

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

**федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»**

**УТВЕРЖДЕНО**

решением ученого совета ННГУ  
протокол от "27" апреля 2022 г. № 6

**Рабочая программа дисциплины**  
**Моделирование оптических процессов методом конечных  
разностей во временной области**

Уровень высшего образования  
**Подготовка научных и научно-педагогических кадров**

Программа аспирантуры  
**Лазерная физика**

Научная специальность  
**1.3.19 Лазерная физика**

Форма обучения  
**Очная**

Нижний Новгород  
2022 год

### 1. Место и цель дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Моделирование оптических процессов методом конечных разностей во временной области» относится к числу элективных дисциплин образовательного компонента программы аспирантуры и изучается на 2 году обучения в 3 семестре.

**Цель дисциплины** состоит в формировании у обучающегося целостной системы знаний по основам моделирования оптических процессов с использованием метода конечных разностей во временной области и в приобретении практических навыков разработки программ численного моделирования на основе этого метода.

### 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине

Выпускник, освоивший программу, должен

**знать:**

- основные концепции современной лазерной физики;
- современное состояние исследований;

**уметь:**

- определять наиболее актуальные направления исследований в области лазерной физики;

**владеть:**

- современными теоретическими и экспериментальными методами исследований.

### 3. Структура и содержание дисциплины.

Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е., всего - 72 часа, из которых 36 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа), 36 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

**Таблица 2**

**Структура дисциплины**

Наименование раздела дисциплины	Всего, часов	В том числе					
		Контактная работа, часов					Итого
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Консультации	Всего	
1. Введение в дисциплину.	4	2				2	2
2. Одномерное моделирование	12	6				6	6
3. Материальные уравнения и граничные условия.	8	4				4	4
4. Разделение областей моделирования на область полного и рассеянного полей в одномерном случае.	4	2				2	2
5. Получение частотных характеристик в одномерном случае.	4	2				2	2
6. Основы моделирования в	16	8				8	8

двумерном случае.							
7. Идеально поглощающие слои в двумерном случае.	8	4				4	4
8. Разделение областей моделирования в двумерном случае.	4	2				2	2
9. Решение задач рассеяния в двумерном случае.	10	4				4	6
10. Применение метода для различных областей физики	2	2				2	
<b>Промежуточная аттестация</b>	зачет						
<b>Итого</b>	<b>72</b>	<b>36</b>				<b>36</b>	<b>36</b>

**Таблица 3**

**Содержание дисциплины**

<b>№ п/п</b>	<b>Наименование раздела дисциплины</b>	<b>Содержание раздела</b>	<b>Форма проведения занятия</b>	<b>Форма текущего контроля</b>
1.	Введение в дисциплину.	Обзор практических приложений метода конечных разностей. Обзор различных численных ошибок при моделировании.	лекции	-
2.	Одномерное моделирование	Построение алгоритмов моделирования в одномерном случае на основе уравнений Максвелла. Выбор сетки. Выбор начальных и граничных условий. Сходимость. Выбор пространственного и временного шагов. Численная дисперсия. Основы написания программ моделирования.	лекции	домашнее задание
3.	Материальные уравнения и граничные условия	Моделирование поглощающих и дисперсионных сред. Безотражательные граничные условия в одномерном случае.	лекции	домашнее задание
4.	Разделение областей моделирования на область полного и рассеянного полей в одномерном случае.	Основные принципы разделения областей и приложения. Построение алгоритма.	лекции	домашнее задание
5.	Получение частотных характеристик в одномерном случае.	Использование преобразование Фурье для нахождения характеристик. Выбор точек в области моделирования для снятия характеристик.	лекции	домашнее задание
6.	Основы моделирования в двумерном случае.	Дискретизация уравнений Максвелла. Алгоритм. Построение сетки. Выбор граничных и начальных условий. Сходимость	лекции	

		алгоритма, разделение областей. Написание программ для двумерного случая.		
7.	Идеально поглощающие слои в двумерном случае.	Теоретические основы создания поглощающих слоев в двумерном случае. Тензоры электрической и магнитной проводимостей. Написание программы. Пример использования слоев.	лекции	домашнее задание
8.	Разделение областей моделирования в двумерном случае.	Основные принципы разделения областей в двумерном случае и приложения. Построение алгоритма. Примеры распространения импульса в такой области моделирования.	лекции	домашнее задание
9.	Решение задач рассеяния в двумерном случае.	Моделирование рассеяния электромагнитного поля на цилиндре.	лекции	домашнее задание
10.	Применение метода для различных областей физики	Примеры решения задач оптики, электродинамики и квантовой механики.	лекции	-

#### **4. Формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся**

Самостоятельная работа обучающихся включает следующие виды:

- разбор лекционного материала,
- изучение дополнительных разделов дисциплины с использованием учебной литературы;
- выполнение домашних заданий по решению задач.

Текущий контроль усвоения материала проводится путем балльной оценки домашних заданий. Для оценивания результатов обучения по дисциплине используется балльная система оценки домашних задач в зависимости от полноты и правильности их решения.

#### **5. Фонд оценочных средств для аттестации по дисциплине**

##### ***5.1. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине.***

Итоговый контроль качества усвоения аспирантами содержания дисциплины и выставление зачета проводится по результатам выполнения домашних заданий. За решение каждой домашней задачи начисляются баллы в зависимости от полноты и правильности ее выполнения. Для получения оценки "зачет" необходимо набрать 60% и более от максимального количества баллов.

##### ***5.2. Примеры типовых контрольных заданий или иных материалов, используемых для оценивания результатов обучения по дисциплине***

###### Примеры домашних заданий:

1) Разработать программу одномерного моделирования распространения оптического импульса используя метод конечных разностей. Запустить два импульса (ширина  $\tau=5$  фс, расстояние в начальный момент 50 микрон), распространяющиеся навстречу друг другу. Что происходит при их прохождении через друг друга?

2) Создать монохроматическую волну в резонаторе с граничными условиями  $E=0$ . Убедиться, что происходят периодические колебания во времени при выборе временного шага с  $\xi < 1$ . Найти, как будет расти поле при  $\xi = 1.01$ , и сравнить коэффициент роста во времени с аналитическим значением, которое получается из дисперсионного анализа для дискретной среды.

3) Используя метод КРВО (конечных разностей во временной области) рассчитать распространение оптического импульса и получить его значительное искажение на больших расстояниях. Теперь, представляя такой же импульс аналитически как суперпозицию плоских волн, рассчитать, используя преобразование Фурье, как он будет распространяться в пространстве с дисперсией  $n(\omega)$ , полученной для дискретной среды. Сравнить распределения поля импульса после прохождения одного и того же расстояния, используя эти два метода. Получить полное совпадение результатов.

4) Создать в вакууме начальный импульс с длиной волны  $\lambda_0 = 600$  нм и длительностью  $\tau = 5$  фс. Найти численно и построить коэффициент отражения от полупространства с  $\epsilon = 2$  в области частот, задаваемой начальным импульсом. Сравнить с аналитической зависимостью.

5) Найти численно и построить коэффициент отражения от полупространства с  $\epsilon = 2$ , но при наличии поглощения с  $\sigma = 2\omega_0$ , где  $\omega_0 = 2\pi c/\lambda_0$ . Сравнить с аналитической зависимостью.

6) Промоделировать распространение импульса (с длиной волны  $\lambda_0 = 600$  нм и длительностью  $\tau = 5$  фс) в свободном пространстве, используя методику разделения области моделирования на область полного поля и область рассеянного поля. Продемонстрировать правильность работы алгоритма, построив распределения полей в различные моменты времени: при входе в область полного поля и при выходе из нее.

7) Найти частотную зависимость коэффициента отражения и коэффициента прохождения для слоя с проницаемостью  $\epsilon = 4$  и толщиной  $L = 1500$  нм. Сравнить результаты с аналитическими.

8) Написать программу двумерного моделирования оптических процессов для ТЕ поляризации ( $E_z$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ) используя нулевые граничные условия для  $E_z$ . Продемонстрировать динамику поля  $E_z$  (распространение поля, отражение от границ) при возбуждении точечным источником тока в свободном пространстве.

9) Добавить поглощающий слой (PML) около всех границ. Промоделировать отражение волн при нескольких значениях (2-3) параметров слоя. Выбрать наиболее подходящий набор параметров и продемонстрировать эффективность поглощения в слое.

10) Оценить эффективность использования импедансно-согласованного поглощающего слоя (PML) для снижения отражения. Для этого сравнить отражение в двух случаях. Случай 1: используя PML с наиболее подходящими параметрами из предыдущего задания (2D моделирование, ТЕ поляризация). Случай 2: используя обычный изотропный слой с электрической проводимостью с такой же пространственной зависимостью для  $\sigma$ , как и для PML. Сделать выводы об эффективности PML по сравнению с обычным изотропным слоем с электрической проводимостью.

## **6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.**

### **а) Основная литература**

1. Маслов А.В. «Моделирование волновых процессов в электродинамике» ([www.lib.unn.ru/students/src/fdtd\\_textbook\\_maslov\\_sept\\_2019.pdf](http://www.lib.unn.ru/students/src/fdtd_textbook_maslov_sept_2019.pdf)).

2. Маслов А. В. "Решение электродинамических задач методом конечных разностей во временной области ([http://www.unn.ru/books/met\\_files/fdtd\\_maslov.pdf](http://www.unn.ru/books/met_files/fdtd_maslov.pdf))

### **б) Дополнительная литература**

1. Джексон Д., "Классическая электродинамика", М. Мир. 1965 г., 702 с.

2. Ландау Л., Лифшиц Е. М., "Электродинамика сплошных сред", М. Гостехиздат, 1957 г. 432 с.

## **7. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

- помещения для проведения занятий: лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для хранения и профилактического обслуживания оборудования и помещения для самостоятельной работы обучающихся, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ;
  - материально-техническое обеспечение, необходимое для реализации дисциплины, включая лабораторное оборудование;
  - лицензионное программное обеспечение: *Windows, Microsoft Office*;
  - обучающиеся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья обеспечиваются электронными и (или) печатными образовательными ресурсами в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья.
- ресурсам.

Рабочая программа учебной дисциплины составлена в соответствии с учебным планом, Положением о подготовке научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Постановление Правительства РФ от 30.11.2021 № 2122), Федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Приказ Минобрнауки РФ от 20.10.2021 № 951).

Автор: к.ф.-м.н. доцент А.В. Маслов

Рецензент: к.ф.-м.н. доцент С.Н. Жуков

Заведующий кафедрой общей физики д.ф.-м.н. профессор М.И. Бакунов

Программа одобрена на заседании Центра исследования науки и развития аспирантского образования (на правах кафедры) Института аспирантуры и докторантуры от 24 января 2022г., протокол №10.