

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
Филиал Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова
в городе Сарове

УТВЕРЖДАЮ



Директор филиала МГУ в г. Сарове
член-корреспондент РАН В.В.Воеводин

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Наименование дисциплины:

ОСНОВЫ ФИЗИКИ ЛАЗЕРОВ

Уровень высшего образования:

Магистратура

Направление подготовки:

03.04.02 Физика

Направленность (профиль) ОПОП:

Лазерная нелинейная оптика и фотоника

Квалификация «Магистр»

Форма обучения: Очная

Саров 2021 г.

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 Физика в редакции приказа по МГУ от 30 декабря 2020 г. №1366.

Авторы–составители:

Д.ф.-м.н., профессор Савельев-Трофимов Андрей Борисович, кафедра общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ

Аннотация к рабочей программе дисциплины

«ОСНОВЫ ФИЗИКИ ЛАЗЕРОВ»

1. Курс представляет собой систематическое изложение физических основ и принципов действия лазеров. В рамках курса последовательно рассматриваются основные аспекты описания электромагнитного излучения (переход к уравнению Гельмгольца и понятию мод), вещества (переход к уравнению Лиувилля, балансным и скоростным уравнениям), их взаимодействий (спонтанные и индуцированные процессы в многоуровневых системах), а также ряд стандартных приближений (дипольное и резонансное приближения, быстрая фазовая релаксация). Анализируются условия усиления и генерации (активные среды, системы накачки, резонаторы) и способы реализации различных режимов работы (непрерывная генерация, модуляция добротности, синхронизация мод), а также основные характеристики выходного излучения. Особенностью курса является стремление отследить границы применимости различных подходов к описанию рассматриваемых явлений.

1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

В результате освоения дисциплины «ОСНОВЫ ФИЗИКИ ЛАЗЕРОВ» обучающийся кроме знаний предмета получает навыки применения ранее полученных знаний для решения новых научных и практических задач.

Дисциплина читается в 2ом семестре и относится к вариативной части программы

2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия

Освоение дисциплин «Электромагнетизм», «Электродинамика», «Оптика», «Математический анализ», «Квантовая механика», «Дифференциальные уравнения», «Теория колебаний», «Теория волн».

3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

Формируемые компетенции (код компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)
Способность использовать знания современных проблем и новейших достижений в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники в своей научно-исследовательской деятельности (СПК-1).	ЗНАТЬ основные законы и направления современных научных исследований в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники. УМЕТЬ на основе фундаментальных знаний в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники, определять возможные направления научных исследований. ВЛАДЕТЬ необходимой информацией из современных отечественных и зарубежных источников по тематике избранного направления исследования в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.
Способность организовать и планировать физические исследования, ставить	ЗНАТЬ базовые принципы организации научных исследований с использованием информационных технологий, основные методики работы на современном

<p>конкретные задачи научных исследований в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники и решать их с помощью современной аппаратуры, оборудования и информационных технологий (СПК-2).</p>	<p>научном оборудовании в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники. УМЕТЬ используя знания в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники проводить научные исследования. ВЛАДЕТЬ навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов, обобщения, оформления и публичного представления полученных результатов.</p>
<p>Способность определять основные направления внедрения научных результатов в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники (СПК-3).</p>	<p>ЗНАТЬ основные направления инновационного развития в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники. УМЕТЬ проводить необходимый анализ современных тенденций научных инноваций в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники для подготовки предложений по внедрению полученных научных результатов. ВЛАДЕТЬ методами обоснования возможного применения полученных научных результатов с учетом современных достижений в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p>

4. Форма обучения: очная

5. Язык обучения: русский

6. Содержание дисциплины:

Тема 1. Фундаментальные основы физических процессов происходящих в лазерах

Свойства лазерного излучения: монохроматичность, поляризация, направленность, когерентность. Спонтанные и индуцированные переходы и их вероятности. Коэффициенты Эйнштейна, их связь. Термодинамическое равновесие с электромагнитным вакуумом. Безызлучательные переходы. Балансные уравнения. Двухуровневая система: коэффициент поглощения, насыщение, невозможность создания инверсной заселенности за счет оптической накачки. Отрицательная температура. 3-х и 4-х уровневые системы переходов: разность населенностей, условия получения инвертированного состояния. Уравнение Шредингера и волновая функция. "Чистые" и "смешанные" состояния. Оператор и матрица плотности, уравнение Лиувилля. Система уравнений для диагональных и недиагональных элементов матрицы плотности. Поляризация среды. Дипольное приближение. Резонанс - приближение "вращающейся волны". Быстрая фазовая релаксация и переход к балансным уравнениям. Механизмы релаксации, однородное и неоднородное уширение, эффект Доплера, лоренцевский и гауссовский контуры линий.

Тема 2. Оптическое излучение в резонаторе.

Уравнения Максвелла, волновое уравнение. Объемный резонатор. Собственные типы колебаний - моды. Пространственная структура поля, собственные частоты и поляризационные характеристики. Специфика оптического диапазона: поперечные и продольные моды, открытые резонаторы и световые пучки. Дифракционные потери и зависимость их величины от индексов мод. Селекция мод, роль дифракционных потерь. Взаимодействие и конкуренция мод. Гауссов пучок как основная поперечная мода аксиально-симметричного резонатора. Перетяжка пучка и конфокальный параметр. Зависимость радиуса пучка и кривизны волнового фронта от расстояния до плоскости перетяжки. Комплексный параметр пучка. Закон ABCD. Лучевая матрица как решение системы линейных уравнений для параметров пучка в параксиальном приближении: свободное пространство, тонкая линза, граница раздела диэлектриков. Фокусировка пучка. Матричный расчет линейного резонатора и области существования

решений в резонаторе, образованном двумя плоскими зеркалами и тонкой линзой. Оптимальное заполнение активного элемента. Обобщенный сферический резонатор и диаграмма его устойчивости. Параметры Френеля. Их связь с дифракционными потерями и оптимальные значения. Эквивалентные резонаторы. Спектр генерации: продольные и поперечные моды, спектральная полоса усиления активной среды. Интервал частот между соседними продольными модами, их число для лазеров на растворах красителей, стеклах, активированных кристаллах и газах. Сужение спектра генерации: уменьшение длины резонатора, применение дисперсионных элементов. Эталон Фабри-Перо, призмы, дифракционные решетки. Трехзеркальные резонаторы. Поляризационная селекция. Специальные резонаторы. Кольцевые резонаторы: лучевые матрицы для внеосевых пучков и астигматизм, однонаправленная генерация и оптические вентили. Эффект Фарадея. Неустойчивые резонаторы: используемые варианты схем, их положение с точки зрения диаграммы устойчивости и числа Френеля, вывод излучения из резонатора, геометрическая оптика и расчет коэффициента телескопирования.

Тема 3. Лазер как самосогласованная система: активная среда + излучение.

Блок-схема лазера и ее аналогия с генератором радиочастотного диапазона. Необходимость учета нелинейности амплитудно-частотной характеристики. Потери и эффективное время жизни фотона в резонаторе. Порог генерации и устойчивость, ее связь с насыщением коэффициента усиления. Режимы генерации. Скоростные уравнения: усреднение поля по объему резонатора и времени обхода, область применимости. Уравнения для 3-х и 4-х уровневых схем переходов. Непрерывный режим генерации. Зависимость инверсии населенности и числа фотонов в резонаторе от скорости накачки. Пороговая скорость накачки и выходная мощность, оптимальная обратная связь. Примеры: лазер на рубине и алюмоиттриевом гранате. Релаксационные колебания: их частота и скорость затухания. Режим свободной генерации и конкуренция мод. Режим модуляции добротности при генерации гигантских импульсов. Оптические затворы: электромеханические, электрооптические, акустооптические, пассивные. Этапы генерации: балансные уравнения для этапов подготовки активной среды и развития генерации. Решение системы скоростных уравнений в случаях 3-х и 4-х уровневых схем переходов. Пиковая мощность, энергия и длительность переднего и заднего фронтов выходного импульса. Синхронизация мод и сверхкороткий световой импульс. Связь предельных параметров импульса с характеристиками активной среды. Качество сверхкороткого импульса, пиковая и средняя мощности. Методы активной синхронизации мод: амплитудная и фазовая модуляции, режим синхронной накачки. Спектральное и временное представления. Необходимые условия для реализации режима синхронизации мод. Пассивные затворы.

Тема 4. Специфика и применения различных типов лазеров

Классификация лазеров: типы активных сред и методы их накачки. Газовые лазеры: лазеры на нейтральных атомах, ионные, молекулярные, на парах металлов, химические и эксимерные лазеры. Твердотельные лазеры: лазеры на активированных кристаллах, стеклах, кристаллах с центрами окраски. Полупроводниковые лазеры и лазеры на растворах органических красителей. Лазер на титан-сапфире. Волоконные лазеры.

Тема 5. Усиление лазерного излучения в усилителях.

Описание процесса усиления лазерного излучения в усилителе. Формула Франца-Нодвига для 3-х и 4-х уровневых сред. Насыщение усилителя и его влияние на временные и спектральные характеристики усиливаемого излучения. Особенности усиления непрерывного излучения и импульса. Типы усилителей. Лазерные среды для усилителей. Методы накачки усилителей. Геометрия усилителей.

7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в ак. часах				
		Общая трудоемкость	в том числе ауд. занятий			Самостоятельная работа студентов
			Общая аудиторная нагрузка	Лекций	Семинаров	
Основы физики лазеров	2	72	34	17	17	38

8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Изучение курса «Основы физики лазеров» включает в себя лекции, на которых рассматривается теоретическое содержание курса, обсуждение вопросов, обозначенных в темах дисциплины; самостоятельную работу, заключающуюся в подготовке к лекционным и семинарским занятиям. Темы, рассматриваемые на лекциях, по вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации. Темы, рассматриваемые на лекциях и изучаемые самостоятельно, по вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации.

№ темы	Наименование раздела дисциплины	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы					Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации
		Всего часов	Лекции	Научно- практические	Семинары	Самостоятельная работа	
1	Фундаментальные основы физических процессов, происходящих в лазерах	12	3		3	6	Собеседование, опрос

2	Оптическое излучение в резонаторе.	16	4	-	4	8	
3	Лазер как самосогласованная система: активная среда + излучение.	16	4	-	4	8	
4	Специфика и применения различных типов лазеров	20	5		5	10	
5	Усиление лазерного излучения в усилителях.	4	1		1	2	
6							
	Промежуточная аттестация	4				4	экзамен в устной форме
ИТОГО:		72	17	-	17	38	

9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Основы физики лазеров» осуществляется на лекциях и заключается в оценке активности слушателей, качества ответов на вопросы лектора, аргументированности позиции студента, оценивается широта используемых им теоретических знаний. В семестре в конце некоторых лекций проводятся несколько коротких контрольных работ (10 – 15 минут).

Промежуточная аттестация по дисциплине «Основы физики лазеров» проводится в форме зачета. Результаты сдачи зачета оцениваются по шкале «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично». Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

Требования к структуре и содержанию фонда оценочных средств текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Перечень оценочных средств, применяемых на каждом этапе проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине, представлены в таблице

Наименование оценочного средства	Краткая характеристика оценочного средства	Представление оценочного средства в фонде
Оценочные средства текущего контроля		
Тематический опрос (в форме ответов на вопросы)	Средство контроля, организованное как короткий письменный ответ на поставленный вопрос по тематике предыдущей или текущей лекции, рассчитанное на выяснение объема и качества знаний, усвоенных обучающимися по определенному разделу, теме, проблеме.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины

Собеседование (в форме беседы, дискуссии по теме)	Средство контроля, организованное как свободная беседа, дискуссия по тематике изучаемой дисциплины, рассчитанное на выяснение объема знаний обучающегося по всем изученным разделам, темам; свободного использования терминологии для аргументированного выражения собственной позиции.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Оценочные средства промежуточной аттестации		
Короткая письменная работа	Средство, позволяющее оценить сформированность систематических представлений о методах научно-исследовательской деятельности.	Перечень вопросов к зачету

11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	2	3	4	5
ЗНАТЬ: принципы работы лазеров ОПК-3.Б 3-6	Отсутствие знаний принципов работы лазеров	В целом успешные, но не систематические знания принципов работы лазеров	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания принципов работы лазеров	Успешные и систематические знания принципов работы лазеров
УМЕТЬ: работать с лазерами ОПК-3.Б У-6	Отсутствие умения работать с лазерами	В целом успешное, но не систематическое умение работать с лазерами	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение работать с лазерами	Успешное и систематическое умение работать с лазерами
ВЛАДЕТЬ: методами описания и расчета лазеров ОПК-3.Б В-6	Отсутствие/фрагментарное владение методами описания и расчета лазеров	В целом успешное, но не систематическое владение методами описания и расчета лазеров	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение методами описания и расчета лазеров	Успешное и систематическое владение методами описания и расчета лазеров

12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся:

Пример:

1. Чем отличаются спонтанные и индуцированные переходы?
2. Что такое коэффициенты Эйнштейна?
3. Что такое балансные уравнения?
4. Что такое "чистые" и "смешанные" состояния, как и в каких приближениях описывается эволюция оператора/матрицы плотности?
5. Чем удобно введение оператора и матрицы плотности?
6. Что такое процессы релаксации, чем они обусловлены и чем отличаются процессы релаксации разных типов?
7. Что такое моды резонатора, какие типы мод Вы знаете?
8. Чем отличаются закрытые и открытые резонаторы, одинаковы ли у них продольные и поперечные моды?
9. Что приводит к взаимодействию и конкуренции мод?
10. Что такое гауссов пучок, как описывается его эволюция при распространении?
11. Что такое ABCD матрица, как пользоваться матричным описанием?
12. Что такое параметры Френеля, каковы их оптимальные значения и как эти значения связаны с дифракционными потерями?
13. Какие резонаторы называются эквивалентными и почему?
14. Что такое энергия насыщения усиления?

13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.

Материалы промежуточного контроля успеваемости обучающихся в форме зачета:

1. Свойства лазерного излучения и блок-схема лазера. Необходимость учета нелинейности амплитудно-частотной характеристики. Потери и эффективное время жизни фотона в резонаторе. Порог генерации и устойчивость, насыщение коэффициента усиления. Режимы генерации.
2. Спонтанные и индуцированные переходы и их вероятности. Коэффициенты Эйнштейна, их связь. Термодинамическое равновесие с электромагнитным вакуумом. Безызлучательные переходы. Балансные уравнения.
3. Балансные уравнения для двухуровневой системы переходов. Насыщение коэффициента поглощения. 3-х и 4-х уровневые системы переходов: разность населенностей, условия получения инвертированного состояния.
4. Уравнение Шредингера и волновая функция. "Чистые" и "смешанные" состояния. Оператор и матрица плотности. Уравнения для элементов матрицы плотности. Дипольное и резонансное приближения. Фазовая релаксация и переход к балансным уравнениям.
5. Основные типы физических механизмов релаксации. Однородное и неоднородное уширение линии перехода. Лоренцевский и гауссовский контуры линии. Роль эффектов Штарка и Доплера.
6. Уравнения Максвелла и волновое уравнение. Собственные типы колебаний - моды для излучения в пустом объемном резонаторе. Пространственная структура поля, собственные частоты и поляризационные характеристики.

7. Специфика открытых резонаторов: поперечные и продольные моды в оптическом диапазоне, световые пучки. Дифракционные потери и зависимость их величины от индексов мод. Селекция мод, роль дифракционных потерь. Взаимодействие и конкуренция мод.
8. Гауссов пучок как основная поперечная мода аксиально-симметричного резонатора. Перетяжка пучка и конфокальный параметр. Зависимость радиуса пучка и кривизны волнового фронта от расстояния до плоскости перетяжки. Комплексный параметр пучка. Закон ABCD.
9. Закон ABCD. Лучевая матрица как решение системы линейных уравнений для параметров пучка в параксиальном приближении: свободное пространство, тонкая линза, граница раздела двух диэлектриков. Фокусировка пучка.
10. Обращение волнового фронта в резонаторе с обычными и нелинейными зеркалами. Матричный расчет линейного резонатора и области существования решений в резонаторе с двумя плоскими зеркалами и тонкой линзой. Оптимальное заполнение активного элемента.
11. Обращение волнового фронта в резонаторе с обычными и нелинейными зеркалами. Обобщенный сферический резонатор и диаграмма устойчивости. Параметры Френеля. Их связь с дифракционными потерями и оптимальные значения. Эквивалентные резонаторы.
12. Спектр генерации: продольные и поперечные моды, спектральная полоса усиления активной среды. Интервал частот между соседними продольными модами и их число для лазеров различных типов. Методы сужения спектра генерации. Поляризационная селекция.
13. Специальные резонаторы. Кольцевые резонаторы: лучевые матрицы для внеосевых пучков и астигматизм, однонаправленная генерация и оптические вентили. Неустойчивые резонаторы, вывод излучения из таких резонаторов и их положение на диаграмме устойчивости.
14. Скоростные уравнения и область их применимости. Скоростные уравнения для 3-х и 4-х уровневых схем переходов. Зависимость инверсии населенности и числа фотонов в резонаторе от скорости накачки в непрерывном режиме генерации.
15. Скоростные уравнения для 3-х и 4-х уровневых схем переходов. Пороговая скорость накачки и выходная мощность, оптимальная обратная связь. Релаксационные колебания: их частота и скорость затухания на примере лазеров на рубине и алюмо-иттриевом гранате.
16. Режим свободной генерации и конкуренция мод. Режим модуляции добротности. Оптические затворы: электромеханические, электрооптические, акустооптические, пассивные. Балансные уравнения для этапов подготовки активной среды и развития генерации.
17. Режим модуляции добротности. Балансные уравнения на этапах подготовки активной среды и развития генерации. Решение системы скоростных уравнений для 3-х и 4-х уровневых схем переходов. Пиковая мощность, энергия и длительность фронтов выходного импульса.
18. Синхронизация мод. Связь предельных параметров сверхкороткого импульса с характеристиками активной среды. Качество импульса, пиковая и средняя мощности. Методы активной синхронизации мод: амплитудная и фазовая модуляция, режим синхронной накачки.
19. Описание методов активной и пассивной синхронизации мод в спектральном и временном представлениях. Используемые типы затворов и необходимые условия для реализации режима синхронизации мод.
20. Классификация лазеров по типам активных сред и методам их накачки. Основные особенности газовых лазеров на примерах лазеров на нейтральных атомах, ионных, молекулярных, на парах металлов и эксимерных лазеров.
21. Классификация лазеров по типам активных сред и методам их накачки. Твердотельные лазеры: лазеры на активированных кристаллах, стеклах и кристаллах с центрами окраски. Полупроводниковые лазеры и лазеры на растворах красителей. Лазер на титан-сапфире.

22. Особенности усиления лазерного излучения в 4-х уровневом усилителе. Формула Франца-Нодвига для 4-х уровневой системы. Описание усиления непрерывного излучения и импульса. Примеры 4-х уровневых сред.
23. Особенности усиления лазерного излучения в 3-х уровневом усилителе. Формула Франца-Нодвига для 3-х уровневой системы. Описание усиления непрерывного излучения и импульса. Примеры 3-х уровневых сред.

14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

Основная литература.

1. Ф. Качмарек. Введение в физику лазеров. - М.: Мир, 1981.
2. О. Звелто. Физика лазеров.- М.: Мир, 1979.
3. А. Мэйтлэнд, М. Данн. Введение в физику лазеров. - М.: Наука, 1978.
4. Л.В.Тарасов. Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения. – М.: Радио и связь, 1981.
5. И.И.Кондиленко, П.А.Коротков, А.И.Хижняк. Физика лазеров. – Киев, «Вища школа», 1984.
6. Сверхкороткие световые импульсы / Под ред. С. Шапиро.- М.: Мир, 1981.
7. Й. Херман, Б. Вильгельми. Лазеры сверхкоротких импульсов.- М.: Мир, 1986.

Дополнительная литература.

1. М. Лэкс. Флуктуации и когерентные явления.- М.: Мир, 1974.
2. Справочник по лазерам в 2-х томах.- М.: Сов. радио, 1978.
3. Справочник по лазерной технике.- Киев: Техника, 1978.
4. В. Бруннер. Справочник по лазерной технике. Энергоатомиздат, 1991.

Интернет-ресурсы.

1. Википедия (<http://ru.wikipedia.org>)
2. Encyclopedia of Laser Physics and Technology (<http://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>)

Материально-техническое обеспечение

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

Для лекционной части курса требуются аудитория, оборудованная мультимедийным проектором, управляющим компьютером, экраном и обычной учебной доской.