

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Саровский физико-технический институт -
филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего
образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(СарФТИ НИЯУ МИФИ)

УТВЕРЖДАЮ
Декан физико-технического
факультета СарФТИ НИЯУ
МИФИ

_____ А.К.Чернышев
«...» _____ 2023 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Основы лазерной техники

(наименование дисциплины)

Направление подготовки (специальность) 03.03.01 Прикладные математика и физика

Профиль подготовки Фундаментальная и прикладная физика

Квалификация (степень) выпускника _____ бакалавр

Форма обучения _____ очная

Автор _____ д.ф.-м.н. С.П. Мельников

Рецензент _____ д.ф.-м.н. С.Н. Абрамович

Зав. кафедрой ЯРФ _____ д.ф.-м.н. Н.В. Завьялов

Руководитель ОПП _____ д.ф.-м.н. Н.В. Завьялов

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО и ОС НИЯУ
МИФИ (актуализирован Ученым советом университета, Протокол №21/11 от
28.07.2023 г)

Программа актуализирована на заседании кафедры
Ядерной и радиационной физики
от 30.08.23 протокол №1
и радиационной физики

г. Саров, 2023 г.

1. Цели и задачи освоения учебной дисциплины

Цель изучения дисциплины – дать студентам необходимый минимум сведений по квантовой электронике, а именно: физические основы квантовой электроники, методы создания активной лазерной среды, основы теории оптических резонаторов, свойства некоторых лазеров (включая лазеры, возбуждаемые ионизирующими излучениями), применение лазеров и тенденции их развития.

Задачи дисциплины:

- дать представление о месте и роли квантовой электроники в современной науке и технике;
- дать знания об истории возникновения квантовой электроники как раздела физики;
- ознакомить с основными характеристиками наиболее известных лазеров;
- сообщить сведения о процессах, приводящих к образованию инверсной населенности уровней в различных лазерных средах;
- ознакомить с важнейшими проблемами квантовой электроники;
- стимулировать развитие способности к самостоятельному поиску и обработке научной информации.

В итоге изучения курса студент должен освоить основной фактический материал, научиться работать с научной периодикой, овладеть техникой представления результатов в виде доклада, научно-технического отчёта, статьи в научное издание.

2. Место учебной дисциплины в структуре ООП

Курс предназначен для студентов 3 курса (6 семестр обучения). Для успешного освоения дисциплины необходимы знания по курсам общей физики и курсу высшей математики.

Знания, полученные при изучении курса, необходимы для многих специализированных дисциплин по теоретической и экспериментальной физике, изучаемых студентами старших курсов.

3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

Курс направлен на формирование следующих **профессиональных и профильных профессиональных компетенций** бакалавра по направлению 03.03.01 Прикладные математика и физика:

ПК-1- способен проводить сбор, анализ научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по тематике исследования;

ПК-2 - способен выбирать и применять необходимое оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области

ПК-4 - способен критически оценивать применяемые методики и методы исследования;

ПК-8.1- способен самостоятельно и в составе группы проводить научные исследования в области ядерной и радиационной физики с применением экспериментальных методов, методов имитационного моделирования, статистических методов обработки экспериментальных данных, методов компьютерного моделирования процессов и объектов

ПК-8.2 - способен к участию в проведении измерений, выполнении экспериментов на ядерно- и электрофизических установках – источниках излучения, высоковольтном и измерительном оборудовании

Студент должен:

Знать:

З-ПК-1 Знать способы сбора, анализа научно- технической информации, отечественного и зарубежного опыта по тематике исследования.

З-ПК-2 Знать современное оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области.

З-ПК-4 Знать основные методики и методы исследования в сфере своей профессиональной деятельности

З-ПК-8.1 знать нормы и правила ядерной и радиационной безопасности

З-ПК-8.2 знать порядок проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ

Уметь:

У-ПК-1 Уметь синтезировать и анализировать научно-техническую информацию по тематике исследования.

У-ПК-2 Уметь критически оценивать, выбирать оборудования, инструментов и методов исследований в избранной предметной области

У-ПК-4 Уметь анализировать и критически оценивать применяемые методики и методы исследования.

У-ПК-8.1 уметь проводить расчетные исследования на сертифицированных кодах в рамках поставленной задачи, оценивать погрешность результатов измерений

У-ПК-8.2 уметь создавать математические модели процессов, протекающих в экспериментальных стендах и установках

Владеть:

В-ПК-1 Владеть навыками сбора, синтеза и анализа научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по тематике исследования.

В-ПК-2 Владеть навыками выбора и применения оборудования, инструменты и методы исследований для решения в задач избранной предметной области

В-ПК-4 Владеть навыками выбора и критической оценки применяемых методик и методов исследования в сфере своей профессиональной деятельности

В-ПК-8.1 владеть навыками проведения экспериментов на установках и стендах, сопоставления расчетных и экспериментальных данных

В-ПК-8.2 владеть навыками обработки результатов исследований

В результате изучения курса студенты будут иметь современные представления о свойствах усиливающей среды и основах теории резонаторов, методах создания инверсной населенности и характеристиках таких известных лазеров, как гелий-неоновый лазер, СО₂-лазер, химических и газодинамические лазерах, лазерах с ядерной накачкой, а также о наиболее важных применениях лазеров. Усвоенные знания позволят студентам применять их на практике в научных исследованиях.

4. Структура и содержание учебной дисциплины

«Основы лазерной техники»

4.1. Структура учебной дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 144 а.ч., из них 16 часов – лекции, 32 часа – практические занятия, включая обучение в интерактивной форме – 8 часов, 60 часов– самостоятельная работа студентов.

Раздел учебной дисциплины	Недели	Виды учебной деятельности			Текущий контроль успеваемости	Балл за раздел
		Лекции Нед. (час)	Практика Нед. (час)	Самост. Нед. (час)		
1. Основы физики лазеров					Обсуждение вопросов, тем, ответы на контрольные вопросы	15
1.1 Законы теплового излучения. Основные понятия квантовой электроники	1	1(2)	1(2)	1(2)		

1.2 Индуцированное излучение, коэффициенты Эйнштейна, ширина линии излучения	2		2(2)	2(2)			
1.3 Принципы работы квантовых усилителей и генераторов. Поглощение и усиление в активной среде	3	3(2)	3(2)	3(4)	Контрольная работа №1		
1.4 Усиление и генерация лазерного излучения	4		4(2)	4(2)			
1.5 Способы накачки лазеров	5	5(2)	5(2)	5(3)			
1.6 Открытые резонаторы (часть 1)	6		6(2)	6(4)	Контрольная работа №2		15
1.6 Открытые резонаторы (часть 2)	7	7(2)	7(2)	7(3)			
1.7 Режимы работы лазеров. Управление характеристиками лазерного излучения	8		8(2)	8(3)			
2. Основные типы лазеров и их применение					Обсуждение вопросов, тем, ответы на контрольные вопросы, участие в дискуссии		
2.1 Газовые лазеры низкого давления	9	9(2)	9(2)	9(3)			
2.2 Молекулярные CO ₂ -лазеры: механизм генерации; характеристики при накачке в тлеющем разряде низкого давления	10		10(2)	10(4)	Дискуссия		
2.3 Импульсные CO ₂ -лазеры высокого давления. СО-лазеры. Газодинамические лазеры	11	11(2)	11(2)	11(4)	Дискуссия		
2.4 Химические лазеры	12		12(2)	12(4)	Дискуссия		
2.5 Йодные лазеры. Эксимерные лазеры	13	13(2)	13(2)	13(4)			
2.6 Лазеры с ядерной накачкой (часть 1)	14		14(2)	14(3)			
2.7 Лазеры с ядерной накачкой (часть 2)							
2.8 Лазеры с ядерной накачкой (часть 3)							

2.9 Применение лазеров в науке 2.10 Твердотельные лазеры 2.11 Применение лазеров в технологии 2.12 Жидкостные лазеры. Полупроводниковые лазеры 2.13 Проблемы лазерного термоядерного синтеза	15	15(2)	15(2)	15(4)	Дискуссия		
Проверка СРС	16		16(2)	16(6)	Итоговый тест		
Работа в семестре:							
Контрольные работы	3,6						30
СРС	16						5
Итоговое тестирование	16						10
Участие в дискуссии	10, 11, 12, 15						5
Экзамен				5			50
Итоги за семестр		16	32	60			100

4.2. Содержание разделов учебной дисциплины

Часть I. Основы физики лазеров.

Тема 1. Основные понятия квантовой электроники.

Квантовая электроника – область физики, изучающая методы усиления и генерации электромагнитного излучения путем использования эффекта индуцированного испускания излучения в термодинамически неравновесных системах, свойства получаемых таким образом усилителей и генераторов и их применения.

Понятие об индуцированном излучении было введено в физику А.Эйнштейном в 1916 году, он же предсказал когерентность такого излучения, которая была позже (1929 год) строго обоснована Дираком в созданной им квантовой теории излучения. В 1939 году советский физик В.А.Фабрикант, изучавший отрицательное поглощение в газах, указал на возможность усиления света за счет индуцированного излучения как на способ обнаружения этого излучения. Несмотря на важность сделанных в этих работах выводов, они, к сожалению, остались практически не замеченными и не оказали существенного влияния на создание лазеров. Это же относится и к поданной В.А.Фабрикантом с сотрудниками в 1951 году заявке на изобретение "нового способа усиления электромагнитного излучения УФ, видимого, ИК и радиодиапазонов", которая была опубликована только в 1959 году, уже после создания мазеров и публикаций другими учеными предложений о создании лазеров.

Первый квантовый генератор, работающий на переходе молекулы аммиака с длиной волны 1,25 см, был создан в 1954 году Н.Г. Басовым и А.М. Прохоровым в Физическом институте им. П.Н.Лебедева АН СССР и группой под руководством Ч.Таунса в Колумбийском университете (США). Первые лазеры (газовый лазер на смеси He-Ne и твердотельный рубиновый лазер) были созданы в 1960-1961 г.г. Т. Мейманом и А.Джаваном (США).

Во ВНИИЭФ начиная с середины 60-х годов были выполнены исследования лазеров с ядерной накачкой, фотодиссоционных лазеров, химических лазеров и ряда других.

Тема 2. Коэффициенты Эйнштейна. Ширина линии излучения.

В квантовых системах, обладающих дискретными уровнями энергии, существуют три типа переходов между энергетическими состояниями: 1) переходы, индуцированные электромагнитным полем; 2) спонтанные переходы; 3) безызлучательные релаксационные переходы. Важным свойством индуцированного излучения является то, что рожденные по этому механизму кванты идентичны тем, что индуцировали излучение, в частности, они распространяются в том же направлении и имеют то же состояние поляризации. Из общих термодинамических принципов можно получить соотношения между вероятностями индуцированных и спонтанных переходов (коэффициенты Эйнштейна).

Линии излучения и поглощения линейчатого спектра имеют конечную ширину. Имея в виду этот факт, говорят об уширении линий дискретных переходов. Чтобы учесть уширение, вводят коэффициенты Эйнштейна, зависящие от частоты. Существует ряд факторов, приводящих к уширению энергетических уровней: радиационное или спонтанное излучение (естественная ширина линии), безызлучательные релаксационные переходы (однородное уширение, лоренцева форма линии), хаотическое движение атомов (неоднородное уширение, доплеровская форма линии).

Тема 3. Принципы работы квантовых усилителей и генераторов. Поглощение и усиление в активной среде.

Системы квантовых частиц, в которых хотя бы для двух уровней энергии верхний уровень населен сильнее нижнего уровня, называются системами с инверсией населенностей. Такие системы способны усиливать излучение.

Для создания инверсии населенностей необходимо дополнительное внешнее воздействие для вывода системы из равновесного состояния. Вне зависимости от конкретного механизма образования инверсии это внешнее воздействие должно преодолевать процессы, которые восстанавливают равновесие, и, следовательно, сопровождаться затратами энергии от источника накачки.

Для плоской световой волны, распространяющейся в направлении z , интенсивность излучения изменяется по закону: $dI_\nu/I_\nu = -k_\nu \cdot dz$ (закон Бугера-Ламберта-Бера в дифференциальной форме, k_ν – коэффициент поглощения). Если $k_\nu < 0$ (среда с инверсией населенностей), световое излучение будет усиливаться, а $\alpha_\nu = -k_\nu$ называется коэффициентом усиления.

При высокой интенсивности излучения I_ν происходит уменьшение α_ν . Этот эффект который называется эффектом насыщения, играет важную роль в квантовой электронике. Насыщение снижает коэффициент усиления сред с инверсией населенностей, что часто является нежелательным. Иногда этот эффект может быть полезным. Например, при отсутствии инверсии населенностей, когда среда является поглощающей, может происходить уменьшение коэффициента поглощения и просветление среды.

Тема 4. Усиление и генерация лазерного излучения.

В данной лекции рассмотрена работа лазерных усилителей и генераторов.

В первом случае используется маломощный источник, излучение которого пропускается через усиливающую среду с инверсией населенностей. На выходе из усилителя интенсивность излучения увеличивается. По такой схеме работают, например, известные мощные импульсные установки, предназначенные для исследований в области лазерного термоядерного синтеза. Для определения интенсивности излучения на выходе усилителя можно решить уравнение переноса излучения в усиливающей среде. Интенсивность выходного излучения зависит от трех наиболее важных параметров среды – коэффициентов усиления α_ν , нерезонансных потерь β_ν и параметра насыщения I_s .

Для осуществления генераторного режима работы лазера необходимо организовать обратную связь. В лазерной технике это достигается тем, что усиливающая среда помещается в открытый оптический резонатор, который в простейшем случае состоит из двух зеркал. В резонаторе лазера усиливаемое излучение распространяется в активной

среде между зеркалами в виде нарастающих бегущих волн. Из уравнения переноса для бегущих волн можно определить мощность лазерного излучения на выходе из резонатора. Мощность лазерного излучения в генераторном режиме зависит не только от α_v , β_v , I_s , но и от коэффициентов отражения (пропускания) зеркал резонатора.

Тема 5. Способы накачки лазеров.

Процесс создания инверсной населенности уровней называется накачкой активной или лазерной среды. Все методы накачки нацелены на эффективное заселение определенных возбужденных состояний или, как говорят, на селективное заселение верхних лазерных уровней. Из основных способов накачки можно выделить следующие:

1. Оптическая накачка, которая используется в основном для возбуждения лазеров на конденсированных средах (трех- и четырехуровневые схемы накачки).
2. Фотодиссоционная накачка (разновидность оптической накачки) используется для молекулярных газовых сред, которые диссоциируют при поглощении светового излучения накачки. Среди продуктов диссоциации по крайней мере один атом может оказаться в возбужденном состоянии. Наиболее известные фотодиссоционные лазеры, активные среды которых содержат молекулярные соединения C_3F_7I или CF_3I , работают на переходах атома йода с длиной волны излучения $\lambda = 1,315$ мкм.
3. Газовый разряд – один из наиболее распространенных методов накачки газовых лазеров как низкого (≤ 50 мм рт. ст.), так и высокого (~ 1 атм) давления. Применение газового разряда позволило получить генерацию более чем на 6000 переходах атомов, ионов, молекул при использовании примерно 130 различных элементов и молекулярных соединений в диапазоне длин волн 0,115–337 мкм.
4. Химическая накачка используется для создания инверсной населенности уровней в химических лазерах. Инверсная населенность возникает непосредственно в процессе химических реакций между компонентами активной среды. Излучение химического лазера есть результат прямого преобразования химической энергии в лазерное излучение. Для инициирования химических реакций чаще всего используются различные типы газовых разрядов и пучки быстрых электронов. Наиболее известными являются химические лазеры на колебательно-вращательных переходах молекулы HF ($\lambda = 2,6$ –3,3 мкм).
5. Газодинамическая накачка, в основе которой лежит быстрое охлаждение предварительно нагретой до температур 1000–2000 К газовой смеси. В качестве лазерных сред используются молекулярные газы, чаще всего лазерные смеси на основе CO_2 ($\lambda = 10,6$ мкм).
6. Накачка лазеров ионизирующими излучениями с использованием пучков быстрых электронов и ионов, ядерных реакторов, ядерных взрывных устройств, радиоактивных изотопов.

Темы 6-7. Открытые оптические резонаторы.

Важнейшим элементом лазерных устройств является резонатор, при использовании которого за счет многократного отражения достигается наиболее полное взаимодействие электромагнитного излучения с активной средой. Обеспечивая положительную обратную связь, резонатор существенно влияет на свойства лазерного излучения и определяет, в частности, его диаграмму направленности и спектральный состав.

В оптическом диапазоне спектра используют открытые резонаторы, у которых отражающие стенки не замкнуты. В простейшем случае резонатор состоит из двух зеркал. Для вывода излучения наружу одно из зеркал должно быть полупрозрачным. Это определяет необходимые полезные потери резонатора, которые называются потерями на излучение. Часто для характеристики потерь энергии в резонаторе вводят понятие добротности. Кроме полезных потерь на излучение в реальном резонаторе существуют дополнительные потери (дифракционные потери, потери в активном веществе, потери из-за разбюстировки зеркал резонатора).

Резонатор формирует определенные состояния поля излучения, которые называются модами или типами колебаний. Отдельная мода обозначается как TEM_{mnq} , где m и n – поперечные индексы моды, а q – продольный индекс. Каждая мода характеризуется определенной пространственной структурой поля (распределением амплитуды и фазы) в поперечном к оси резонатора направлении. Продольными или аксиальными модами в резонаторе называются моды с разными значениями индекса q . Совокупность продольных мод с данным сочетанием индексов m и n объединяют под названием поперечной или неаксиальной моды.

Наибольшее распространение в лазерной технике получили оптические резонаторы, образованные двумя сферическими или одним сферическим и одним плоским зеркалами. Из резонаторов со сферическими зеркалами можно выделить следующие типы: конфокальный, полуконфокальный, концентрический, полуконцентрический.

Свойства резонаторов зависят от знака и величины радиуса их кривизны и расстояния между ними. Именно эти параметры определяют устойчивость существования в резонаторе электромагнитной волны. В устойчивом резонаторе распределение электромагнитного поля воспроизводится идентично при многократных проходах излучения между зеркалами. В приближении геометрической оптики это означает, что излучение не выходит за пределы зеркал в поперечном направлении. В неустойчивом резонаторе световые пучки в результате последовательных отражений от зеркал перемещаются в поперечном относительно оси резонатора направлении и покидают его. Для резонатора с произвольными значениями радиусов кривизны R_1 , R_2 и расстояния между ними L условие устойчивости имеет вид: $0 \leq g_1 \cdot g_2 \leq 1$, где $g_1 = 1 - L/R_1$, $g_2 = 1 - L/R_2$.

В лазерах повышенной мощности с высокими коэффициентами усиления часто используют неустойчивые резонаторы, для которых выполняются условия $g_1 \cdot g_2 \leq 0$, $g_1 \cdot g_2 \geq 1$. Из-за высоких дифракционных потерь излучения (особенно для мод с большими значениями m и n) в неустойчивых резонаторах происходит эффективное выделение основной моды, что позволяет получить высокую направленность лазерного излучения.

Тема 8. Режимы работы лазеров. Управление характеристиками лазерного излучения.

Режимы работы лазеров, которые осуществляются на практике, бывают стационарными или нестационарными, т.е. постоянными или изменяющимися во времени. Стационарные условия выполняются в том случае, когда процессы накачки лазерной среды и генерации продолжаются в течение времени τ_n заметно превышает характерные времена τ_p процессов релаксации энергии в лазерной среде. Таким образом, для непрерывных лазеров $\tau_p \ll \tau_n$. Режим работы считается нестационарным, если $\tau_p \gg \tau_n$.

В качестве примера нестационарных режимов работы можно привести режимы регулярных и нерегулярных пичков в твердотельных лазерах (рубин, неодимовое стекло), а также режим модулированной добротности, возникающий при модуляции добротности резонатора. Из основных способов модуляции добротности можно отметить использование оптико-механических, электрооптических и акустооптических модуляторов. Эти способы модуляции добротности называются активными. Существует также пассивный способ модуляции добротности, при использовании которого потери в резонаторе регулируются автоматически. В этом случае используются нелинейные просветляющиеся фильтры (например, красители), коэффициент пропускания которых зависит от мощности излучения. В режиме модулированной добротности мощность лазерного излучения может быть очень высокой – до 1 ГВт при длительности импульса ~ 10 нс.

Для получения мощных коротких импульсов лазерного излучения можно также использовать метод синхронизации мод. При использовании метода синхронизации мод (точнее синхронизации фаз продольных мод лазера) получены очень короткие импульсы длительностью до 10^{-12} с и пиковой мощностью до 10^{12} Вт.

Для изменения временных и спектральных характеристик лазеров в их конструкцию вносят изменения, чтобы получить излучение с заданными конкретными свойствами. Для

улучшения частотного (модового) состава лазерного излучения используют методы селекции мод, которые основаны на увеличении потерь энергии в резонаторе для нежелательных мод при сохранении высокой добротности резонатора для требуемой моды. Различают методы угловой и частотной селекции, называемые также селекцией поперечных и продольных мод соответственно.

Часть II. Основные типы лазеров и их применение.

Тема 9. Газовые лазеры низкого давления.

В газовых лазерах в качестве активных сред могут использоваться разнообразные переходы между электронными, колебательными и вращательными уровнями энергии нейтральных или ионизованных атомов и молекул. Поэтому газовые лазеры излучают более чем на 6000 различных переходах в очень широком диапазоне спектра от ультрафиолетовой до субмиллиметровой области.

Наиболее широкое распространение получили газоразрядные лазеры, которые в свою очередь подразделяют на три группы: атомарные, ионные и молекулярные. Газовый разряд, как правило, создается непосредственно в самой активной среде. Используют различные виды газовых разрядов: самостоятельный и несамостоятельный, импульсный и стационарный, дуговой и тлеющий, высокочастотный разряд и разряд постоянного тока.

Для накачки газоразрядных лазеров низкого давления (≤ 10 мм рт. ст.) используют два типа стационарных разрядов: тлеющий (лазеры на атомных переходах и молекулярные лазеры) и дуговой (ионные лазеры). Тлеющий разряд – слаботочный (плотность тока $\leq 0,1$ А/см²) низкотемпературный разряд с относительно низкой степенью ионизации ($\leq 10^{-4}$), дуговой разряд – сильноточный (плотность тока до 1000 А/см²) высокотемпературный разряд с высокой степенью ионизации ($> 10^{-2}$).

Из многочисленных газовых лазеров низкого давления, возбуждаемых стационарным тлеющим разрядом, в этой лекции подробно рассмотрены характеристики лазеров на смесях He-Ne ($\lambda = 0,63; 1,15$ и $3,39$ мкм) и He-Cd ($\lambda = 325,0$ и $441,6$ нм), а из лазеров, возбуждаемых дуговым разрядом – ионный аргоновый лазер (8 линий в диапазоне 455-515 нм). Наиболее мощным из них является аргоновый ионный лазер, для которого мощность излучения достигала 100 Вт при КПД до 0,1 %.

Из газоразрядных лазеров представляют интерес так называемые лазеры на самоограниченных переходах, у которых верхним лазерным уровнем является первое резонансное состояние, а нижним – метастабильное состояние. Эффективность возбуждения резонансного уровня может быть очень высокой. Так, в разряде на парах ртути на возбуждение резонансного уровня расходуется около 60 % энергии, вводимой в разряд. Такие лазеры могут работать только в импульсном режиме, так как нижнее состояние является долгоживущим и инверсия населенностей может поддерживаться лишь короткое время до тех пор, пока населенности верхнего и нижнего уровней не выравниваются.

В настоящее время получена генерация примерно на 40 самоограниченных переходах атомов и ионов металлов Pb, Mn, Cu, Ba, Sr, Au, Ca, Yb, Bi, Fe, Tl в диапазоне спектра 310-650 нм. В качестве активных сред таких лазеров используют смеси буферного газа (гелий, неон или аргон) при давлениях 10-50 мм рт. ст. и пары металлов с парциальными давлениями 0,3-3 мм рт. ст. Для получения необходимой концентрации паров металлов газоразрядные трубки нагреваются в трубчатых печах или используются специальные саморазогревные разрядные трубки.

Наиболее известным представителем семейства лазеров на самоограниченных переходах является лазер на парах меди ($\lambda = 511$ и 578 нм), для которого получены максимальные энергетические параметры. При работе в импульсно-периодическом режиме с частотой повторения импульсов 235 кГц средняя мощность лазерного излучения составляет 100 Вт при довольно высоком КПД около 1 %.

Генерация в импульсном режиме на самоограниченных переходах получена также на электронных переходах молекул N₂ ($\lambda = 320-8200$ нм), H₂ ($\lambda = 110-160; 830-1600$ нм), CO ($\lambda = 450-660$ нм), NO ($\lambda = 1022$ нм), причем для накачки N₂- и H₂-лазеров низкого

давления (10-40 мм рт. ст.) использовался не только газовый разряд, но и пучки быстрых электронов.

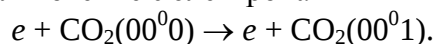
Тема 10. Молекулярные CO₂-лазеры: механизм генерации; характеристики при накачке в тлеющем разряде низкого давления.

Молекулярные CO₂-лазеры, излучающие на колебательно-вращательных переходах основного электронного состояния молекулы CO₂, занимают особое место в лазерной физике и технике благодаря высоким энергетическим параметрам, возможности реализации различных режимов работы, а также возможности использования для их накачки разных способов возбуждения (газоразрядный, газодинамический, химический).

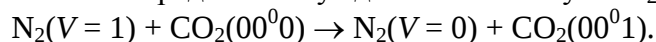
Молекула CO₂ представляет собой линейную симметричную молекулу, которая имеет три типа нормальных колебаний: симметричное валентное, деформационное и несимметричное валентное. Лазерный переход с наиболее интенсивной длиной волны излучения 10,6 мкм происходит между колебательными уровнями 00⁰1 и 10⁰0. В качестве активной среды при накачке в газовом разряде используется, как правило, смесь He-N₂-CO₂.

Эффективное заселение верхнего лазерного уровня 00⁰1 осуществляется благодаря следующим трем процессам:

1. Столкновение с электронами

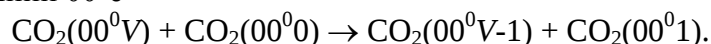


2. Резонансная передача возбуждения от молекулы N₂



Молекулы N₂ эффективно возбуждаются: в тлеющем разряде от 40 до 80 % молекул азота возбуждены.

3. Столкновение молекул CO₂ в состояниях 00⁰V (V ≥ 2) с молекулами CO₂ в основном состоянии 00⁰0



Механизм генерации CO₂-лазеров выглядит следующим образом. Электроны плазмы тлеющего разряда возбуждают, в основном, молекулы азота, которые передают энергию возбуждения верхнему лазерному уровню 00⁰1, имеющему большое время жизни. Нижний лазерный уровень 10⁰0 расселяется (разрушается) за счет столкновений с атомами гелия.

В CO₂-лазере генерация может происходить не только на *P*- и *R*-ветвях колебательной полосы 00⁰1-10⁰0 (λ ≈ 10,3 и 10,6 мкм), но и на переходах полосы 00⁰1-02⁰0 (*P*- ветвь – λ = 9,6 мкм; *R*-ветвь – λ = 9,3 мкм). При использовании перестраиваемого селективного резонатора можно получить лазерное излучение практически на любой из линий *P*- и *R*-ветвей полос 00⁰1-10⁰0 и 00⁰1-02⁰0.

Конструкции газоразрядных CO₂-лазеров низкого давления могут быть весьма разнообразными: 1) лазеры с продольным относительно оси резонатора возбуждением и продольной прокачкой газа; 2) лазеры с поперечной относительно оси резонатора прокачкой газа; 3) волноводные лазеры. Для таких лазеров получены высокие энергетические параметры – мощность лазерного излучения в непрерывном режиме достигала 10-20 кВт при КПД до 20 %.

Тема 11. Импульсные CO₂-лазеры высокого давления. СО-лазеры. Газодинамические лазеры.

Импульсные CO₂-лазеры. Для повышения энергетических параметров CO₂-лазера необходимо увеличить давление активной среды до атмосферного и выше, что приведет к увеличению плотности излучающих частиц и удельного энергосъема. Однако при увеличении давления необходимо преодолеть проблемы, связанные с необходимостью однородного возбуждения активной среды при высоких напряжениях разряда, что требуют изменения конструкции лазера и способа его возбуждения. Для преодоления этих проблем используются в основном два типа импульсного газового разряда: 1) самостоятельный разряд при сравнительно слабой предварительной ионизацией газа; 2)

несамостоятельный разряд с предварительной ионизацией газа от внешнего источника (электронные пучки, продукты ядерных реакций).

Развитие техники лазеров с самостоятельным разрядом высокого давления позволило решить проблему зажигания таких разрядов в объемах, составляющих сотни литров, при размерах разрядных промежутков в десятки сантиметров и длительностях объемной стадии горения до 1 мкс. На основе эти разработок созданы импульсные CO_2 -лазеры с энергией излучения до 10 кДж при довольно высоком КПД около 10 %. Близкие значения энергетических параметров получены также при использовании для накачки лазеров самостоятельных разрядов с предварительной ионизацией газовой среды электронными пучками.

СО-лазеры. Лазеры на колебательно-вращательных переходах молекулы СО ($\lambda = 5,0\text{--}6,5$ мкм) во многом подобны CO_2 -лазерам. Они также обладают высокими энергетическими параметрами и способностью работать в различных режимах.

Механизмы колебательного возбуждения молекул СО подобны механизмам возбуждения молекул CO_2 – это непосредственное возбуждение колебательных состояний молекулы СО электронным ударом или передача энергии от возбужденных молекул N_2 . Особенностью СО-лазеров является отсутствие инверсии населенностей между верхними и нижними колебательными уровнями. Генерация в этом случае происходит в результате частичной инверсии между вращательными уровнями принадлежащими двум соседним колебательным уровням.

В настоящее время мощность излучения СО-лазеров в непрерывном режиме в зависимости от способа возбуждения и конструкции варьируется от нескольких ватт до десятков киловатт, а КПД генерации даже выше, чем в случае CO_2 -лазеров, и достигает 50 %.

Газодинамические лазеры. В газодинамических лазерах (ГДЛ) в качестве активных сред используются смеси на основе молекулярных газов СО и CO_2 , излучающие на тех же переходах этих молекул, как и в случае газоразрядного возбуждения. В этих лазерах источником накачки служит тепловая энергия молекулярного газа, равновесно нагретого до высокой температуры.

Принцип работы ГДЛ можно объяснить на примере ГДЛ на основе CO_2 . Газовая смесь, находящаяся в резервуаре при температуре ~ 1500 К и высоком давлении (более 10 атм), выпускается через специальные сверхзвуковые сопла. В высокотемпературном резервуаре газ находится в термодинамическом равновесии, причем около 10 % молекул CO_2 находятся в верхнем лазерном состоянии 00^0_1 , а 25 % – в нижнем состоянии 10^0_0 . Проходя через сопла со сверхзвуковой скоростью, газ быстро расширяется, и его температура резко снижается. Населенности уровней будут стремиться к новым равновесным значениям. Поскольку время жизни верхнего уровня больше времени жизни нижнего, то нижний уровень достигает состояния равновесия раньше, чем верхний, и в направлении по потоку от зоны расширения будет существовать довольно широкая область с инверсией населенностей.

Основным достоинством ГДЛ является их высокая мощность (на уровне 1 МВт) при длительностях работы от нескольких миллисекунд до сотен секунд. ГДЛ на основе CO_2 (наряду с химическими лазерами) являются самыми мощными среди непрерывных лазеров.

Тема 12. Химические лазеры.

В химическом лазере инверсия населенностей на переходах активных частиц создается либо непосредственно в результате химической реакции, либо после обмена энергией между первоначально возбужденной частицей, образующейся за счет химической реакции, и другой (лазерной) частицей. Одним из достоинств химических лазеров (наряду с высокой мощностью излучения некоторых из них) является богатый спектр лазерных длин волн – от 1,3 до 26 мкм.

Практический интерес к химическим лазерам связан с тем, что в процессе некоторых экзотермических реакций выделяется значительная энергия на единицу массы

прореагировавшего вещества. При этом до 70 % от выделившейся энергии (например, в реакции $F + H_2 \rightarrow HF^* + H$) расходуется на колебательное возбуждение молекул. Поэтому именно переходы между колебательными уровнями молекул используются в большинстве химических лазеров. В химических лазерах (как и в СО-лазерах) в результате релаксационных процессов возникает частичная инверсия населенностей.

Химические реакции, которые используются для образования колебательно-возбужденных молекул, можно разделить на два типа – цепные и нецепные. При этом имеется в виду цепной процесс, эффективный с точки зрения генерации, т.е. процесс для которого лазерная длина цепи больше единицы. Из активных сред химических лазеров на основе нецепных процессов можно отметить смесь H_2-Cl_2 (молекула HCl^* ; $\lambda = 3,5-3,9$ мкм), а также смеси H_2-RF_n , где RF_n – фторсодержащее вещество (молекула HF^* ; $\lambda = 2,7-3,0$ мкм). В качестве примера лазерной среды с цепной химической реакцией можно привести смесь H_2-F_2 .

Химические лазеры могут работать как в импульсном, так и в непрерывном режимах. Для работы непрерывных химических лазеров необходимо организовать слияние и быструю смену потоков реагентов в активном лазерном объеме.

Для инициирования химических лазеров используются различные процессы, приводящие к разрушению стабильных молекул и образованию свободных радикалов. Основными способами инициирования являются:

1. Фотоиницирование – образование свободных радикалов в результате фотодиссоциации молекул, облучаемых УФ излучением: $AB + h\nu \rightarrow A + B$.
2. Электронный пучок – при прохождении через газ быстрых электронов происходит диссоциация молекул и образование свободных радикалов, например, $F_2 + e \rightarrow F^+ + F^-$ (диссоциативное прилипание).
3. Газовый разряд – механизм диссоциации примерно такой же, как для приведенных выше способов инициирования. Особенность горения газового разряда в химических лазерах связана с наличием в них электроотрицательных частиц (атомов, молекул и радикалов), что приводит к снижению концентрации электронов и ограничению давления газовой смеси.
4. Термоиницирование – термическая диссоциация исходных молекул. Из фторсодержащих молекул наиболее слабосвязанной молекулой является молекула F_2 (энергия связи 1,4 эВ).
5. Химическое иницирование – образование атомов или свободных радикалов происходит в результате химической реакции, например, $F_2 + NO \rightarrow NOF + F$. Такой способ накачки применяется в химических лазерах с передачей возбуждения $DF^* + CO_2 \rightarrow CO_2^* + DF$.

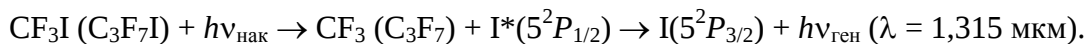
В настоящее время разработано большое количество химических лазеров с различными параметрами. Из импульсных химических лазеров максимальными энергетическими параметрами обладает, по-видимому, HF-лазер на смеси SF_6-H_2 , иницируемый гамма-излучением ядерного взрыва (ВНИИЭФ): энергия лазерного импульса длительностью 10 нс составляла 70 кДж при внешнем КПД около 5 %. В случае непрерывных химических лазеров максимальные энергетические характеристики зарегистрированы для сверхзвуковых HF(DF)-лазеров с нагревом теплоносителя в дуговом разряде: мощность излучения 15 кВт при внешнем КПД 3% и химическом КПД около 10 %.

Тема 13. Йодные лазеры. Эксимерные лазеры.

Йодные лазеры. Йодный лазер излучает на переходах между подуровнями тонкой структуры основного состояния атома йода $5^2P_{1/2}$ и $5^2P_{3/2}$ ($\lambda = 1,315$ мкм). Для создания инверсной населенности между этими состояниями используют три метода возбуждения: 1) оптическая накачка или фотодиссоционный метод; 2) химическая накачка (кислород-йодный лазер); 3) газоразрядный метод. Наибольшее распространение получили первых два метода, причем в результате применения этих методов созданы йодные лазеры,

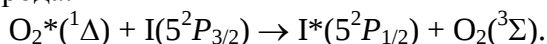
которые по своим энергетическим характеристикам конкурируют с другими наиболее мощными лазерами.

В случае фотодиссоционной накачки заселение верхнего лазерного уровня $5^2P_{1/2}$ и генерация происходят при облучении перфторалкилйодидов (CF_3I или C_3F_7I) мощными УФ источниками света:

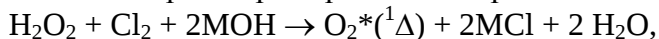


В качестве источников УФ излучения используются импульсные лампы накачки или открытые разряды непосредственно в активной среде. Одним из самых мощных йодных лазеров является установка «Искра-5», разработанная во ВНИИЭФ для исследований в области лазерного термоядерного синтеза: мощность лазерного излучения $5 \cdot 10^{13}$ Вт при длительности лазерного импульса $3 \cdot 10^{-10}$ с.

Другим направлением в создании мощных йодных лазеров является использование для образования атомов $I^*(5^2P_{1/2})$ реакции передачи энергии от возбужденных молекул кислорода:



Возбужденные молекулы $O_2^*(^1\Delta)$ образуются в результате химической реакции хлорирования щелочного раствора перекиси водорода:



где М – атом щелочного металла К, Na или Li. На основе этого метода накачки созданы непрерывные кислород-йодные лазеры с мощностью излучения ~ 10 кВт. Один из технологических кислород-йодных лазеров с мощностью излучения 1 кВт, разработанный фирмой «Кавасаки» (Япония), используется для резки, сверления и сварки деталей сложной формы.

Эксимерные лазеры. Эксимерные лазеры работают на переходах между двумя электронными уровнями молекулы, нижний из которых является «отталкивательным» или «разлетным» и составлен обычно из атомов в основном состоянии. Термин «эксимер» является сокращением английского выражения *excited dimer* (возбужденный димер). Эксимерные молекулы существуют только в возбужденном состоянии и диссоциируют при радиационном переходе в основное «разлетное» состояние. К настоящему времени получена генерация на переходах примерно двадцати эксимерных молекул в диапазоне от 126 нм (молекула Ar_2^*) до 1100 нм (молекула $LiHe^*$).

Наиболее известными являются эксимерные лазеры на молекулах галогенидов инертных газов $KrCl$ ($\lambda = 223$ нм), KrF ($\lambda = 248$ нм), $XeCl$ ($\lambda = 308$ нм), XeF ($\lambda = 351$ и 483 нм). Активной средой эксимерных лазеров на галогенидах инертных газов RX^* (X – атом галогена) являются тройные смеси $R'-R-XY$ (R' – буферный инертный газ He, Ne или Ar; XY – галогеносодержащее вещество) при полном давлении 1-10 атм и соотношениях компонент $(10^3-10^2):(10^2-10):1$. Образование эксимерных молекул RX^* происходит за счет следующих реакций:

- 1) гарпунная реакция $R^* + XY \rightarrow RX^* + Y$;
- 2) ион-ионная рекомбинация $R^+ + X^- + R' \rightarrow RX^* + R$, $R_2^+ + X^- \rightarrow RX^* + R$.

Возбуждение эксимерных лазеров требует высоких удельных мощностей накачки ($\geq 0,1$ МВт/см³), поэтому для этих целей используются в основном импульсные наносекундные электронные пучки или газовый разряд. Для эксимерных KrF - и XeF -лазеров получены довольно высокие энергетические параметры в УФ области спектра: при накачке электронными пучками энергия лазерного излучения составляла 5-10 кДж при КПД до 10 % и длительности лазерного импульса ≤ 1 мкс.

Темы 14-16. Лазеры с ядерной накачкой.

Обсуждение проблемы прямого преобразования ядерной энергии в лазерное излучение началось в начале 60-х годов прошлого века сразу же после создания первых лазеров. В настоящее время в России исследования по проблемам лазеров с ядерной накачкой (ЛЯН) проводятся в основном во ВНИИЭФ (Саров), ВНИИТФ (Снежинск) и ФЭИ (Обнинск).

Интерес к этой проблеме, имеющей большое практическое и научное значение, связан с возможностью использования для накачки лазеров мощных, компактных и энергоемких источников ядерной энергии (ядерные реакторы, ядерные заряды) и, соответственно, с принципиальной возможностью создания мощных лазеров. Энергия, выделяющаяся, например, при полном делении 1 г ^{235}U составляет $8 \cdot 10^{10}$ Дж, что примерно на семь порядков превосходит максимальную удельную энергию, выделяющуюся в результате взрывных химических реакций ($\leq 10^4$ Дж/г).

Существуют три основных источника ядерных излучений, которые использовались для накачки ЛЯН, или, по крайней мере, обсуждалась возможность их использования: 1) ядерные реакторы; 2) ядерные взрывные устройства (ядерные заряды); 3) радиоактивные изотопы. В настоящее время накачка лазеров осуществлена при использовании первых двух источников, причем основной объем исследований был выполнен на импульсных реакторах, так как ядерные заряды являются довольно экзотическими приборами однократного действия, при срабатывании которых происходит уничтожение лазерной установки. В экспериментах с использованием ядерных зарядов (ВНИИЭФ) была осуществлена накачка химического HF-лазера и эксимерного XeF-лазера гамма-излучением ядерного взрыва.

Основной объем исследований по поиску и изучению характеристик ЛЯН выполнен на импульсных ядерных реакторах, которые являются мощными источниками нейтронов и отличаются составом и конструкцией активной зоны, длительностью и флюенсом нейтронного импульса, объемом и конфигурацией пространства для облучения, частотой повторения импульсов. Непосредственная накачка газовых активных сред высокого давления осуществляется с помощью продуктов экзотермических ядерных реакций, протекающих при взаимодействии нейтронов с ядрами ^{235}U , ^{10}B и ^3He .

К настоящему времени у нас в стране и за рубежом разработаны и находятся в эксплуатации более десятка таких реакторов и несколько десятков их модификаций. Длительности нейтронных импульсов варьируются от нескольких десятков микросекунд до нескольких десятков миллисекунд при нейтронных флюенсах в экспериментальных каналах 10^{13} - 10^{16} нейтр./см². В России для исследований ЛЯН в разное время использовались импульсные реакторы ВИР-1(2), ТИБР-1М, БР-1, БИГР (ВНИИЭФ), ЭБР-Л (ВНИИТФ), БАРС-6 (ФЭИ), а за рубежом – близкие по характеристикам импульсные реакторы типа Godiva, SPR, TRIGA, ACRR, APRF и др.

В настоящее время прямая ядерная накачка реализована для газовых лазерных сред, в которых заселение лазерных уровней происходит в результате процессов, происходящих в низкотемпературной плазме высокого давления, образованной ионизирующими излучениями. Иногда такую плазму называют ядерно-возбуждаемой плазмой. В качестве активных сред ЛЯН чаще всего используют двойные смеси $A-B$ (A – буферный газ, B – лазерный компонент). В этом случае заселение верхних лазерных уровней атомов и ионов B может происходить на различных этапах последовательности релаксационных процессов. Первым таким этапом являются процессы передачи энергии от ионов и атомов буферного газа A атомам примеси B :

1. Процесс перезарядки $A^+(A_2^+) + B \rightarrow (B^+)^* + A(2A)$. В зависимости от давления буферного газа в этой реакции будут участвовать атомарные A^+ или молекулярные A_2^+ ионы.
2. Реакция Пеннинга $A^* + B \rightarrow (B^+)^* + A + e$. Эта реакция может протекать только в том случае, когда энергия возбужденного атома A^* больше потенциала ионизации атома B .
3. Процесс передачи возбуждения $A^* + B \rightarrow B^* + A$.

Заселение верхних лазерных уровней может, в принципе, происходить за счет любого из этих трех процессов. Например, первые два из них являются основными в заселении лазерных уровней ЛЯН на смесях He-Cd и He-Zn, излучающих на переходах возбужденных ионов Cd^+ и Zn^+ .

В условиях возбуждения газовых сред атмосферного давления ядерными излучениями, когда удельная мощность возбуждения сравнительно невелика и составляет обычно $< 10^3$ Вт/см³ (концентрация электронов $\leq 5 \cdot 10^{13}$ см⁻³), больший интерес представ-

ляют процессы диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов B_2^+ или AB^+ с электронами, константы скоростей которых для тяжелых инертных газов достаточно велики и составляют от 10^{-7} до 10^{-6} см³/с. В результате диссоциативной рекомбинации один из атомов образуется в возбужденном состоянии, причем число таких состояний невелико, что обеспечивает селективность заселения энергетических уровней. Такой механизм заселения верхних лазерных уровней имеет место в ЛЯН на переходах атомов Ar, Kr, Xe, Ne, Hg.

Начиная с 1972 г, когда во ВНИИЭФ была впервые осуществлена накачка лазеров ядерными излучениями, до настоящего времени в различных лабораториях с использованием импульсных реакторов была получена квазинепрерывная генерация с длительностью излучения 0,1-50 мс в диапазоне спектра 0,39-5,6 мкм примерно на 50 переходах атомов Ar, Kr, Xe, Ne, C, N, O, Cl, Hg, Cd, ионов Cd^+ , Zn^+ , Hg^+ , молекулы CO и молекулярного иона N_2^+ . Максимальные энергетические параметры (мощность лазерного излучения $\leq 2,5$ кВт, КПД 1-3 %) зарегистрированы на линиях 1,73; 2,03 и 2,65 мкм, которые начинаются с уровня $5d[3/2]_1^0$ атома Xe. Для этих же линий наблюдались минимальные пороги генерации при плотностях потока тепловых нейтронов $\sim 10^{13}$ нейтр./см² (удельная мощность накачки на пороге генерации $\sim 0,2$ Вт/см³). Активные среды этого лазера представляют собой смеси Ne-Xe, Ar-Xe, Kr-Xe, Ne-Ar-Xe, Ne-Ar-Xe и чистый Xe при давлениях ~ 1 атм. Гелий, неон, аргон и криптон являются буферными газами, а концентрация ксенона составляет, как правило, от 1 % до 10 %.

Исследования в области исследований ЛЯН направлены, главным образом, на создание мощных ядерно-лазерных устройств. Наиболее распространенной в настоящее время является концепция реактора-лазера, в активной зоне которого, состоящей из делящегося вещества и лазерной среды, происходит прямое преобразование выделившейся ядерной энергии в лазерное излучение, минуя промежуточную стадию тепловой энергии. Такие установки могут найти применение в промышленности для различных технологических процессов, требующих высоких мощностей лазерного излучения, в качестве источников энергии для космических станций, для удаления так называемого «космического мусора» и др.

Тема 17. Твердотельные лазеры.

Лазеры на конденсированных средах можно разделить на два типа – твердотельные и жидкостные лазеры. Активным веществом этих лазеров является диэлектрик, находящийся в конденсированной фазе. По сравнению с газами в конденсированных средах можно создать более высокие концентрации активных частиц и тем самым достичь большего удельного энергосъема. Практически единственным способом накачки конденсированных сред является оптический метод (облучение светом).

Рабочий элемент твердотельных лазеров выполнен в виде кристаллического или аморфного диэлектрика. Спектральный диапазон работы твердотельных лазеров ограничен оптической прозрачностью активной среды и расположен в видимой и ближней ИК областях спектра (0,69-2,36 мкм).

Основные требования к матрицам активных диэлектриков: 1) высокое оптическое качество; 2) возможность введения заданного активатора без нарушения ее свойств; 3) высокая теплопроводность; 4) высокая лучевая стойкость; 5) хорошие механические свойства (возможность оптической обработки). Оптимальной совокупностью таких параметров обладают: 1) рубин ($Al_2O_3 : Cr^{3+}$); 2) алюмоиттриевый гранат с неодимом ($Y_3Al_5O_{12} : Nd^{3+}$); 3) стекло с неодимом; 4) иттербий-эрбиевое стекло; 5) алюминат иттрия с неодимом ($YAlO_3 : Nd^{3+}$); 6) натрий-лантанат-молибдат с неодимом ($NaLaMoO_4 : Nd^{3+}$); 7) флюорит кальция с диспрозием ($CaF_2 : Dy^{2+}$); 8) гадолиний-скандий-галлиевый гранат с хромом и неодимом $[(Gd_{3-x}Nd_x)(Sc_{2-y}Cr_y) \cdot Ga_3O_{12}]$. Все лазеры на этих веществах (за исключением рубина) работают по четырехуровневой схеме.

В качестве источников накачки используются лампы-вспышки, а также полупроводниковые лазеры и светодиоды. В первом случае максимальные КПД

твердотельных лазеров не превышают нескольких процентов, а во втором – примерно на порядок величины выше.

Наиболее известными представителями семейства твердотельных лазеров являются рубиновый ($\lambda = 694$ нм) и неодимовый ($\lambda = 1060$ нм) лазеры. Активным элементом рубинового лазера является кристалл розового рубина $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Cr}^{3+}$ с содержанием хрома около 0,05 %. В неодимовом лазере генерация наблюдалась более чем в 100 различных кристаллических и аморфных матрицах. Из них наилучшими свойствами обладают кристаллы иттрий-алюминиевого граната $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (называемые также ИАГ или YAG), кристаллы ГСГГ ($\text{Gd}_3\text{ScGa}_3\text{O}_{12}$) и стекла. В наиболее мощных действующих и проектируемых многоканальных лазерных установках (Nova, Omega-Up, NIF, Искра-6) с энергией лазерного импульса 30-1000 кДж, предназначенных для исследований в области лазерного термоядерного синтеза, используются неодимовые лазерные элементы.

Из твердотельных лазеров следует отметить также лазеры на центрах окраски или F-центрах, представляющие собой щелочно-галогидные кристаллы типа NaCl, LiF со специально созданными дефектами структуры – центрами окраски. При использовании таких лазеров можно получить плавную перестройку частоты генерации в довольно широком диапазоне. В настоящее время для этих лазеров освоены диапазоны перестройки 0,63-0,73; 0,8-1,5; 2,25-3,3 мкм.

Тема 18. Жидкостные лазеры. Полупроводниковые лазеры.

Жидкостные лазеры. Несмотря на то, что было исследовано несколько сотен различных вариантов жидкостей, реализовать лазерную генерацию удалось лишь при использовании немногих из них: 1) металлоорганические или хелатные лазерные жидкости – растворы органических комплексов редкоземельных элементов, активированные ионами Nd^{3+} (1,06 мкм) и Eu^{3+} (612 нм); 2) неорганические или апротонные жидкости (без водорода) – смесь SeOCl_2 или POCl_3 (оксихлориды селена или фосфора) с галогенидами элементов III, IV и V групп элементов (SnCl_4 , SbCl_5 и др.), активированные ионами Nd^{3+} ; 3) лазеры на органических красителях.

Первые два типа лазеров, не обладая заметными преимуществами перед твердотельными лазерами, уступают им по своим рабочим характеристикам.

Наибольший интерес представляют жидкостные лазеры на органических красителях. Красителям называются сложные органические соединения с разветвленной системой сопряженных химических связей. Из наиболее распространенных в лазерной технике красителей можно отметить «Родамин 6G». К достоинствам лазеров на красителях можно отнести: а) возможность плавной перестройки длины волны генерации в широкой области спектра 0,34-1,17 мкм; б) возможность работы в непрерывном, импульсном и импульсно-периодическом режимах (энергия одного импульса – до сотен джоулей, мощность генерации в непрерывном режиме – десятки ватт, длительность импульсов в режиме синхронизации мод $\leq 10^{-12}$ с). Активным веществом лазера – растворы молекул органических красителей в органических растворителях или в воде.

Для накачки жидкостных лазеров на красителях используется оптический метод. В качестве источников накачки используются лампы, газовый азотный лазер, аргоновый ионный лазер, эксимерные лазеры, вторые гармоники неодимового и рубинового лазеров и др. КПД современных лазеров на органических красителях достигает 25-30 % при накачке лазерным излучением и 1% при накачке специальными импульсными лампами. Лазеры могут работать в непрерывном режиме с выходной мощностью несколько ватт, а также в импульсных режимах с мощностью в несколько мегаватт при длительности импульса порядка 20 нс и частоте повторения ≤ 200 Гц.

Полупроводниковые лазеры. В основе действия полупроводниковых инжекционных лазеров лежит электролюминесценция – это люминесценция, возбуждаемая внешним электрическим полем. Наиболее эффективный метод возбуждения – инжекция неосновных носителей заряда через *p-n*-переход.

Для получения инверсии населенностей в полупроводнике, а следовательно, для усиления и генерации в нем света, необходимо достичь вырождения электронов и дырок,

т.е. такого его состояния, когда все уровни хотя бы в небольшой полосе энергии вблизи «дна» зоны проводимости заняты электронами, а все уровни у «потолка» валентной зоны – дырками. Условие инверсии населенностей для полупроводника:

$$\mu_{\text{э}} - \mu_{\text{д}} > \Delta \epsilon,$$

где $\Delta \epsilon$ – ширина запрещенной зоны, $\mu_{\text{э}}$ – уровень Ферми для электронов (наивысший уровень энергии, до которого электроны плотно заполняют зону проводимости); $\mu_{\text{д}}$ – уровень Ферми для дырок (с увеличением числа дырок опускается вниз). Полоса частот, в которой происходит усиление излучения:

$$\Delta \epsilon < h\nu < \mu_{\text{э}} - \mu_{\text{д}}.$$

Для того, чтобы создать инверсию населенностей, нужно приложить к *p-n*-переходу электрическое напряжение. При этом через *p-n*-переход потечет электрический ток, состоящий из электронов и дырок,двигающихся навстречу друг другу. Эти два потока частиц встречаются в тонком слое перехода и рекомбинируют, излучая свет.

Имеется ряд полупроводниковых материалов, из которых изготавливаются инжекционные лазеры. Лучшие результаты получены для лазерного *p-n*-перехода в GaAs. В импульсном режиме полупроводниковый лазер из GaAs при температуре жидкого азота излучает мощности до 100 Вт, в непрерывном – 10 Вт.

Лазеры на *p-n*-переходе имеют очень малые размеры: расстояние между зеркалами 0,2-0,5 мм, поперечный размер кристалла тот же, что и толщина *p-n*-перехода, т.е. ~ 0,1 мкм. Из-за малых размеров полупроводникового лазера расходимость лазерного излучения довольно велика и составляет 1-2°.

Переходы инжекционных лазеров, которые были рассмотрены выше, называются гомопереходами, так как по обе стороны границы раздела свойства кристалла одинаковы. В 1968 г. Под руководством Ж.И.Алферова были разработаны так называемые гетероструктурные полупроводниковые лазеры. Геоероструктура возникает в том случае, если наращивать монокристаллический слой одного полупроводникового материала на монокристаллической подложке другого. Такое наращивание возможно лишь для таких материалов, у которых кристаллические решетки почти не отличаются. Именно такая ситуация наблюдается, например, в случае GaAs и AlAs. Поэтому в твердом растворе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ замещение Al на Ga и наоборот происходит без изменения параметров кристаллической решетки.

Наибольшая доля промышленного выпуска приходится на инжекционные лазеры на основе гетероструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{P}_y$, перекрывающих диапазон спектра 0,67-1,67 мкм. Наиболее мощные из таких лазеров генерируют в непрерывном режиме мощности лазерного излучения до 10 Вт при очень высоком КПД 50-60 %.

В настоящее время для различных применений (в частности, для накачки твердотельных лазеров) разработаны лазерные линейки и решетки, в которых объединены отдельные полупроводниковые излучатели. Стандартные лазерные линейки шириной 1 см (мощность излучения до 50 Вт, срок службы до 10 тысяч часов) могут служить модулями для строительства наиболее мощных лазерных излучателей – лазерных решеток.

В заключение отметим, что кроме инжекционных полупроводниковых лазеров, в которых возбуждение осуществляется за счет встречной диффузии электронов и дырок в *p-n*-переходе при приложении к нему прямого напряжения, существуют полупроводниковые лазеры с другим методом накачки – с электронной накачкой. Этот метод является наиболее универсальным, так как применим к материалам с любой шириной запрещенной зоны и не требует создания специальных структур типа *p-n*-переходов. Примерами полупроводниковых лазеров с электронно-лучевой накачкой являются лазеры на таких широкозонных полупроводниках, как CdSe, CdS, ZnSe и ZnS с длинами волн излучения соответственно 690, 490, 460 и 330 нм.

4.3 Планы практических занятий

Цель практических занятий – закрепить основные (базовые) понятия и определения изучаемой темы, приобрести начальные навыки решения типовых задач по изучаемой теме.

Темы занятий:

1. Законы теплового излучения. Основные понятия квантовой электроники
2. Индуцированное излучение, коэффициенты Эйнштейна, ширина линии излучения.
3. Принципы работы квантовых усилителей и генераторов. Поглощение и усиление в активной среде
4. Усиление и генерация лазерного излучения
5. Способы накачки лазеров
6. Открытые резонаторы
7. Режимы работы лазеров. Управление характеристиками лазерного излучения
- 8 Газовые лазеры низкого давления
- 9 Молекулярные CO_2 -лазеры: механизм генерации; характеристики при накачке в тлеющем разряде низкого давления
- 10 Импульсные CO_2 -лазеры высокого давления. CO -лазеры. Газодинамические лазеры
- 11 Лазеры с ядерной накачкой
- 12 Применение лазеров в науке
13. Твердотельные лазеры
14. Применение лазеров в технологии
15. Жидкостные лазеры. Полупроводниковые лазеры
16. Проблемы лазерного термоядерного синтеза

4.4. Интерактивные формы, используемые в реализации дисциплины

Раздел дисциплины (тема)	Интерактивная форма	Кол-во часов	Методы и средства контроля
Молекулярные CO_2 -лазеры – причины получения высокого КПД	Дискуссия (10,11неделя)	4	Оценка активности участия студента
Химические лазеры – разнообразные способы накачки и максимальные энергетические параметры.	Дискуссия (12неделя)	2	Оценка активности участия студента
Лазеры с ядерной накачкой – способы накачки и механизмы образования инверсной населенности уровней.	Дискуссия (15неделя)	2	Оценка активности участия студента

5. Самостоятельная работа студентов

Виды и формы самостоятельной работы:

- самостоятельный поиск литературы по разделам и темам курса;
- самостоятельное изучение тем, предложенных преподавателем;
- ответы на вопросы для обсуждения ;
- подготовка к тестированию, решению задач и упражнений;
- подготовка к экзамену.

Вопросы и задачи для самостоятельной работы студентов:

1. Дать определение индуцированным и спонтанным переходам.
2. Что такое безызлучательные переходы и их влияние на время жизни энергетических уровней?
3. Что такое коэффициенты Эйнштейна?
4. Каковы механизмы уширения спектральных линий ?
5. В чем заключаются основные отличия механизмов однородного и неоднородного уширения линии излучения ?
6. В каком случае происходит усиление энергии внешнего излучения?
7. Что такое сечение усиления?
8. Получить выражение, связывающее коэффициент усиления активной среды лазера с параметрами резонатора на пороге генерации.
9. Дать объяснение эффекту насыщения при увеличении интенсивности излучения.
10. Что такое открытый резонатор?
11. Показать, при каких условиях резонатор является устойчивым.
12. Нарисовать и объяснить диаграмму устойчивости резонаторов Фабри-Перо.
13. Каковы преимущества неустойчивых резонаторов ?
14. Перечислить основные типы газовых лазеров и механизмы образования в них инверсной населенности уровней.
15. В чем заключается механизм работы гелий-неонового лазера?
16. Каковы особенности газовых лазеров высокого давления и каким образом они влияют на способы их накачки ?
17. В чем особенность эксимерных лазеров?
18. Перечислить основные принципы работы химических лазеров.
19. Перечислить основные типы газовых лазеров с ядерной накачкой и указать их основные характеристики.
20. Каковы механизмы образования инверсной населенности уровней в лазерах с ядерной накачкой ?
21. На каком принципе и на каких средах работают мощные йодные лазеры ?
22. Перечислить наиболее часто применяемые кристаллические матрицы твердотельных лазеров. Почему именно хром и неодим используется чаще всего как активные центры?
23. В чем заключаются основные преимущества неодимовых лазеров по сравнению с рубиновыми ?
24. Какие методы используются при измерении энергии и мощности лазерного излучения?
25. Перечислить основные области применения лазеров.
26. В чем заключается основной принцип использования лазерного излучения для инициирования термоядерного синтеза?

6. Контрольно-измерительные материалы

Текущий и итоговый контроль знаний студентов:

- посещаемость лекций, практических занятий;
- активность на занятиях;
- выполнение индивидуальных заданий (СРС);
- выполнение контрольных работ;
- итоговый тест;

- сдача экзамена.

6. 1. ПРИМЕРНЫЕ ВОПРОСЫ ИТОГОВОГО ТЕСТА

Для текущего контроля успеваемости проводится тест на 16 неделе семестра в виде письменной работы. Тест составляется в нескольких вариантах (по количеству студентов) и содержит 5 вопросов из ниже предложенных. Правильный ответ на 1 вопрос – 2 балла. Максимальное количество баллов за тест – 10 баллов.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ТЕСТА:

1. Каково соотношение температур T_1/T_2 абсолютно черных тел, если отношение длин волн, соответствующих максимуму их излучения, $\lambda_1/\lambda_2 = 2$?

Варианты ответа:

а) $T_1/T_2 = 1/4$

б) $T_1/T_2 = 1/2$

в) $T_1/T_2 = 2$

2. Определить отношение n_2/n_1 населенностей верхнего и нижнего энергетических уровней, если они находятся в термодинамическом равновесии при температуре 300 К и если энергетический зазор между уровнями соответствует частоте генерации CO_2 -лазера ($\lambda = 10,6$ мкм). Учесть, что $h\nu/k = 14,3 \cdot 10^3 / \lambda$ (k – постоянная Больцмана, λ – в микронах).

Варианты ответа:

а) $n_2/n_1 \approx 0,1$

б) $n_2/n_1 \approx 0,01$

в) $n_2/n_1 \approx 0,001$

3. Пусть отношение n_2/n_1 населенностей двух уровней, находящихся в термодинамическом равновесии при температуре 300 К, равно $1/e$. Определить длину волны излучения λ , соответствующую переходу между этими уровнями (постоянная Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град). К какой области спектра относится излучение с такой длиной волны ?

Варианты ответа:

а) $\lambda \approx 10$ мкм

б) $\lambda \approx 20$ мкм

в) $\lambda \approx 50$ мкм

4. Естественная ширина линии генерационного перехода CO_2 -лазера равна 50 МГц. Чему равно время жизни τ_0 верхнего лазерного уровня по отношению к спонтанному распаду ?

Варианты ответа:

а) $\tau_0 \approx 3$ нс

б) $\tau_0 \approx 30$ нс

в) $\tau_0 \approx 0,3$ нс

5. Определить сечение поглощения σ_a ионов Cr^{3+} в рубине с концентрацией $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, если на длине волны $\lambda = 540$ нм интенсивность света, прошедшего через пластинку толщиной 5 мм, падает в 22 тысячи раз.

Варианты ответа:

а) $\sigma_a = 4 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$

б) $\sigma_a = 8 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$

в) $\sigma_a = 1 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$

6. Что такое открытый резонатор?

Варианты ответа:

а) полость с отражающими стенками

б) устройство, отражающие стенки которого не замкнуты

в) устройство с одной отражающей поверхностью

7. Резонатор состоит из двух вогнутых зеркал с радиусами кривизны $R_1 = 1$ м, $R_2 = 2$ м. Какую максимальную длину $L_{\max}$ может иметь устойчивый резонатор с этими зеркалами ?

Варианты ответа:

- а) $L_{\max} = 1,5$ м
- б) $L_{\max} = 2$ м
- в) $L_{\max} = 3$ м.

8. Определить, при какой длине L активной среды газового лазера мощность излучения на выходе из резонатора будет максимальной, если начальный коэффициент усиления и коэффициент нерезонансных (вредных) потерь равны соответственно $5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ и $2 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$, а произведение коэффициентов отражения зеркал резонатора $R_1 \cdot R_2 = 0,852$.

Варианты ответа:

- а) $L = 75$ см
- б) $L = 100$ см
- в) $L = 150$ см

9. Чем определяется угол Брюстера ?

Варианты ответа:

- а) коэффициентом поглощения оптического материала
- б) толщиной оптического материала
- в) показателем преломления оптического материала

10. За счет какого процесса происходит заселение верхних лазерных уровней в гелий-неоновом лазере ?

Варианты ответа:

- а) за счет процесса передачи энергии от метастабильных атомов гелия:
 $\text{He}^* + \text{Ne} \rightarrow \text{Ne}^* + \text{He}$
- б) в результате диссоциативной рекомбинации: $\text{Ne}_2^+ + e \rightarrow \text{Ne}^* + e$
- в) за счет возбуждения электронами атомов неона: $\text{Ne} + e \rightarrow \text{Ne}^* + e$

11. В чем особенность лазеров на переходах эксимерных молекул?

Варианты ответа:

- а) основное состояние эксимерной молекулы является устойчивым
- б) основное состояние эксимерной молекулы является неустойчивым
- в) эксимерная молекула существует как устойчивое образование как в верхнем, так и в нижнем (основном) лазерных состояниях

12. Зеркала резонатора имеют коэффициенты отражения $R_1 \cdot R_2 = 0,887$ и нанесены прямо на торцы стержня рубинового лазера. Предполагая, что вредные потери в стержне и зеркалах отсутствуют, определить минимальную длину $L_{\min}$, которую может иметь рубиновый лазер с такими зеркалами, если в нем создана полная инверсия (коэффициент усиления $0,3 \text{ см}^{-1}$).

Варианты ответа:

- а) $L_{\min} = 0,5$ мм
- б) $L_{\min} = 2$ мм
- в) $L_{\min} = 10$ мм

Таблица оценок

№ вопроса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Индекс правильного ответа	б	б	в	а	а	б	в	б	в	а	б	б

6.2. ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ

1. Индуцированные и спонтанные переходы, коэффициенты Эйнштейна.
2. Полупроводниковые лазеры..

3. Ширина линии излучения, однородное и неоднородное уширение.
4. Лазеры на органических красителях, перестройка спектра генерации.
5. Усиление и генерация, условие самовозбуждения.
6. Неодимовый лазер и его основные характеристики.
7. Эффект насыщения излучения в лазерных генераторах и усилителях.
8. Рубиновый лазер и его основные характеристики.
9. Открытый резонатор, его добротность.
10. Газодинамические лазеры.
11. Устойчивые и неустойчивые резонаторы, диаграмма устойчивости.
12. Механизмы образования инверсной населенности уровней в лазерах с ядерной накачкой.
13. Основные методы накачки лазеров и режимы из работы.
14. Активные среды газовых лазеров с ядерной накачкой, их разновидности и особенности.
15. Лазеры на самоограниченных переходах.
16. Инверсная населенность уровней в гелий-неоновом лазере.
17. Неустойчивые резонаторы и их преимущества.
18. Кислород-йодный лазер и особенности его работы.
19. Особенности газовых лазеров высокого давления и способы их накачки.
20. Основные принципы работы химических лазеров и способы их инициирования.
21. Оптическая накачка: трех- и четырехуровневые схемы.
22. Фотодиссоционный йодный лазер.
23. Двухуровневая схема накачки, лазеры..
24. Экимерные лазеры и их особенности.
25. Селекция линий излучения лазера, одномодовый режим работы.
26. Способы накачки CO_2 -лазеров высокого давления и их характеристики.
27. Работа лазера в режиме модуляции добротности резонатора, способы модуляции.
28. Особенности работы газоразрядных CO_2 -лазеров низкого и высокого давления.
29. Синхронизация мод – способ получения мощных лазерных импульсов.
30. Механизм образования инверсной населенности уровней в CO_2 -лазерах.
31. Выходная мощность излучения лазера, ее зависимость от параметров резонатора и характеристик активной среды
32. Лазеры на парах металлов.
33. Лазерные моды – собственные типы колебаний оптического резонатора.
34. Аргоновый ионный лазер.
35. Соотношения Эйнштейна между вероятностями излучения и поглощения.
36. Особенности работы лазера на электронно-колебательных переходах молекулы CO .
37. Основные параметры, характеризующие лазерное излучение (монохроматичность, когерентность, направленность).
38. Лазеры на центрах окраски.
39. Формирование спектра собственных частот (мод) плоского резонатора.
40. Основные способы регистрации лазерного излучения.

6.3. УРОВЕНЬ ТРЕБОВАНИЙ И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ

Текущий контроль осуществляется в ходе учебного процесса, консультирования студентов, проверки выполнения ими самостоятельных и тестовых заданий.

Формой промежуточной аттестации является экзамен, который проводится в письменной форме в виде ответов на вопросы билетов.

Оценка знаний студентов осуществляется в баллах в комплексной форме с учетом:

- работы в семестре:

- выполнение контрольных работ;
- оценки за тестирование;

- оценка за СРС;
 - за участие в дискуссии;
- и

- оценки знаний в ходе экзамена.

Ориентировочное распределение баллов по видам работы

<i>№ п/п</i>	<i>Вид отчетности</i>	<i>Баллы</i>
1	Контрольные работы	30
2	Тестирование	10
3	СРС	5
4	Дискуссии	5
5	Экзамен	50
	Итого	100

Оценка знаний по 100-бальной шкале в соответствии с критериями СарФТИ НИЯУ МИФИ реализуется следующим образом:

- 90 – 100 баллов – отлично
- 75 – 89 баллов – хорошо
- 60 – 74 баллов – удовлетворительно
- 0 – 59 баллов - неудовлетворительно

7. Образовательные технологии

В соответствии с требованиями ОС НИЯУ МИФИ, ФГОС ВО по подготовке студентов для направления (специальности) 03.03.01 «Прикладные математика и физика» реализация компетентностного подхода к обучению предусматривает широкое использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков студентов. В рамках учебного курса студенты работают с лекциями, рекомендованной литературой, выполняют домашние задания. В процессе подготовки студенты используют информационные источники, размещенные в сети Интернет (официальные сайты, веб-порталы и веб-представительства организаций, предприятий и учреждений, тематические форумы и телекоммуникации), электронные учебники и учебно-методические пособия.

8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Малышев В.А. Основы квантовой электроники и лазерной техники. М., Высшая школа, 2006.
2. Мельников С.П., Пунин В.Т., Синянский А.А. Газовые лазеры с ядерной накачкой: физические процессы и техника эксперимента. М., МИФИ, 2008.
3. Айхлер Ю., Айхлер Г.И. Лазеры. Исполнение, управление, применение. М., Техносфера, 2012.
4. Тарасов Л.В. Физика лазера. М., Книжный дом «Либроком», 2010.
5. Стафеев С.К., Боярский К.К., Башнина Г.Л. Основы оптики. Санкт-Петербург, Питер, 2006.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Быков В.П., Силичев О.О. Лазерные резонаторы, М., Физматлит, 2004.
2. Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике. М., Наука, 1988.

3. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника. М., Высшая школа, 2001.

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Квантовая электроника
2. Успехи физических наук
3. Журнал технической физики
4. Письма в «Журнал технической физики»
5. Приборы и техника эксперимента

9. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Материально-техническое обеспечение включает в себя специально оборудованные кабинеты и аудитории: компьютерные классы, аудитории, оборудование мультимедийными средствами обучения.

10. Методические рекомендации по организации изучения дисциплины

Изучение дисциплины «Лазеры и их применение» предполагает освоение материалов лекций, тестовых заданий, выполнение заданий для самостоятельной работы.

На лекциях раскрываются основные вопросы в рамках рассматриваемой темы, ставятся акценты на наиболее сложных положениях изучаемого материала. Материалы лекции используются студентами для подготовки к самостоятельным занятиям.

Задания для самостоятельной работы предусмотрены для закрепления и расширения знаний, умений и навыков, приобретенных в результате изучения дисциплины.

Работа должна носить творческий характер. При ее оценке учитывается обоснованность и оригинальность выводов. В письменной работе студент должен полно и всесторонне рассмотреть все аспекты задания, четко сформулировать и аргументировать свою позицию по исследуемым вопросам.

Рабочая программа составлена в соответствии с требованиями ОС НИЯУ МИФИ, ФГОС ВО по направлению подготовки (специальности) 03.03.01 «Прикладная математика и физика».

Лист регистрации изменений

Лист регистрации изменений (продолжение)

Номер изменения	Номера листов			Основание	для внесения	изменений	Подпись	Расшифровка
	замененных	новых	аннулированных					
1.								
2.								
3.								
4.								
5.								
6.								
7.								
8.								
9.								