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим обеспечением, включающим учебники, учебно-методические пособия, конспекты лекций.

Текущий контроль осуществляется на занятиях семинарского типа.

Темы самостоятельной работы для текущего контроля успеваемости:

Раздел 1.

1.1. Обзорный доклад на тему: "Последние разработки в области создания источников и приемников терагерцового излучения".

1.2. Доклад на тему: "Принцип работы и устройство [прибор]". В качестве [прибора] можно выбрать синхротрон, лазер на свободных электронах, квантово-каскадный лазер, гиротрон, лампу обратной волны, диод Ганна и др.

Раздел 2.

2.1. Применение метода разложения Фурье для нахождения полей поляризационного источника, движущегося в безграничной среде.

2.2. Применение леммы Лоренца для нахождения полей излучения заданного токового источника.

2.3. Применение метода медленно меняющихся амплитуд для нахождения полей поляризационного источника, движущегося в безграничной среде.

2.4. Применение метода медленно меняющихся амплитуд для нахождения модуляции интенсивности оптического импульса при детектировании терагерцового импульса в электрооптической среде.

Раздел 3.

3.1. Доклад на тему: "Спектральное, пространственное и временное разрешение в терагерцовой спектроскопии".

3.2. Доклад на тему: "Шумы в терагерцовой спектроскопии".

Раздел 4.

4.1. Оценка эффективности генерации терагерцового излучения при заданных параметрах лазерного импульса и кристалла в схемах с а) коллинеарным синхронизмом; б) неколлинеарным синхронизмом; в) волноводной структурой; г) наклонным фронтом интенсивности.

4.2. Оценка величины относительной модуляции интенсивности при регистрации терагерцовых импульсов в электрооптических кристаллах в схемах а) эллипсометрического детектирования в коллинеарной и неколлинеарной геометриях; б) энергетического детектирования; в) энергетического детектирования с частотной фильтрацией; г) энергетического детектирования с пространственной фильтрацией.

6. Фонд оценочных средств для аттестации по дисциплине

6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), характеризующих этапы их формирования

Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования приведен в приложении 1.

6.2. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине. Описание шкал оценивания

Процедура аттестации: для оценки результатов обучения в виде знаний – индивидуальное собеседование, для оценки результатов обучения в виде умений и владений – практические контрольные задания, описывающие проблемные и нестандартные ситуации.

Шкала оценивания: оценка по пятибалльной шкале. Оценивание знаний и умений обучаемого производится в соответствии с критериями компетенций, приведенными в п.6.1., а также на основе

решения обучающимся практических задач и модельных ситуаций, предложенных преподавателем в процессе тестирования.

Зачтено	Отличная, хорошая или удовлетворительная подготовка. Обучаемый не менее чем удовлетворительно отвечает на вопросы программы – минимум и основной вопрос, а также на большинство дополнительных вопросов.
Не зачтено	Обучаемый показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий, допускает значительные ошибки при ответах на большинство дополнительных вопросов. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.

6.3. Примеры типовых контрольных заданий или иных материалов, необходимых для оценки результатов обучения, характеризующих сформированность компетенций.

Вопросы для контроля

1. Современные источники и приемники когерентного терагерцового излучения (ПК-2).
2. Генерация и детектирование терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами: метод «накачка-зонд» (pump-probe) (ПК-1).
3. Механизмы генерации и детектирования терагерцового излучения, основанные на линейных эффектах в полупроводниках (ПК-1, ПК-2).
4. Генерация терагерцового излучения за счет оптического выпрямления. Свойства тензора нелинейной восприимчивости второго порядка. Зависимость направления вектора нелинейной поляризации от поляризации накачки (ПК-1).
5. Режимы терагерцовой генерации: синхронизованный, черенковский, нестационарный (ПК-1).
6. Применение метода разложения Фурье для расчета терагерцового поля движущегося светоиндуцированного источника (ПК-1).
7. Применение метода медленно меняющейся амплитуды и метода стационарной фазы для расчета терагерцового поля движущегося светоиндуцированного источника (ПК-1).
8. Модифицированные формулы Френеля для импульсов вынужденного излучения (ПК-2).
9. Методы увеличения эффективности генерации терагерцового излучения при оптическом выпрямлении (ПК-2).
10. Применение леммы Лоренца для расчета поля излучения заданного токового источника (ПК-1).
11. Метод электрооптического стробирования (ПК-1, ПК-2).
12. Терагерцовая спектроскопия во временной области. Динамический диапазон терагерцового спектрометра (ПК-2).
13. Настройка оптической схемы терагерцовой спектроскопии во временной области (ПК-1).
14. Методы оценки экспериментальной эффективности генерации терагерцового излучения при электрооптическом стробировании (ПК-1).

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

а) основная литература:

- 1) Царев М.В. "Генерация и регистрация терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами". Учебное пособие. [URL] http://www.unn.ru/books/met_files/terahertz.pdf.
- 2) M.I. Bakunov, A.V. Maslov, S.B. Bodrov, and M. Hangyo, "Theory of terahertz generation in a

slab of electro-optic material using an ultrashort laser pulse focused to a line," Phys. Rev. B. 2007. V. 76. P. 085346. [URL] <http://journals.aps.org/prb/pdf/10.1103/PhysRevB.76.085346>

3) B. Ferguson, X.-C. Zhang, " Materials for terahertz science and technology." Nature Materials. 2002. V. 1. P. 26 -33.

[URL] http://www.optics.rochester.edu/workgroups/zhangxc/assets/pdf/BradleyFerguson_NMat_2001Sep

б) дополнительная литература:

1. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики / И.Р. Шен. М.: Наука. 1989.

2. Оптические волны в кристаллах / А. Ярив, П. Юх М.: Мир. 1987.

3. Efficient Cherenkov-type terahertz generation in Si-prism-LiNbO₃-slab structure pumped by nanojoule-level ultrashort laser pulses / M. I. Bakunov et al. Apl. Phys. Lett. 2012. V. 101. P. 151102.

[https://www.researchgate.net/publication/257952201_Efficient_Chernkov-type_terahertz_generation_in_Si-prism-LiNbO₃-slab_structure_pumped_by_nanojoule-level_ultrashort_laser_pulses](https://www.researchgate.net/publication/257952201_Efficient_Chernkov-type_terahertz_generation_in_Si-prism-LiNbO3-slab_structure_pumped_by_nanojoule-level_ultrashort_laser_pulses)

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Фемтосекундная лазерная система Spectra Physics Tsunami + CDP Systems MPA-50. Терагерцовый спектрометр с разрешением по времени.

Аудиторный фонд ННГУ.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО с учетом рекомендаций ОПОП по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия (уровень подготовки кадров высшей квалификации) и направленности 01.04.21 Лазерная физика.

Автор _____ Бакунов М.И.

Рецензент _____ Маругин А.В.

Заведующий кафедрой общей физики _____ Бакунов М.И.

Программа одобрена на заседании методической комиссии радиофизического факультета от _____ 2021 года, протокол № ____.

Карты компетенций, в формировании которых участвует дисциплина

ПК-1 Способность выполнять научно-исследовательские работы и получать новые научные результаты в области лазерной физики в составе научной группы

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОМПЕТЕНЦИИ

Тип КОМПЕТЕНЦИИ:

Профессиональная компетенция выпускника программы аспирантуры.

ПОРОГОВЫЙ (ВХОДНОЙ) УРОВЕНЬ ЗНАНИЙ, УМЕНИЙ, ОПЫТА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ, ТРЕБУЕМЫЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИИ

Для того, чтобы формирование данной компетенции было возможно, обучающийся, приступивший к освоению программы аспирантуры, должен:

ЗНАТЬ: базовые разделы высшей математики, теоретической и лазерной физики.

УМЕТЬ: проводить основные математические преобразования, пользоваться основными измерительными приборами.

ВЛАДЕТЬ: базовым уровнем английского языка, навыками программирования и использования ресурсов интернета.

Планируемые результаты обучения* (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Критерии оценивания результатов обучения				
	1	2	3	4	5
ЗНАТЬ: Основные концепции современной лазерной физики	Отсутствие знаний	Фрагментарные представления об основных концепциях лазерной физики	Неполные представления об основных концепциях лазерной физики	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы, представления об основных концепциях лазерной физики	Сформированные систематические представления об основных концепциях лазерной физики
УМЕТЬ: Работать на современном оптическом и измерительном оборудовании	Отсутствие умений	Частично освоенное умение работать на современном оптическом и измерительном оборудовании	В целом успешное, но не систематическое умение работать на современном оптическом и измерительном оборудовании	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение работать на современном оптическом и измерительном оборудовании	Успешное и систематическое умение работать на современном оптическом и измерительном оборудовании
ВЛАДЕТЬ: Современными теоретическими и	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение современных теоретических и экспериментальных ме-	В целом успешное, но не систематическое применение современных теоретиче-	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение современных	Успешное и систематическое владение современными теоретическими и экспе-

экспериментальными методами исследований		тодов исследований	ских и экспериментальных методов исследований	теоретических и экспериментальных методов исследований	риментальными методами исследований
ВЛАДЕТЬ: Навыками чтения и восприятия научной литературы на английском языке	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков чтения и восприятия научной литературы на английском языке	В целом успешное, но не систематическое применение навыков чтения и восприятия научной литературы на английском языке	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков чтения и восприятия научной литературы на английском языке	Успешное и систематическое владение навыками чтения и восприятия научной литературы на английском языке

ПК-2 Способность самостоятельно ставить научные задачи и формулировать новые идеи в области лазерной физики

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОМПЕТЕНЦИИ

Тип КОМПЕТЕНЦИИ:

Профессиональная компетенция выпускника программы аспирантуры.

ПОРОГОВЫЙ (ВХОДНОЙ) УРОВЕНЬ ЗНАНИЙ, УМЕНИЙ, ОПЫТА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ, ТРЕБУЕМЫЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИИ

Для того, чтобы формирование данной компетенции было возможно, обучающийся, приступивший к освоению программы аспирантуры, должен:

ЗНАТЬ: основы лазерной физики.

УМЕТЬ: выделять и систематизировать основные идеи в научных текстах.

ВЛАДЕТЬ: базовым уровнем английского языка, навыками использования ресурсов интернета.

Планируемые результаты обучения* (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Критерии оценивания результатов обучения				
	1	2	3	4	5
ЗНАТЬ: Современное состояние исследований в области лазерной физики	Отсутствие знаний	Фрагментарные представления о современном состоянии исследований в области лазерной физики	Неполные представления о современном состоянии исследований в области лазерной физики	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы, представления о современном состоянии исследований в области лазерной физики	Сформированные систематические представления о современном состоянии исследований в области лазерной физики

УМЕТЬ: Определять наиболее актуальные направления исследований	Отсутствие умений	Частично освоенное умение определять наиболее актуальные направления исследований	В целом успешное, но не систематическое умение определять наиболее актуальные направления исследований	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение определять наиболее актуальные направления исследований	Успешное и систематическое умение определять наиболее актуальные направления исследований
ВЛАДЕТЬ: Навыками формулирования задач для членов исследовательской группы	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков формулирования задач для членов исследовательской группы	В целом успешное, но не систематическое применение навыков формулирования задач для членов исследовательской группы	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков формулирования задач для членов исследовательской группы	Успешное и систематическое владение навыками формулирования задач для членов исследовательской группы