

**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 "16" января 2024 г. №1

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
2024 год

1. Место и цель дисциплины в структуре ПА

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					С а м о
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского	Занятия лабораторного	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 двумерном случае.	16	8				8	8
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	
Промежуточная аттестация	зачет						
Итого	72	36				36	36

Таблица 3

Содержание дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела	Форма проведения занятия	Форма текущего контроля
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	лекции	

		начальных условий. Сходимость 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.

Описание шкалы оценивания на промежуточной аттестации в форме зачета

Оценка	Уровень подготовленности, характеризуемый оценкой
<i>Зачтено</i>	владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, умение самостоятельно обозначить проблемные ситуации в организации научных исследований, способность критически анализировать и сравнивать существующие подходы и методы к оценке результативности научной деятельности, свободное владение источниками, умение четко и ясно излагать результаты собственной работы, следовать нормам, принятым в научных дискуссиях.
<i>Не зачтено</i>	непонимание смысла ключевых проблем, недостаточное владение науковедческой терминологией, неумение самостоятельно обозначить проблемные ситуации, неспособность анализировать и сравнивать существующие концепции, подходы и методы, неумение ясно излагать результаты собственной работы, следовать нормам, принятым в научных дискуссиях.

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 σ , 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).

2. Маслов А. В. "Решение электродинамических задач методом конечных разностей во временной области (http://www.unn.ru/books/met_files/fdtd_maslov.pdf)

3. A. Taflov and S. Hagness, Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, 3rd edn. Artech House, 2005.

4. D. Sullivan, Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method, 2nd Edition, Wiley-IEEE Press, 2013.

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.

3. Manolatu C., Haus H.A. (2002) The Finite Difference Time Domain (FDTD) Method. In: Passive Components for Dense Optical Integration. Springer, Boston, MA, DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0855-7_3

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4615-0855-7_3

4. Archambeault B., Brench C., Ramahi O.M. (2001) The Finite-Difference Time-Domain Method. In: EMI/EMC Computational Modeling Handbook. The Springer International Series in Engineering and Computer Science, vol 630. Springer, Boston, MA

DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1557-9_3

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4615-1557-9_3

5. K. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 14, no. 3, pp. 302–307, 1966.

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).

Авторы:

Автор: А.В. Маслов

Рецензент: С.Н. Жуков

Заведующий кафедрой: М.И. Бакунов

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 18 декабря 2023 года, протокол №09/23.