# .

**Рабочая программа дисциплины**

**1. Математическое моделирование в фотонике**

**2. Лектор.**

**2.1.** К.ф.-м.н., доцент, Захарова Ирина Гургеновна, кафедра фотоники и физики микроволн, физический факультет, [zaharova@physics.msu.ru](mailto:zaharova@physics.msu.ru), тел. 939-16-62.

**3. Аннотация дисциплины.**

В настоящее время теоретическое или экспериментальное исследование во многих областях науки и, особенно в физике, требует привлечения математического моделирования. В связи с этим умение грамотно использовать аппарат моделирования является необходимым практически для каждого специалиста. В процессе чтения курса студенты получат базовые знания о принципах выполнения вычислительного эксперимента применительно к бурно развивающейся области современной физики - нелинейной фотонике.

Огромную роль при проведении любого вычислительного эксперимента играет выбор математической модели. При этом важно то, что нелинейная фотоника имеет дело с распространением фемтосекундных (коротких) импульсов, что, как правило, сопровождается нелинейными процессами. Нелинейность приводит к множественности решений и для отбора нужных решений и их аналитического построения решений (если удастся) важно использовать законы сохранения – инварианты задачи. Они применяются также для тестирования численных методов и контроля результатов компьютерного моделирования.

В рамках лекционного курса студенты познакомятся с многочисленными примерами, иллюстрирующими численные подходы к различным типам возникающих задач, на простейших примерах научатся самостоятельно строить численные методы и анализировать применимость этих методов к конкретным задачам.

**4. Цели освоения дисциплины.**

Основной целью лекционного курса является введение в современные проблемы фотоники, принципы построения моделей на простейших примерах, а также освоение студентами знаний о том, чем следует руководствоваться при проведении математического моделирования различных явлений, изучаемых в фотонике. Поскольку важнейшей составной частью моделирования является численный метод, большое внимание уделяется выбору численного алгоритма, адекватного поставленной задаче. Студенты узнают на какие свойства модели следует обращать внимание при ее численном решении, какими свойствами должен обладать численный метод для получения надежных результатов вычислений.

**5. Задачи дисциплины.**

Основными задачами лекционного курса являются: (1) систематическое изложение основополагающих принципов современного подхода к моделированию задач фотоники; (2) приобретение навыков построения алгоритмов моделирования на примере простейших характерных задач, исследуемых в современной фотонике.

**6. Требования к результатам освоения содержания дисциплины**

В результате освоения дисциплины студент должен знать основные принципы подхода к моделированию задач нелинейной фотоники; владеть полученными теоретическими и практическими знаниями и уметь применять эти знания для построения алгоритмов моделирования современных задач фотоники.

**8. Содержание и структура дисциплины.**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Вид работы** | **Семестр** | | | **Всего** |
| 5 |  |  |
| **Общая трудоёмкость, акад. часов** | 62 |  |  | 62 |
| **Аудиторная работа:** | 30 |  |  | 30 |
| Лекции, акад. часов | - |  |  | - |
| Семинары , акад. часов | - |  |  | - |
| Лабораторные работы, акад. часов | - |  |  | - |
| **Самостоятельная работа, акад. часов** | 32 |  |  | 32 |
| **Вид итогового контроля (зачёт, зачёт с оценкой, экзамен)** | экз |  |  | экз |

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **N раз- дела** | **Наименование раздела** | **Трудоёмкость (академических часов) и содержание занятий** | | **Форма текущего контроля** |
| **Аудиторная работа** | **Самостоятельная работа** |
| **Лекции** |
| **1** | Постановки задач о распространении световых волн в линейных и нелинейных средах | *Лекция 1 (2 часа)*  Примеры физических постановок задач распространения светового излучения в линейных и нелинейных средах. Виды нелинейности (кубичная, квадратичная, тепловая и т.п.). Отличительные черты фемтосекундной оптики с точки зрения уравнений и нелинейностей. |  |  |
| *Лекция 2 (2 часа)*  Понятие математической модели для исследуемого класса задач. Ее связь с физической моделью. Нормировки физических величин. Постановка начальных и граничных условий. | *(2 часа)*  Самостоятельная проработка примера получения математической модели путем нормировки физических величин для задачи генерации второй гармоники. | ДЗ |
| *Лекция 3 (2 часа)*  Законы сохранения при взаимодействии лазерного фемтосекундного импульса с веществом. Метод их получения. Преобразование обобщенного нелинейного уравнения Шредингера. | *(2 часа)*  Самостоятельная проработка примера вывода трех интегралов движения для задачи генерации второй оптической гармоники. | ДЗ |
| **2** | Подходы к построению численных методов | *Лекция 4 (2 часа)*  Сохранение интегралов движения, присущих физической модели, как базовый принцип построения численного метода. Понятие о консервативных разностных схемах. Важность свойства асимптотической устойчивости. Примеры их построения. | *(2 часа)*  Самостоятельный анализ материалов лекции. | ДЗ |
| *Лекция 5 (2 часа)*  Методы расщепления по физическим факторам для расчета эволюционных многомерных нелинейных моделей. | *(2 часа)*  Самостоятельный анализ материалов лекции. | ДЗ |
| *Лекция 6 (2 часа)*  Нелинейные консервативные разностные схемы. Методы их решения. Место итерационных алгоритмов при построении численных методов для расчета нелинейных процессов. | *(2 часа)*  Самостоятельное построение итерационного алгоритма для модели стационарного самовоздействия световой волны в кристалле с керровской нелинейностью. | ДЗ |
| *Лекция 7 (2 часа)*  Многоэтапные итерационные методы, как универсальный инструмент для реализации консервативных разностных схем для уравнений с произвольными краевыми условиями. Их преимущества перед методами расщепления по физическим процессам. | *(2 часа)*  Самостоятельное построение численного алгоритма для трехмерной модели генерации второй гармоники. | ДЗ |
| *Лекция 8 (2 часа)*  Адаптивные искусственные краевые условия для нелинейного уравнения Шредингера. Их преимущества перед другими искусственными условиями. | *(2 часа)*  Самостоятельное построение адаптивных краевых условий для двумерной модели распространения дифрагирующего светового пучка в кристалле с кубичной нелинейностью. | ДЗ |
| *Лекция 9 (2 часа)*  Численное решение уравнений Максвелла с помощью разностной схемы Finite Difference Time Domain (FDTD). | *(2 часа)*  Самостоятельный анализ материалов лекции. | ДЗ |
| *Лекция 10 (2 часа)*  Солитонные решения “классических“ задач нелинейной оптики. Солитонные решения в фотонных кристаллах. Остановка света и эффект локализации света в нелинейном фотонном кристалле. | *(2 часа)*  Самостоятельный анализ материалов лекции. | ДЗ |
| *Лекция 11 (2 часа)*  Чирпированные солитоны и автомодельные решения - новый класс солитонов нелинейной оптики. | *(2 часа)*  Самостоятельный анализ материалов лекции. | ДЗ |
| *Лекция 12 (2 часа)*  Роль инвариантов при построении точных решений систем нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих преобразование частоты высокоинтенсивных оптических импульсов среде с комбинированной нелинейностью. | *(2 часа)*  Самостоятельный анализ материалов лекции. | ДЗ |
| *Лекция 13 (2 часа)*  Многоволновое взаимодействие. Генерация второй оптической гармоники (ГВГ). Световые пули в условиях ГВГ | *(2 часа)*  Самостоятельный анализ материалов лекции. | ДЗ |
| *Лекция 14 (2 часа)*  Современные методы импульсной терагерцовой спектроскопии веществ. | *(6 часов)*  Самостоятельный анализ материалов лекции. Повторение материала курса и решение тестовых задач | ДЗ |
|  |  | *(2 часа)*  *Итоговая контрольная работа* |  | ДЗ |

**Предусмотрены следующие формы текущего контроля успеваемости:**

1. Домашнее задание (ДЗ);
2. Итоговая контрольная работа (ИКР).

**9. Образовательные технологии**

Основное изложение материала, необходимого для решения задач, ведётся традиционным способом в виде лекций, сопровождаемых демонстрацией слайдов. Используется мультимедийный проектор, что позволяет, в том числе, наглядную демонстрацию примеров моделирования. В процессе лекционного разбирается решение простейших задач, нацеленных на выработку умения строить алгоритмы для моделирования круга явлений, исследуемых в нелинейной фотонике.

**10. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации**

**Текущий контроль успеваемости** проводится с помощью проверки домашних заданий. Критерии формирования оценки – умение решать тестовые задачи по пройденной части курса.

* **Промежуточная аттестация** проводится в конце семестра в виде экзамена в письменной форме. На экзамене предлагается контрольная работа, состоящая из 5 задач. Критерии формирования оценки – посещаемость занятий, активность студентов на занятиях, результаты контрольной работы.

**Образцы тестовых задач для контрольной работы**

1. Записать математическую модель, описывающую генерацию второй оптической гармоники в волноводе. Указать принципы построения алгоритма для выполнения компьютерного моделирования этой задачи.

2. Для щелевого пучка, распространяющегося в кубично-нелинейной среде, записать модель с прозрачными граничными условиями. Для этой модели построить численный метод.

3.Построить консервативную разностную схему на характеристической сетке для модели встречных волн, распространяющихся в кубической среде.

4. Построить алгоритм метода FDTD для уравнений Максвелла в ТМ случае.

**12. Учебно-методическое обеспечение дисциплины**

Основная литература

1. А.А. Самарский, А.П. Михайлов. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры, М. “Физматлит”, 2005.

2. Р.П.Федоренко. Введение в вычислительную физику, Изд-во МФТИ, 1994, 2008.

3. Ю.Н.Карамзин, А.П.Сухоруков, В.А.Трофимов. Математическое моделирование в нелинейной оптике. М., Изд-во МГУ, 1989.

4. А.А.Самарский, А.В.Гулин. Численные методы математической физики. 2000.

5. Дифракционная нанофотоника/ Под ред. В.А. Сойфера. М. “Физматлит”, 2011.

Дополнительная литература

1.Г.П. Агравал. Нелинейная волоконная оптика. 1996.

2.Г.И. Марчук. Методы вычислений, 1977.

3. Ю.С. Кившарь, Г.П. Агравал. Оптические солитоны. От волоконных световодов к фотонным кристаллам. М. “Физматлит”, 2005.

Периодическая литература

1. P. Monk, Finite element methods for Maxwell’s equations

(Oxford Science Publications, Oxford, 2003).

2. A. Taflove and S. C. Hagness, Computational Electrodynamics:

The Finite-Difference Time-Domain Method, 3rd ed.

(Artech House, Boston, 2005).

3. A. Aceves, C.M. deSterke and M. Weinstein, Book chapter: “Theory of

nonlinear pulse propagation periodic structures “ Nonlinear Photonic Crystals,

B. Eggleton and R.E. Slusher. Springer series in Photonics, (2003), Vol 10. Springer Eds.

4. T. Dohnal, A. Aceves (2005), “Optical soliton bullets in (2+1)D nonlinear bragg

resonant periodic geometries”, Studies in Applied Mathematics, 115 209-232.

53. T. Dohnal and A. B. Aceves . A finite dimensional model for defect-trapped

light in 2D periodic nonlinear structures, (2006), Optics Letters, 13, 3013-3015.

5. A. Alberucci, and G. Assanto , Modeling nematicon propagation, Mol. Cryst. Liq. Cryst. 572 (1), (2013), 2-12

6. M. Conforti, F. Baronio, S. Trillo, Dispersive shock waves in phase-mismatched second-harmonic generation. Optics Letters. Vol. 37, No. 6, 2012, pp: 1082-1084

7. K. Busch, M. König, and J. Niegemann, Discontinuous Galerkin method in nanophotonics. Laser & Photonics Rev. **5**, No. 6, 773– 809, 2011

8. Guy Bouchitté, Christophe Bourel, Didier Felbacq , Homogenization of the 3D Maxwell system near resonances and artificial magnetism, (2009), 571-576. In Comptes Rendus Mathematique 347 (9-10).

**13. Материально-техническое обеспечение**

В соответствии с требованиями п.5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика».

Занятия проводятся в аудитории 2-59 физического факультета МГУ. Она оснащена мультимедийным проектором, экраном и доской.