

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Амурский государственный университет»**

Кафедра Физики

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ
ФИЗИКА ЛАЗЕРОВ**

Основной образовательной программы по специальности 010701.65 - Физика

Благовещенск 2012

УМКД разработан канд. физ.-мат. наук, доцентом Верхотуровой Ириной Владимировной

Рассмотрен и рекомендован на заседании кафедры

Протокол заседания кафедры от «21» 09 2012 г. № 1

Зав.кафедрой  И.А. Голубева

УТВЕРЖДЕН

Протокол заседания УМСС 010701.65 - Физика
от «10» 09 2012 г. № 1

Председатель УМСС  Е.А. Ванина

СОДЕРЖАНИЕ

1. Рабочая программа учебной дисциплины	4
2. Краткое изложение программного материала	19
3 Методические указания (рекомендации)	78
3.1 Методические указания для преподавателя	78
3.2 Методические указания для студентов	80
3.3 Методические указания по самостоятельной работе студента	82
4. Контроль знаний	87
4.1 Текущий контроль	87
4.2 Итоговый контроль знаний	89
5. Интерактивные технологии и инновационные методы, используемые в образовательном процессе.	90

1. Рабочая программа учебной дисциплины.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью освоения дисциплины «Физика лазеров» является формирование у студентов уровня знаний соответствующего современному состоянию вопросов теории лазерной генерации; устройства приборов квантовой электроники и их возможностей.

Задачи дисциплины:

1. Изучение теоретических основ генерации лазерного излучения, характеристик лазерного излучения.
2. Ознакомление с основными типами лазеров и их устройством.
3. Получение специальных знаний, необходимых для исследовательских и прикладных работ в области техники, физики и технологии, включающих в себя изучение механизмов и закономерностей лазерного воздействия на материалы.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВПО:

Дисциплина «Физика лазеров» ДС.Р.9 входит в раздел «Национально-региональный (вузовский) компонент» цикла «Дисциплины специализации». Другие дисциплины, такие как «Технология лазерной обработки», «НИРС» изучаются на основе знаний физики лазеров.

Для освоения дисциплины необходимо знать:

- 1) курс Общей физики;
- 2) элементы дисциплины «Математика»;
- 3) Квантовую физику;
- 4) Физику атома и атомных явлений.

По завершению изучения дисциплины студент должен:

- **Знать** теоретические и экспериментальные проблемы физики лазеров и возможные пути их решения;
- **Уметь** описывать процесс генерации лазерного излучения в различных типах лазеров; рассчитывать различные параметры лазерных установок; решать задачи с использованием приобретенных теоретических знаний.
- **Владеть** теоретическими знаниями и математическим аппаратом для решения простейших задач физики лазеров.

3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «Физика лазеров»

Общая трудоемкость дисциплины составляет 84 часа.

№ п/п	Модуль дисциплины	Виды учебной работы				Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра) Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
		Лекции (час.)	Практи- ческие занятия (час.)	Лаборат орные раб. (час.)	СРС (час.)	
Семестр 8						
1	Модуль 1 «Исходные концепции» 1.1 Спонтанное и вынужденное излучение, поглощение; 1.2 Принцип работы лазера; 1.3 Схемы накачки; 1.4 Типы лазеров; 1.5 Материалы применяемые в качестве активных сред в лазерах; 1.6 Свойства лазерного излучения; 1.7 Применение лазеров.	6			1	Контроль посещений аудиторных занятий. Контролирующий тест по модулю.
2	Модуль 2 «Взаимодействие излучения с атомами и ионами» 2.1 Основы теории излучения черного тела; 2.2 Спонтанное излучение; 2.3 Поглощение и вынужденное излучение; 2.4 Механизмы уширения линий; 2.5 Безызлучательные переходы и передача энергии; 2.6 Уровни с вырожденными или сильно связанными подуровнями; 2.7 Насыщение; 2.8 Люминесценция в оптически плотной среде.	8			2	Контроль посещений аудиторных занятий. Контролирующий тест по модулю.
3	Модуль 3 «Распространение лучей и волн в оптических средах» 3.1 Матричное	8			1	Контроль посещений аудиторных занятий. Контролирующий

	представление геометрической оптики; 3.2 Отражение и пропускание волн на границе раздела диэлектриков; 3.3 Многослойные диэлектрические покрытия; 3.4 Интерферометр Фабри-Перо; 3.5 Дифракционная оптика в параксиальном приближении; 3.6 Гауссовы пучки.					тест по модулю.
4	Модуль 4 «Пассивные оптические резонаторы» 4.1 Типы резонаторов; 4.2 Собственные моды и собственные значения. Модовые конфигурации; 4.3 Время жизни фотона и добротность резонатора; 4.4 Критерий устойчивости резонатора; 4.5 Устойчивые резонаторы; 4.6 Неустойчивые резонаторы; 4.7 Согласование резонаторов.	8			1	Контроль посещений аудиторных занятий. Контролирующий тест по модулю.
5	Модуль 5 «Процессы накачки» 5.1 Оптическая накачка некогерентным источником света; 5.2 Накачка лазерным излучением; 5.3 Накачка в электрическом разряде.	6			1	Контроль посещений аудиторных занятий. Контролирующий тест по модулю.
6	Подготовка к зачету				8	Зачет
7	Итого	36			14	
<i>Семестр 9</i>						
1	Модуль 1 «Непрерывный режим работы лазера» 1.1 Скоростные уравнения; 1.2 Пороговые условия и выходная мощность; 1.3 Оптимальная связь на	3	2		1	Контроль посещений аудиторных занятий. Контролирующий тест по модулю.

	выходе лазера; 1.4 Перестройка частоты и генерации лазера; 1.5 Причины возникновения многомодовой конфигурации; 1.6 Одномодовый режим генерации; 1.7 Затягивание частоты и предел монохроматичности; 1.8 Флуктуации частоты генерации и стабилизация частоты лазера; 1.9 Шум и интенсивность излучения и методы его уменьшения.					Контроль выполнения заданий на практических занятиях.
2	Модуль 2 «Нестационарный режим работы лазера» 2.1 Релаксационные колебания; 2.2 Модуляция добротности; 2.3 Режим синхронизации мод; 2.4 Разгрузка резонатора.	2	2		1	Контроль посещений аудиторных занятий. Контролирующий тест по модулю. Контроль выполнения заданий на практических занятиях.
3	Модуль 3 «Типы лазеров» 3.1 Твердотельные лазеры; 3.2 Полупроводниковые лазеры; 3.3 Лазеры на красителях; 3.4 Газовые лазеры; 3.5 Химические лазеры; 3.6 Лазеры на свободных электронах; 3.7 Лазеры на центрах окраски; 3.8 Рентгеновские лазеры.	2	2		1	Контроль посещений аудиторных занятий. Контролирующий тест по модулю. Подготовка доклада с презентацией по определенному типу лазера. Контроль выполнения заданий на практических занятиях.
4	Модуль 4 «Преобразование лазерного пучка» 4.1 Преобразование в пространстве:	2	2		1	Контроль посещений аудиторных занятий. Контролирующий тест по модулю.

	распространение многомодового лазерного пучка; 4.2 Преобразование амплитуды: лазерное усиление; 4.3 Преобразование частоты; 4.4 Преобразование во времени; 4.5 Преобразование ширины полосы и частотная метрология, генерация гармоник более высокого порядка и аттосекундных импульсов.					Контроль выполнения заданий на практических занятиях.
5	Модуль 5 «Измерение параметров лазеров» 5.1 Характеристики временного и пространственного формирования излучения; 5.2. Элементы оптических схем лазеров; 5.3 Измерение энергетических параметров; 5.4 Измерение длины волны излучения, длительности импульсов и параметров пучка.	2	2		1	Контроль посещений аудиторных занятий. Контролирующий тест по модулю. Контроль выполнения заданий на практических занятиях.
6	Модуль 6 «Системы сканирования луча лазера» 6.1 Классификация и параметры систем сканирования. 6.2 Оптико-механические дефлекторы. 6.3 Дефлекторы непрерывного сканирования на основе электрооптических кристаллов.	1	2		1	Контроль посещений аудиторных занятий. Контролирующий тест по модулю. Контроль выполнения заданий на практических занятиях.
7	Модуль 7 «Прохождение лазерного излучения через атмосферу» 7.1 Распространение лазерного излучения в атмосфере.	1	1		1	Контроль посещений аудиторных занятий. Контролирующий тест по модулю. Контроль выполнения

	7.2 Распространение мощного лазерного излучения в атмосфере.					заданий на практических занятиях.
8	Модуль 8 «Приемники лазерного излучения» 8.1 Классификация, основные параметры и характеристики. 8.2 Приемники излучения с внешним фотоэффектом. 8.3 Фоторезисторы. 8.4 Приемники излучения с $p-n$ переходом.	1	1		1	Контроль посещений аудиторных занятий. Контролирующий тест по модулю. Контрольная работа
9	Подготовка к экзамену				8	Экзамен
10	Итого	14	14		16	

4 . СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ И ТЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1 ЛЕКЦИИ

Семестр 8

Модуль 1 «Исходные концепции»

- 1.1 Спонтанное и вынужденное излучение, поглощение;
- 1.2 Принцип работы лазера;
- 1.3 Схемы накачки;
- 1.4 Типы лазеров;
- 1.5 Материалы, применяемые в качестве активных сред в лазерах;
- 1.6 Свойства лазерного излучения;
- 1.7 Применение лазеров.

Модуль 2 «Взаимодействие излучения с атомами и ионами»

- 2.1 Основы теории излучения черного тела;
- 2.2 Спонтанное излучение;
- 2.3 Поглощение и вынужденное излучение;
- 2.4 Механизмы уширения линий;
- 2.5 Безызлучательные переходы и передача энергии;
- 2.6 Уровни с вырожденными или сильно связанными подуровнями;
- 2.7 Насыщение;
- 2.8 Люминесценция в оптически плотной среде.

Модуль 3 «Распространение лучей и волн в оптических средах»

- 3.1 Матричное представление геометрической оптики;
- 3.2 Отражение и пропускание волн на границе раздела диэлектриков;
- 3.3 Многослойные диэлектрические покрытия;
- 3.4 Интерферометр Фабри-Перо;
- 3.5 Дифракционная оптика в параксиальном приближении;
- 3.6 Гауссовы пучки.

Модуль 4 «Пассивные оптические резонаторы»

- 4.1 Типы резонаторов;
- 4.2 Собственные моды и собственные значения. Модовые конфигурации;
- 4.3 Время жизни фотона и добротность резонатора;
- 4.4 Критерий устойчивости резонатора;
- 4.5 Устойчивые резонаторы;
- 4.6 Неустойчивые резонаторы;
- 4.7 Согласование резонаторов.

Модуль 5 «Процессы накачки»

- 5.1 Оптическая накачка некогерентным источником света;
- 5.2 Накачка лазерным излучением;
- 5.3 Накачка в электрическом разряде.

Семестр 9

Модуль 1 «Непрерывный режим работы лазера»

- 1.1 Скоростные уравнения;
- 1.2 Пороговые условия и выходная мощность;
- 1.3 Оптимальная связь на выходе лазера;
- 1.4 Перестройка частоты и генерации лазера;
- 1.5 Причины возникновения многомодовой конфигурации;
- 1.6 Одномодовый режим генерации;
- 1.7 Затягивание частоты и предел монохроматичности;
- 1.8 Флуктуации частоты генерации и стабилизация частоты лазера;
- 1.9 Шум и интенсивность излучения и методы его уменьшения.

Модуль 2 «Нестационарный режим работы лазера»

- 2.1 Релаксационные колебания;
- 2.2 Модуляция добротности;
- 2.3 Режим синхронизации мод;
- 2.4 Разгрузка резонатора.

Модуль 3 «Типы лазеров»

- 3.1 Твердотельные лазеры;
- 3.2 Полупроводниковые лазеры;
- 3.3 Лазеры на красителях;
- 3.4 Газовые лазеры;
- 3.5 Химические лазеры;
- 3.6 Лазеры на свободных электронах;
- 3.7 Лазеры на центрах окраски;
- 3.8 Рентгеновские лазеры.

Модуль 4 «Преобразование лазерного пучка»

- 4.1 Преобразование в пространстве: распространение многомодового лазерного пучка;
- 4.2 Преобразование амплитуды: лазерное усиление;
- 4.3 Преобразование частоты;
- 4.4 Преобразование во времени;
- 4.5 Преобразование ширины полосы и частотная метрология, генерация гармоник более высокого порядка и аттосекундных импульсов.

Модуль 5 «Измерение параметров лазеров»

- 5.1 Характеристики временного и пространственного формирования излучения;
- 5.2. Элементы оптических схем лазеров;
- 5.3 Измерение энергетических параметров;
- 5.4 Измерение длины волны излучения, длительности импульсов и параметров пучка.

Модуль 6 «Системы сканирования луча лазера»

- 6.1 Классификация и параметры систем сканирования.
- 6.2 Оптико-механические дефлекторы.
- 6.3 Дефлекторы непрерывного сканирования на основе электрооптических кристаллов.

Модуль 7 «Прохождение лазерного излучения через атмосферу»

- 7.1 Распространение лазерного излучения в атмосфере.
- 7.2 Распространение мощного лазерного излучения в атмосфере.

Модуль 8 «Приемники лазерного излучения»

- 8.1 Классификация, основные параметры и характеристики.
- 8.2 Приемники излучения с внешним фотоэффектом.
- 8.3 Фоторезисторы.
- 8.4 Приемники излучения с р – n переходом.

4.2 ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

Задания к практическим занятиям, представленным ниже, формируются на основе учебника [1] и выдаются преподавателем в начале семестра по следующим темам:

Семестр 9

- 1. Спонтанное и вынужденное излучение, поглощение (3 часа);
- 2. Схемы накачки (3 часа);
- 3.Пассивные оптические резонаторы (4 часа);
- 4.Матричное представление геометрической оптики (4 часа).

5. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА СТУДЕНТОВ

№ п/п	№ раздела (темы) дисциплины	Форма (вид) самостоятельной работы	Трудоемкость в часах
<i>Семестр 8</i>			
1	Модуль 1 «Исходные концепции»	Подготовка конспектов по темам на самостоятельное изучение. Подготовка к контролируемому тесту по модулю.	1
2	Модуль 2 «Взаимодействие излучения с атомами и ионами»	Подготовка конспектов по темам на самостоятельное изучение. Подготовка к контролируемому тесту по модулю.	2
3	Модуль 3 «Распространение лучей и волн в оптических средах»	Подготовка конспектов по темам на самостоятельное изучение. Подготовка к контролируемому тесту по модулю.	1
4	Модуль 4 «Пассивные	Подготовка к контролируемому тесту по	1

	оптические резонаторы»	модулю.	
5	Модуль 5 «Процессы накачки»	Подготовка конспектов по темам на самостоятельное изучение. Подготовка к контролируемому тесту по модулю.	1
6	Подготовка к зачету		8
7	Итого		14
Семестр 9			
1	Модуль 1 «Непрерывный режим работы лазера	Подготовка конспектов по темам на самостоятельное изучение. Подготовка к контролируемому тесту по модулю.	1
2	Модуль 2 «Нестационарный режим работы лазера»	Подготовка конспектов по темам на самостоятельное изучение. Подготовка к контролируемому тесту по модулю.	1
3	Модуль 3 «Типы лазеров»	Подготовка конспектов по темам на самостоятельное изучение. Подготовка доклада с презентацией по определенному типу лазера.	1
4	Модуль 4 «Преобразование лазерного пучка»	Подготовка конспектов по темам на самостоятельное изучение. Подготовка к контролируемому тесту по модулю.	1
5	Модуль 5 «Измерение параметров лазеров»	Подготовка к контролируемому тесту по модулю.	1
6	Модуль 6 «Системы сканирования луча лазера»	Подготовка к контролируемому тесту по модулю.	1
7	Модуль 7 «Прохождение лазерного излучения через атмосферу»	Подготовка к контролируемому тесту по модулю.	1
8	Модуль 8 «Приемники лазерного излучения»	Подготовка к контролируемому тесту по модулю. Подготовка к контрольной работе	1
9	Подготовка к экзамену		8
10	Итого		16

ТЕМЫ ДОКЛАДОВ

1. Рубиновый лазер
2. Nd: YAG – лазер
3. Лазер на стекле с неодимом
4. Yb: YAG – лазер
5. Мощные лазеры на тонких дисках.
6. Лазер на александрите
7. ER:YAG – лазер

8. YB:ER – лазер
9. TM:HO YAG – лазер
10. Волоконные лазеры
11. Лазер на титан-сапфире.
12. Гелий-неоновый лазер
13. Лазер на парах меди и золота
14. Аргоновый лазер
15. He-Cd лазер
16. CO₂ – лазер
17. CO –лазер
18. Азотный лазер
19. Экимерные лазеры
20. Лазеры на красителях
21. Лазеры на HF
22. Полупроводниковые лазеры
23. Лазеры на центрах окраски
24. Лазеры на свободных электронах
25. Рентгеновских лазеры

ОСНОВНЫЕ ПУНКТЫ ДОКЛАДА

Содержание

1. Введение (историческая справка) основные проблемы.
2. Активная среда
 - химические элементы, схемы энергетических уровней;
 - кинетические уравнения;
 - способ создания инверсии населенностей.
3. Резонатор:
 - тип;
 - технические приспособления;
 - проблемы.
4. Энергетические характеристики лазера. (КПД, энергия в импульсе, пиковая мощность и т.д.).
5. Улучшение характеристик лазера.
6. Применение

6.ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При чтении лекций по данной дисциплине используется такой неимитационный метод активного обучения, как «Проблемная лекция», а при определенных темах «Лекция-визуализация».

При проведении практических занятий используется либо «Мозговой шторм», либо «Метод Дельфи», которые направлены на вовлечение всех студентов в решении конкретных задач.

При изучении темы «Типы лазеров» используется метод «Деловой игры». Где группа студентов развивается не несколько команд. Каждая, из которых, выбирает себе определенный тип лазера и подготавливает по нему информацию с обязательной презентацией. Преподаватель играет роль директора фирмы использующей лазерные технологии в научно-исследовательских и производственных направлениях. Студенты должны представить свою продукцию (тип лазера) и обосновать необходимость приобретения.

7. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

7.1 Контролирующий тест

Контролирующий тест проводится по темам соответствующих модулей. В каждом тестовом задании от 7 до 10 заданий. Тест выявляет теоретические знания, практические умения и аналитические способности студентов.

7.2 Контрольная работа

Контрольная работа выполняется в конце семестра по всем пройденным модулям семестра. В контрольной работе содержится четыре задачи. Контрольная работа направлена на проверку умений студентов применять полученные теоретические знания в отношении определенной конкретной задачи.

7.3 Подготовка конспектов по темам на самостоятельное изучение

Семестр 8

Модуль 1 «Исходные концепции». Свойства лазерного излучения; Применение лазеров.

Модуль 2 «Взаимодействие излучения с атомами и ионами». Уровни с вырожденными или сильно связанными подуровнями; Люминесценция в оптически плотной среде.

Модуль 3 «Распространение лучей и волн в оптических средах». Отражение и пропускание волн на границе раздела диэлектриков; Многослойные диэлектрические покрытия; Интерферометр Фабри-Перо.

Модуль 5 «Процессы накачки». Накачка лазерным излучением.

Семестр 9

Модуль 1 «Непрерывный режим работы лазера». Причины возникновения многомодовой конфигурации; Затягивание частоты и предел монохроматичности; Флуктуации частоты генерации и стабилизация частоты лазера; Шум и интенсивность излучения и методы его уменьшения.

Модуль 2 «Нестационарный режим работы лазера». Разгрузка резонатора.

Модуль 3 «Типы лазеров». Твердотельные лазеры; Полупроводниковые лазеры; Лазеры на красителях; Газовые лазеры; Химические лазеры; Лазеры на свободных электронах; Лазеры на центрах окраски; Рентгеновские лазеры.

Модуль 4 «Преобразование лазерного пучка». Преобразование ширины полосы и частотная метрология, генерация гармоник более высокого порядка и аттосекундных импульсов.

7.4 Примерные зачетные вопросы (семестр 8)

1. История возникновения квантовой электроники.
2. Спонтанное и вынужденное излучение, поглощение. Коэффициенты Эйнштейна.
3. Принцип работы лазера. Условия для создания ОКГ.
4. Схемы накачки.
5. Типы лазеров.
6. Активные вещества твердотельных лазеров.
6. Активные вещества жидкостных лазеров.
7. Активные вещества полупроводниковых лазеров.
8. Активные вещества газовых лазеров.

9. Свойства лазерного излучения.
10. Применение лазеров.
11. Взаимодействие излучения с веществом: излучение черного тела.
12. Спонтанное излучение.
13. Поглощение и вынужденное излучение.
14. Сечение перехода, коэффициенты поглощения и усиления.
15. Механизмы уширения. Однородное уширение.
16. Механизмы уширения. Неоднородное уширение.
17. Безызлучательные переходы и передача энергии.
18. Совместное проявление спонтанных излучательных и безызлучательных процессов.
19. Уровни с вырожденными или сильно связанными подуровнями.
20. Совместное действие различных механизмов уширения линии.
21. Насыщение поглощения, однородно уширенная линия.
22. Насыщение усиления, однородно уширенная линия.
23. Неоднородно уширенная линия.
24. Люминесценция в оптически плотной среде.
25. Матричное представление геометрической оптики. Матрицы передачи.
26. Отражение и пропускание волн на границе раздела диэлектриков. Многослойные диэлектрические покрытия.
27. Интерферометр Фабри-Перо.
28. Дифракционная оптика в параксиальном приближении. Гауссовы пучки. Распространение в свободном пространстве.
29. Оптические резонаторы: плоскопараллельный, сферический, конфокальный, сферический общего вида, кольцевой.
30. Собственные моды и собственные значения оптических резонаторов. Модовые конфигурации.
31. Время жизни фотона в резонаторе. Добротность резонатора. Число Френеля. Свойства и основные функции резонатора. Виды потерь в резонаторе.
32. Критерий устойчивости резонатора.
33. Устойчивые резонаторы.
34. Неустойчивые резонаторы.
35. Согласование резонаторов.
36. Процессы накачки.
37. Оптическая накачка некогерентным источником.
38. Накачка лазерным излучением.
39. Процессы электрической накачки.

7.5 Примерные экзаменационные вопросы (семестр 9)

1. Непрерывный режим работы лазера. Скоростные уравнения: четырех и трехуровневый лазер.
2. Непрерывный режим работы лазера. Пороговое условие и выходная мощность.
3. Непрерывный режим работы лазера. Оптимальная связь на выходе лазера.
4. Перестройка частоты лазера.
5. Причины возникновения многомодовой генерации.
6. Одномодовый режимы генерации. Методы и схемы селекции мод: селекция поперечных типов колебаний, селекция продольных типов колебаний
7. Затягивание частоты и предел монохроматичности.
8. Флуктуации частоты генерации и стабилизация частоты лазера. Шум интенсивности излучения и методы его уменьшения.
9. Нестационарный режим работы лазера. Релаксационные колебания.

10. Нестационарный режим работы лазера. Модуляция добротности. Режим модуляции добротности. Теория активной модуляции.
11. Модуляторы лазерного излучения. Физические принципы, классификация основных требования к модуляторам лазерного излучения.
12. Модуляция усиления.
13. Режим синхронизации мод.
14. Роль дисперсии резонатора в фемтосекундных лазерах с синхронизацией мод.
15. Методы и системы синхронизации мод.
16. Твердотельные лазеры.
17. Лазеры на красителях.
18. Полупроводниковые лазеры.
19. Лазеры на нейтральных атомах.
20. Ионные лазеры.
21. Молекулярные газовые лазеры.
22. Химические лазеры.
23. Лазеры на свободных электронах.
24. Лазеры на центрах окраски.
25. Рентгеновские лазеры.
26. Преобразование лазерного пучка: преобразование в пространстве (распространение многомодового лазерного пучка), преобразование амплитуды (лазерное усиление).
27. Преобразование лазерного пучка: преобразование частоты.
28. Преобразование лазерного пучка: преобразование во времени.
29. Преобразование лазерного пучка: преобразование ширины полосы и частотная меторология, генерация гармоник более высокого порядка и аттосекундных импульсов.
30. Характеристики временного и пространственного формирования излучения. Элементы оптических схем лазеров: осветители, зеркала, резонансные отражатели.
31. Измерение параметров лазеров: энергетических параметров.
32. Измерение параметров лазеров: длины волны излучения, длительности импульсов и параметров пучка.
33. Системы сканирования луча лазера.
34. Прохождение лазерного излучения через атмосферу.
35. Приемники лазерного излучения (классификация, основные параметры и характеристики).

7.6 Критерии оценки при сдаче зачета (8 семестр)

1. К сдаче зачета допускаются студенты:

- посетившие все лекционные занятия данного курса;

При наличии пропусков темы пропущенных занятий должны быть отработаны. Программные вопросы к зачету доводятся до сведения студентов за месяц до зачета.

2. Критерии оценки:

Итоговая оценка знаний студентов должна устанавливать активность и текущую успеваемость студентов в течение семестра по данному предмету.

Оценка «зачет» - ставиться при 75% правильных ответов на зачете.

7.7 Критерии оценки при сдаче экзамена (9 семестр)

1. К сдаче экзамена допускаются студенты:
 - посетившие все лекционные данного курса;
 - подготовившие доклад по одной из тем.

При наличии пропусков, темы пропущенных занятий должны быть отработаны.

Программные вопросы к экзамену доводятся до сведения студентов за месяц до экзамена.

2. Критерии оценки:

Итоговая оценка знаний студентов должна устанавливать активность и текущую успеваемость студентов в течение семестра по данному предмету.

Оценка «отлично» - ставится при 90 - 100 % правильных ответов на экзамене.

Оценка «хорошо» - ставится при 70 - 90 % правильных ответов на экзамене.

Оценка «удовлетворительно» - ставится при 50 - 70 % правильных ответов на экзамене.

«неудовлетворительно» - ставится до 50 % правильных ответов на экзамене.

8.УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «Физика лазеров»

а) основная литература:

1. Звелто, Орацио Принципы лазеров: пер. с англ./ О.Звелто; под науч. ред. Т.А. Шмаонова.- 4-е изд.- СПб.: Лань, 2008.- 720 с.
2. Тарасов, Л.В. Физические основы квантовой электроники: оптический диапазон/ Л.В. Тарасов.- М.: ЛИБРОКОМ, 2010.- 370 с.
3. Айхлер, Юрген Лазеры. Исполнение, управление, применение/ Ю.Айхлер.- И.Айхлер: пре. с нем. Л.Н. Казанцевой.- М.: Техносфера, 2008.- 439 с.

б) дополнительная литература:

1. Ханин, Я.И. Основы динамики лазеров: научное издание/ Я.И. Ханин.- М.: Наука. Физматлит, 1999.- 201 с.
2. Паршаков, А.Н. Введение в квантовую физику: учеб. пособие/ А.Н. Паршаков.- СПб.: Лань, 2010.- 352 с.
3. Козлов, С.А. Основы фемтосекундной оптики/С.А. Козлов, В.В. Самарцев.- М.: Физматлит, 2009.- 292 с.
4. Физика лазеров: учеб-метод. комплекс для спец. 010701-Физика/ АмГУ, ИФФ; сост. И.В. Верхотурова, Е.В. Шумейко.- Благовещенск: Изд-во Амур. гос. ун-та, 2007.- 91 с.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

№	Наименование ресурса	Краткая характеристика
1	http://www.iqlib.ru	Интернет-библиотека образовательных изданий, в который собраны электронные учебники, справочные и учебные пособия.
2	http://rucont.ru/	Электронная библиотечная система, в который собраны электронные учебники, справочные и учебные пособия.

г) периодические издания:

1. Известия вузов. Физика.

2. Известия РАН. Серия физическая.
3. Доклады Академии наук.
4. Журнал экспериментальной и теоретической физики.
5. Успехи физических наук.
6. Оптика и спектроскопия.
7. Оптический журнал.
8. Реферативный журнал «Физика»

9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «Физика лазеров»

№ п/п	Наименование лабораторий, ауд.	Основное оборудование
1.	112	Комплект ТСО Мультимедийный проектор Ноутбук

2. Краткое изложение программного материала

ЛЕКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ

Введение

1. Предмет курса и его задачи

Предметом изучения данной дисциплины являются физические основы теории лазерной генерации, приборы квантовой электроники и воздействия лазерного излучения на материалы.

Основная цель изучения дисциплины заключается в формировании у студентов уровня знаний вопросов, относящихся к теории лазерной генерации, приборов квантовой электроники.

В результате изучения курса студенты должны знать:

1. Теоретические основы генерации лазеров, характеристики лазерного излучения, умения управлять этими характеристиками.
2. Основные типы лазеров, и методы их классификации. Тенденции дальнейшего развития.
3. Получить специальные знания, необходимые для исследовательских и прикладных работ в области техники, физики и технологии, включающие в себя излучение механизмов и закономерностей лазерного воздействия на материалы.

2. История возникновения квантовой электроники.

Квантовая электроника возникла в середине 50-х годов 20 века и в настоящее время бурно развивается.

Высокие темпы развития КЭ привели к появлению за последние несколько лет новых типов лазеров, к значительному усовершенствованию уже существующих и к новым многочисленным применениям в различных областях науки.

Всегда интересно вспомнить первые шаги квантовой электроники.

Идея возможности использования неравновесных квантовых систем была впервые высказана еще в 1945 г. советским физиком В.А.Фабрикантом и его сотрудниками. В 1954г. академики Н.Г.Басов и А.М. Прохоров в целях усиления и генерации электромагнитных колебаний СВЧ-диапазона предложили использовать вынужденное излучение «активных» молекул аммиака. Были заложены основы теории и создан действующий образец молекулярного генератора – мазера. Ими были так же разработаны принципы использовать в лазерах трехуровневых квантовых систем.

В 1958г. были опубликованы теоретические работы американских ученых Ч.Таунса и А. Шавлова о возможности практической реализации квантового генератора оптического диапазона, а в 1960г. в США Мейман запустил первый лазер.

Основополагающие работы в области КЭ были отмечены присуждением в 1964г. Нобелевской премии по физике академиком Н.Г. Басову и А.М. Прохорову и американскому ученому Ч.Таунсу.

Дальнейшее развитие квантовой электроники шло все возрастающими темпами. Родилось одно из важнейших направлений КЭ – нелинейная оптика, появление которой связано с возможностью использования высокоинтенсивных монохроматических пучков света, излучаемых лазерами. Это привело к открытию и изучению современно новых физических явлений, имеющих широкие перспективы для практических применений.

Семестр 8

Модуль 1 «Исходные концепции»

Цель – ознакомиться с физическими процессами и основными идеями, лежащими в основе работы лазера.

Задачи – ознакомиться с процессами спонтанного излучения, поглощения и вынужденного излучения, основными схемами работы лазеров, активными средами лазеров, принципов работы и применением лазеров.

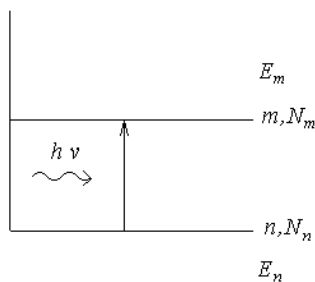
1.1 Спонтанное и вынужденное излучение, поглощение.

Квантовую электронику можно определить как раздел электроники, в котором фундаментальную роль играют явления квантового характера.

В лазере используются три фундаментальных явления, происходящих при взаимодействии электромагнитных волн с веществом, а именно процессы спонтанного и вынужденного излучения и процесс поглощения.

Поглощение и усиление электромагнитного излучения веществом: Рассмотрим однородную систему. Пусть она характеризуется только двумя состояниями n – нижнее состояние с энергией E_n , m – верхнее состояние с энергией E_m .

Пусть на уровне n находится N_n – частиц, а на m – N_m .
 $E_m > E_n$.



На среду падает излучение с частотой $\nu_{mn} = \frac{(E_m - E_n)}{h}$ и I_ν – мощность излучения. По мере прохождения через вещество эта интенсивность будет изменяться (ослабляется).

Тогда можно определить энергии поглощенную веществом:

$-dI_\nu \sim I_\nu \cdot dx$, следовательно $-dI_\nu = \alpha_\nu \cdot I_\nu \cdot dx$, отсюда

$I_\nu = I_{\nu_0} \cdot e^{-\alpha_\nu \cdot x}$ – закон Бугера_Ламбэрта-Берра.

Где I_{ν_0} – начальная интенсивность.

Физический смысл коэффициента α_ν : из закона выражаем: $\alpha_\nu = -\frac{dI_\nu}{I_\nu} \cdot \frac{1}{x}$

$-\frac{dI_\nu}{I_\nu}$ – характеризует относительное изменение интенсивности излучения падающего на площадку.

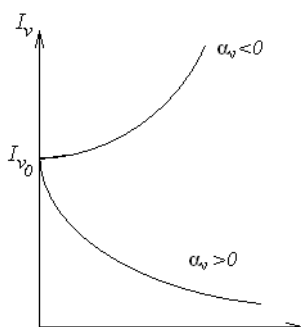
Коэффициент поглощения должен быть универсальным, поэтому выбираем единичную площадку. Следовательно, α_ν показывает, какая доля энергии поглощается в единичном объеме.

В естественных условиях (т/д равновесия) с возрастанием номера уровня населенность уровня изменяется, поэтому выполняется неравенство:

$$\frac{N_n}{N_m} > \frac{g_n}{g_m} \text{ или } g_m N_n > g_n N_m.$$

В такой среде $\alpha_\nu > 0$, следовательно излучение проходя сквозь среду уменьшает свою интенсивность.

Если каким-то образом изменить распределение частиц по уровням так чтобы выполнялось условия: $g_m N_n < g_n N_m$, в таком случае α_ν будет < 0 , а значит излучение проходя сквозь среду будет усиливаться. Т.е. среда становится усилителем электромагнитного излучения. В такой среде индуцированное



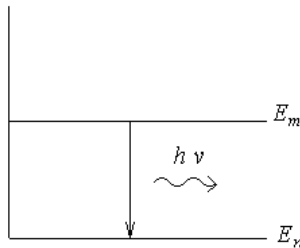
излучение преобладает над поглощением (населенность N_m всегда больше N_n). Такая ситуация называется инверсия населенности. А среда в которой наблюдается инверсия населенности называется оптически активной средой и средой с отрицательной температурой.

Спонтанное и вынужденное излучение:

1-ый тип спонтанный.

Пусть атом или молекула находятся в возбужденном состоянии на уровне m и обладает энергией E_m , такое возбужденное состояние не устойчивое.

Спустя некоторое время частица самостоятельно переходит в нижнее не возбужденное состояние n , при этом излучается квант энергии: $h\nu = E_m - E_n$.



Такой переход называется самопроизвольный (спонтанный). Этот переход случайный, следовательно, случайной будет и фаза перехода, а значит случайными будут направление излучения и расположение плоскости поляризации. Т.е. спонтанный переход – это излучение некогерентное и неполяризованное.

Излучение числа возбужденных атомов при спонтанном переходе подчиняется экспоненциальному закону:

$$N_m = N_n e^{-\frac{t}{\tau_{mn}}}$$

τ_{mn} - оптическое время жизни уровня m по отношению к переходу с m на n .

τ_{mn} связано с величиной $A_{mn} = \frac{1}{\tau_{mn}}$ - определяет среднее число квантов испускаемых при переходе с m уровня на n в расчете на одну частицу за единицу времени.

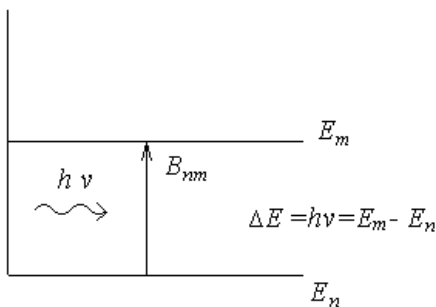
Величина A_{mn} - называется вероятностью спонтанного излучения.

Число фотонов в спонтанном излучении: $Z_{mn}^c = A_{mn} \cdot N_m$.

Величина вероятности спонтанного перехода не зависит от плотности энергии падающей на вещество или вещества.

2-ой тип – вынужденные переходы

Атом находится на нижнем уровне n , на него падает внешнее излучение в результате чего атом совершает переход на высший уровень, поглощая квант энергии - этот процесс называется вынужденным поглощением.



Все вынужденные процессы зависят от мощности внешнего излучения. В качестве накачки может выступать свет. Вводим характеристику внешнего излучения ρ – плотность энергии внешнего излучения, т.е. величина световой энергии в единице объема.

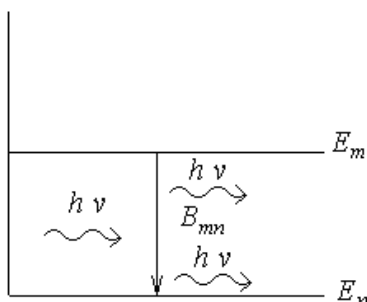
Тогда количество поглощенных квантов:

$Z_{nm}^a = B_{nm} \rho N_n$ - число переходов под действием внешнего излучения.

B_{nm} - постоянная перехода с уровня n на m под действием внешнего излучения.

Если атом находится на высшем уровне m и на систему падает внешнее излучение, частотой ν , то под действием излучения атом переходит на нижний уровень n , излучая квант энергии $\Delta E = E_m - E_n$.

Число квантов излученных под действием излучения: $Z_{mn}^a = B_{mn} \rho N_m$



Излученный фотон идентичен фотону падающему на этот атом, говорят что вторичный фотон является точной копией первичного, поэтому эти фотоны когерентны.

Коэффициенты A_{mn} , B_{nm} , B_{mn} – называются коэффициентами Эйнштейна.

Эти коэффициенты используются в теории теплового излучения, для объяснения модели абсолютно черного тела. Тепловое излучение является равновесным. Для него характерен принцип детального равновесия – это закон сохранения по количеству переходов.

$$Z_{mn}^C + Z_{mn}^{\dot{a}} = Z_{nm}^{\dot{a}} - \text{принцип детального равновесия.}$$

1.2 Принцип работы лазера

- распространение электромагнитной волны в тонком слое активного вещества;
- формула определения изменения числа фотонов в данном тонком слое;
- поперечное сечение перехода;
- условие инверсии населенности уровней;
- определение активной среды;
- определение лазера, отличие от мазера;
- условие при котором усилитель превращается в генератор;
- потери в лазеры, виды потерь;
- пороговая инверсия населенностей.

1.3 Схемы накачки

- описание процессов происходящих в двухуровневой системе;
- описание невозможности создания инверсии населенности в двухуровневой системе;
- описание трехуровневой системы накачки;
- описание четырехуровневой системы накачки;
- преимущество четырехуровневой системы перед трехуровневой.

1.4 Типы лазеров

- классификация лазеров по типу активного вещества;
- классификация лазеров по длине волны генерации;
- классификация лазеров по мощности излучения;
- классификация лазеров по длительности излучения.

1.5 Материалы применяемые в качестве активных сред в лазерах

Активные вещества твердотельных лазеров: Активные твердые вещества могут иметь кристаллическое или аморфное строение. Активный кристалл состоит из основы (матрицы) и примеси замещения. Атомы (ионы) примеси под воздействием периодического поля кристаллической решетки приобретают свойства оптически активных центров, поэтому примесь называется активатором. Атомы активатора должны быть равномерно распределены в узлах решетки, замещая атомы матрицы.

Основные требования к матрице:

- минимальные потери энергии, обусловленные собственным и примесным поглощением на частотах накачки и генерации;
- высокая теплопроводность;
- отсутствие неоднородностей и механических локальных напряжений;
- максимальная прочность, термическая и химическая стойкость;
- устойчивость к ультрафиолетовому облучению со стороны лампы накачки.

Основные требования к активатору:

- структура спектра должна отвечать требованиям трех- или четырехуровневой системы, побочные линии поглощения должны отсутствовать;
- метастабильный уровень должен обладать максимальным временем жизни и узкой линией люминесценции, не более нескольких сантиметров в минус первой степени;

-полоса поглощения должна быть по возможности широкой;
-частота поглощения накачки не должна значительно превышать частоту полезного излучения.

Кристаллические активные вещества:

1. Кислородные соединения. В эту группу входят окислы элементов III группы таблицы Менделеева, вещества на основе кислородных соединений элементов IV, V и VI групп, а также некоторые другие, например SiO_2 (кварц), ZnO и MgO .

2. Окислы элементов III группы.

Рубин — $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Cr^{3+}) — кристаллическая матрица α -корунда ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), часть узлов которой замещена ионами хрома (Cr^{3+}). Радиусы ионов хрома и ионов алюминия близки по величине, что обуславливает относительно небольшие искажения решетки при замещении атома матрицы атомом примеси.

Гранаты — это соединения, отвечающие формуле $A_3B_5O_{12}$ или $A_3B_2(\text{BO}_4)_3$, имеющие кубическую решетку структурного типа граната. Здесь буква A — это ионы иттрия или лантанидов, B — алюминий, галлий, железо, индий, хром и др. Наибольшее распространение в лазерах имеет иттрий-алюминиевый гранат (YAG) с неодимом, имеющий формулу $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (Cr^{3+} , Nd^{3+}). Неодим и хром входят в матрицу иттрия в виде ионов замещения. Концентрация неодима составляет 1,3...1,5%, а хрома — 1%. Теплопроводность примерно в полтора раза меньше, чем у рубина.

3. Окислы редкоземельных элементов.

Практическое применение получили окислы лантана с примесью неодима La_2O_3 (Nd^{3+}), гадолиния с примесью неодима — Gd_2O_3 (Nd^{3+}), эрбия — Er_2O_3 (Ho^{3+} , Tm^{3+}). Окись иттрия — Y_2O_3 (Nd^{3+} , Eu^{3+}).

4. Материалы на основе кислородных соединений элементов V группы.

К этой группе относятся *ванадаты* с матрицами Ca_2VO_4 , YVO_4 , GdVO_4 , LaVO_4 , $\text{Th}_2\text{Ln}(\text{VO}_4)_3$ и примесями Nd , Eu , Tb , Dy , Er и др., *ниобаты* и *фосфаты*. Ниобаты кальция $\text{Ca}(\text{NbO}_3)_2 \times (\text{Nd}^{3+}, \text{Ho}^{3+}, \text{Pr}^{3+}, \text{Er}^{3+}, \text{Tr}^{3+})$ и лития LiNbO_3 (Nd^{3+}) обладают хорошими характеристиками вынужденного излучения в диапазоне волн 1,04...2,047 мкм. Ниобаты переходных металлов и двойные ниобаты (типа $\text{Ba}_2\text{NaNb}_3\text{O}_{15}$) широко используются в качестве неактивных материалов для модуляции и умножения частоты, так как они обладают хорошими электрооптическими нелинейными свойствами.

5. Материалы на основе кислородных соединений элементов VI группы. К этой группе материалов относятся *вольфраматы* и *молибдаты*. Вольфраматы имеют матрицы CaWO_4 , SrWO_4 и $\text{Na}_{0,5}\text{Cd}_{0,5}\text{WO}_4$. Они легированы соответственно элементами Nd^{3+} , Pr^{3+} , Tm^{3+} , Ho^{3+} , Er^{3+} , Dy^{3+} ; Nd^{3+} и Nd^{3+} . Наиболее широко применяется вольфрамат на основе CaWO_4 , так как он имеет малый порог возбуждения и дает возможность осуществлять непрерывную генерацию при 300 К. Молибдаты имеют матрицы CaMoO_4 , SrMoO_4 , GdMoO_4 , PbMoO_4 , NaLaMoO_4 , $\text{NaNd}(\text{MoO}_4)_2$ и $\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$. Все они легируются неодимом, так что полная химическая структура кристаллов имеет следующий вид: GdMoO_4 (Nd^{3+}), PbMoO_4 (Nd^{3+}) и т. д. Наибольшее применение нашли кристаллы CaMoO_4 (Nd^{3+}) и SrMoO_4 (Nd^{3+}). Молибдаты обладают хорошей теплопроводностью. Уровень легирования неодимом составляет 1...1,5%. Длина волны излучения у молибдата кальция — 1,067 мкм, у молибдата стронция — 1,0645 мкм (при 300 К).

6. Фтористые соединения. В качестве матриц используются фториды щелочноземельных металлов (CaF_2 , SrF_2 , MgF_2 , BaF_2 , а в качестве активаторов — ионы урана (U^{3+}), некоторые лантаниды, например Sm^{2+} , Dy^{2+} , Tm^{2+} , и некоторые другие элементы, например Nd^{3+} , Ni^{2+} , Co^{2+} .

Аморфные активные вещества:

К твердым телам аморфного строения относится стекло, поскольку взаимное расположение атомов (ионов) в стекле характеризуется ближним порядком, тогда как дальний порядок отсутствует. Стеклами называют неорганические термопластические материалы на основе ковалентно связанной сетки полиэдров анионов $(\text{SiO}_4)^{4-}$, $(\text{BO}_3)^{4-}$,

$(\text{BO}_3)^{3-}$, $(\text{PO}_4)^{3-}$. Компонентами стекла являются кварцевый песок, сода, поташ, известняк, доломит, бура и окислы различных металлов (свинца, цинка, алюминия, бария, титана).

Активные вещества жидкостных лазеров: Жидкие активные вещества имеют ряд преимуществ по сравнению с твердыми. Жидкость можно сделать совершенно однородной в большом объеме, что позволяет существенно увеличивать предельный уровень энергии излучения. Осуществив циркуляцию жидкости в кювете, можно улучшить отвод тепла. Жидкости обладают постоянными оптическими характеристиками, кроме того, они изотропны. В случае необходимости отработанный объем жидкости легко заменить свежим. Кроме того, жидкие активные вещества дешевы. Важным преимуществом жидкостных лазеров является непрерывная перестройка частоты излучения в относительно широком диапазоне.

Жидкие активные среды подразделяются на три группы: растворы диоксидов редкоземельных элементов в органических растворителях; растворы органических красителей; растворы неорганических соединений редкоземельных элементов. Наибольший эффект при работе в лазерах дают растворы органических красителей, особенно раствор родамина (6G) в этиловом спирте. Родамин относится к группе так называемых ксантеновых красителей.

Активные вещества полупроводниковых лазеров: Наиболее широкое применение получил арсенид галлия. Наиболее эффективными донорами являются селен и теллур, а акцепторами — цинк и кадмий. При концентрации донорной примеси, превышающей 10^{17} см^{-3} примесная зона смыкается с дном зоны проводимости. При концентрации меньшей 10^{15} см^{-3} примесная зона вырождается в примесный уровень, отделенный от дна зоны проводимости энергетической щелью шириной 0,008 эВ.

С целью уменьшения длины волны излучения необходимо создать p — n -структуру с более широкой запрещенной зоной. Это достигается в гетероструктурах типа GaAs — $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ или GaAs — $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$.

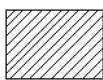
Активные вещества газовых лазеров: Активным веществом может быть газ нейтральных атомов, газ ионов и газ молекул. В атомных газоразрядных лазерах используются соударения I рода (упругие соударения) электронов с атомами газа (Ne, Ar, Cr, Xe) и с атомами в парах металлов (Cu, Pb, Mn). Кроме того, используются соударения II рода в процессе передачи энергии от атома одного элемента (например, Ne) атому другого (например, Ne), причем атомы находятся в возбужденном состоянии. Важным условием при этом является равенство энергий метастабильного уровня атома активатора и возбужденного уровня атома, разряжающегося с излучением. Представителем лазеров с ионной активной газовой средой является аргонный лазер. Ионизация атомов Ar происходит в дуговом разряде, при давлении 400... 550 Па. В лазерах, работающих на молекулярном газе, излучение обусловлено квантовыми переходами между электронными, колебательными и вращательными уровнями. Используются молекулы N_2 , O_2 , H_2 , CO, CO_2 и др.

1.6 Свойства лазерного излучения

Лазерное излучение ОКГ отличается от существующих электромагнитных излучений оптического диапазона и имеет некоторые специфические свойства, присущие только ОКГ.



1 – субмиллиметровая область, 2 – ИК-излучение, 3 – видимая область, 4 – УФ, 5 – область рентгеновского излучения, 6 – область γ – излучения, 7 – космические лучи.



- лазерное излучение, оно охватывает 1, 2, 3, и 4 области электромагнитного спектра. В остальной части этого диапазона возможность получения генерации лазерного излучения доказана пока лишь теоретически.

Лазерное излучение обладает свойствами как волн, так и частиц.

Основными свойствами лазерного излучения, обеспечивающими самое широкое применение лазеров в различных областях науки и техники, являются.

Монохроматичность излучения: Высокая степень монохроматичности лазерного излучения объясняется тем, что стимулированное излучение представляет собой резонансный процесс и вследствие этого привязано к центру полосы частот больше, чем излучение, спонтанно испускаемое обычными источниками излучения. Из сказанного можно заключить, что ОКГ излучает практически на одной фиксированной длине волны. Как было отмечено выше, для лазеров характерен крайне узкий спектр излучения. Однако генерация в них происходит одновременно более чем на одной частоте, вследствие чего получается ряд узких спектральных линий, при этом следует рассматривать ширину полосы частот одной компоненты, обусловленной генерацией данного типа колебаний (модой).

Лазерное излучение не идеально монохроматично, а лишь квазимонохроматично.

Когерентность излучения: Для любой электромагнитной волны можно определить два независимых понятия когерентности, а именно пространственную и временную когерентность. Пространственно когерентными считают источники которые излучают колебания с одинаковыми фазами или с постоянной разностью фаз. Т.о., если выходное излучение по форме близко к плоской волне, и все волновые фронты плоские и перпендикулярны направлению распространения излучения, то оно является пространственно когерентным. Если же выходное излучение обладает высокой степенью монохроматичности, оно является пространственно-когерентным. Если же выходное излучение обладает высокой степенью монохроматичности, оно является когерентным и во времени, т.к. имеется строгое фазовое соответствие между частью волны, излучаемой в данный момент времени, и волной излучаемой спустя некоторый момент времени.

Благодаря свойству пространственной когерентности лазерного излучения возможно создать высокоэффективные мощные лазерные устройства с огромной выходной мощностью излучения.

Направленность излучения: Важным свойством лазерного излучения является его направленность, характеризующаяся расходимостью излучения. Под расходимостью пучка излучения понимают плоский или телесный угол при вершине конуса, внутри которого распространяется заданная доля энергии или мощности пучка излучения.

Высокая направленность излучения лазера достигается за счет самой природы лазерного излучения – его когерентности. Следует также отметить, что угловая расходимость лазерного излучения практически не зависит от размеров излучающего тела. Она ограничивается лишь явлением дифракции когерентных волн на выходном отверстии лазера.

Длительность действия лазерного излучения: Длительность определяется конструкцией лазера. Можно выделить следующие типичные режимы распределения излучения во времени:

- непрерывный режим;
- импульсный режим, длительность импульса определяется при этом длительностью вспышки лампы накачки, типичная длительность $\Delta\tau_{\text{л}} \sim 10^{-3} \text{ с}$;

- режим модуляции добротности резонатора (длительность импульса излучения определяется превышением накачки над порогом генерации и скоростью и скоростью включения добротности, типичная длительность лежит в интервале $10^{-9} - 10^{-8}$ с, это так называемый наносекундный диапазон длительностей излучения);

- режим синхронизации и продольных мод в резонаторе (длительность импульса излучения $\Delta\tau_L \sim 10^{-11}$ с – пикосекундный диапазон длительностей излучения);

- различные режимы принудительного укорочения импульсов излучения ($\Delta\tau_L \sim 10^{-12}$ с).

Плотность мощности излучения: Лазерное излучение может быть сконцентрировано в узконаправленном луче с большой плотностью мощности. Плотность P_s мощности излучения определяется отношением мощности излучения, проходящего через сечение лазерного пучка, к площади сечения и имеет размерность Вт см^{-2} .

1.7 Применение лазеров.

Применение в физике и химии: Изобретение и последующие разработки лазеров опирались на фундаментальные исследования в области физики и химии.

В физике использование лазеров, с одной стороны, привело к открытию совершенно новых областей исследования, а с другой — в огромной степени способствовало развитию некоторых уже существующих. Следует также признать, что излучения с веществом сами составляют развивающиеся направления исследования в физике. Особенно интересным примером является нелинейная оптика.

В физике и химии важную роль играют измерения характеристик различных сред после того, как они подверглись воздействию коротких световых импульсов. Эти измерения требуют высокого разрешения во времени. Благодаря использованию таких импульсов можно выполнять измерения быстропротекающих процессов с высоким разрешением во времени, что приводит к новым возможностям для исследования широкого круга явлений. Поскольку в физике, химии и биологии многие важные процессы протекают в пикосекундном диапазоне, то применение лазеров приводит к новым достижениям.

Еще одна область исследований — лазерная спектроскопия, позволяющая проводить спектроскопические измерения с разрешающей способностью, которая на много порядков превышает разрешение, достигаемое с помощью обычных спектроскопических методов.

В химии лазеры применяются как в целях диагностики, так и для получения необратимых химических изменений. Методы резонансного комбинационного рассеяния и когерентного антистоксового рассеяния дают важную информацию о структуре и свойствах многоатомных молекул, концентрации различных молекулярных соединений (исследование процессов сгорания в пламени и плазмы).

Наиболее интересным химическим применением лазера является фотохимия — разделение изотопов.

Применение в биологии и медицине: В биологии и медицине лазеры получают все большее распространение. Здесь они опять-таки могут использоваться либо для целей диагностики, либо для получения необратимых изменений в биомолекулах, клетках или тканях (лазерная фотобиология и лазерная хирургия).

Диагностика

1) флуоресценция, вызванная действием сверхкоротких лазерных импульсов в молекулах ДНК, в комплексах пигмент-ДНК и в пигментах, участвующих в фотосинтезе;

2) резонансное комбинационное рассеяние для изучения биомолекул;

3) фотокорреляционная спектроскопия для получения информации о структуре и степени агрегации различных биомолекул;

Необратимые изменения

Лазеры используются для создания необратимых изменений в биомолекуле или части клетки. Основная цель этого метода состоит в том, чтобы выяснить, как влияет на функционирование клетки ее повреждение на некотором конкретном участке, вызванное лазерным излучением.

В медицине лазеры используются:

- 1) лазерная хирургия;
- 2) в офтальмологии;
- 3) лазерная флуоресцентная бронхоскопия.

Обработка материалов: Благодаря высокой интенсивности, достигаемой в фокальном пятне лазерного пучка большой мощности, лазеры нашли многочисленные применения в технологии и при обработке материалов, например при сварке, резке, сверлении, поверхностной обработке и легировании.

Оптическая связь: Применение лазеров в открытой (без использования волновода) связи ограничилось двумя случаями. Одним из них является осуществление космической связи между двумя спутниками или между спутником и наземной станцией, расположенной в особо благоприятных климатических условиях. Весьма привлекательным в области оптической связи является в настоящее время использование оптических волноводов.

Измерения и контроль: Такие свойства лазеров, как направленность, яркость и монохроматичность, сделали их весьма полезными для множества методов измерения и контроля в промышленности при управлении станками и в гражданском строительстве.

Применение:

- 1) юстировка (в самолетостроении и в гражданском строительстве);
- 2) выравнивание конструкций (в самолетостроении и в гражданском строительстве);
- 3) измерения расстояний;
- 4) для измерения скорости жидкостей и твердых тел;
- 5) измерения концентрации различных загрязнений в атмосфере.

Термоядерный синтез: Осуществление термоядерного синтеза и использование его в мирных целях позволят человечеству получить неограниченный источник энергии. Главная проблема при производстве энергии путем термоядерного синтеза заключается в том, чтобы получить и затем удержать плазму, состоящую из тяжелых изотопов водорода. Лазеры позволяют осуществлять инерциальное удержание плазмы, поскольку лазерное излучение может обеспечить быстрый разогрев плазмы. Лазер, с помощью которого можно осуществить управляемый лазерный термоядерный синтез, должен иметь длину волны между 250 и 2000 нм, энергию импульса $(1—3) \cdot 10^6$ Дж, длительность импульса $(5—10) \cdot 10^{-9}$ с и, следовательно, пиковую мощность >200 ТВт.

Применения в военных целях:

- 1) лазерные дальномеры;
- 2) лазерные целеуказатели;
- 3) оружие направляемой энергии.

Голография: В научных приложениях используется голографический метод, который позволяет записывать и измерять напряжения и вибрации трехмерных объектов — голографическая интерферометрия (плюс дефектоскопия и составление различных контурных карт различных объектов).

Модуль 2 «Взаимодействие излучения с атомами и ионами»

Цель – изучить основные процессы взаимодействия электромагнитного излучения с веществом.

Задачи – изучить основы теории излучения черного тела, механизмы уширения, процессы безызлучательной передачи энергии.

2.1 Основы теории излучения черного тела

- распространение электромагнитной волны в полости;
- формула объемной плотности энергии излучения;
- волновое уравнение для электрического поля прямоугольной полости;
- решение волнового уравнения – мода полости;
- уравнение Гемгольца;
- формула частоты моды;
- формула числа резонансных мод;
- закон Релея-Джинса и формула Планка для теплового излучения;
- гипотеза планка и квантование поля.

2.2 Спонтанное излучение

- полуклассический подход (волновая функция состояний атома, электрический дипольный момент атома, осциллирующая составляющая дипольного момента атома, электрический дипольный момент перехода атома, излучательное время жизни атома, вероятность спонтанного излучательного перехода);
- квантово-электродинамический подход;
- разрешенные и запрещенные переходы.

2.3 Поглощение и вынужденное излучение

- вероятности поглощения и вынужденного излучения;
- вид нормированной функции;
- равенство величин вероятностей поглощения и вынужденного излучения;
- разрешенные и запрещенные переходы;
- правила отбора;
- сечение и коэффициенты поглощения и усиления для перехода;
- линия с нормированным гауссовым контуром;
- термодинамическое описание Эйнштейна.

2.4 Механизмы уширения линий

- определение механизма уширения линии поглощения и излучения;
- классификация механизмов уширения;
- однородное уширение – столкновительный механизм;
- однородное уширение – спонтанный механизм;
- неоднородное уширение – доплеровский механизм;
- неоднородное уширение – эффект Штарка.

2.5 Безызлучательные переходы и передача энергии

- классификация безызлучательных переходов;
- описание процесса столкновительной дезактивации;
- передача энергии за счет диполь-дипольного взаимодействия;
- совместное проявление спонтанных излучательных и безызлучательных процессов.

2.6 Уровни с вырожденными или сильно связанными подуровнями

- вырожденные подуровни;
- сильносвязанные подуровни.

2.7 Насыщение

- определение процесса насыщения;
- насыщение поглощения: однородно уширенная линия;
- насыщение усиления: однородно уширенная линия;
- неоднородно уширенная линия.

2.8 Люминесценция в оптически плотной среде

- захват излучения;
- усиленное спонтанное излучение.

Модуль 3 «Распространение лучей и волн в оптических средах»

Цель – изучить основные процессы распространения лучей и волн некоторых оптических средах и элементах

Задачи – ознакомиться с матричным представлением геометрической оптики, с основными законами дифракционной оптики, гауссовыми пучками.

3.1 Матричное представление геометрической оптики

Для сферического резонатора запишем условия устойчивости. Преобразование величины x_n и θ_n через x_0 и θ_0 выражается:

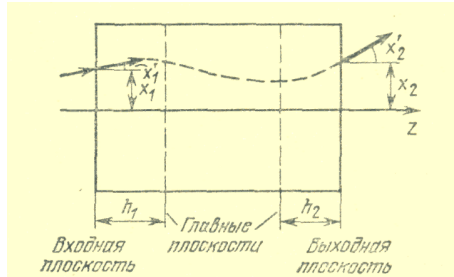
$$\begin{pmatrix} x_n \\ \theta_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ \theta_0 \end{pmatrix} \quad \begin{cases} x_n = Ax_0 + B\theta_0 \\ \theta_n = Cx_0 + D\theta_0 \end{cases}$$

Лучевая матрица $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$ - матрица передачи связывает параметры x_0 и θ_0 входящего луча с параметрами выходящего x_n и θ_n .

Матрицей передачи описывается распространение параксиальных лучей через линейную оптическую систему.

Параксиальными называются лучи, образующие малые углы с оптической осью системы.

Матричные элементы обычно удовлетворяют соотношению $AD - BC = 1$ и связаны с фокусным расстоянием системы и координатами ее главных плоскостей.



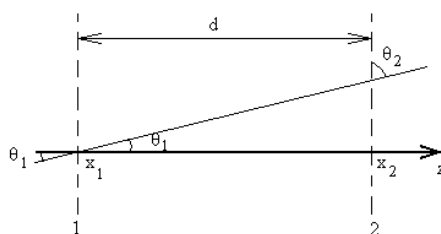
$$f = -\frac{1}{C}; \quad h_1 = \frac{(D-1)}{C}; \quad h_2 = \frac{(A-1)}{C}$$

h_1, h_2 - расстояния главных плоскостей системы от входной и выходной плоскостей.

Рассмотрим матрицы передачи для систем простейших оптических систем:

1) матрица передачи - $\begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ - описывает

распространение лучей на расстояние d в свободном пространстве.



При прохождении среды преломления нет:

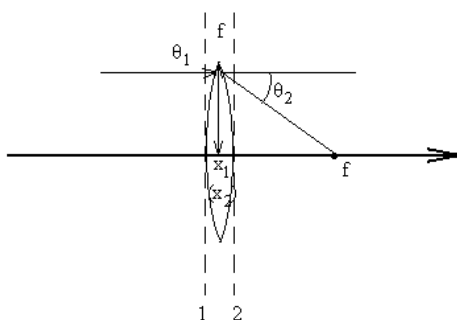
$$\theta_2 = \theta_1.$$

$$\begin{cases} x_2 = Ax_1 + B\theta_1 \\ \theta_2 = Cx_1 + D\theta_1 \end{cases} \Rightarrow \theta_2 = Cx_1 + D\theta_1, \text{ где } C=0, D=1.$$

$$\Rightarrow x_2 = x_1 + d\theta_1, \text{ где } \tan \phi_1 = \theta_1. \Rightarrow A=1, B=d.$$

2) матрица передачи - $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix}$ -

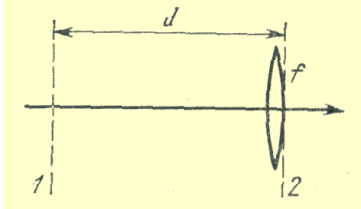
прохождение лучей через тонкую линзу с фокусным расстоянием f . Входной и выходной плоскостями в этом случае являются вертикальные плоскости, проходящие через крайние левую и правую точки линзы.



Вводится правило: если угол отсчитывается против часовой стрелки – знак «плюс», если по часовой стрелке – знак «минус».

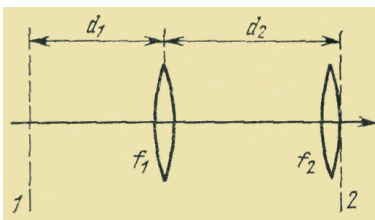
Если $\theta_1 = 1$ (параллельно оси линзы), введем фокус линзы f . Угол θ_2 – отрицательный. Центр линзы находится на оси, поэтому $x_1 = x_2$. Следовательно:

$x_2 = Ax_1 + B\theta_1$, где $a=1$, $B=0$. $tg\theta_2 = -x/f$, x – всегда постоянно ($x=1$), следовательно, $tg\theta_2 = \theta_2 = -\frac{1}{f}$, откуда $\theta_2 = -\frac{1}{f}x_1 + 1 \cdot \theta_1$.



3) матрица передачи - $\begin{pmatrix} 1 & d \\ -1/f & 1-d/f \end{pmatrix}$ - является

произведением матриц 2 и 1 и описывает последовательное прохождение лучей сначала через свободное пространство, а затем через тонкую линзу. При обратном ходе лучей диагональные матричные элементы меняются местами.

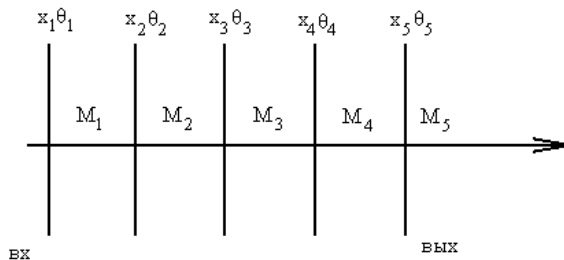


4) матрица передачи -

$$\begin{pmatrix} 1 - d_2/f_1 & d_1 + d_2 - \frac{d_1 d_2}{f_1} \\ -\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} + \frac{d_2}{f_1 f_2} & 1 - \frac{d_1}{f_1} - \frac{d_2}{f_2} - \frac{d_1}{f_2} + \frac{d_1 d_2}{f_1 f_2} \end{pmatrix} - \text{описывает}$$

последовательное прохождение лучей через две системы

предыдущего типа.



В случае когда есть проход через разные системы:

$$\begin{pmatrix} x^* \\ \theta^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{ВЫХОД} \\ \text{ВХОД} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix}$$

Расчет обобщенной матрицы

начинается с системы перед выходными системами.

$$\begin{pmatrix} x^* \\ \theta^* \end{pmatrix} = M_5 \cdot \begin{pmatrix} x_5 \\ \theta_5 \end{pmatrix} = \dots = M_5 \cdot M_4 \cdot M_3 \cdot M_2 \cdot M_1 \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix},$$

где $M_5 \cdot M_4 \cdot M_3 \cdot M_2 \cdot M_1 = M^*$

$$\begin{pmatrix} x^* \\ \theta^* \end{pmatrix} = M^* \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix}$$

3.2 Отражение и пропускание волн на границе раздела диэлектриков

- описание прохождения электромагнитной волны через границу раздела двух диэлектрических сред с разными показателями преломления;
- формула коэффициента отражения;
- выражение для угла Брюстера.

3.3 Многослойные диэлектрические покрытия

- условия создания многослойных диэлектрических покрытий и их применение в лазерной технике;
- формула для коэффициента отражения для многослойного покрытия.

3.4 Интерферометр Фабри-Перо

- описание устройства интерферометра;
- формула для напряженности электрического поля внутри интерферометра;
- формула коэффициента пропускания интерферометра;
- зависимость коэффициента пропускания от частоты падающей волны;
- добротность интерферометра и острота полос;
- интерферометр как спектрометр.

3.5 Дифракционная оптика в параксиальном приближении

- распространение электромагнитной волны между зеркалами интерферометра – скалярное приближение;
- формула интеграла Френеля- Кирхгофа;
- решение уравнений для напряженности электрического поля в параксиальном приближении;
- волновое уравнение в параксиальном приближении;
- интеграл Гюйгенса – Френеля в приближении Френеля.

3.6 Гауссовы пучки

Лазерные пучки во многих отношениях ведут себя как однородные плоские волны. Однако распределение интенсивности в них неоднородно (наибольшего значения интенсивность достигает на оси распространения) и волновой фронт обладает небольшой кривизной. При излучении на основной моде TEM_{00} изменение амплитуды лазерного пучка в любом поперечном сечении описывается гауссовой экспонентой.

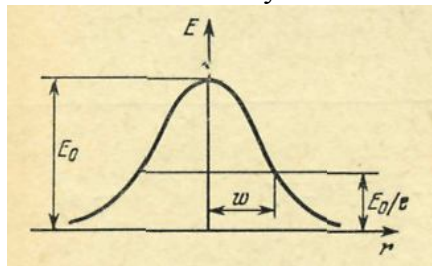


Рис. изменение амплитуды электромагнитного поля по сечению гауссова пучка

$$E = E_0 \exp\left(-\frac{r^2}{w^2}\right)$$

Ширина пучка характеризуется его радиусом w , определяемым как расстояние, на котором амплитуда поля уменьшается в e раз по сравнению с амплитудой на оси пучка.

Гауссов пучок имеет минимальный диаметр $2w_0$ в «перетяжке» пучка, где волновой фронт плоский. По мере удаления от перетяжки пучок расширяется по закону:

$$w^2(z) = w_0^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2 \right]$$

z – расстояние от перетяжки.

Зависимость $w(z)$ показана на рисунке. Расходимость пучка в дальней зоне:

$\theta = \frac{\lambda}{\pi w_0}$. Радиус кривизны волнового фронта изменяется следующим образом:

$$R(z) = Z \left[1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right]$$

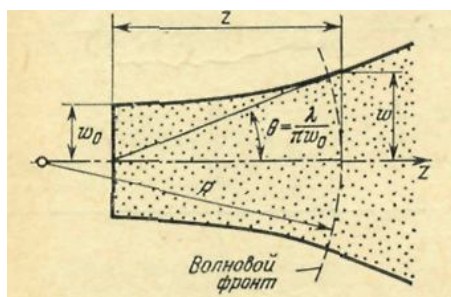


Рис. Контур гауссова пучка.

Модуль 4 «Пассивные оптические резонаторы»

Цель – изучить различные конфигурации резонаторов, законы, описывающие процесс распространения гауссовых пучков

4.1 Типы резонаторов

Под оптическими резонаторами понимают замкнутую полость, состоящую из отражающих поверхностей и содержащую внутри себя однородную, изотропную и пассивную диэлектрическую среду.

Мода резонатора - стационарная конфигурация электромагнитного поля, которая удовлетворяет как уравнениям Максвелла, так и граничным условиям. При этом электрическое поле такой конфигурации можно записать в виде:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = E_0 \vec{u}(\vec{r}) \exp(i\omega t) \quad (4.1)$$

где $\omega/2\pi$ — частота моды.

Лазерные резонаторы характеризуются следующими двумя главными особенностями:

- 1) они, как правило, бывают открытыми, т. е. не имеют боковой поверхности,
- 2) их размеры намного превышают длину волны лазерной генерации.

Данные особенности оказывают значительное влияние на его характеристики.

Если резонатор будет открытым, то это означает существование неизбежных потерь для любой моды резонатора. Эти потери, связанные с дифракцией электромагнитного поля, которая приводит к тому, что часть энергии покидает резонатор, называются *дифракционными*. Таким образом, строго говоря, определение моды в смысле (4.1) нельзя применить к открытому оптическому резонатору, и в таком резонаторе не существует истинных мод (т. е. стационарных конфигураций). Однако в открытых резонаторах в существуют конфигурации типа стоячих электромагнитных волн, имеющие очень небольшие потери. При этом мода электромагнитного поля:

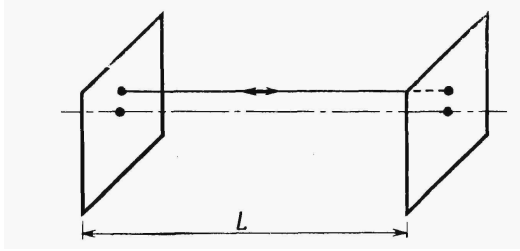
$$E(\vec{r}, t) = E_0 \vec{u}(\vec{r}) \exp\left[\left(-\frac{t}{2\tau_c}\right) + i\omega t\right] \quad (4.2)$$

τ_c – время жизни фотона в резонаторе.

В открытом резонаторе лишь очень немногие моды, соответствующие суперпозиции волн, распространяющихся почти параллельно оси резонатора, будут иметь достаточно низкие потери, чтобы стала возможной генерация. Все остальные моды резонатора соответствуют волнам, которые после одного прохода резонатора почти полностью затухают. Это главная причина, почему в лазерах применяется открытый резонатор.

Плоскопараллельный резонатор (или резонатор Фабри—Перо).

Этот резонатор состоит из двух плоских зеркал, расположенных параллельно друг другу. В первом приближении моды такого резонатора можно представить себе как суперпозицию двух плоских электромагнитных волн, распространяющихся в противоположных направлениях вдоль оси резонатора.



В рамках этого приближения нетрудно получить резонансные частоты, если наложить условие, что длина резонатора L должна быть равной целому числу полуволен, т. е. $L = n(\lambda/2)$, где n — положительное целое число. Такое условие является необходимым для того, чтобы на обоих зеркалах электрическое поле электромагнитной стоячей волны было равным

нулю. Отсюда следует, что резонансные частоты определяются следующим образом:

$$\nu = n\{c/2L\} \quad (2)$$

а) Приближенная теория Шавлова и Таунса для определения резонансной частоты.

Первое упоминание об изучении плоскопараллельного резонатора появилось в классической работе Шавлова и Таунса. Они рассмотрели распространение электромагнитных волн в открытом резонаторе используя аналогию с закрытым прямоугольным резонатором.

В случае прямоугольного резонатора, составляющие напряженности электрического поля:

$$\begin{aligned} E_x &= e_x \cos k_x x \sin k_y y \sin k_z z \sin \omega t, \\ E_y &= e_y \sin k_x x \cos k_y y \sin k_z z \sin \omega t, \\ E_z &= e_z \sin k_x x \sin k_y y \cos k_z z \sin \omega t \end{aligned}$$

где $k_x = l\pi/2a$, $k_y = m\pi/2a$, $k_z = n\pi/L$ (l, m, n — положительные целые числа), а резонансные частоты даются выражением:

$$\nu = (c/2) [(n/L)^2 + (m/2a)^2 + (l/2a)^2] \quad (3)$$

Кроме того, Шавлов и Таунс предположили (что является довольно хорошим приближением), что моды открытого резонатора описываются теми модами прямоугольного резонатора, для которых $(l, m) \ll n$ (открытый резонатор получается из прямоугольного путем удаления боковых поверхностей).

Предполагая, что $(l, m) \ll n$, резонансные частоты плоскопараллельного резонатора можно найти из выражения (3) путем разложения его в степенной ряд:

$$\nu \approx \frac{c}{2} \cdot \left[\frac{n}{L} + \frac{(l^2 + m^2)L}{8na^2} \right] \quad (4)$$

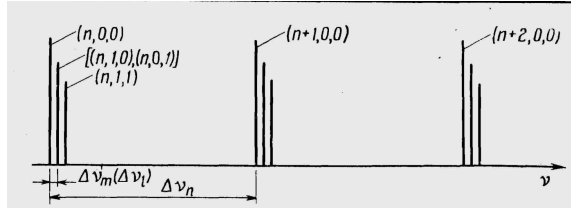
Это выражение можно сравнить с (2), которое было получено из простых соображений в одномерном случае. Таким образом, для каждого набора значений трех величин l, m и n существует вполне определенная мода резонатора с вполне определенной резонансной частотой.

Из выражения (4) можно сразу получить, что разность частот, соответствующих двум модам, с одними и теми же значениями l и m , но с n , отличающимися на 1, равна:

$$\Delta \nu_n = \frac{c}{2L} \quad (5)$$

Эти две моды отличаются одна от другой лишь распределением поля вдоль оси z . Поэтому $\Delta \nu_n$ нередко называют разностью частот между двумя последовательными продольными модами. Разность частот между двумя модами, отличающимися только значениями m на 1 (т. е. разность частот между соседними поперечными модами):

$$\Delta \nu_m = \frac{cL(m + 1/2)}{8na^2} \quad (6)$$



Резонансные частоты плоскопараллельного резонатора

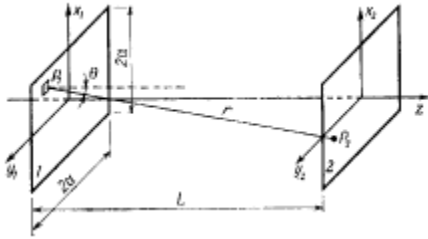
Для типичных значений L величины $\Delta\nu_n$ составляют порядка нескольких сотен мегагерц, тогда как $\Delta\nu_m$ — порядка нескольких мегагерц.

В данном предположении не рассматривали потери в резонаторе и предполагали, что ширина, линий резонансных мод резонатора бесконечно мала. В действительности, как уже указывалось выше, оптические резонаторы имеют неизбежные потери, связанные с дифракцией. С учетом этих потерь мода резонатора определяется выражением (4.2), а это означает, что ширина резонансной линии равна:

$$\Delta\omega_c = 1/\tau_c \quad (7)$$

2) Теория разработанная Фоксом и Ли.

Более строгая теория плоскопараллельного резонатора дана Фоксом и Ли, которые изучали настоящую проблему в скалярном приближении. В этом приближении электромагнитное поле предполагается почти поперечным и однородно поляризованным. При этом поле волны можно записать в виде скалярной величины u , описывающей амплитуду электрического поля. Предположим, что u_1 представляет собой некоторое произвольное распределение поля на зеркале 1.



Тогда благодаря дифракции это распределение вызовет какое-то распределение поля на зеркале 2.

При этом в произвольной точке P_2 зеркала 2 $u_2(P_2)$ дается выражением:

$$u_2(P_2) = -\frac{i}{2\lambda} \int_1 \frac{u_1(P_1) \exp(ikr)(1 + \cos\theta)}{r} dS_1 \quad (8)$$

Интеграл вычисляется по всей поверхности 1.

В этом случае распределение поля на зеркале 2 вычисленное по формуле (8), с точностью до некоторого постоянного множителя должен быть снова равным u .

$$\sigma \cdot u(P_2) = -\frac{i}{2\lambda} \int_1 \frac{u(P_1) \exp(ikr)(1 + \cos\theta)}{r} dS_1 \quad (9)$$

σ — константа.

Собственные решения этого уравнения u определяют распределения поля на зеркалах резонатора, соответствующие его модам.

Если $\sigma = |\sigma| \exp(i\phi)$, то величина ϕ представляет собой запаздывание волны по фазе при распространении ее от одного зеркала до другого.

А 2ϕ — запаздывание по фазе при двойном проходе резонатора и оси будет зависеть от волнового числа k .

Поскольку распределение поля u на зеркалах известно, с помощью уравнения (8) можно вычислить поле в любой точке внутри (стоячая волна) и вне (бегущая волна) резонатора.

При $L \gg a$ и предположить что $\cos\theta \approx 1$ и $r \approx L + \frac{1}{2}L \cdot [(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2]$ и

условии $N \ll L^2/a^2$, N — число Френеля. $N = \frac{a^2}{L\lambda}$.

$N = \frac{\theta_g}{2\theta_d}; \theta_g = \frac{a}{L}$ - геометрический угол под которым одно зеркало видно из центра другого.

$\theta_d \approx \frac{\lambda}{2a}$ - угол дифракционной расходимости.

Таким образом большие числа Френеля означают, что угол дифракционной расходимости мал по сравнению с геометрическим углом.

При выполнении $L \gg a$ и $N \gg L^2/a^2$, следовательно

$$\exp(ikr) \approx \exp[(ikL) + i(\pi N/a^2)[(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2]]$$

А также используя: $\xi = \frac{\sqrt{N}}{a}x$, $\eta = \frac{\sqrt{N}}{a}y$, получим:

$$\sigma^* U(\xi_2, \eta_2) = -i \int_1 U(\xi_1, \eta_1) \exp\{i\pi \cdot [(\xi_1 - \xi_2)^2 + (\eta_1 - \eta_2)^2]\} \cdot d\xi \cdot d\eta \quad (10)$$

где $\sigma^* = \sigma \exp(-ikL)$. (11)

Для зеркал квадратной или прямоугольной формы в уравнение (10) можно разделить переменные:

$$U(\xi, \eta) = U_\xi(\xi) \cdot U_\eta(\eta),$$

$$\sigma^* = \sigma_\xi^* \cdot \sigma_\eta^*$$

$$\text{Или } U_{ml}(\xi, \eta) = U_{\xi m}(\xi) \cdot U_{\eta l}(\eta), \quad \sigma_{ml}^* = \sigma_{\xi m}^* \cdot \sigma_{\eta l}^* \quad (12)$$

m, l – модовые индексы.

В соответствии с представлением (12) полное распределение поля $U_{ml}(x, y)$ можно записать в виде произведения $U_m(x)U_l(y)$. Мода, которая соответствует случаю, когда как $U(x)$, так и $U(y)$ определяются решениями низшего порядка: $m = l = 0$, называется модой ТЕМ₀₀. Мода ТЕМ₀₁ получается, когда $U(x)$ представляет собой решение низшего порядка ($m = 0$) и $U(y)$ — решение следующего более высокого порядка ($l=1$). Lkz vjls ТЕМ₁₀ получается обратное соответствие.

Буквы ТЕМ означают поперечное электрическое и магнитное поле (аббревиатура англ. слов: transverse electric and magnetic). Для этих мод как электрическое, так и магнитное поле электромагнитной волны ортогонально оси z резонатора.

Резонансные частоты можно получить, если приравнять фазу величины σ целому числу, умноженному на π . Таким образом, используя выражение (11), получаем:

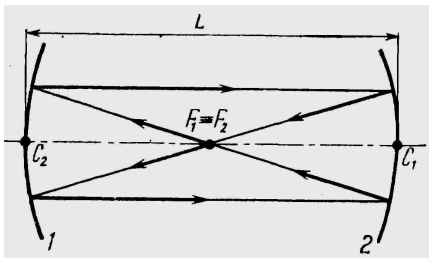
$$kL + \phi_{m,l}^* = n\pi$$

Фаза ϕ^* собственного значения σ^* зависит от модовых индексов m и l . Заметим, что, поскольку волновое число k зависит только от длины волны λ , фаза ϕ^* зависит как от длины волны λ , так и от модовых индексов m и l . Поэтому данное уравнение позволяет вычислить резонансные длины волн λ в виде функций от модовых индексов n , l и m . Результаты численного расчета σ^* , выполненного Фоксом и Ли, подтверждают, что для достаточно больших чисел Френеля ($N > 10$) значения резонансных частот,

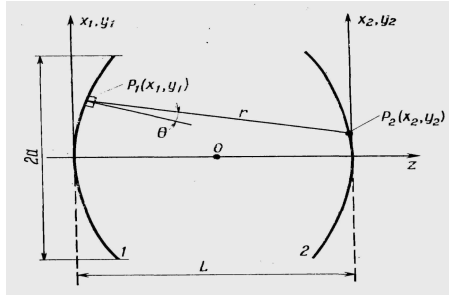
предсказываемых, соотношением (4), подтверждают достаточную точность приближения, использованного этими авторами.

Конфокальный резонатор

Он состоит из двух сферических зеркал, имеющих одинаковые радиусы кривизны R и расположенных на расстоянии L друг от друга таким образом, что фокусы зеркал F_1 и F_2 совпадают.



Отсюда следует, что центр кривизны C одного зеркала лежит на поверхности второго зеркала (т. е. $L = R$).



Бойд и Гордон разработали теорию конфокального резонатора в скалярном приближении.

Рассмотрим резонатор длиной L , причем одну зеркальную поверхность будем описывать в системе координат (x_1, y_1) , а другую — в системе координат (x_2, y_2) . Пусть оба зеркала имеют квадратное поперечное сечение со стороной квадрата $2a$.

В рамках скалярного приближения собственные решения даются выражением (9). В случае, когда $L \gg a$, $\cos \theta \approx 1$ и $r \approx L - \frac{1}{L}(x_1 x_2 + y_1 y_2)$. Аналогично и в предыдущем случае получим:

$$\sigma^* U(\xi_2, \eta_2) = -i \int_1 U(\xi_1, \eta_1) \exp[-2i\pi(\xi_1 \xi_2 + \eta_1 \eta_2)] \cdot d\xi_1 \cdot d\eta_1 \quad (13)$$

где σ^* определяется выражением (11).

Решением этого уравнения являются:

$$\sigma_\xi^* U_\xi(\xi_2) = \exp\left[-\frac{i\pi}{4}\right] \cdot \int_{-\sqrt{N}}^{+\sqrt{N}} U_\xi(\xi_1) \exp(-i2\pi\xi_1 \xi_2) \cdot d\xi_1 \quad (14)$$

$$\sigma_\eta^* U_\eta(\eta_2) = \exp\left[-\frac{i\pi}{4}\right] \cdot \int_{-\sqrt{N}}^{+\sqrt{N}} U_\eta(\eta_1) \exp(-i2\pi\eta_1 \eta_2) \cdot d\eta_1 \quad (15)$$

Физический смысл этих интегральных уравнений: они являются решениями задачи в случае одномерных зеркал (ленточных).

Уравнения (14) и (15) имеют конечный набор собственных решений, которые мы обозначим индексами m и l , т. е.

$$U_{m,l}(\xi, \eta) = U_{\xi m}(\xi) \cdot U_{\eta l}(\eta) \quad (16)$$

$$\sigma_{ml}^* = \sigma_{\xi m}^* \cdot \sigma_{\eta l}^* \quad (17)$$

Поскольку полная модовая картина определяется выражением (16), отсюда получаем моды низшего порядка:

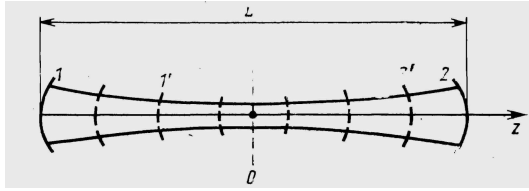
Кроме того, следует заметить, что в отличие от случая плоских волн межмодовое расстояние в частотной области теперь равно $c/4L$. Однако разность частот между двумя соседними продольными модами, равна $c/2L$, т. е. такая же, как и для резонатора с плоскими зеркалами.

Если распределение поля на зеркалах известно, то распределение поля в любой точке внутри резонатора дается выражением:

$$U(x, y, z) = \frac{\omega_0}{\omega(z)} \cdot H_m \cdot \left(\frac{\sqrt{2}x}{\omega(z)}\right) \cdot H_l \cdot \left(\frac{\sqrt{2}y}{\omega(z)}\right) \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2(z)}\right] \times \exp\left\{-i \cdot \left[k \frac{(x^2 + y^2)}{2R(z)} + kz - (l + m + 1)\phi(z)\right]\right\} \quad (19)$$

ω_s - расстояние от центра зеркала на котором амплитуда электромагнитного поля уменьшается в e раз. H_m, H_l - полиномы Эрмита m -го и n -го порядков. $\phi|z|$ - фаза волны.

Если центр резонатора расположить в начале координат,



то диаметр пучка $\omega(z)$, который входит в выражение (19), запишется в виде:

$$\omega(z) = \omega_0 \cdot \left[1 + \left(\frac{2z}{L} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

где ω_0 — диаметр пятна в центре резонатора, определяемый выражением:

$$\omega_0 = \left(L \lambda / 2\pi \right)^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

В плоскости $z = 0$ размер пятна является минимальным. Поэтому величину ω_0 называют размером пятна в *перетяжке пучка*. Следует также заметить, что при $z = \pm L/2$ (т. е. на зеркалах) из выражения (20) имеем:

$$\omega = \left(\frac{L \lambda}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Таким образом, размер пятна на зеркалах в $\sqrt{2}$ раз больше, чем в центре резонатора. (зеркала стремятся сфокусировать пучок в центре резонатора.)

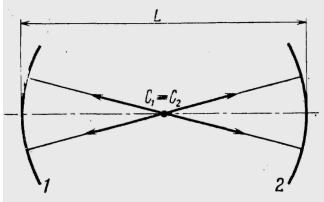
В формулу (19) входит фаза волны и радиус кривизны:

$$R(z) = z \cdot \left[1 + \left(\frac{L}{2z} \right)^2 \right],$$

$$\phi(z) = \arctg \left(\frac{2z}{L} \right).$$

Из (19) следует, что поверхности постоянной фазы с хорошей степенью точности являются сферическими, радиус кривизны равен $R(z)$ (синфазные поверхности).

Обобщенный сферический резонатор



Этот резонатор состоит из двух сферических зеркал, имеющих одинаковые радиусы R_1 и R_2 и расположенных друг от друга на расстоянии L , *центры кривизны зеркал C_1 и C_2 совпадают* (т.е. $L=2R$).

Поскольку величины R_1 и R_2 могут принимать любые значения (либо положительные, либо отрицательные), можно будет составить такую комбинацию зеркал, которая приведет к неустойчивой конфигурации резонатора. В связи с этим необходимо определить условия устойчивости в случае обобщенного сферического резонатора. Введем две безразмерные величины:

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1} \text{ и } g_2 = 1 - \frac{L}{R_2}$$

Для того чтобы вычислить распределение поля, представим себе, что на место синфазных поверхностей $1'$ и $2'$, поместим два зеркала, радиусы кривизны зеркал и синфазных поверхностей совпадают. (т.е. резонатор образован зеркалами $1'$ и $2'$ и распределение поля внутри резонатора не изменится). Соответственно размер пятна и синфазные поверхности как внутри, так и вне резонатора останутся теми же самыми, что и на рисунке. Следует заметить, что синфазные поверхности $1'$ и $2'$ уже не являются конфокальными. Следовательно, Для того чтобы найти моды резонатора, образованного зеркалами $1'$ и $2'$, нам необходимо прежде всего вычислить координаты двух соответствующих конфокальных поверхностей 1 и 2 . При этом задача сводится к задаче об *эквивалентном конфокальном резонаторе*.

Координаты этого резонатора найдем с помощью выражения (22), заменив в нем L на L_e (длину эквивалентного конфокального резонатора). Задавая радиусы кривизны R_1 и R_2 зеркал 1 и 2 и расстояние между ними L , можно вычислить расстояние от перетяжки пучка до одного из двух зеркал и длину L_e эквивалентного конфокального резонатора. Вычислив эти две величины с помощью выражения (19) можно найти распределение поля.

Таким образом, для сферического резонатора:

$$\omega = \omega_0 \left[1 + \left(\frac{2z}{L_e} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (24)$$

$$\omega_0 = \left(\frac{L_e \lambda}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (25)$$

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{L_e}{2z} \right)^2 \right], \quad (26)$$

$$\phi = \arctan \left(\frac{2z}{L_e} \right). \quad (27)$$

Особый интерес представляет случай когда $R_2 = -R_1 = R$ (симметричный резонатор):

$$L_e^2 = (2R - L)L$$

Размер пятна на зеркале:

$$\omega_s' = \left(\frac{\lambda L}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{4R^2}{(2R - L)L} \right]^{\frac{1}{4}}$$

Резонансные частоты:

$$\nu = \frac{c}{2L} \cdot \left(n + (l + m + 1)\pi^{-1} \cdot \arccos(g_1 g_2) \right)^{\frac{1}{2}}$$

Необходимо заметить, что частотное выражение, которое наблюдается в конфокальном резонаторе, в сферическом снимается.

Сферический резонатор имеет следующие недостатки:

- 1) очень небольшой размер пятна в центре резонатора, что может приводить к нежелательным эффектам в лазерах большой мощности,
- 2) высокую чувствительность к несоосности зеркал.

Основные функции резонатора. Принцип положительной обратной связи

- 1) позволяет формировать стоячую электромагнитную волну, т.е. устойчивую конфигурацию электромагнитного поля в пространстве.

- 2) Резонатор монохроматизирует излучение.

- 3) Обеспечивает направленность излучения и малую расходимость.

Принцип положительной обратной связи:

Часть усиленной волны возвращается обратно в активную среду и проходя вновь через эту среду усиливается. При этом:

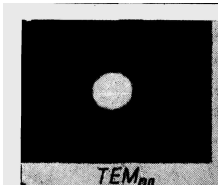
- 1) увеличивается длина активного пути,
- 2) быстрее создается инверсия населенностей.

В результате многократных проходов усиление света будет велико. Когда в среде усиление будет превышать потери, в цепи обратной связи, т.е. в самой среде произойдет самовозбуждение. Это и есть инверсия населенности. А это приводит к появлению вынужденного излучения или говорят достигнут порог генерации. Вынужденное излучение это начало генерации, т.е. среда в которой реализуется принцип положительной-обратной связи превращается в генератор.

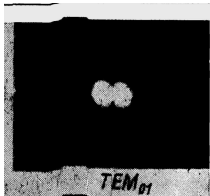
Генератор – это устройство, генерирующее электромагнитную энергию, без поступления энергии.

4.2 Собственные моды и собственные значения. Модовые конфигурации.

1) Мода TEM_{00} ($m = l = 0$)



Эта мода имеет гауссово распределение как в направлении x , так и в направлении y . В данном случае модовая картина представляет собой круглое светящееся пятно на зеркале, причем его размер определяется величиной w_s . Поэтому w_s называют размером пятна на зеркале. Например, в случае $\lambda = 0,6$ мкм и $L = 0,5$ м получаем $w_s \approx 0,3$ мм.

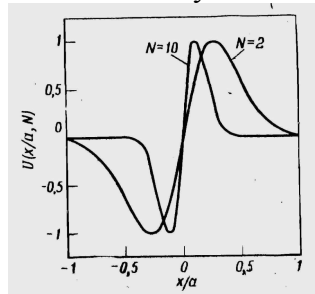


2) Мода TEM_{01} ($m = 0, l = 1$)

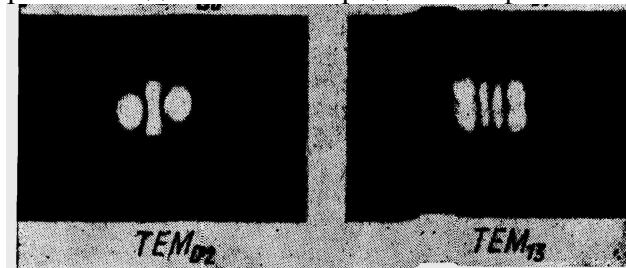
Зависимость поля в направлении оси x такая же, как в направлении y . В направлении оси x – гауссово распределение, в направлении y . Световое пятно, которое образуется на зеркале для этой моды:

3) Мода TEM_{11} ($m=0, l=1$).

В направлении x и y поле распределено по следующей зависимости:



Антисимметричная мода низшего порядка в конфокальном резонаторе



Модовая структура

Резонансные частоты для конфокального резонатора:

$$\nu = c \cdot [2n + (1 + m + l)] / 4L \quad (18)$$

Следует заметить, что моды, характеризующиеся одним и тем же значением суммы $2n + m + l$, имеют одинаковые резонансные частоты, хотя их пространственные конфигурации различны. Говорят, что эти моды являются частотно-вырожденными.

4.3 Время жизни фотона и добротность резонатора

Энергия, которую запасена в резонаторе можно выразить следующим образом. Учитывая, что с течением времени она убывает.

$$W = W_0 e^{-\frac{\omega t}{\theta}},$$

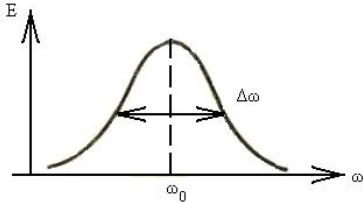
Где W_0 – энергия в начальный момент времени, ω – частота (модовый состав), θ – добротность – величина, которая помогает удерживать энергию в резонаторе.

$$\left| \frac{dW}{dt} \right| = W_0 \frac{\omega}{\theta} e^{-\frac{\omega t}{\theta}}, \quad \text{отсюда} \quad \left| \frac{dW}{dt} \right| = W \frac{\omega}{\theta}, \quad \Rightarrow \quad \theta = W \left(\frac{\omega}{\left| \frac{dW}{dt} \right|} \right) - \text{физическое}$$

определение добротности: добротность прямо пропорциональна отношению энергии запасенной в резонаторе к энергии теряемой в единицу времени умноженной на частоты.

Добротность также характеризует скорость потерь энергии.

Обозначим через τ – время в течении которого энергия в резонаторе убывает в e раз.



$$W = W_0 e^{-\frac{\omega \tau}{\theta}} = \frac{W_0}{e} \Rightarrow \frac{\omega \tau}{\theta} = 1, \Rightarrow \tau = \frac{\theta}{\omega}.$$

τ – время жизни фотона в резонаторе.

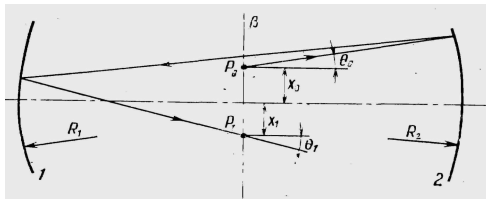
Из оптики: каждый переход характеризуется спектральной кривой распределения:

$\Delta \omega_{\text{рез}}$ – ширина спектральной линии.

$$\tau = \frac{1}{\Delta \omega_{\text{ддс}}}; \quad \frac{1}{\omega_{\text{ддс}}} = \frac{\theta}{\omega}, \Rightarrow \theta = \frac{\omega}{\omega_{\text{ддс}}}.$$

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda} = \frac{\omega}{d\omega} - \text{разрешающая способность в резонаторе.}$$

4.4 Критерий устойчивости резонатора



Условие устойчивости сферического резонатора можно получить исходя из приближения геометрической оптики.

Рассмотрим луч, выходящий из точки P_0 некоторой главной плоскости β расположенной внутри резонатора. Этот луч, после того как он отразится от зеркал 1 и 2, пересечет плоскость β в точке P_1 .

Пусть X_0 и X_1 – координаты точек P_0 и P_1 , отсчитываемые от оси резонатора, а через θ_0 и θ_1 – углы, которые соответствующие лучи образуют с осью резонатора. При небольших x и θ с помощью линейного преобразования величины x_1 и θ_1 можно вычислить из соответствующих величин x_0 и θ_0 . В матричном виде:

$$\begin{vmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x_0 \\ \theta_0 \end{vmatrix}$$

Где матричные элементы A , B , C и D определяются только геометрией резонатора. Луч, выходящий из точки $P_1(x_1, \theta_1)$, после двух отражений пересечет плоскость β в точке $P_2(x_2, \theta_2)$, координаты которой определяются выражением:

$$\begin{vmatrix} x_2 \\ \theta_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix}^2 \cdot \begin{vmatrix} x_0 \\ \theta_0 \end{vmatrix}$$

Таким образом, после n полных проходов луча через резонатор координаты точки $P_n(x_n, \theta_n)$ запишутся следующим образом:

$$\begin{vmatrix} x_n \\ \theta_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix}^n \cdot \begin{vmatrix} x_0 \\ \theta_0 \end{vmatrix}$$

Для того чтобы резонатор был устойчивым, необходимо, чтобы для любой точки (x_0, θ_0) точка (x_n, θ_n) не удалялась на бесконечно большое расстояние от оси, когда n увеличивается. Это означает, что с ростом n матрица:

$$\begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix}^n$$

не должна расходиться.

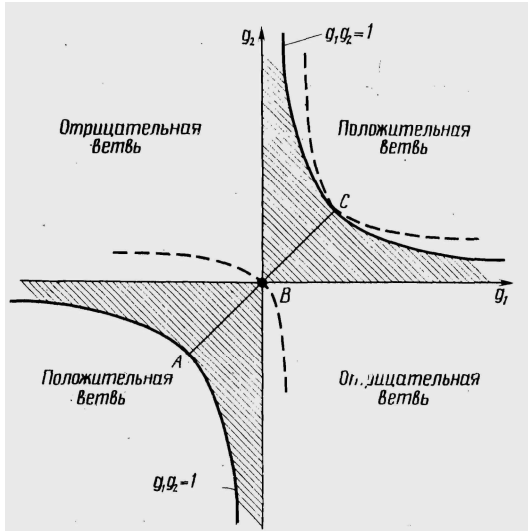
Матрица не расходится при выполнении условия:

$$-1 < \frac{(A+D)}{2} < 1.$$

Или

$$0 < g_1 \cdot g_2 < 1.$$

Диаграмма устойчивости на плоскости $g_1 - g_2$ для сфер резонатора.



Область устойчивости соответствует заштрихованным частям. Штриховые кривые соответствуют возможным конфигурациям конфокальных резонаторов

Особый интерес представляет класс сферических резонаторов, которым на диаграмме соответствуют точки на прямой AC, составляющей угол 45° с осями g_1 и g_2 . Точки A, B, C – соответствуют концентрическим (сферическим), конфокальным и плоским резонаторам.

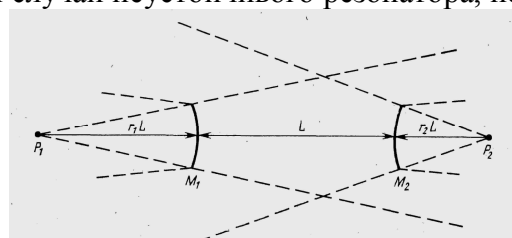
4.5 Устойчивые резонаторы

- определение устойчивых резонаторов;
- резонаторы с бесконечно большой апертурой;
- собственные моды;
- собственные значения;
- стоячие и бегущие волны в двухзеркальном резонаторе;
- влияние конечности размеров апертуры;
- динамически и механически устойчивые резонаторы.

4.6 Неустойчивые резонаторы

Неустойчивые резонаторы представляют интерес для лазерной техники. В первую очередь потому, что в случае неустойчивых резонаторов поле нестремится сосредоточиться вблизи оси и в режиме одной поперечной моды можно получить большой модовый объем. Однако при работе с неустойчивыми резонаторами возникает другая проблема, связанная с тем, что лучи стремятся покинуть резонатор. Поэтому соответствующие моды имеют значительно большие потери, чем моды устойчивого резонатора. Тем не менее данное обстоятельство можно использовать даже в качестве преимущества, если лучи, которые теряются на выходе из резонатора, включить в полезное выходное излучение лазера.

Рассмотрим общий случай неустойчивого резонатора, показанный на рисунке:



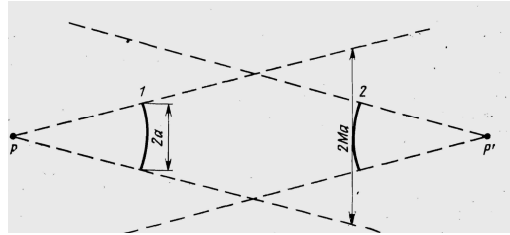
а) с выпуклыми зеркалами

Предположим, что мода образована суперпозицией двух сферических волн постоянной интенсивности. Центры P_1 и P_2 , из которых исходят эти волны, не совпадают с центрами кривизны зеркал M_1 и M_2 , но их координаты нетрудно вычислить, используя соображение самосогласованности: сферическая волна, исходящая из точки P_1 , после отражения от зеркала M_2 должна давать сферическую волну, выходящую из точки P_2 , и наоборот. Таким образом, координаты точек P_1 и P_2 можно получить из непосредственных вычислений, основаны на геометрической оптике:

$$r_1 = g_2 \cdot \left\{ g_1 g_2 \cdot (g_1 g_2 - 1)^{1/2} + g_1 g_2 - g_2 \right\}^{-1};$$

$$r_2 = g_1 \cdot \left\{ g_1 g_2 \cdot (g_1 g_2 - 1)^{1/2} + g_1 g_2 - g_1 \right\}^{-1},$$

Для того чтобы вычислить потери этой моды, в неустойчивом резонаторе, ограничимся рассмотрением симметричного двухзеркального резонатора:



Симметричный двухторцевой неустойчивый резонатор

$$R_1 = R_2 = R$$

$$a_1 = a_2 = a$$

$2a_1$ – апертура зеркала

После того, как пучок пройдет от одного зеркала до другого, размер пятна от каждой сферической волны увеличивается в M раз, причем:

$$M = g + (g^2 - 1)^{1/2}, \text{ - однопроходный коэффициент увеличения.}$$

Распределение поля обозначим через u_2 и u_1 , то можно записать следующее соотношение между ними:

$$u_2(x) = \frac{1}{M^{1/2}} \cdot u_1\left(\frac{x}{M}\right),$$

где амплитудный множитель $1/M^{1/2}$, стоящий в правой части этого соотношения,

указывает на то, что при прохождении от зеркала 1 до зеркала 2 размер пучка увеличивается в M раз. Для того чтобы $U(x)$ представляло собой моду резонатора, необходимо, чтобы $u_2(x) = \sigma_x u_1(x)$. Тогда:

$$\sigma_x \cdot u(x) = \frac{1}{M^{1/2}} \cdot u\left(\frac{x}{M}\right) \text{ - уравнение на собственные значения.}$$

Аналогичное уравнение справедливо и для координаты y . Таким образом, общее собственное решение можно записать в виде $U(x, y) = U(x)U(y)$, а соответствующее собственное значение $\sigma = \sigma_x \sigma_y$.

Используя волновое приближение можно получить более близкую к действительности картину мод. Из волновой теории следует, что различные моды, т. е. различные самовоспроизводящиеся пространственные структуры поля, действительно существуют. Эти моды отличаются друг от друга числом колец, а также своим положением и амплитудой. Четкого различия между модами низшего и высшего порядков теперь установить практически невозможно. Однако найти какое-то различие все же можно, если рассмотреть собственные значения уравнения, которые определяют дифракционные потери. Действительно, выявляются новые характерные особенности: для каждого полуцелого значения соответствующим образом определенного эквивалентного

числа Френеля $N_{\text{экв}}$ имеется отличная от других и четко выделяемая мода «низшего порядка» (т. е. мода с минимальными потерями).

Следует заметить, что для каждого полуцелого значения $N_{\text{экв}}$ существует большое различие между потерями моды низшего порядка и прочих мод. Таким образом, в этих условиях можно получить эффективную селекцию поперечных мод. Для симметричного двух-зеркального резонатора $N_{\text{экв}}$ определяется выражением:

$$N_{\text{всд}} = \frac{M^2 - 1}{2M} N$$

К основным преимуществам неустойчивого резонатора можно отнести следующие:

- а) большой контролируемый объем моды,
- б) хорошую селекцию поперечных мод,
- в) используется только отражательная оптика.

Основными недостатками этих резонаторов являются:

- 1) Поперечное сечение излучаемого пучка имеет форму кольца (т. е. в центре пучка находится темное пятно).
- 2) Распределение интенсивности в пучке неоднородна и имеет вид нескольких дифракционных колец.
- 3) Резонатор более чувствителен к возмущениям.

В соответствии с перечисленными достоинствами и недостатками неустойчивые резонаторы находят применение в лазерах с высоким коэффициентом усиления, особенно в ИК-области спектра и в случае, когда требуется получить пучки высокой мощности.

4.7 Согласование резонаторов.

- необходимость согласования резонаторов;
- два подхода к согласованию резонаторов;
- формула связывающая параметры двух резонаторов.

Модуль 5 «Процессы накачки»

Цель – процессы и методы перевода активных частиц в возбужденное состояние.

Процессы, которые переводят атомы с уровня 1 на уровень 3 (для трехуровневого лазера) или с уровня 0 на уровень 3 (для четырехуровневого) называются процессами накачки.

Обычно накачка осуществляется следующими двумя способами: оптическим или электрическим.

При *оптической накачке* излучение мощного источника света поглощается активной средой и таким образом переводит атомы активной среды на верхний уровень. Этот способ накачки особенно подходит для твердотельных или жидкостных лазеров.

Электрическая накачка осуществляется посредством достаточно интенсивного электрического разряда и особенно пригодна для газовых и полупроводниковых лазеров.

Два процесса накачки не исчерпывают всех возможных процессов накачки лазеров. Например, накачку можно также осуществить с помощью соответствующей химической реакции (химическая накачка) или сверхзвукового расширения газа (газодинамическая накачка). Следует также заметить, что для оптической накачки твердотельных, газовых и лазеров на красителях все более широко применяются сами лазеры.

Однако следует заметить, что если верхний уровень накачки пуст, то скорость, с которой верхний лазерный уровень 2 станет заселяться с помощью накачки $\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_P$, в общем случае можно записать:

$$\left(\frac{dN_2}{dt} \right)_p = W_p N_g$$

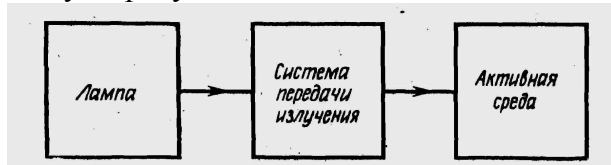
N_g – населенность основного уровня;

W_p – коэффициент, который называется скоростью накачки.

Для того чтобы достигнуть пороговых условий, скорость накачки должна превысить некоторое пороговое или критическое значение, которое обозначается как $W_{кр}$.

5.1 Оптическая накачка некогерентным источником света

На рисунке представлена общая схема системы оптической накачки. Свет от мощной некогерентной лампы с помощью оптической системы фокусируется и попадает в активную среду.



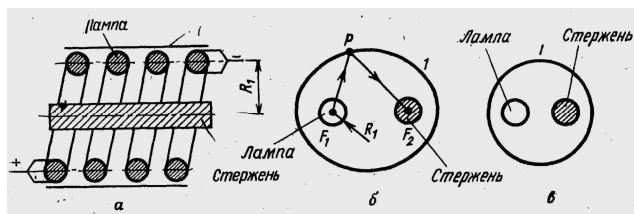
1) импульсные лазеры – ксеноновые или криптоновые импульсные лампы высокого давления (450-1500 мм.рт.ст.);

2) непрерывные лазеры – криптоновые лампы высокого давления (4000-8000 мм.рт.ст.) или вольфрам-иодные лампы.

В первом случае в импульсной лампе при разряде выделяется электрическая энергия, накопленная в батарее конденсаторов. Разряд чаще всего возбуждают, подавая высоковольтный импульс поджига на вспомогательный электрод, который предварительно ионизирует газ, заполняющий лампу. Затем в лампе происходит интенсивная вспышка света в течение времени от нескольких микросекунд до нескольких сотен микросекунд. Как в первом, так и во втором случае активная среда обычно имеет форму цилиндрического стержня диаметром от нескольких миллиметров до нескольких

сантиметров и длиной от нескольких до десятков сантиметров.

Наиболее широко используемые системы оптической накачки.



а) лампа (обычно импульсная) имеет форму спирали; при этом

попадает в активную среду либо непосредственно, либо после отражения от зеркальной цилиндрической поверхности l . Такая конфигурация ламп накачки использовалась при создании первого рубинового лазера и до сих пор широко применяется в импульсных лазерах.

б) лампа имеет форму цилиндра (линейная лампа), радиус и длина которого совпадают с соответствующими размерами активной среды.

Лампа помещается вдоль одной из фокальных осей F_1 зеркально отражающего эллиптического цилиндра (l). Лазерный стержень располагают вдоль другой фокальной оси F_2 .

Хорошо известное свойство эллипса состоит в том, что луч F_1P , выходящий из первого фокуса проходит после отражения от эллиптической поверхности через второй фокус F_2 . Это означает, что большая часть света, излучаемого лампой, вследствие отражения от эллиптического цилиндра попадает в лазерный стержень.

в) лампа с плотной упаковкой. Лазерный стержень и лампа (линейная) располагаются так близко друг к другу, насколько это возможно, и окружаются цилиндрическим отражателем (l) с минимально возможным диаметром.

Эффективность конфигурации с плотной упаковкой обычно ненамного ниже, чем в случае эллиптического цилиндра.

Иногда вместо зеркально отражающих рефлекторов, применяют цилиндры, изготовленные из диффузно отражающих материалов (MgO или $BaSO_4$, белая керамика).

Хотя диффузные поверхности несколько снижают эффективность передачи накачки, они обладают определенным преимуществом, а именно обеспечивают более однородную накачку активной среды. Находят также применение сложные типы осветителей. Однако, они дают более низкий КПД, чем соответствующие более простые конфигурации.

Общий КПД накачки определяют следующие три вклада:

- 1) Эффективность передачи η_t , которая представляет собой отношение мощности накачки, действительно поступающей в лазерный стержень, к мощности, излучаемой лампой.
- 2) Излучательная эффективность лампы η_l , определяющая эффективность преобразования электрической энергии в оптическое излучение в диапазоне длин волн λ_1 - λ_2 , в котором находятся эффективные полосы накачки лазерной среды.
- 3) Квантовый выход накачки η_q . Эта величина учитывает то, что не все атомы, возбужденные светом накачки, попадают на верхний лазерный уровень. Некоторые из этих атомов могут в действительности из полосы накачки перейти непосредственно в основное состояние или, возможно, попасть на какие-то другие уровни, которые в данной схеме не используются. Квантовый выход накачки $\eta_q(\lambda)$ определяется как отношение числа атомов, которые попадают на верхний лазерный уровень, к числу атомов, которые возбуждаются в полосе накачки при накачке монохроматическим светом с длиной волны λ .

5.2 Накачка лазерным излучением

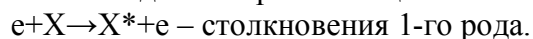
- применение лазерной накачки;
- излучатели систем накачки на основе диодных лазеров;
- системы передачи излучения накачки (продольная накачка, поперечная накачка);
- скорость и эффективность накачки;
- пороговая мощность для четырехуровневого и квазичетырехуровневого лазеров;
- сравнение накачки излучением диодного лазера и ламповой накачки.

5.3 Накачка в электрическом разряде

Как говорилось ранее, этот тип накачки используется в газовых и полупроводниковых лазерах. Рассмотрим электрическую накачку газовых лазеров. В данном случае накачка осуществляется путем пропускания соответствующего тока через газ. При этом в газе образуются ионы и свободные электроны. Ускоряясь в электрическом поле, они приобретают дополнительную кинетическую энергию и при столкновениях способны перевести нейтральный атом в возбужденное состояние. Для такого ударного возбуждения движение ионов обычно играет менее существенную роль, чем движение электронов. По истечении некоторого короткого промежутка времени среди электронов устанавливается равновесие, которое можно характеризовать средней электронной температурой T_e .

Электрическая накачка газа осуществляется с помощью одного из следующих двух процессов.

- 1) В газе, состоящем только из одного сорта частиц:



Электронные удары включают как упругие, так и неупругие столкновения. При неупругом столкновении атом может либо возбуждаться и перейти на более высокий уровень, либо стать ионизованным.

Если F_e — поток электронов, то полное сечение столкновения σ_e , можно определить:

$$dF_e = -\sigma_e N_g F_e dz,$$

где dF_e — изменение потока, которое имеет место, когда пучок электронов распространяется в среде на расстояние dz .

Столкновения, приводящие к возбуждению электронным ударом, определяют только некоторую часть этого полного сечения.

Проведенное до сих пор рассмотрение применимо в случае монохроматического пучка электронов. Однако в газовом разряде пучок электронов не является монохроматическим, а описывается некоторым распределением энергии $f(E)$, следовательно скорость увеличения населенности верхнего состояния:

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_p = N_g N_e \cdot \langle \nu \sigma_{e2} \rangle$$

$$\langle \nu \sigma \rangle = \int \nu \sigma(E) f(E) dE$$

Если предположить, что соответствующее распределение энергии является максвелловским, то можно записать $f(E) \sim E^{1/2} \exp [-(E/kT_e)]$, и единственная величина, которая должна быть известна,— это электронная температура T_e :

$$T_e = \frac{e}{k} El(2\delta)^{-1/2}$$

E – напряженность прикладываемого электрического поля;

l – длина свободного пробега электрона;

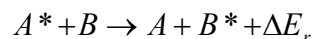
δ – доля кинетической энергии электрона, которая теряется электроном в каждом столкновении.

Для определенного газа определенная температура T_e зависит от отношения E/p – она определяет установившуюся в данной системе определенную электронную температуру, и его часто используют на практике в качестве полезного параметра при определении условий разряда.

Слишком маленькая величина отношения E/p приводит к очень низкому значению электронной температуры T_e , и лазерные уровни накачки не могут эффективно возбуждаться. Наоборот, слишком большая величина E/p ведет к возбуждению более высоких уровней (которые могут не иметь прямой связи с лазерным переходом) и избыточной ионизации (которая может вызывать нестабильности разряда, т. е. переход из тлеющего разряда в дуговой) газовой смеси.

2) В газе состоящем из двух компонентов A и B , возбуждение атомов может осуществляться при столкновении атомов одного сорта друг с другом так и при столкновении атомов различных компонентов благодаря процессу резонансной передачи энергии.

Если атомы сорта A находятся в возбужденном состоянии, а атомы B – в основном. Так же будем считать, что разность энергий ΔE_r между этими двумя состояниями меньше, чем kT . Тогда существует заметная вероятность того, что после столкновения атомы A окажутся в основном состоянии, а атомы B – в возбужденном. Следовательно, этот процесс запишется:



Этот процесс накачки атомов B является особенно эффективным, если заранее верхнее состояние атомов A является метастабильным. В этом случае, как только при возбуждении электронным ударом атомы A перейдут на свой верхний уровень, они и будут оставаться на нем в течении довольно длительного времени, образуя тем самым резервуар энергии для возбуждения атомов сорта B . Процесс такого типа называется **столкновением второго рода**.

В этом случае явление возбуждения можно записать:

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)_{AB} = N_A N_B \nu \sigma_{AB}$$

N_A — населенность верхнего состояния атомов A ,
 N_B — населенность нижнего состояния атомов B
 v — относительная скорость двух атомов.

Зависимость сечения σ_{AB} от разности энергий ΔE между двумя уровнями требует некоторых замечаний. Поскольку мы имеем дело с резонансным процессом, можно ожидать, что $\sigma_{AB}(\Delta E)$ представляет собой функцию с острым максимумом, который, очевидно, соответствует $\Delta E = 0$. В этом процессе возбуждения в действительности происходит следующий физический процесс: когда атом A приближается к атому B , последний будет находиться в потенциальном поле либо сил притяжения, либо сил отталкивания. Таки образом около резонансные столкновения обеспечивают очень удобный метод селективного заселения данного перехода.

Семестр 9

Модуль 1 «Непрерывный режим работы лазера»

Цель — изучить законы и уравнения непрерывного режима работы лазера

Ранее рассмотрена система накачки и оптические резонаторы. Воспользуемся результатами, полученными для построения теории, описывающей как непрерывный, так и нестационарный режимы работы лазеров. Эта теория базируется на так называемом приближении скоростных уравнений. В рамках этого приближения соответствующие уравнения выводятся из условия баланса между скоростями изменения полного числа частиц и полного числа фотонов лазерного излучения. Достоинство данной теории состоит в том, что она дает простое и наглядное описание работы лазера. Кроме того, она позволяет получить достаточно точные результаты для большинства реализуемых на практике ситуаций.

1.1 Скоростные уравнения

Четырехуровневый лазер

Рассмотрим четырехуровневый лазер имеющий одну полосу поглощения накачки (полоса 3).

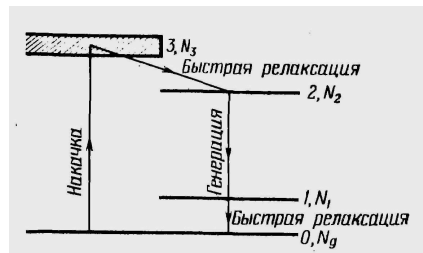


Схема энергетических уровней четырехуровневого лазера.

Последующий анализ останется без изменения, даже если мы будем иметь дело с более чем одной полосой (или уровнем) поглощения накачки, при условии, что переход из этих полос на верхний лазерный уровень 2 является быстрым.

Предполагая, что переходы между уровнями 3 и 2 и уровнями 1 и 0 являются быстрыми, можно положить $N_1 \approx N_3 \approx 0$. Таким образом, мы можем написать следующие скоростные уравнения:

$$N_g + N_2 = N_t \quad (1)$$

$$\dot{N}_2 = W_p N_g - Bq N_2 - \frac{N_2}{\tau} \quad (2)$$

$$\dot{q} = V_a Bq N_2 - \frac{q}{\tau_c} \quad (3)$$

которое означает, что разница между усилением и потерями не велика, т.е. лазер работает при не слишком большом превышении над порогом.

Уравнения скоростные в совокупности с выражениями для B и τ_c описывают непрерывный и нестационарный режимы работы четырехуровневого лазера. Следует заметить, что обычно уравнения принято записывать, используя не населенность верхнего уровня N_2 , а инверсную населенность:

$$N = N_2 - N_1.$$

Т.к. предполагали, что релаксация с уровня 1 является быстрой, имеем $N=N_2$ и скоростные уравнения сводятся к двум уравнениям в переменных $N(t)$ и $q(t)$:

$$\dot{N} = W_p \cdot (N_t - N) - BqN - \frac{N}{\tau} \quad (4)$$

$$\dot{q} = \left[V_a B N - \frac{1}{\tau_c} \right] \cdot q \quad (5).$$

Это уравнения Стаца де Марса.

Для количественного описания работы лазера необходимо решить эти уравнения с учетом соответствующих начальных условий. Если, например, накачка включается в момент времени $t = 0$, то начальные условия: $N(0) = 0$ и $q(0) = q_i$, где q_i — очень небольшое число первоначально присутствующих фотонов, которые позволяют учесть эффект спонтанного излучения. Если $q(t)$ известно, то нетрудно вычислить выходную мощность, излучаемую через одно из зеркал резонатора:

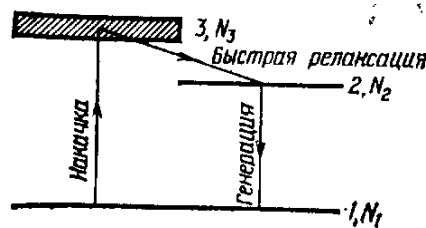
$$P_1 = \frac{\gamma_1 l}{2L'} \hbar \omega q$$

γ_1 - потери за проход, обусловленные пропусканием зеркал.

Необходимо подчеркнуть, что полученные здесь результаты применимы только для случая одномодовой генерации лазера. Если же генерация лазера происходит более чем на одной моде, то расчет значительно усложняется. Однако рассмотрение многомодовой генерации можно снова упростить за счет того, что можно учитывать лишь полное число фотонов q , просуммированное по всем модам.

Трехуровневый лазер

В случае трехуровневого лазера рассмотрение является таким же, как и для четырехуровневого.



Аналогично, как и в предыдущем случае предположим, что имеется лишь одна полоса поглощения накачки и, если переход $3 \rightarrow 2$ достаточно быстрый, то $N_3 \approx 0$. При этом скоростные уравнения:

$$N_1 + N_2 = N_t \quad (6)$$

$$\dot{N}_2 = W_p N_1 - Bq(N_2 - N_1) - \frac{N_2}{\tau}, \quad (7)$$

$$\dot{q} = V_a B q (N_2 - N_1) - \frac{q}{\tau_c} \quad (8)$$

Сводим эти уравнения к двум:

$$\dot{N} = W_p \cdot (N_t - N) - 2BqN - \frac{(N_t + N)}{\tau} \quad (9)$$

$$\dot{q} = \left(V_a B N - \frac{1}{\tau_c} \right) q \quad (10)$$

Эти уравнения описывают как непрерывный, так и нестационарный режим работы трехуровневого лазера.

Также заметим, что скоростные уравнения для фотонов в случае четырехуровневых (5) и трехуровневых (10) лазеров одинаковы. Однако скоростные уравнения для инверсии населенностей несколько отличаются.

Член, отвечающий вынужденному излучению, в случае трехуровневого лазера: $-2BqN$, а четырехуровневого $-BqN$. Это различие возникает из-за того, что при излучении одного фотона в трехуровневом лазере инверсия населенностей изменяется на 2 (N_2 уменьшается на 1, а N_1 увеличивается на 1), тогда как в четырехуровневом лазере она уменьшается на 1 (N_2 уменьшается на 1, в то время как N_1 остается практически неизменной, из-за быстрой релаксации $1 \rightarrow 0$).

1.2 Пороговые условия и выходная мощность

В данном вопросе изучили работу лазера при стационарной накачке (т.е. когда скорость накачки W_p не зависит от времени). Следовательно, это можно рассматривать как непрерывный режим работы лазера.

Четырехуровневый лазер

Рассмотрим сначала пороговое условие генерации лазера. Предположим, что в момент времени $t = 0$ в резонаторе вследствие спонтанного испускания присутствует некоторое большое число фотонов q_i . При этом из уравнения (15) следует, что для того,

чтобы величина $\dot{q}$ была положительной, должно выполняться условие:

$$V_a B N > \frac{1}{\tau_c}$$

Следовательно, генерация возникает в том случае, когда инверсия населенностей N достигнет некоторого критического значения N_c :

$$N_c = \frac{1}{V_a B \tau_c}$$

При этом критическая скорость накачки W_p :

$$W_{cp} = \frac{N_c}{(N_t - N_c)\tau}$$

Видим, что критическая скорость накачки соответствует ситуации, когда полная скорость накачки уровней $W_{cp}(N_t - N_c)$ равна скорости $\frac{N_c}{\tau}$ спонтанного перехода с уровня 2.

Если $W_p > W_{cp}$, то число фотонов q будет возрастать от исходного значения, определяемого спонтанным излучением, и если W_p не зависит от времени, оно достигнет некоторого постоянного значения q_0 . Это стационарное значение и соответствующее ему стационарное значение инверсии N_0 получаются из уравнений Стаца де Марса, если в них положить $\dot{N} = \dot{q} = 0$. Таким образом, имеем:

$$N_0 = \frac{1}{V_a B \tau_c} = N_c \quad (11)$$

$$q_0 = V_a \tau_c \cdot \left[W_p \cdot (N_t - N_0) - \frac{N_0}{\tau} \right] \quad (12)$$

Эти уравнения описывают непрерывный режим работы четырехуровневого лазера. Также они показывают, что равенство $N_0 = N_c$ выполняется даже при $W_p > W_{cr}$. В стационарных условиях инверсия населенностей N_0 всегда равна критической инверсии N_c . Иными словами, когда скорость накачки выше критической, в резонаторе лазера увеличивается число фотонов, а не инверсия населенностей

Выходная мощность излучения через одно из двух зеркал резонатора:

$$P_1 = \frac{V_a \hbar \omega}{\sigma l \tau} \cdot \frac{\gamma_1}{2} \cdot \left(\frac{W_p}{W_{cr}} - 1 \right) \quad (13)$$

Выражение для мощности, когда зеркало 2 резонатора имеет коэффициент отражения равный 100%.

Трехуровневый лазер

Расчет трехуровневого лазера проводится по аналогии с четырехуровневым, только исходными теперь являются уравнения (9) и (10).

Полагая в уравнении (10) $\dot{q} = 0$, пороговую инверсию населенностей можно записать в виде:

$$N_c = 1/BV_a\tau_c \quad (14)$$

Данное выражение совпадает с тем, что было получено в случае четырехуровневого лазера. При этом критическая скорость накачки:

$$W_{cr} = (N_t + N_c) / (N_t - N_c) \tau$$

Заметим, что на практике выполняется условие:

$$N_c \ll N_t$$

(как для трех – так и для четырехуровневого лазера). Следовательно:

$$W_{cr} \approx 1/\tau$$

Сравнивая, видим, что при одном и том же значении τ в случае четырехуровневого лазера критическая скорость накачки в N_c/N_t раз меньше, чем в трехуровневом. Это является основным преимуществом четырехуровневой схемы.

В случае непрерывного режима работы, когда мощность накачки превышает пороговую, инверсия населенностей N_0 и число фотонов q_0 определяются из уравнений (9) и (10), если в них положить $\dot{N} = \dot{q} = 0$. Так же, как и в случае четырехуровневого лазера, мы снова видим, что $N_0 = N_c$, следовательно:

$$q_0 = \frac{V_a \cdot (N_t + N_0) \tau_c}{2\tau} \cdot (x - 1) \quad (15)$$

Выходная мощность излучения через одно из зеркал:

$$P_1 = \frac{V_a \cdot (N_t + N_0) \cdot \hbar \omega \cdot \gamma_1}{4\tau \cdot \gamma} \cdot \left(\frac{W_p}{W_{cr}} - 1 \right) \quad (16)$$

1.3 Оптимальная связь на выходе лазера

При фиксированной скорости накачки существует некоторое значение коэффициента пропускания T выходного зеркала, при котором достигается максимальная выходная мощность. Физически существование такого оптимума связано с тем, что с увеличением T имеют место два следующих эффекта: с одной стороны, выходная мощность должна возрасти из-за увеличения пропускания выходного зеркала, а с другой — она должна уменьшаться, поскольку с увеличением пропускания возрастают внутрирезонаторные потери, что приводит к уменьшению числа фотонов в резонаторе.

Чтобы вычислить оптимальную величину коэффициента пропускания, можно воспользоваться либо выражением (13) (четырёхуровневый лазер), либо выражением (16) (трехуровневый лазер) и наложить условие $dP_1/d\gamma_1 = 0$, при этом необходимо учесть, что x , N_0 и γ являются функциями величины γ_1 . В случае четырёхуровневого лазера эта задача решается особенно просто; поэтому ограничимся рассмотрением только этого случая.

Если предположить для простоты, что $W_{cp} = N_c/N_t\tau$, то мощность:

$$P_1 = \left[A_e \cdot I_s \cdot \left(\gamma_i + \frac{\gamma_1}{2} \right) \right] \cdot S \cdot \left(\frac{x_{i\bar{i}i}}{S+1} - 1 \right)$$

A_e – площадь поперечного сечения активной среды лазера, занимаемая генерируемой модой.

I_s – интенсивность при которой в четырёхуровневом лазере происходит насыщение усиления.

$$S = \frac{\gamma_1}{\gamma_1 + 2\gamma_i}$$

$x_{мин}$ – отношение фактической скорости накачки W_p к минимальному значению скорости накачки (т.е. скорости накачки, необходимой для достижения порога при несущественных потерях).

Полагая $dP_1/dS = 0$, получаем:

$$S_{\bar{i}i\bar{o}} = (x_{i\bar{i}i})^{1/2} - 1.$$

При этом:

$$P_{\bar{i}i\bar{o}} = \left[A_e I_s \cdot \left(\gamma_i + \frac{\gamma}{2} \right) \right] \cdot \left[(x_{i\bar{i}i})^{1/2} - 1 \right]^2$$

Уменьшение мощности, обусловленное неоптимальным набором условий генерации, оказывается особенно важным вблизи порога генерации (т. е. когда $x_{мин} \approx 1$). Однако, когда генерация происходит в условиях с большим превышением над порогом, выходная мощность становится практически не чувствительной к изменению связи на выходе вблизи ее оптимального значения.

1.4 Перестройка частоты и генерации лазера

- способы перестройки частоты лазерного излучения среднего ИК-диапазона;
- способы перестройки частоты лазерного излучения для видимого и ближнего ИК-диапазона.

1.5 Причины возникновения многомодовой конфигурации

- причины возникновения многомодовой генерации;
- анализ частотной зависимости коэффициента усиления лазера от скорости накачки при условии насыщения (однородно уширенная линия);
- анализ частотной зависимости коэффициента усиления лазера от скорости накачки при условии насыщения (неоднородно уширенная линия).

1.6 Одномодовый режим генерации

- селекция отдельной поперечной моды;
- селекция отдельной продольной моды;
- эталон Фабри – Перо как оптический элемент для селекции мод;
- селекция продольных мод с помощью однонаправленных кольцевых резонаторов.

1.7 Затягивание частоты и предел монохроматичности

- определение частоты генерации в рамках полуклассического подхода;

- расчет ширины спектра;
- квантовый предел для ширины лазерной линии;
- квантовый шум;
- технический шум.

1.8 Флуктуации частоты генерации и стабилизация частоты лазера

- долговременные флуктуации;
- кратковременные флуктуации;
- способы уменьшения флуктуаций;
- частота смещения;
- методы стабилизации частоты.

1.9 Шум и интенсивность излучения и методы его уменьшения

- классификация возмущений приводящих к шумам интенсивности;
- отрицательная обратная связь;
- шум перераспределения мод.

Модуль 2 «Нестационарный режим работы лазера»

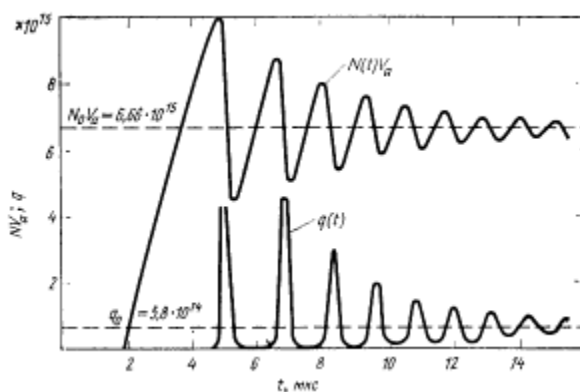
Цель – изучить законы, описывающие нестационарный режим работы лазера

Для того чтобы изучить нестационарный режим работы четырехуровневого и трехуровневого лазеров, необходимо решить соответственно уравнения системы Стаца де Марса для этих лазеров. При этом для данной временной зависимости скорости накачки $W_p(t)$ мы найдем временные зависимости $q(t)$ и $N(t)$, если заданы начальные условия.

Ниже будет рассмотрено нестационарный режим работы. Уравнения описывающие нестационарный режим, являются нелинейными относительно переменных $q(t)$ и $N(t)$.

2.1 Релаксационные колебания

Рассмотрим случай, когда скорость накачки описывается ступенчатой функцией. Таким образом, предположим, что $W_p=0$ при $t<0$ и $W_p(t)=W_p$ при $t>0$. Предположим, что лазер генерирует на одной моде, поскольку лишь при этом условии справедливы уравнения Стаца де Марса.



Пример временной зависимости полной инверсии $N(t)V_a$ и числа фотонов $q(t)$ в трехуровневом лазере.

Численные расчеты в случае трехуровневого лазера типа рубинового.

При расчете использовались начальные условия: $N(0) = -N_i$, $q(0) = q_i$.

Особенности кривых на рисунке:

1) число фотонов $q(t)$ в резонаторе описывается регулярной последовательностью уменьшающихся по амплитуде пиков (пичков) с временным интервалом между ними, равным нескольким микросекундам;

2) инверсия населенностей $N(t)$ осциллирует относительно стационарного значения N_0 ;

3) в соответствии с уравнениями (11) и (12) как $N(t)$, так и $q(t)$ и конечном счете достигают своих стационарных значений. Осциллирующий характер кривых $N(t)$ и $q(t)$ объясняется тем, что, после того как изменилась инверсия населенностей, число фотонов изменяется не сразу, а с некоторой задержкой.

Таким образом, когда $N(t)$ проходит впервые через значение N_0 , достигается пороговое условие и лазер может начать генерировать. При этом в течение некоторого времени число фотонов в резонаторе возрастает относительно своего начального значения, определяемого спонтанным излучением, и благодаря продолжающемуся процессу накачки инверсия населенностей $N(t)$ в течение этого времени может непрерывно нарастать выше значения N_0 . Однако, когда $q(t)$ достигнет достаточно большого значения, $N(t)$ начнет уменьшаться из-за высокой скорости вынужденного излучения. В момент времени, когда $q(t)$ достигает максимума, $N(t)$ спадает до значения N_0 . Вследствие все еще большой скорости вынужденного излучения населенность $N(t)$ продолжает уменьшаться после значения N_0 . При этом лазер оказывается в условиях ниже пороговых и генерация должна прекратиться. Затем благодаря накачке $N(t)$ снова возрастает до тех пор, пока не достигнет порогового значения, когда в резонаторе число фотонов может вновь нарастать и т.д. Следует заметить, что поскольку в конце концов достигаются стационарные решения определяемые уравнениями (11), (12), численный расчет подтверждает, что эти решения соответствуют устойчивому режиму работы.

Можно сказать, что выходное излучение представляет собой цуг нерегулярных во времени импульсов со случайными амплитудами (нерегулярные пички). Кроме того, генерация не переходит в нестационарный режим. Такое поведение объясняется тем, что при переходе от одного пичка к другому или от одного цуга пичков к другому происходит изменение генерируемых мод. Данное явление называется «перескоком мод». В этом случае выходная мощность лазерного излучения не является регулярной и воспроизводимой во времени.

Однако при некоторых условиях многомодовый лазер может все же работать в режиме регулярных пичков. Это происходит при одновременной генерации большого числа мод со случайными фазами соответствующих электрических полей. Такая ситуация реализуется когда:

- 1) межмодовое расстояние очень мало по сравнению с шириной линии лазерного перехода;
- 2) потери каждой моды велики, а ширины линий сравнимы или больше межмодового расстояния;
- 3) потери для всех мод примерно одинаковы. Однако в этом случае понятие моды резонатора почти не имеет физического смысла и резонатор следует рассматривать как систему с нерезонансной обратной связью.

2.2 Модуляция добротности

Метод модуляции добротности позволяет получать лазерную генерацию в виде коротких импульсов (длительностью от нескольких наносекунд до нескольких десятков наносекунд) с высокой пиковой мощностью (от нескольких мегаватт до нескольких десятков мегаватт).

Принцип работы лазера в режиме добротности модуляции состоит в следующем. Предположим, что в резонатор лазера помещен затвор. Если затвор закрыт, то генерация возникнуть не может и инверсия населенностей может достичь значения, которое намного превышает пороговое, имеющее место в отсутствие затвора. Если теперь резко открыть затвор, то усиление в лазере существенно превысит потери и накопленная энергия выделится в виде короткого и интенсивного светового импульса. Поскольку при этом происходит переключение добротности резонатора от низкого к высокому значению, то данный метод называется модуляцией добротности. При условии что затвор открывается за время, которое является коротким по сравнению с временем линейного развития лазерного импульса, выходное излучение состоит из одиночного гигантского импульса. В случае же медленного открывания затвора в генерации может возникнуть несколько импульсов. В самом деле, энергия, накопленная в активной среде до момента полного открывания затвора, высвечивается в виде последовательных порций, каждая из которых соответствует излучению импульса. Каждый импульс приводит к тому, что усиление

становится ниже мгновенного порогового значения и подавляет тем самым генерацию до тех пор, пока продолжающееся открывание затвора не приведет к уменьшению потерь в резонаторе лазера u_1 , следовательно, не понизит порог генерации.

Методы модуляции добротности.

Для модуляции добротности наиболее широко используются следующие устройства.

1) Электрооптические затворы. Эти затворы основаны на электрооптическом эффекте, обычно на эффекте Поккельса, устройство в котором при приложении к нему постоянного электрического напряжения возникает двойное лучепреломление.

2) Механические затворы. Модуляции добротности осуществляется механически, т.е. вращением одного из зеркал лазерного резонатора вокруг оси, перпендикулярной оси резонатора. (скорость вращения очень большая).

3) Затворы на основе насыщающегося поглотителя. Затвор представляет собой кювету, наполненную некоторым насыщающимся поглотителем, который поглощает свет, и длина которого совпадает с длиной волны лазерного излучения. Используют раствор органического красителя.

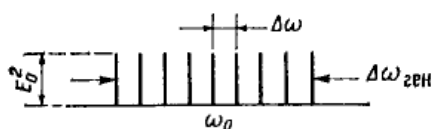
4) Акустооптические модуляторы добротности. Оптически прозрачное вещество, в котором с помощью пьезоэлектрического преобразователя возбуждается ультразвуковая волна, которая приводит к тому, что это вещество работает как фазовая решетка.

2.3 Режим синхронизации мод

Метод синхронизации мод позволяет получить генерацию лазерных импульсов сверхкороткой длительности (от нескольких десятков фемтосекунд до нескольких десятков пикосекунд) и очень высокой пиковой мощности. Синхронизация мод соответствует условию генерации, при котором моды резонатора генерируют с примерно одинаковыми амплитудами и синхронизованными фазами.

Рассмотрим частотное распределение амплитуд мод лазера с синхронизированными модами:

Однородное распределение



Гауссово распределение в полосе шириной $\Delta\omega_{\text{ген}}$, измеряемой на полувысоте.



Условие синхронизации фаз φ_l :

$$\varphi_l - \varphi_{l-1} = \varphi$$

φ – постоянная величина.

1) электрическое поле электромагнитной волны можно записать в виде:

$$E(t) = A(t) \cdot \exp(i\omega_0 t), \text{ где } A(t) = \frac{E_0 \cdot \sin \left[(2n+1) \cdot \frac{(\Delta\omega t + \varphi)}{2} \right]}{\sin \left[\frac{(\Delta\omega t + \varphi)}{2} \right]}; \Delta\omega = \frac{\pi \cdot c}{L}.$$

$E(t)$ представляет собой несущую синусоидальную волну на центральной частоте ω_0 с амплитудой $A(t)$.

При выполнении условия синхронизации фаз моды интерферируют, что приводит к образованию коротких световых импульсов. Два соседних импульса разделены между собой временным интервалом:

$$\tau_p = \frac{2\pi}{\Delta\omega}$$

Это время, необходимое для полного прохода резонатора. Следовательно, генерацию можно представить себе также в виде импульса, распространяющегося в резонаторе туда и обратно.

Ширина: $\Delta\tau \approx 1/\Delta\nu_{\text{ааи}}$, $\Delta\tau_{\text{ааи}} = (2n+1) \cdot \Delta\omega / 2\pi$ - полная ширина спектра генерируемого излучения.

Таким образом, можно видеть, что для получения очень коротких импульсов требуется большая ширина генерируемого спектра.

2) Гауссово распределение описывается выражением:

$$E(t) = A(t) \cdot \exp(i\omega_0 t)$$

$$A(t) = \int E_l \exp(i(l \cdot \Delta\omega t)) \cdot dl - \text{Фурье образ спектральной амплитуды.}$$

Длительность импульса $\Delta\tau_p$, определяемая на полувысоте, дается выражением:

$$\Delta\tau_p = 0,441 \cdot \Delta\nu_{\text{ааи}}$$

После рассмотрения этих двух примеров синхронизации мод, можно в заключение сделать вывод, что при выполнении условия синхронизации мод амплитуда поля оказывается пропорциональной фурье-образу спектральной амплитуды. Длительность импульса $\Delta\tau_p$ связана с шириной спектральной интенсивности $\Delta\nu_{\text{ааи}}$ соотношением $\Delta\tau_p = k/\Delta\nu_{\text{ааи}}$, где k — числовой множитель (порядка единицы), который зависит от конкретного вида распределения спектральной интенсивности. Такой импульс называют импульсом, длительностью которого определяется обратной шириной спектра.

Методы синхронизации мод:

Наиболее широкое применение нашли следующие два метода синхронизации мод:

- 1) синхронизация мод, осуществляемая активным модулятором, управляемым внешним сигналом (активная синхронизация мод),
- 2) синхронизация мод с помощью соответствующей-нелинейной оптической среды (пассивная синхронизация мод).

Режимы работы лазеров с синхронизацией мод:

Лазеры с синхронизацией мод могут работать либо с импульсной, либо с непрерывной накачкой.

В импульсном режиме общая длительность $\Delta\tau_p'$ огибающей цуга импульсов с синхронизованными модами в некоторых случаях определяется длительностью накачки. Однако в ряде других случаев наличие насыщающегося поглотителя приводит одновременно как к модуляции добротности, так и к синхронизации мод. Тогда длительность $\Delta\tau_p'$ огибающей цуга импульсов с синхронизованными модами определяется длительностью $\Delta\tau_p$ импульса лазера с модулированной добротностью.

В импульсном режиме для синхронизации мод чаще всего применяют электрооптический модулятор или кювету с насыщающимся поглотителем.

В случае получения непрерывной генерации с синхронизацией мод накачка лазера осуществляется непрерывно, а синхронизация мод достигается с помощью насыщающегося поглотителя или акустооптического модулятора.

2.4 Разгрузка резонатора

- необходимость разгрузки резонатора;
- схема устройства разгрузки резонатора.

Модуль 3 «Типы лазеров»

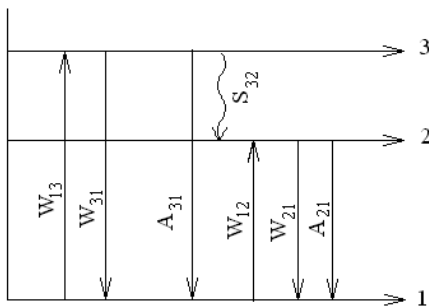
Цель – ознакомиться с основными конструкциями различных типов лазеров

3.1 Твердотельные лазеры

В качестве активных для твердотельных лазеров в настоящее время используется множество материалов. Активными центрами являются примесные ионы: ионы переходных металлов (особенно Cr^{3+}); либо ионы редкоземельных элементов (главным образом Nd^{3+} или Ho^{3+}); введенные в кристалл.

Лазер на рубине.

Это лазер, на котором впервые была осуществлена генерация и который все еще находит применение. Рубин, представляет собой кристалл Al_2O_3 (корунд), в котором некоторые ионы Al^{3+} замещены ионами Cr^{3+} . Соответственно энергетические лазерные уровни - это уровни иона Cr^{3+} в решетке кристалла Al_2O_3 . Генерация происходит на переходе $\bar{E} \rightarrow {}^4A_2$ (линия R_1 , $\lambda_1 = 694,3$ нм, красная). Генерация на этом лазере получена как на линии R_1 так и на R_2 (использ. дисперсионный резонатор). Несмотря на усложнение, обусловленное этими двумя лазерными переходами, очевидно, что лазер на рубине работает по трехуровневой схеме.



Лазер на рубине, как правило, работает в импульсном режиме. Для накачки применяются импульсные ксеноновые лампы среднего давления (~500 мм рт. ст.). диаметр стержня обычно составляет 5-10 мм, а длина 5-20 см.

Инверсия в твердом теле создается по методу Басова-Прохорова.

Рассмотрим трехуровневую систему.

Рабочим переходом является переход 2-1. Уровень 3 – вспомогательный. В нормальном состоянии занят только уровень 1.

Для создания инверсии населенности рабочее вещество облучают светом, т.е. оптическая накачка, частота переходом накачки должна соответствовать переходам с 1 на 3.

С уровня 3 частицы безизлучательно переходят на уровень 2 – постоянного перехода S_{32} . Эта энергия идет на нагрев рабочего тела. При этом достигается такая интенсивность накачки, что на уровне 2 удастся получить больше рабочих частиц, чем на 1.

Обозначим населенности рабочих уровней N_1 , N_2 , N_3 . Переход на уровень знак плюс, уход – знак минус:

$$\frac{dN_3}{dt} = W_{13} \cdot N_1 - N_3 \cdot (W_{31} + S_{32} + A_{31}) \quad (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{12} \cdot N_1 - N_2 \cdot (W_{21} + A_{21}) + N_3 \cdot S_{32} \quad (2)$$

Система решается, если:

$$N_1 + N_2 + N_3 = N_0 \quad (3)$$

Дополнительное условие:

$$W_{13} = W_{31}$$

$$W_{21} = W_{12}$$

Рассмотрим стационарный случай:

$$\frac{dN_3}{dt} = \frac{dN_2}{dt} = 0$$

Будем считать, что вероятность безизлучательного перехода много больше всех других переходов с уровня 3.

$$S_{32} \gg (W_{31} + A_{31})$$

Учитывая это условия, запишем:

$$W_{13} \cdot N_1 - N_3 \cdot S_{32} = 0, \text{ следовательно } N_1 = \frac{N_3 \cdot S_{32}}{W_{13}}$$

Т.к. требуется, что $S_{32} \gg W_{31}$, следовательно уровень N_3 быстро опустошается, т.е. $N_1 \gg N_3$, отсюда $N_1 \neq N_2 = N_0$.

Для стационарного случая решим систему трех уравнений. Из уравнения (2) следует:

$$W_{12} \cdot N_1 - N_2 \cdot (W_{21} + A_{21}) + N_3 \cdot S_{32} = 0, \text{ где } N_2 = N_0 - N_1 \text{ и } N_3 \cdot S_{32} = W_{13} \cdot N_1$$

$$W_{12} \cdot N_1 - N_0 \cdot W_{21} - N_0 \cdot A_{21} + N_1 \cdot W_{21} + N_1 \cdot A_{21} + W_{13} \cdot N_1 = 0$$

$$N_1 = N_0 \cdot \frac{W_{21} + A_{21}}{2W_{12} + W_{13} + A_{21}}$$

Населенность:

$$N_2 = N_0 \cdot \frac{W_{12} + W_{13}}{2W_{12} + W_{13} + A_{21}}$$

По методу Басова-Прохорова необходимо получить разность населенностей рабочего уровня:

$$N_2 - N_1 = N_0 \cdot \frac{W_{13} - A_{21}}{2W_{12} + W_{13} + A_{21}}$$

1) для создания инверсии населенности необходимо: $W_{13} > A_{21}$.

2) Скорость заполнения верхнего лазерного уровня должна превышать скорость его опустошения в результате спонтанных переходов.

Наряду с рубиновыми лазерами широкое распространение получили лазеры на стеклянной основе, имеющие ряд таких достоинств, как практически неограниченные размеры стержней, простота изготовления образцов любой формы, высокая оптическая однородность, простота массового производства. В то же время по сравнению с ионными кристаллами стекла имеют отрицательные свойства: низкая теплопроводность и высокий коэффициент теплового расширения, что затрудняет разработку импульсных лазеров с большой частотой повторения. В настоящее время созданы лазеры на стекле, активированном ионами неодима, иттербия, эрбия, гольмия и др.

Наиболее интересным по своим возможностям в настоящее время считают твердотельный лазер на иттрий-алюминиевом гранате (YAG) с примесью неодима. Неодимовые лазеры могут генерировать на нескольких линиях, самая сильная из них и наиболее широко используемая $\lambda = 1,064$ мкм. ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$. Неодимовый лазер работает по четырехуровневой схеме. Лазер может работать как в непрерывном, так и в импульсном режиме. В обоих случаях обычно используются линейные лампы в схемах с

одноэллипсным осветителем, с близким расположением лампы и кристалла или с многоэллипсным осветителем. Для работы в импульсном и непрерывных режимах применяются ксеноновые лампы среднего давления (500-1500 мм.рт.ст.) и криптоновые лампы высокого давления (4-6 атм.). размеры стержней обычно такие же, как и в случае рубина.

3.2 Полупроводниковые лазеры

Возможность использования полупроводниковых материалов в качестве рабочего вещества лазера давно привлекает к себе внимание. Это обусловлено тем, что полупроводники имеют очень высокую чувствительность к внешним воздействиям. Их свойствами можно управлять в широких пределах, варьируя температуру или давление, воздействуя на них световым излучением или потоком заряженных частиц, а также вводя различные примеси.

В настоящее время создано большое количество полупроводниковых лазеров различных типов, на различных материалах.

Создание неравновесного состояния с помощью оптической накачки, инверсия населенностей в полупроводнике.

Образование пары — электрона проводимости и дырки — может происходить как под влиянием тепловых колебаний решетки, так и при поглощении полупроводником света с частотой $h\nu > E_g$ (внутренний фотоэффект). Если же энергия кванта $h\nu > E_g$, то рождения электронно-дырочных пар не происходит (полупроводник прозрачен). Для получения лазерного эффекта существенно, что наряду с процессом индуцированного поглощения полупроводником световых квантов частоты ν имеет место, и процесс индуцированной рекомбинации, причем при определенных условиях излучение может преобладать над поглощением (при условии инверсии населенности).

При тепловом равновесии вероятность того, что состояние с энергией E занято электроном, дается распределением Ферми — Дирака:

$$f(E) = \left\{ 1 + \exp \left[\frac{(E - E_F)}{kT} \right] \right\}^{-1}$$

В этом случае уровень Ферми для валентной зоны и зоны проводимости общий. Поэтому при тепловом равновесии электронов вблизи потолка валентной зоны больше, чем дырок. Учитывая также, что вероятность единичного акта образования электронно-дырочной пары с поглощением фотона точно равна вероятности рекомбинации электронно-дырочной пары с испусканием фотона, получаем, что полупроводник при тепловом равновесии (как и другие вещества) способен лишь поглощать, а не усиливать свет.

Для того чтобы полупроводник усиливал падающий свет, необходимо сильно нарушить тепловое равновесие так, чтобы электроны плотно заполнили область, примыкающую ко дну зоны проводимости, а дырки заполнили область у потолка валентной зоны (такое состояние полупроводника называется вырожденным).

$F_c - F_v > E_g$; F_v , F_c - квази уровни Ферми для электронов и дырок.

Следовательно электроны из валентной зоны можно перевести только на свободные уровни, лежащие выше F_c . В то же время электроны из зоны проводимости можно перевести в валентную зону лишь только на уровни в интервале от E_v до F_c . Таким образом, если направить на вырожденный полупроводник поток световых квантов с частотой ν в интервале: $\nu_{\min} < \nu < \nu_{\max}$; при условии $h\nu_{\min} = E_g$; $h\nu_{\max} = F_c - F_v$,

то такие фотоны не смогут вызвать электронных переходов из валентной зоны в зону проводимости, т. е. не будут поглощаться. В то же время эти фотоны могут перебросить электроны из зоны проводимости в валентную зону, т. е. вызвать вынужденную рекомбинацию. Такой полупроводник будет усиливать свет в полосе частот:

$$\Delta \nu = \nu_{\max} - \nu_{\min}.$$

Для получения инверсии в чистом полупроводнике необходимо достичь вырождения электронов и дырок. Чем выше температура, тем труднее это осуществить, так как с повышением температуры электроны и дырки стремятся на более высокие энергетические уровни, плотность заполнения нижних состояний уменьшается, квазиуровни Ферми приближаются к запрещенной зоне.

Полупроводниковые лазеры отличаются друг от друга способами создания инверсии населенностей. Четыре основные группы:

- 1) лазеры на $p-n$ -переходе (инжекционные лазеры),
- 2) лазеры с электронным возбуждением,
- 3) оптической накачкой,
- 4) лазеры с прямым электрическим возбуждением (лавинный пробой).

3.3 Лазеры на красителях

В жидкостных лазерах активной средой является жидкость. Жидкие активные среды имеют существенные преимущества по сравнению с твердыми и газообразными. Объем жидкой активной среды может быть любым. Важным преимуществом среды по сравнению с твердой является отсутствие потерь излучения из-за неоднородности структуры активного вещества. Так как жидкость однородна и в ней не возникают деформации и напряжения, ограничивающие срок службы твердого активного вещества. Легко решается проблема отвода тепла: для этого достаточно применить циркуляцию жидкости в резонаторе. Еще одним важным преимуществом жидких активных сред по сравнению с твердыми является их дешевизна и быстрота изготовления.

Жидкая среда характеризуется большей концентрацией активных молекул, поэтому она более пригодна для получения мощного непрерывного излучения. На жидких активных средах можно создавать лазеры, мощность излучения которых значительно превышает мощности твердотельных лазеров, а расходимость излучения такая же, как у газовых лазеров.

В настоящее время используют жидкие активные среды трех классов: растворы редкоземельных хелатов; растворы органических красителей и растворы неорганических соединений редкоземельных элементов.

Редкоземельные хелаты представляют собой сложные органические комплексы в которых ионы редкоземельного элемента находятся в окружении атомов кислорода принадлежащих органическим молекулам (лигандам). Из многочисленного класса хелатов наиболее перспективны в лазерной технике комплексы ионов европия с β -дикетонами, например бензоилацетанат европия.

Основным недостатком хелатов, препятствующим созданию на их основе мощных лазеров, является сильное поглощение лучистого потока накачки, что мешает проникновению излучения накачки в глубинные слои активного вещества. Другим существенным недостатком хелатов является их низкая фотохимическая стойкость.

Лазеры на хелатах удобны для лабораторных исследований, так как их излучение охватывает видимый диапазон спектра.

Возбуждение молекул красителей осуществляется импульсами лучистого потока. В процессе накачки молекулы-красителя возбуждаются до высших синглетных состояний и затем переходят в основное состояние. Конечно, генерация осуществляется не по двухуровневой схеме, а по схеме двух электронно-колебательных полос или по более сложной схеме, учитывающей взаимодействие синглетных и триплетных состояний. Ввиду возможности быстрого, безызлучательного перехода из возбужденного состояния в основное накачку необходимо производить короткими мощными импульсами лучистого потока. В качестве источника потока используют либо твердотельный лазер, либо импульсную лампу специальной конструкции.

Одним из наиболее важных достоинств лазеров на красителях является возможность перестройки длины волны выходного излучения, что достигается

изменением концентрации раствора и оптической длины кюветы. Перестройку длины волны можно осуществлять также путем введения в резонатор наклонного интерферометра Фабри — Перо с расстоянием между зеркалами около 20 мкм или дифракционной решетки. Эксперименты показали, что перестройку можно осуществить в полосе около 0,07 мкм с центром на длине волны 0,875 мкм. Таким образом, с помощью лазеров на красителях можно получить практически любые длины волн излучения в видимой и ближней инфракрасной областях спектра.

Благодаря этим свойствам можно создавать малогабаритные лазеры с перестраиваемой длиной волны, которые найдут широкое применение в цветной голографии, фотохимии, лазерной локации и многих других областях науки и техники.

Неорганические соединения редкоземельных элементов представляют собой типичные ионные системы и отличаются высокой эффективностью и фотохимической стойкостью. Чаще всего используется раствор хлорида или окиси неодима (Nd) в оксихлориде селена (SeOCl_2). Для растворения достаточного количества хлорида или окиси неодима растворы подкисляют неводородными кислотами.

Генерация происходит по четырехуровневой схеме, характерной для иона неодима. На соединениях Nd^{3+} : SeOCl_2 и Nd^{3+} : POCl_3 можно создавать лазеры, близкие по параметрам к характеристикам неодимовых лазеров на иттрий-алюминиевом гранате и стекле, однако жидкости имеют большие потенциальные возможности как по мощности излучения, так и по эффективности.

3.4 Газовые лазеры

Газовыми называются лазеры, в которых активной средой является газ, смесь нескольких газов или смесь газа с парами металла. Особенностью активной среды, находящейся в газовой фазе, является ее высокая оптическая однородность, дающая возможность применять большие оптические резонаторы и получать высокую направленность и монохроматичность излучения. Другая особенность такой активной среды — ее малая плотность, вследствие чего энергетический спектр активных частиц (атомов, ионов, молекул) не искажается из-за взаимодействия с соседними активными частицами. Поэтому энергетические уровни в спектре газов узкие, что позволяет сосредоточить энергию излучения газового лазера в нескольких или даже одной модах. При соответствующем выборе активной среды в газовых лазерах можно осуществить генерацию в любой части спектра — от ультрафиолетовой до далекой инфракрасной области.

Большим достоинством газовых лазеров является их способность работать как в непрерывном, так и в импульсных режимах. Эти лазеры характеризуются большим диапазоном мощностей излучения и способностью работать с высоким КПД.

Первыми были созданы газовые лазеры, возбуждаемые продольным электрическим разрядом (т. е. разрядом, направленным вдоль оптической оси резонатора) и получившие название газоразрядных. Инверсия населенностей уровней в газоразрядных лазерах создается в результате прохождения через активную газовую среду электрического тока (табл.). В качестве активных частиц в газоразрядных лазерах используют нейтральные атомы, ионы и молекулы газов. Механизмы возбуждения этих частиц различны.

Инверсия населенностей в молекулярных лазерах происходит под влиянием различных процессов (соударений молекул с быстрыми электронами, неупругих столкновений молекул различных газов в рабочей смеси и др.), которые качественно подобны процессам возбуждения в лазерах на нейтральных газах. Наиболее распространенными рабочими веществами в молекулярных лазерах являются азот и углекислый газ (CO_2) в смеси с азотом и гелием.

Процессы протекающие в газоразрядном лазере

Инициатор	Атомный процесс	Молекулярный процесс
-----------	-----------------	----------------------

Фотон	$\left\{ \begin{array}{l} \text{Поглощение} \rightleftharpoons \text{излучение:} \\ h\nu + A \rightleftharpoons A^* \\ \text{Ионизация} \rightleftharpoons \text{рекомбинация:} \\ h\nu + A \rightleftharpoons A^* + e \end{array} \right.$	Рамановское рассеяние: $h\nu + AB \rightleftharpoons AB^*$ Диссоциация: $h\nu + AB \rightleftharpoons A + B$ $h\nu + AB \rightleftharpoons A^+ + B^-$ - $e + AB \rightleftharpoons AB^* + e$ $e + AB \rightleftharpoons A^+ + B^- + e$ Диссоциация: $e + AB \rightleftharpoons A + B + e$ $e + A^+ + B \rightleftharpoons A + B$ - -
Электрон	$\left\{ \begin{array}{l} \text{Столкновения I рода} \\ \text{Возбуждение:} \\ e + A \rightleftharpoons A^* + e \\ \text{Ионизация:} \\ e + A \rightleftharpoons A^+ + 2e \\ \text{Тройственная рекомбинация:} \\ e + A^+ + B \rightleftharpoons A + B \end{array} \right.$	
Атом	$\left\{ \begin{array}{l} \text{Упругое рассеяние} \\ \text{Столкновения II рода:} \\ A + B^* \rightleftharpoons A^* + B \\ A^* + B \rightarrow A + (B^+)^* + e \\ A^* + B \rightarrow A + (B^+)^* \end{array} \right.$	

Условные обозначения: A — частица в нормальном состоянии; A^* — частица в возбужденном состоянии; A^+ — положительно заряженный ион; A^- — отрицательно заряженный ион; $h\nu$ — фотон; e — электрон.

Газовые лазеры могут возбуждаться не только продольным электрическим разрядом. Большие мощности излучения обеспечивают газодинамические, химические, электроионизационные и ТЕА-лазеры. Название последних образовано из первых букв английских слов «Transversely Excited, Atmospheric Pressure».

3.5 Химические лазеры

Газодинамические и ТЕА-лазеры, будучи приборами большой мощности, нуждаются, как правило, в громоздких и дорогих внешних источниках энергии. С этой точки зрения более выгодны химические лазеры, которые в принципе могут работать без внешнего источника энергии.

Химическим называется газовый лазер, в котором инверсия населенностей возникает непосредственно в процессе элементарной химической реакции. В ходе химической реакции свободная энергия системы уменьшается, однако существуют реакции, в процессе которых скорость образования продуктов в верхних энергетических состояниях больше, чем в нижних. За счет этого и получается инверсия населенности (табл. 7.5). В этих реакциях участвуют только свободные атомы, поскольку молекулы исходных веществ не могут реагировать с достаточно большой скоростью. Следовательно, для инициирования химической реакции необходимо создать большое количество свободных атомов. В большинстве случаев для этого необходимо использовать внешний источник энергии, предназначенный для нагрева газа, или пропускания через газ электрического разряда.

Табл. 7.5. Реакции используемые в химических лазерах

Исходная система	Реакция	Активная молекула	Длина волны излучения, мкм
$H_2 : F_2$	$F + H_2 \rightarrow HF^* + H$ $H + F_2 \rightarrow HF^* \rightarrow HF^* + F$	HF	2,6-3,6
$H_2 : Cl_2$	$H + Cl_2 \rightarrow HCl^* + Cl$	HCl	3,5-4,1

$CS_2 : O_2$	$O + CS_2 \rightarrow CS + SO$ $SO + O_2 \rightarrow SO_2 + O$ $O + CS \rightarrow CO^* + S$ $S + O_2 \rightarrow SO + O$	CO	4,9-5,7
--------------	--	------	---------

3.6 Лазеры на свободных электронах

Из самых новых и интересных типов лазеров, в активной среде которых электроны являются еще более свободными, чем в рассмотренных выше случаях, а именно лазер на свободных электронах. На самом деле в этом лазере электроны движутся свободно (они находятся в вакууме) в периодическом магнитном поле, и процесс вынужденного излучения происходит за счет взаимодействия электромагнитного поля лазерного пучка с электронами, движущимися в такой периодической структуре. В принципе лазеры на свободных электронах могут генерировать вынужденное излучение с высокой пиковой интенсивностью ($\sim$ несколько МВт/см²) на любой длине волны от ИК- до УФ-диапазона и, возможно, даже в рентгеновской области спектра.

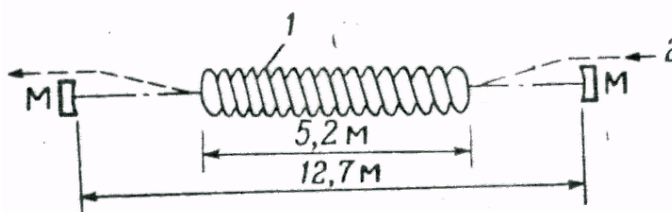


Рис. 6.38. Схематическое представление лазера на свободных электронах. М — зеркало резонатора; 1 — магнит, создающий поле винтовой структуры с периодом 3,2 см; 2 — сгруппированный пучок электронов (43 МэВ). Согласно Дикону и др. [34].

Схема устройства лазера на свободных электронах приведена на рис. 6.38. Пучок релятивистских электронов проходит через поперечное периодическое магнитное поле («виглер»). Как и в любом другом лазере, вынужденное излучение вдоль направления электронного пучка имеет обратную связь, образованную двумя зеркалами с соответствующими коэффициентами отражения. Вынужденное излучение обусловлено взаимодействием электромагнитной волны с электронами, движущимися в периодической магнитной структуре. Этот эффект можно, собственно, назвать магнитным тормозным излучением. Излучение может также поглощаться за счет процесса, обратного тормозному излучению. Длины волн, на которых происходит излучение (знак «+») и поглощение (знак «—»), даются следующим выражением:

$$\lambda = \frac{\lambda_q}{2\gamma^2} \cdot \left[1 + \left(\frac{1}{2\pi} \right)^2 \cdot \frac{\lambda_q^2 \cdot r_0}{mc^2} \cdot B^2 \right] \cdot \left(1 \pm \frac{h\nu}{\gamma mc^2} \right), \quad (6,29)$$

где λ_q — период магнитного поля, γmc^2 — энергия электрона (в эргах), m — масса электрона, r_0 — классический радиус электрона (в сантиметрах) и B — напряженность поперечного магнитного поля (в гауссах). Поскольку длина волны излучения несколько больше длины волны поглощения, усиление наблюдается с длинноволновой стороны, а поглощение — с коротковолновой стороны перехода. Минимальное теоретическое значение ширины линии определяется спонтанным излучением и в то же время зависит от длины магнита.

С помощью устройства, показанного на рис. 6.38, получена излучение с длиной волны $\lambda \approx 3,4$ мкм, средней мощностью 0,36 Вт и максимальной мощностью импульса (электронный пучок был импульсный) 7 кВт.

Длину волны перехода можно перестраивать, изменяя энергию электронов и(или) период магнита. Для получения генерации в видимой и УФ-областях спектра понадобятся сильноточные электронные пучки. Возможности современных ускорителей электронных пучков позволяют реализовать лазерную генерацию на коротких длинах волн по крайней мере до 100 нм. Необходимость использования сложных ускорителей электронных пучков, а также сравнительно невысокий КПД таких лазеров (<0,5%) в настоящее время представляют собой, по-видимому, наиболее серьезное препятствие, ограничивающее развитие лазеров на свободных электронах. Следовательно, будущее лазеров на свободных электронах зависит от того, как будут развиваться относительно большие ускорительные установки.

3.7 Лазеры на центрах окраски

В настоящее время используется целый ряд различных типов центров окраски в щелочно-галогидных кристаллах для получения генерации в эффективных оптически накачиваемых лазерах, перестраиваемых в широкой полосе в ближнем ИК-Диапазоне. Лазеры на центрах окраски позволяют перекрыть диапазон длин волн 0,8—3,3 мкм.

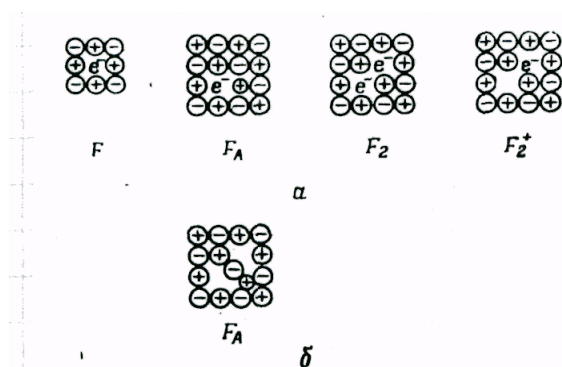


Рис.6.35. а – нормальная структура F -, F_A -, F_2 - и F_2^+ -центров окраски; б — структура релаксированного F_A -центра. Электрон (не показан на рисунке) находится, в двух пустых областях решетки.

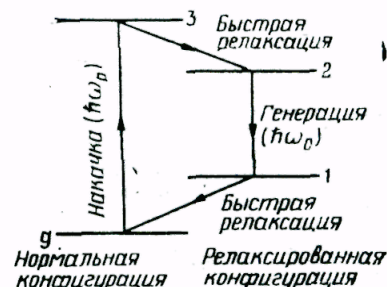


Рис.6.36. Цикл накачки лазера на F -центрах.

На рис. 6.35 показана структура некоторых центров окраски, представляющих интерес для нашего рассмотрения. Из приведенных на рисунке центров окраски [генерация получена лишь на F_A и F_2^+ . Если один из шести ближайших к вакансии ионов металла посторонний (изображен на рисунке кружком меньшего диаметра; например, Li^+ в галогениде калия), то такой дефект называется F_A -центром. Два соседних F -центра, расположенные вдоль направления (110), образуют F_2 -центр, а F_2^+ -центр представляет собой однократно ионизованный F_2 -центр. После того как F -центр будет переведен в возбужденное состояние 3, он быстро (за время порядка пикосекунд) релаксирует в состояние 2. Релаксация F -, F_2 - и F_2^+ -центров состоит лишь в пространственном расширении вакансии (или удвоении вакансии). Далее F -центр рекомбинирует (излучательно) в релаксированное основное состояние {состояние 1 на рис. 6.36), а затем из этого состояния быстро переходит в нерелаксированное основное состояние g .

Из лазеров на F_A -центрах упомянем лазеры на KCl: Li ($\lambda = 2,5—2,9$ мкм) и RbCl: Li ($\lambda = 2,7—3,3$ мкм). Среди лазеров на F_2^+ -центрах отметим лазеры на NaF ($\lambda = 0,88—1$ мкм), KF ($\lambda = 1,25—1,45$ мкм) и LiF ($\lambda = 0,84—1,04$ мкм). Следует заметить, что приготовление лазерных кристаллов с F_A - и F_2^+ -центрами окраски требует особой тщательности и большого искусства.

Лазеры на центрах окраски имеют следующие параметры. Типичная пороговая мощность накачки составляет порядка нескольких десятков милливатт (при фокусировке

излучения накачки в кристалле в пятно диаметром 20 мкм). Получена непрерывная генерация мощностью 1 Вт.

3.8 Рентгеновские лазеры

- создание инверсии населенности;
- устройство и принцип работы лазера;
- сфера применения.

Модуль 4 «Преобразование лазерного пучка»

Цель – ознакомиться с основными методами преобразования лазерного пучка в пространстве.

4.1 Преобразование в пространстве: распространение многомодового лазерного пучка

- представление многомодового пучка как встроеного гауссового пучка;

4.2 Преобразование амплитуды: лазерное усиление

- вычисление скорости изменения энергии фотонов элементарном объеме лазерного усилителя;
- дифференциальное уравнение для полной плотности энергии импульса;
- зависимость изменения выходной плотности от входной плотности энергии;
- ограничивающий фактор.

4.3 Преобразование частоты

- физическая картина;
- генерация второй гармоники;
- параметрическая генерация;
- аналитическое рассмотрение.

4.4 Преобразование во времени

- сжатие импульса;
- расширение импульса.

4.5 Преобразование ширины полосы и частотная метрология, генерация гармоник более высокого порядка и аттосекундных импульсов

- описание процесса преобразования ширины полосы;
- сдвиг несущая –огибающая;
- описание процесса измерения частоты лазерного излучения;
- общие спектральные характеристики типичного спектра гармоник высшего порядка;
- модель генерации высоких гармоник на основе трех стадий возвратного столкновения;
- фазовое согласование при генерации гармоник более высокого порядка.

Модуль 5 «Измерение параметров лазеров»

Цель – ознакомиться с основными методами измерения параметров лазеров

5.1 Характеристики временного и пространственного формирования излучения

Временными характеристиками лазерного излучения являются длительность генерации и частота следования импульсов излучения. Принято выделять следующие временные режимы работы лазеров.

Временной режим	Длительность импульса, с	Мощность, Вт	Энергия импульсе, Дж
Непрерывный	-	$10^{-3} - 10$	-
Импульсный периодический (60 Гц)	10^{-6}	50	0,016
Режим одиночного миллисекундного импульса	$(0,1 - 1)10^{-6}$	$10^4 - 10^5$	1 - 50
С модуляцией добротности (низкая частота повторения)	10^{-8}	$10^7 - 10^8$	0,1 - 1
Пикосекундного импульса (низкая частота повторения)	$10^{-11} - 10^{-12}$	$10^9 - 10^{13}$	0,01 - 0,1

Пространственное распределение на выходе газового лазера имеет ярко выраженный модовый состав. Выходное излучение твердотельных лазеров имеет сложное пространственное распределение. Оно, как правило, достаточно неупорядоченно, и по нему невозможно установить модовую структуру. В частности, выходное излучение лазера на рубине является суперпозицией многих мод, на которую, к тому же, оказывают влияние различные неоднородности структуры активного вещества. Вследствие наличия этих неоднородностей пространственное распределение излучения твердотельных лазеров не поддается математическому описанию. В этом случае говорят о расходимости излучения-лазера (угловой расходимости)

5.2. Элементы оптических схем лазеров

Осветители. Для повышения эффективности накачки лампы и активное вещество помещают в осветитель. Эффективность светопередачи осветителя далека от идеальной. Потери в осветителе составляют от 20 до 70% , что в основном и обуславливает низкий КПД (0,1...1,5%) твердотельных лазеров. Наибольший КПД (около 1,5 %) можно получить, применяя осветитель, показанный на рис.4 а и нитевидную лампу накачки.

В группе осветителей с лампой накачки, расположенной на оси активного вещества, максимальная эффективность достигает 56 % (рис. 4, б), а у остальных осветителей этой группы она не превышает 50%. Осветители, показанные на рис. 4, в, г имеют ограниченное применение, так как получение высокого коэффициента отражения в них связано со значительными технологическими трудностями. Допустимый уровень энергии накачки не превышает 25 Дж.

Для осветителя, показанного на рис. 4, ж, эффективность светопередачи $\eta_{осв} = r_{ст} S_a / S_{осв}$, где $r_{ст}$ - коэффициент отражения стенок; S_a — площадь боковой поверхности активного вещества; $S_{осв}$ — площадь поверхности осветителя,

На рис. 4, з, и представлены схемы осветителей, образованных несколькими эллиптическими цилиндрами. Такие осветители применяются в лазерах с большой выходной энергией. С увеличением числа ламп накачки относительная величина энергии накачки возрастает, однако общая эффективность осветителя снижается. Оптимальное число ламп накачки $N_{opt} = R_2 n / R_1$ где n — показатель преломления.

Применение осветителя, показанного на рис. 4, к, обеспечивает относительно высокий $\eta_{осв} \approx 75\%$). Допустимая величина энергии накачки достигает 1000 Дж. На рис. 4, м, н представлены схемы осветителей для активных тел прямоугольного сечения. Осветитель

на рис. 4, *н* применяется в схемах накачки лазеров с высокой импульсной мощностью и в каскадах оптических квантовых усилителей.

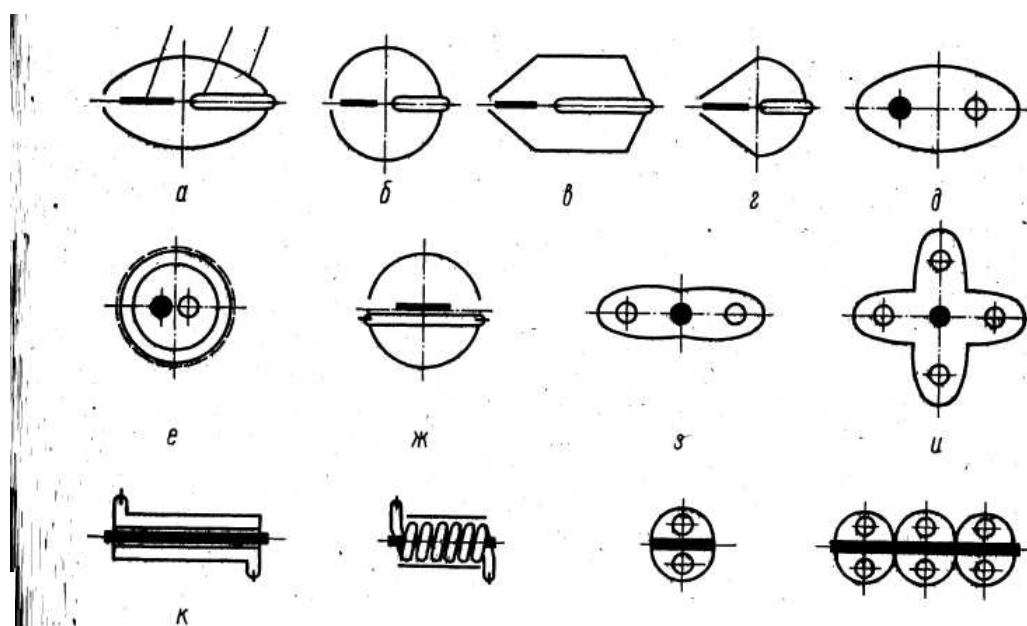


Рис. 4. Схемы конструкций осветителей: а – г лампа накачки находится на оси активного вещества; д – и – лампа накачки параллельна оси активного вещества; к, л – лампа накачки концентрична оси активного вещества; м, н – лампа накачки параллельна боковой поверхности активного вещества (прямоугольное активное вещество); 1 – активное вещество; 2 – лампа накачки; 3 – осветитель.

Зеркала. В лазерной технике нашли применение зеркала с металлическими и диэлектрическими отражающими покрытиями. Зеркала с металлическими отражающими покрытиями имеют существенные недостатки; отражательная способность металлов мала и составляет 70...90%; покрытия имеют малую стойкость к световому излучению и имеют малую механическую прочность. Так, например, при плотностях энергии 50...80 Дж/см² серебряные покрытия начинают отслаиваться от стеклянной подложки после 50...200 вспышек.

Коэффициент отражения у диэлектриков значительно меньше, чем у металлов (для стекла с показателем преломления $n = 1,5$ коэффициент отражения составляет всего 4%), однако использование многослойных отражающих диэлектрических покрытий дает возможность получать коэффициенты отражения более 99%. Диэлектрические зеркала состоят из большого числа (13 - 17) слоев двух диэлектриков (с высоким и низким показателями преломления), расположенных попеременно. Толщина слоя диэлектрического покрытия $\Delta = \Delta n/4$.

Нечетные слои делают из диэлектриков с высоким показателем преломления: сульфиды цинка и сурьмы, окислы титана, циркония, гафния, тория, свинца. Четные слои – из материалов с низким показателем преломления (фториды магния и стронция, двуокись кремния). Преимущества диэлектрических покрытий можно реализовать лишь при высококачественном изготовлении подложки. Для получения коэффициента отражения более 99% при $\lambda = 0,7$ мкм высота микронеровностей не должна превышать 0,005 мкм. Стойкость диэлектрических покрытий к световому излучению зависит от числа слоев, температуры подложки при нанесении диэлектриков, чистоты исходных материалов и от ориентации микрокристаллов.

Резонансные отражатели. В ряде случаев в качестве выходного зеркала используют резонансные отражатели, которые представляют собой набор (стопу) плоскопараллельных пластин, разделенных воздушными промежутками. Максимальный коэффициент отражения системы, состоящей из m пластин:

$$r_{\max} = \left[(1 - n^{2m}) / (1 + n^{2m}) \right]^2$$

где n - показатель преломления материала пластин.

Толщины пластин, также как и толщины воздушных промежутков, равны целому нечетному значению $\lambda/4$. Для получения расчетного значения коэффициента отражения при изготовлении резонансного отражателя необходимо, чтобы пластины отличались по толщине не более чем на $\lambda/8$. Изменение толщины пластин, вызванное изменением температуры, приводит к смещению частоты, соответствующей максимуму коэффициента отражения. Резонансные отражатели имеют высокую стойкость к световому излучению, определяемую порогом разрушения материала пластин. Призмы-крыши в резонаторах лазеров позволяют отказаться от отражающих покрытий и использовать явление полного внутреннего отражения. При этом увеличивается допустимая плотность энергии в резонаторе лазера, определяемая порогом разрушения материала призмы, и выравнивается плотность лазерного излучения по сечению активного вещества. Величина потерь на отражение зависит от материала призмы и составляет 4...9

5.3 Измерение энергетических параметров

К энергетическим параметрам лазеров относят:
мощность излучения P при работе лазера в непрерывном режиме;

энергию излучения одиночных импульсов $W = \int_0^{t_u} p(t) dt$, где $p(t)$ – мгновенная

мощность, t_u — длительность импульса;
среднюю мощность в импульсе $P_{cp} = W/t_u$;

среднюю мощность импульсно-модулированного излучения $P_{cp}^* = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$

где T — период повторения импульсов;
коэффициент полезного действия η .

Энергия и мощность излучения лазеров — это разные, хотя и связанные друг с другом величины. Поэтому некоторые приборы пригодны для измерения как мощности излучения, так и полной энергии в импульсе. Измерения энергии и мощности излучения лазеров не отличаются высокой точностью (ошибки измерения имеют порядок 5% и редко понижаются до 1%).

Калориметрические измерители. Калориметрический метод измерения энергии основан на преобразовании энергии излучения лазера в тепловую энергию калориметра, что вызывает изменение температуры поглотителя. Регистрация изменения температуры может проводиться непосредственно либо косвенно как изменение объема, давления или некоторых других параметров поглотителя. Калориметр должен обладать обратимостью в том смысле, что за время установления равновесия в поглотителе не должно происходить необратимых изменений, и, следовательно, после окончания измерения калориметр должен возвращаться в свое первоначальное состояние.

Для регистрации импульсов излучения с энергией менее 10^{-3} Дж применяют *вакуумный микрокалориметр* с поглотителем в виде миниатюрного конуса,

изготовленного из медной фольги и имеющего массу 100 мг. Измеряемое излучение направляется в поглотитель с помощью короткофокусной линзы. Изменение температуры поглотителя регистрируется дифференциальной медно-константановой термопарой. Один из спаев термопары укреплен на вершине конуса, а другой (холодный) присоединен к траверсе, выходящей наружу через ножку колбы. Конус вклеен в слюдяную пластину, закрепленную в держателях. При использовании гальванометра типа М-95 чувствительность прибора составляет 0,8 мДж на деление шкалы.

В жидкостных калориметрах поглощенная энергия распределяется по всему объему, следовательно, в них устраняются ошибки, вызываемые местным радиационным нагревом. При правильном подборе длины пути и поглощающей способности жидкости выравнивание температуры по объему среды достигается с помощью конвекции. Следует следить лишь за тем, чтобы измеряемая мощность не превышала величины, при которой начинается рассеяние энергии в калориметре вследствие кипения жидкости. Температуру измеряют с точностью до $0,01^\circ$ прецизионными термисторами, включенными в мостовую схему.

При измерении жидкостными калориметрами энергии излучения лазеров с модулированной добротностью следует учитывать возможность повреждения калориметров импульсами с большой пиковой мощностью. Во избежание этого входное окно калориметра должно быть выполнено из сапфира, плавленого кварца или боросиликатного стекла. В качестве рабочей жидкости целесообразно брать растворы одноатомных ионов металлов, в которых поглощенная энергия преобразуется только в тепло, а не в энергию химических связей.

Основной недостаток жидкостных калориметров с датчиками температуры - большое время установления теплового равновесия (единицы минут). За это время часть тепла теряется на излучение и конвекцию, что является причиной дополнительных погрешностей в измерении величины поглощаемой энергии. Этого недостатка лишены жидкостные калориметры для измерения больших энергий излучения, работающие подобно термопарам.

Болометрические измерители. Данный метод измерения энергии излучения лазеров основан на изменении сопротивления болометра при падении на него излучения. Болометр выполнен, в виде мотка тонкой эмалированной медной проволоки, свободно и беспорядочно уложенной в полости с посеребренной внутренней поверхностью. Для уменьшения конвекционных токов воздуха отверстие полости закрывают плоским, стеклянным, окном.

Для измерения энергии импульсов в диапазоне $10^{-1} \dots 10^{-3}$ Дж применяют болометр в виде однослойной бескаркасной катушки конической формы, намотанной медной эмалированной проволокой диаметром 0,06 мм. Общее сопротивление катушки 100 Ом. Угол раствора конуса 15° при диаметре входного отверстия 14 мм. Болометр включают в одно из плеч моста. Во второе плечо включают аналогичный болометр для компенсации колебаний температуры окружающей среды. Намеряемое излучение направляется внутрь конуса рабочего болометра без применения фокусирующих линз.

Фотоэлектрические измерители. Любой фотоприемник, выходной сигнал которого пропорционален падающему, лучистому потоку, дает возможность измерять мощность непрерывного излучения лазеров или энергию излучения в импульсе. Для измерения средней мощности излучения лазеров непрерывного действия применяют полупроводниковые фотоприемники с p - n -переходом (селеновые - для ближней ультрафиолетовой и видимой областей спектра, кремниевые - для области с длинноволновой границей 1,2 мкм и неохлаждаемые фотоприемники из антимонида индия - для области с длинноволновой границей 6 мкм).

Пондеромоторные измерители. Действие пондеромоторного измерителя основано на использовании светового давления. Такие приборы применяют для измерения энергии

и мощности излучения лазеров, работающих в импульсном и непрерывном режимах. Верхний предел измеряемых величин практически не ограничен.

Измерители больших импульсных мощностей. В настоящее время разрабатываются новые методы измерения больших импульсных мощностей, с использованием различных эффектов в кристаллах, прозрачных для лазерного излучения. При падении излучения на сегнетоэлектрик (пироэлектрик) можно получить на кристалле или на последовательно соединенном с ним резисторе которое можно измерить. Пироток

Существует также метод измерения мощности, основанный на использовании обратного электрооптического эффекта.

Измеритель мощности, основанный на использовании обратного электрооптического эффекта, состоит из кристалла, прозрачного для измеряемого излучения; конденсатора, в котором находится кристалл и с пластин которого снимается напряжение, пропорциональное пиковой мощности моноимпульса лазера; электронной схемы для измерения наведенной ЭДС (пикового вольтметра) и осциллографа для регистрации длительности импульса при измерении энергии излучения.

5.4 Измерение длины волны излучения, длительности импульсов и параметров пучка

Измерение длины волны излучения. Ни один из имеющихся в настоящее время фотоприемников не обладает достаточно малой постоянной времени, чтобы с его помощью можно было зафиксировать колебания с оптической частотой. Даже у лучших образцов фотоумножителей частотная характеристика доходит до $3 \cdot 10^9$ Гц, в то время как оптические частоты имеют порядок 10^{14} Гц.

Наиболее распространенным прибором для измерения длины волны лазеров является термостатированный интерферометр Фабри – Перо.

Основная проблема при измерении длины волны - монохроматичность и стабильность источника излучения. Обычно применяемая в качестве эталонного источника, ртутная лампа на изотопе Hg^{198} имеет нестабильность $\Delta\lambda/\lambda_0 = \pm 1 \cdot 10^{-8}$, что обеспечивает удовлетворительную точность намерения длины волны.

Измерение выполняют следующим образом. Излучение эталонного источника, длина волны λ_0 которой известна и излучение лазера, длину волны λ_x которого надо определить, направляют одновременно в интерферометр Фабри - Перо. Изменяя расстояние между пластинами интерферометра, отмечают расстояния $l_1, l_2, l_3, \dots$, при которых отчетливо наблюдается интерференционная картина. Пусть интерференционная полоса m -го порядка для λ_x совпадает с полосой $(m + n)$ -го порядка для λ_0 . Следующее совпадение произойдет после прохождения через поле зрения p полос для λ_x и $(p + 1)$ полос для λ_0 . Измеряя число p , находим $\lambda_x = \lambda_0 (p + 1)/p$ или $\lambda_x - \lambda_0 = \lambda_0 \lambda_x / 2 (l_2 - l_1)$. Точность метода ограничивается разрешающей способностью отсчетного устройства, которое обычно снабжают микрометрическим винтом. Известен также метод измерения длины волны лазеров с помощью, так называемого активного интерферометра, представляющего собой лазер с трехзеркальным резонатором. Сущность этого метода состоит в следующем. Нормально к оси излучения лазера непрерывного действия располагают неподвижное и подвижное зеркала. При перемещении подвижного зеркала характер нагрузки лазера меняется и его излучение оказывается промодулированным по амплитуде с периодом модуляции, соответствующим скорости перемещения подвижного зеркала на величину $\lambda_x/2$.

Обозначая через N число циклов модуляции интенсивности излучения лазера, проходящего через полупрозрачное зеркало, n - показатель преломления воздуха и L_x - расстояние, на которое переместилось подвижное зеркало, получаем $\lambda_x = 2L_x n/N$. Измерение длины волны λ_x сводится к перемещению подвижного зеркала и к подсчету циклов модуляции, осуществляемого приемником излучения с усилителем и электронным

счетчиком. Подвижное зеркало устанавливают на каретке и перемещают с помощью синхронного двигателя на расстояние около 200 мм. С помощью сменного комплекта шестерен обеспечивается скорость перемещения от 5 до 100 мм/мин. Погрешность измерения длины волны излучения лазера данным методом - порядка нескольких единиц микрометров.

Измерение длительности импульсов и параметров пучка. Методика измерения длительности импульсов излучения лазеров состоит в преобразовании оптических импульсов в электрические с последующим измерением их длительности обычными способами, применяемыми в электронике

Для измерения угла расходимости излучения лазера используют метод фокального пятна, заключающийся в измерении диаметра пятна d_0 в фокальной плоскости объекта с исправленными аберрациями. Отношение величины d_0 к фокусному расстоянию объектива f характеризует угловую расходимость излучения лазера

Метод фотографирования дает возможность оценить распределение энергии излучения в пучке на заданном расстоянии от лазера. Этот метод основан на том, что плотность почернения фотографического негатива является линейной функцией логарифма экспозиции. Если угол наклона характеристической прямой известен, то экспозицию, а следовательно, и энергию регистрируемого излучения можно найти по данным измерений почернения негатива.

Метод сканирования пучка приемником излучения, регистрирующим в каждый момент времени энергию излучения небольшой части пучка, можно использовать только для лазеров непрерывного действия. Этот метод требует воспроизводимого и точно измеряемого механического перемещения приемника с очень малой площадью чувствительной поверхности или отверстия диафрагмы. Поскольку, характеристики приемников излучения линейны в широких пределах изменения падающего потока, этим методом можно точнее измерять распределение энергии излучения в пучке, чем при помощи фотографирования.

Модуль 6 «Системы сканирования луча лазера»

Цель – ознакомиться с основными методами пространственного перемещения по заданной траектории

6.1 Классификация и параметры систем сканирования

Под сканированием лазерного луча понимается его пространственное перемещение, осуществляемое по определенной траектории и с известной скоростью. Устройства, позволяющие пространственно перемещать луч лазера, называют системами сканирования или оптическими дефлекторами. По характеру взаимодействия лазерного луча с активной средой они разделяются на преломляющие, отражательные, дифракционные, двулучепреломляющие и интерференционные; по характеру отклонения луча - на непрерывные (плавные) и дискретные; по расположению управляющих элементов - на внутриврезонаторные и внешние. По используемым физическим явлениям дефлекторы подразделяются на оптико-механические, электро- и акустооптические и пьезоэлектрические.

К наиболее важным параметрам дефлектора относятся следующие: закон сканирования; амплитуда угла отклонения $\Delta\alpha$; разрешающая способность N ; частота сканирования f_s ; быстродействие t_D ; допустимая линейная апертура D_l сканируемого лазерного луча; допустимая угловая расходимость γ_l луча; спектральный оптический диапазон длин волн $\Delta\lambda$; управляющее электрическое направление U и ток I .

Амплитуда угла отклонения $\Delta\alpha$ характеризует максимальное угловое перемещение светового пучка.

Для оценки разрешающей способности обычно используют критерий Рэлея, согласно которому расходимость светового пучка в радианах

$$\Gamma = \zeta \lambda / n D_1$$

где λ - длина волны излучения; m ; n - показатель преломления среды; ζ - коэффициент, зависящий от формы пучка (для пучка круглого сечения $\zeta = 1,22$).

Разрешающая способность N дефлектора при одномерном сканировании и отсутствии искажений, вносимых дефлектором в апертуру пучка, выражается соотношением

$$N = \Delta \lambda / \gamma$$

Из этих выражений получаем

$$\Delta \alpha D_1 = \zeta \lambda N$$

Разрешающая способность - более важный параметр, нежели угол отклонения (так, величина $\Delta \alpha$ может быть увеличена или уменьшена с помощью соответствующей оптической системы, а величина N остается при этом неизменной или, в худшем случае, уменьшается, так как данное соотношение является инвариантом).

Частота сканирования f_c (в герцах) определяет число периодов колебаний луча при его пространственном перемещении за одну секунду.

Допустимая линейная апертура D_1 и допустимая угловая расходимость γ_1 пучка лазера определяют предельные значения этих величин, при которых обеспечивается нормальная работа дефлектора.

6.2 Оптико-механические дефлекторы

В настоящее время наиболее широкое применение в лазерных устройствах и приборах различного целевого назначения получили оптико-механические дефлекторы. Наиболее часто для целей развертки применяются различного рода перемещающиеся в пространстве преломляющие и отражающие элементы, устанавливаемые на пути луча.

В качестве преломляющих дефлекторов используются механически перемещающиеся в пространстве оптические клинья и различные преломляющие призмы. Отражательные дефлекторы выполняют в виде вращающихся и, колеблющихся зеркал или в виде многогранных зеркальных пирамид и призм. Для зеркал угол отклонения $\Delta \alpha = 2 \alpha$, где α - угол разворота зеркала. Ось вращения многогранной зеркальной пирамиды расположена параллельно оси сканируемого светового пучка. Угол отклонения луча равен углу поворота пирамиды $\Delta \alpha = \alpha$. Частота сканирования лазерного луча $f_c = n_{об} m$, где m - число граней пирамиды, $n_{об}$ - частота вращения c^{-1} .

Методы дискретного отклонения лазерного луча с использованием оптически активных сред основаны на управлении положением поляризации луча и на пространственном поперечном или угловом его отклонении в элементарной ячейке. Элементарная ячейка дискретного дефлектора состоит из поляризатора, поляризационного переключателя и отклоняющего элемента. Поляризатор предназначен для превращения излучения в линейно поляризованное. Если луч лазера линейно поляризован, то поляризатор не нужен. Поляризационный переключатель служит для изменения направления поляризации входящего луча на 90° при воздействии на него управляющего электрического или магнитного поля. Он может быть изготовлен из материала, характеризующегося электрооптическим линейным или квадратичным эффектом, а также магнитооптическим эффектом.

Возможность отклонения лазерного луча с помощью акустических волн основана на периодическом и пространственном изменении плотности среды под воздействием ультразвука, которое приводит к периодическому и пространственному изменению ее показателя преломления n в результате акустооптического эффекта. Акустические волны образуют в среде фазовую решетку, период которой Λ является длиной звуковой волны. При прохождении лазерного луча сквозь среду с изменяющимся по синусоидальному закону показателем преломления возникает

дифракция или рефракция луча. Нормальная дифракция возникает в том случае, когда ширина светового пучка D_I значительно больше длины акустической волны Λ , угол φ между направлением распространения света и фронтом акустической волны равен нулю, а отношение L/Λ достаточно мало (L - длина пути лазерного луча в акустическом поле). Если лазерный пучок падает на бегущую звуковую волну не строго перпендикулярно к направлению звука, то дифракционная картина меняется, при этом наблюдается ярко выраженная асимметрия боковых дифракционных спектров по отношению к центральному максимуму. Если $D_I \gg \Lambda$, угол φ и длина L достигают вполне определенных величин ($\varphi = \varphi_B$, $L > L_0$), то будет наблюдаться дифракция только первого порядка (дифракция Брэгга). Если $D_I \ll \Lambda$ и $\varphi = 0$, при прохождении оптического излучения сквозь акустическое поле возникает рефракция луча лазера. Таким образом, в зависимости от соотношения между величинами D_I , Λ , φ и L и акустооптические системы сканирования разделяются на дифракционные ($D_I \gg \Lambda$, $\varphi = 0$), дифракционные брэгговские ($D_I \gg \Lambda$, $\varphi = \varphi_B$, $L > L_0$) и рефракционные или преломляющие ($D_I \ll \Lambda$, $\varphi = 0$). Чисто дифракционные дефлекторы не получили развития, тогда как дифракционные брэгговские находят широкое применение.

В пьезоэлектрических дефлекторах для сканирования лазерного луча используется обратный пьезоэлектрический эффект, проявляющийся в сжатии, растяжении или деформации сдвига некоторых кристаллов под воздействием электрического поля. В зависимости от конструкции и способа использования обратного пьезоэлектрического эффекта дефлекторы подразделяют на пластинчатые, торцевые и поворотные.

6.3 Дефлекторы непрерывного сканирования на основе электрооптических кристаллов

К данным дефлекторам относят устройства с изменяющимся во времени и пространстве показателем преломления: различные треугольные и прямоугольные призмы, являющиеся элементарными ячейками, и призмы с квадрупольными электродами.

Угол отклонения и разрешающая способность дефлекторов существенно зависят от длины L пути луча в активной среде с изменяемым показателем преломления. Для увеличения L изготавливают специальные блочные зеркально-преломляющие системы, состоящие из отдельных элементарных ячеек. Активная длина пути луча в дефлекторе $L_{\text{акт}} = qL$, где L - длина пути луча при однократном прохождении сквозь активную среду, м; q - коэффициент, учитывающий число проходов луча сквозь один и тот же участок активной среды.

Дефлекторы с использованием временного изменения показателя преломления по взаимному расположению вектора воздействующего электрического поля и поляризации управляемого излучения разделяют на три типа. В дефлекторах первого типа поляризация лазерного луча перпендикулярна вектору напряженности электрического поля.

В данных конструкциях можно использовать электрооптические кристаллы: KDP, DKDP, ADP и др. В дефлекторах третьего типа угол между поляризацией отклоняемого лазерного луча и вектором напряженности электрического поля равен 45° . Возможность использования электрооптических кристаллов в дефлекторах того или иного типа определяется величинами максимального изменения показателя преломления Δn , зависящими от действующего электрооптического коэффициента r_{ij} для линейного электрооптического эффекта и R_{ij} для квадратичного электрооптического эффекта, а также показателя преломления кристалла в направлении его максимального изменения.

Модуль 7 «Прохождение лазерного излучения через атмосферу»

Цель – изучить процесс прохождения лазерного излучения через атмосферу и с эффектами сопровождающими процесс прохождения излучения сквозь атмосферу

7.1 Распространение лазерного излучения в атмосфере

К основным процессам, сопровождающим распространение лазерного излучения в атмосфере, относят селективное поглощение его парами воды, углекислым газом, озоном и метаном, а также рассеяние мельчайшими частицами, находящимися в атмосфере во взвешенном состоянии. Концентрация водяных паров в атмосфере изменяется в зависимости от географического положения, высоты, времени года, местных метеорологических условий и колеблется (по объему) от $1 \cdot 10^{-3}$ до 4%.

Главным компонентом атмосферы, поглощающим инфракрасное излучение, является водяной пар. Для расчета поглощения излучения водяным паром введено понятие количества осаждаемой воды, обозначаемое w и измеряемое толщиной слоя воды в миллиметрах, который получится, если при заданной площади слоя весь содержащийся в атмосфере водяной пар превратить в воду. Расчет поглощения излучения водяными парами и углекислым газом проводят с помощью специальных таблиц, в основу которых положены экспериментальные данные.

Высокая монохроматичность излучения лазера создает особые условия распространения его в атмосфере. Для количественной оценки поглощения излучения лазера в атмосфере необходимо знать с высокой точностью спектры поглощения атмосферных газов.

Кроме поглощения, лучистый поток рассеивается молекулами воздуха (молекулярное рассеяние) и различными частицами, присутствующими в атмосфере, — кристаллами солей, пылинками, поднятыми ветром с поверхности Земли, остатками продуктов сгорания, каплями воды и кристаллами льда (аэрозольное рассеяние).

При распространении пространственно-ограниченных световых пучков в атмосферных аэрозолях большое значение приобретает рассеянное назад излучение (обратное рассеяние). В первом приближении считают, что обратное рассеяние (в направлении к источнику излучения) является изотропным.

Затухание оптического излучения в атмосфере подчиняется закону Бугера — Бэра:

$$P = P_0 e^{-\alpha L}$$

где L — длина пути, проходимого излучением в атмосфере, км; α — показатель затухания, км^{-1} ; P_0 и P — мощность оптического сигнала до и после затухания соответственно.

Затухание обусловлено поглощением и рассеянием оптического излучения, поэтому $\alpha = \alpha_{\text{п}} + \alpha_{\text{р}}$, где $\alpha_{\text{п}}$ и $\alpha_{\text{р}}$ — показатели поглощения и рассеяния соответственно. При конструировании лазерного прибора, предназначенного для работы в атмосфере, выбирают лазер с длиной волны излучения, находящейся в одном из окон пропускания. Поэтому $\alpha_{\text{п}} \ll \alpha_{\text{р}}$, и можно считать что $\alpha \approx \alpha_{\text{р}}$. Показатель затухания связан с метеорологическими параметрами атмосферы, которые меняются во времени и в пространстве. Обычно показатель затухания вычисляют, учитывая его корреляцию с величиной $S_{\text{мдв}}$, которая легко определяется экспериментально и систематически фиксируется метеостанциями.

При распространении лазерного излучения в атмосфере помимо его затухания возникает искривление световых пучков (качание луча), случайные изменения фазы колебаний, флуктуации поляризации излучения и другие явления. Они обусловлены турбулентностью атмосферы, которая вызывает колебания температуры, влажности и плотности воздуха, а следовательно, и его коэффициента преломления. Области скачков показателя преломления (неоднородности) могут иметь протяженность от нескольких миллиметров до сотеу метров.

В условиях сильной турбулентности в нижних слоях атмосферы появляются неоднородности различных масштабов и различной структуры, поэтому при исследовании влияния турбулентности на распространение лазерного излучения используют так называемые структурные функции, введенные А. Н. Колмогоровым.

Турбулентность атмосферы приводит к флуктуации фазы как вдоль, так и поперек пучка, в результате чего снижается временная и пространственная когерентность излучения. Изменения плотности воздуха, вызванные малыми температурными градиентами в атмосфере, приводят к изменениям показателя преломления среды, в результате чего искривляются направления световых пучков.

7.2 Распространение мощного лазерного излучения в атмосфере

Распространение в атмосфере лазерного излучения гигантской импульсной мощности (примерно 10^{11} Вт) с длительностью около 10^{-3} с сопровождается рядом нелинейных эффектов: просветлением тумана, изменением прямолинейности распространения излучения, вызванным конвективным перемешиванием атмосферы, тепловой дефокусировкой луча вследствие повышения температуры в канале просветления и самофокусировкой излучения в результате кинетического охлаждения атмосферы. Для описания затухания мощного лазерного излучения в атмосфере закон Бугера — Бэра неприменим.

Просветление полидисперсного тумана. Известно, что облако или туман состоит из мелких водяных капель от 5 до 20 мкм. Под действием мощного лазерного излучения происходит уменьшение объема капель во времени, вызванное процессом испарения. В результате этого происходит просветление канала лазерного, луча. Скорость просветления определяется темпом испарения капель. Но это справедливо только тогда, когда поглощение излучения в атмосфере определяется процессами испарения водяных капель, преобладающими над поглощением парами воды и углекислым газом.

Влияние процесса конвективного перемешивания. Поглощенная атмосферой энергия оптического излучения вызывает перемешивание газа в вертикальном направлении в гравитационном поле, что приводит к расширению луча.

Повышение температуры в канале лазерного луча. Капли тумана, поглощая энергию оптического излучения, испаряются, что обуславливает нагрев межкапельной среды атмосферы. Повышение температуры газовой среды сопровождается ее тепловым расширением. Если интенсивность лазерного излучения убывает от оси к краю луча, полидисперсная среда приобретает свойства рассеивающей тепловой линзы, что приводит к падению плотности мощности излучения в канале лазерного

Расширение пучка за счет турбулентности атмосферы. При распространении лазерного излучения до высоты примерно 12 км значительный вклад в расширение пучка вносят турбулентные пульсации, которые возникают при неоднородном нагреве атмосферы мощным оптическим излучением.

Кинетическое охлаждение атмосферы. При резонансном поглощении излучения с длиной волны 10,6 мкм молекулами CO_2 возникает эффект кинетического охлаждения атмосферы, приводящий к самофокусировке мощных пучков. Например, миллисекундный импульс с апертурой 1 м и плотностью мощности 10^6 Вт/см², выходящий из слоя атмосферы с повышенной влажностью (туман, дымка) на высоте 3 км, по достижении высоты 30 км уменьшит свои размеры до 0,5—0,8 м, в результате чего плотность мощности возрастает.

Явление самофокусировки мощного лазерного излучения возникает также вследствие эффектов Керра и магнитоотрицательности. Эффект Керра связан с ориентацией дипольных элементов молекул по направлению электрического поля, что приводит к анизотропии свойств преломляющей среды. Эффект магнитоотрицательности заключается в возникновении добавочного объемного давления в области действия излучения.

Модуль 8 «Приемники лазерного излучения»

Цель – ознакомиться с классификацией и принципом работы приемников лазерного излучения

8.1 Классификация, основные параметры и характеристики

Приемники излучения предназначены для преобразования энергии оптического излучения в электрическую (или какую-либо другую) энергию, более удобную для непосредственного измерения.

По принципу действия приемники делят на две большие группы: тепловые и фотонные. Действие тепловых приемников основано на изменении тех или иных свойств при изменении температуры, образующейся при воздействии падающего лучистого потока, независимо от его спектрального состава.

Различают следующие типы тепловых приемников:

болометры, у которых при изменении температуры меняется электрическое сопротивление чувствительного элемента;

термоэлементы, в которых используется термоэлектрический эффект;

пирозлектрические приемники, действие которых основано на изменении параметров сегнетоэлектрика под действием падающего лучистого потока;

оптико-акустические приемники, в которых используется свойство увеличения объема газа при повышении температуры.

Параметры приемников излучения:

интегральная чувствительность - отношение малого приращения фототока к малому изменению воздействующей величины (потока, освещенности);

вольтовая чувствительность — отношение приращения напряжения, снимаемого с приемника, к вызвавшему его приращению лучистого потока;

напряжение шума — среднеквадратическое значение амплитуд хаотических сигналов, возникающих на выходе приемника;

порог чувствительности — минимальное значение лучистого потока, вызывающего на выходе приемника сигнал, равный напряжению шума или превышающий его в заданное число m раз; так как напряжение шума $U_{ш}$ приемника зависит от площади q_n его чувствительного слоя и полосы частот Δf схемы усиления сигнала, то за порог чувствительности приемника принимают величину

$$F_{пор}^* = \frac{m\sqrt{U_{ш}^2}}{s_U \sqrt{q_n \Delta f}}$$

где s_U — вольтовая чувствительность приемника, В/Вт;

обнаружительная способность (Detectivity) — величина, обратная порогу чувствительности.

постоянная времени — промежуток времени от начала облучения приемника до момента, когда его выходная величина достигает заданной части (0,63 или 0,95) значения, установившегося при длительном облучении.

Основные характеристики приемников излучения:

спектральная— зависимость чувствительности приемника от длины волны монохроматического излучения;

частотная — зависимость чувствительности приемника от частоты модуляции падающего на него излучения;

энергетическая — зависимость выходного сигнала от величины падающего лучистого потока (при постоянном напряжении питания цепи приемника);

вольтовая—зависимость чувствительности приемника от напряжения питания;

спектр мощности шума — распределение дисперсии шума по частотам.

8.2 Приемники излучения с внешним фотоэффектом

В фотонных приемниках происходит прямое взаимодействие между падающими фотонами и электронами материала чувствительного элемента'. Различают следующие типы фотонных приемников:

фотоэлементы и фотоумножители, с использованием внешнего фотоэффекта, при котором электроны эмитируются с поверхности чувствительного слоя под действием падающего лучистого потока;

8.3 Фоторезисторы

Фоторезисторы, с использованием внутреннего фотоэффекта, заключающегося в образовании свободных электронов в твердом теле и изменении его электропроводности при поглощении квантов излучения;

Фотогальванические приемники, состоящие из двух различных контактирующих веществ, на границе которых при облучении возникает фотоэлектродвижущая сила; фототок в цепи этих приемников возникает при отсутствии внешнего питающего напряжения;

8.4 Приемники излучения с $p-n$ переходом

Фотодиоды — приемники, у которых в качестве контактирующих веществ применены полупроводники с различным типом проводимости; фотодиоды работают при воздействии внешнего электрического напряжения;

Фототриоды — устройства, подобные фотодиодам, но представляющие собой системы с $n-p-n$ или $p-n-p$ — p -переходами и имеющие свойство внутреннего усиления фототока;

Фотоэлементы с продольным (боковым) фотоэффектом — приемники на основе полупроводников с различными типами проводимости, у которых при облучении при-контактной области наряду с фотоэлектродвижущей силой, возникающей между слоями с p - и n -проводимостями, образуется разность потенциалов вдоль $p-n$ -перехода.

По спектральному диапазону чувствительности приемники разделяют на *неселективные*, чувствительность которых не зависит от длины волны падающего излучения, и *селективные*, чувствительность которых ограничена определенным длинноволновым пределом.

По конструктивным признакам приемники излучения классифицируют на *одноэлементные* и *многоэлементные* (мозаичные), а также на *неохлаждаемые*, работающие при температуре, близкой к 300 К, и *охлаждаемые* приемники, работающие при температуре 195, 77 К и менее 77 К- В лазерной аппаратуре наибольшее применение находят фотоэлементы, фотоумножители, фоторезисторы, фотодиоды и некоторые специальные типы приемников излучения.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

Задачи к практическим занятиям по представленным ниже темам формируются на основе учебного пособия [1] основного списка литературы. Тематика задач включает как темы модулей девятого семестра, так и темы модулей восьмого семестра. Для закрепления пройденного материала студентам предлагается прорешать несколько домашних задач, правильность решения которых проверяется на следующем практическом занятии.

В начале практического занятия студентам предлагается вспомнить основные законы и формулы по теме занятия, при этом можно использовать такой интерактивный метод обучения как «Мозговой штурм». Далее зачитывается условие задачи, и проводится предварительный разбор задачи вместе с аудиторией, после этого любому желающему студенту предлагается изложить решение задачи на доске.

Семестр 9

Тематика практических занятий	Номера аудиторных задач	Номера домашних задач
Исходные концепции	1.1, 1.3, 1.5	1.2, 1.4, 1.6.
Взаимодействие излучения с атомами и ионами	2.1, 2.3, 2.4, 2.5, 2.7, 2.9	2.2, 2.6, 2.8, 2.10, 2.12
Распространение лучей и волн в оптических средах	4.1, 4.3, 4.6, 4.8, 4.9, 4.10	4.2, 4.4, 4.5, 4.7
Пассивные резонаторы	5.1, 5.2, 5.4, 5.7, 5.11	5.4, 5.8, 5.9, 5.10
Процессы накачки	6.3, 6.5, 6.11	6.4, 6.15, 6.18
Непрерывный режим работы лазера	7.5, 7.7, 7.11, 7.16, 7.19	7.1, 7.4, 7.10, 7.12
Нестационарный режим работы лазера	8.1, 8.2, 8.5, 8.10, 8.18	8.3, 8.4, 8.6
Типы лазеров	9.5, 9.6, 9.7, 9.8, 9.11, 10.4, 10.5, 10.11	9.1, 9.2, 9.3, 9.4, 10.1, 10.2, 10.3
Преобразование лазерного пучка	12.3, 12.6, 12.8	12.1, 12.2

3 Методические указания (рекомендации)

3.1 Методические указания для преподавателей

Дисциплина «Физика лазеров» относится к циклу специальных дисциплин, региональная компонента. Для изучения дисциплины предусмотрена аудиторная и самостоятельная формы работы.

В пунктах 3 и 5 рабочей программы приведены формы текущего, итогового контроля и форма самостоятельной работы. К аудиторным видам работы относятся лекции и практические занятия.

На лекциях излагается основной материал по темам дисциплины. Подготовка лекции непосредственно начинается с разработки структуры рабочего лекционного курса по конкретной дисциплине. Количество лекций определяется с учетом общего количества часов, отведенных для лекционной работы.

Структура лекционного курса обычно включает в себя вступительную, основную и заключительную части. После определения структуры лекционного курса по темам можно приступить к подготовке той или иной конкретной лекции.

Методика работы над лекцией предполагает примерно следующие этапы:

- выяснение того, что и в каком объеме было изучено студентами ранее по родственным дисциплинам;
- определение места изучаемой дисциплины в учебном процессе подготовки специалиста;
- отбор материала для лекции;
- определение объема и содержания лекции;
- выбор последовательности и логики изложения, составление плана лекции;
- подбор иллюстративного материала;
- выработка манеры чтения лекции.

Отбор материала для лекции определяется ее темой. Следует тщательно ознакомиться с содержанием темы в базовой учебной литературе, которой пользуются студенты. Выяснить, какие аспекты изучаемой проблемы хорошо изложены, какие данные устарели и требуют корректировки. Следует определить вопросы, выносимые на лекцию, обдумать обобщения, которые необходимо сделать, выделить спорные взгляды и четко сформировать свою точку зрения на них.

Определение объема и содержания лекции – ещё один важный этап подготовки лекции, определяющий темп изложения материала. Это обусловлено ограниченностью временных рамок, определяющих учебные часы на каждую дисциплину. Не рекомендуется идти по пути планирования чтения на лекциях всего предусмотренного программой материала в ущерб полноте изложения основных вопросов. Лекция должна содержать столько информации, сколько может быть усвоено аудиторией в отведенное время. Лекцию нужно разгружать от части материала, переносить его на самостоятельное изучение. Самостоятельно изученный студентами материал, наряду с лекционным, выносится на экзамен. Если лекция будет прекрасно подготовлена, но перегружена фактическим (статистическим, и т.п.) материалом, то она будет малоэффективной и не достигнет поставленной цели.

Кроме того, при выборе объема лекции необходимо учитывать возможность «среднего» студента записать ту информацию, которую он должен обязательно усвоить. Приступая к решению вопроса об объеме и содержании лекции, следует учитывать ряд особенностей, специфических черт этого вида занятия, в том числе и дидактическую характеристику лекции. Лекция входит органичной частью в систему учебных занятий и должна быть содержательно увязана с их комплексом, с характером учебной дисциплины, а также с образовательными возможностями других форм обучения.

Содержание лекции должно отвечать ряду дидактических принципов. Основными из них являются: целостность, научность, доступность, систематичность и наглядность.

После определения объёма и содержания лекции, необходимо с современных позиций проанализировать состояние проблемы, изложенной в учебных материалах, и составить расширенный план лекции.

На практических занятиях проводится коллективное обсуждение теоретического материала изучаемых тем, проводится решение задач, разбор конкретных практических ситуаций. Практические занятия являются одним из основных этапов в процессе обучения, составляя вместе с лекционным курсом единый комплекс подготовки специалиста. Планирование практических занятий осуществляется с учётом установленного количества часов.

Основные этапы планирования и подготовки занятий:

- Разработка системы занятий по теме или разделу.
- Определение задач и целей занятия.
- Определение оптимального объема учебного материала, расчленение на ряд законченных в смысловом отношении блоков, частей.
- Разработка структуры занятия, определение его типа и методов обучения.
- Нахождение связей данного материала с другими дисциплинами и использование этих связей при изучении нового материала.
- Подбор дидактических средств (фильмов, карточек, плакатов, схем, вспомогательной литературы).
- Определение форм и методов контроля знаний студентов.
- Определение самостоятельной работы по данной теме.

При проведении практических занятий преподаватель уделяет внимание формулировкам выводов, способности студентов сравнивать, анализировать, находить несоответствия, оценивает уровень знаний студентов.

При подведении итогов преподаватель знакомит студентов с результатами выполнения заданий, оценивает качество выполненной работы каждым студентом.

В учебном плане по каждой дисциплине имеется графа «Самостоятельная работа» с указанием количества часов, отведенных на эту работу. В рабочей программе дисциплины предусмотрен раздел «Самостоятельная работа», в котором должны быть изложены:

1. Количество часов, выделенных в учебном плане на самостоятельную работу.
2. Число заданий на самостоятельную работу, которое студент должен выполнить в процессе изучения дисциплины.
3. Краткое содержание каждого задания.
4. Сроки и формы промежуточного контроля по выполненным заданиям.

В зависимости от специфики преподаваемой дисциплины допускается выдача одного или нескольких заданий на весь семестр с установлением сроков промежуточного контроля выполнения каждого из этапов самостоятельной работы. Если дисциплина читается в течение 2-х и более семестров, в рабочей программе должны быть предусмотрены задания на самостоятельную работу в каждом семестре. При этом трудоёмкость заданий должна быть равномерно распределена по семестрам.

Все виды самостоятельной работы, предусмотренные в рабочей программе по каждой дисциплине, должны быть обеспечены методическими указаниями, являющимися неотъемлемой частью методического обеспечения читаемой дисциплины.

Дополнительная нагрузка преподавателя, связанная с проведением

В ходе самостоятельной работы студент осваивает теоретический материал по дисциплине (освоение лекционного курса, а также освоение отдельных тем), закрепляет знание теоретического материала подготовка и выполнение работ по физическому практикуму и выполнение расчетно-графических работ.

К видам самостоятельной работы в пределах данной дисциплины относятся:

- 1) написание конспектов по темам, прочитанных на лекциях в краткой форме,
- 2) подготовка к контролирующему тесту по модулю,

- 3) подготовка к контрольной работе,
- 4) подготовка к практическим занятиям,
- 5) подготовка к зачёту и экзамену по дисциплине.

В процессе накопления опыта проведения самостоятельной работы возможно появление и других её видов, не входящих в вышеприведённый перечень.

Перед выдачей заданий на самостоятельную работу преподаватель читает вводную лекцию, в которой излагаются:

1. Тема задания, алгоритм его выполнения.
2. Перечень литературы, необходимой для выполнения задания.
3. Комплекс задач, которые студент обязан решить.
4. Порядок текущего контроля за выполнением самостоятельной работы.
5. Краткое содержание методических указаний по выполнению самостоятельной работы и место, где можно получить эти методические указания.
6. Форма представления выполненного варианта задания.
7. Методика контроля по выполненному заданию.

Контроль за ходом работы может осуществляться в двух режимах.

1. Режим непосредственного контакта студента с преподавателем по заранее разработанному графику. В этом случае предусматривается промежуточный контроль, когда студент предъявляет преподавателю материалы той части работы, которую он обязан выполнить к намеченному в графике сроку. По результатам просмотра преподаватель оценивает объём выполненной работы.

2. Режим дистанционного контроля с использованием ЭВМ и сети "Интернет". В этом случае варианты задания размещаются на кафедральном сайте и каждый студент может получить свой вариант самостоятельно. Результаты выполнения отдельных этапов работы и всей работы в целом могут быть представлены на рабочий компьютер преподавателя по электронной почте, а преподаватель в режиме реального или отложенного времени также по электронной почте может общаться со студентом.

Критериями оценки результатов работы студентов в течение студента являются: уровень освоения студентом учебного материала, умения студента использовать теоретические знания при выполнении практических задач, обосновать четкость изложения ответов. По окончании курса студенты обязаны сдать зачет и экзамен. Сроки проведения итогового контроля устанавливаются графиком учебного процесса. При проведении итогового контроля по дисциплине преподаватель должен оценить уровень сформированности у студентов умений и навыков при освоении программы дисциплины.

3.2 Методические указания для студентов

В процессе изучения лекционного материала рекомендуется использовать не только опорные конспекты, но и учебники и учебные пособия. Перед каждой лекцией рекомендуется просмотреть материал по предыдущей лекции.

Методические рекомендации по подготовке к практическим занятиям и выполнению домашних задач.

1. Для подготовки к практическим занятиям используйте конспекты лекций, учебники и учебные пособия, указанные в списке рекомендуемой основной и дополнительной литературы.
2. Просмотрите те вопросы теории, освещающие разбираемую тему.
3. На практических занятиях целесообразно иметь при себе конспекты лекций, учебники и учебные пособия.

4. При выполнении домашних задач внимательно просмотрите решение аналогичных задач, рассматриваемых на учебных занятиях, осмыслите методы и методические приемы, используемые при их решении.

5. Освоив методику решения данного класса задач, приступайте к решению задач. При этом придерживайтесь следующих правил.

- Решение задач всех разделов удобно начинать с краткой записи условия, где необходимо отразить не только данные числовые значения, но и все дополнительные условия, которые следуют из текста задачи: неизменность или кратность каких-либо параметров, их граничные значения, условия, которые определяются физическим содержанием задачи (например, отсутствие трения, постоянство ускорения и т. п.).

- Очень важно правильно поставить вопрос к задаче. Возможны следующие варианты:

- найти значение какого-либо параметра (при постановке такого вопроса трудностей не возникает);

- на сколько одна величина больше другой (здесь надо найти разность двух значений одного параметра - скорости, силы и т. д., то есть $\Delta x = x_2 - x_1$);

- во сколько раз одна величина больше или меньше другой (надо найти отношение x_2/x_1 или x_1/x_2);

- если стоит вопрос: «Как изменился какой-либо параметр?», то можно выбрать второй или третий вариант вопроса в зависимости от данных задачи; если в условии дана кратность ряда параметров, то надо найти отношение искомых величин.

- Надо проверить, все ли заданные величины в задаче находятся в одной системе единиц. Если величины даны в разных системах, их следует выразить в единицах системы, принятой для решения. Предпочтение отдается системе СИ, но не всегда.

- Обязательно надо нарисовать рисунок к задаче, на котором следует обозначить те параметры (расстояния, силы, размеры тел и прочее), которые даны, и те, которые нужно найти. Рисунок особенно необходим, если используемые уравнения заданы в векторной форме. В этом случае надо нарисовать систему координат, относительно которой следует записать векторное уравнение в проекциях. Рисунок в большинстве случаев сильно облегчает процесс решения задачи.

- Необходимо обдумать физическое содержание задачи, выяснить, к какому разделу она относится и какие законы в ней надо использовать. Задачи могут быть комбинированные, решение их требует использования законов нескольких разделов физики. В задачах механики обычно первый вопрос, который надо поставить перед собой: каков характер движения?

- Далее следует записать формулы, соответствующие используемым в задаче законам, не следует сразу искать неизвестную величину; надо посмотреть, все ли параметры в формуле известны. Если число неизвестных больше числа уравнений, надо добавить уравнения, следующие из условия и рисунка, то есть свести задачу от физической к математической.

- Решение задачи чаще всего следует выполнять в общем виде, то есть в буквенных обозначениях. Решение «по действиям» может не получиться, так как некоторые неизвестные побочные параметры могут сократиться лишь при решении до конца в общем виде. Поэтому не надо бояться вводить параметра, не фигурирующие в условии задачи. Если же преобразования очень громоздки, то можно произвести промежуточные числовые расчеты.

- Получив решение в общем виде, нужно проверить размерность полученной величины. Для этого в формулу подставить не числа, а размерности входящих в нее величин. Ответ должен соответствовать размерности искомой величины (смотрите в примерах).

- После проверки формулы на размерность следует подставить численные значения входящих в нее величин и произвести расчет.
- Далее нужно проанализировать и сформулировать ответ.

Все этапы этих расчетов необходимо кратко отразить в отчете. Выводы отчета должны опираться на анализ выявленных в работе закономерностей, связей между различными физическими величинами, сравнение полученных результатов с теоретическими и табличными.

3.3 Методические рекомендации по самостоятельной работе студентов

Самостоятельная работа студентов – это процесс активного, целенаправленного приобретения студентом новых для него знаний и умений без непосредственного участия преподавателей. Самостоятельная работа сопровождается эффективным контролем и оценкой ее результатов.

Предметно и содержательно самостоятельная работа определяется государственным образовательным стандартом, действующим учебным планом, рабочей программой дисциплины, средствами обеспечения самостоятельной работы.

Самостоятельная работа – это важнейшая часть любого образования. Для студента она начинается с первых дней учебы в высшем учебном заведении. Это работа, которую за него никто не в состоянии выполнить и обязанность преподавателя – научить студента самостоятельно трудиться, самостоятельно пополнять запас знаний.

Для успешной самостоятельной работы студент должен планировать свое время и за основу рекомендуется брать рабочую программу учебной дисциплины.

Самостоятельная работа студента при подготовке и изучению лекционного материала.

После прослушивания лекции необходимо проработать и осмыслить полученный материал. Умение слушать, творчески воспринимать излагаемый материал – это необходимое условие для его понимания. Внимательное слушание требует умственного напряжения, волевых усилий. В процессе лекционного занятия необходимо выделять важные моменты, выводы, анализировать основные положения. Если при изложении материала преподавателем создана проблемная ситуация, пытаться предугадать дальнейший ход рассуждений. Это способствует лучшему усвоению материала лекции и облегчает запоминание отдельных выводов. Из сказанного следует, что для более прочного усвоения знаний лекцию необходимо конспектировать.

Конспект лекций должен быть в отдельной тетради. Не надо стремиться подробно слово в слово записывать всю лекцию. Конспектируйте только самое важное в рассматриваемом параграфе: формулировки определений и законов, выводы основных уравнений и формул, то, что старается выделить лектор, на чем акцентирует внимание студентов. Старайтесь отфильтровывать и сжимать подаваемый материал. Более подробно записывайте основную информацию и кратко – дополнительную. Не нужно просить лектора несколько раз повторять одну и ту же фразу для того, чтобы успеть записать. По возможности записи ведите своими словами, своими формулировками. Лекция не должна превращаться в своеобразный урок-диктант. Поскольку в этом случае вы не учитесь мыслить и анализировать услышанное и лекция превращается в механический процесс.

Тетрадь для конспекта лекций также требует особого внимания. Ее нужно сделать удобной, практичной и полезной, ведь именно она является основным информативным источником при подготовке к различным отчетным занятиям, зачетам, экзаменам. Целесообразно отделить поля, где можно бы изложить свои мысли, вопросы, появившиеся в ходе лекции. Полезно одну из страниц оставлять свободной. Она потребуется потом, при самостоятельной подготовке. Сюда можно будет занести дополнительную информацию по данной теме, полученную из других источников: чертежи и рисунки, схемы и графики, цитаты и биографии выдающихся ученых и т.д.

Таким образом, на лекции студент должен совместить два момента: внимательно слушать лектора, прикладывая максимум усилий для понимания излагаемого материала и одновременно вести его осмысленную запись.

Рабочей программой дисциплины предусматривается самостоятельное изучение определенных тем, приведенных в пункте 7.5, и их конспектирование. При составлении конспектов можно пользоваться теми же принципами, что при написании лектора. Не нужно полнотекстовое копирование, научитесь в процессе конспектирования разбивать текст на смысловые части и заменять их содержание короткими фразами и формулировками.

Самостоятельная работа по решению практических задач.

Практические занятия по решению задач существенно дополняют лекции по физике. В процессе анализа и решения задач расширяются и углубляются знания, полученные из лекционного курса и учебников, глубже понимаются физические законы и формулы. В процессе решения задач вырабатываются навыки вычислений, работы со справочной литературой, таблицами. Решение задач не только способствует закреплению знаний и тренировке в применении изучаемых законов, но и формирует особый стиль умственной деятельности, особый метод подхода к физическим явлениям. Однако на практических занятиях не всегда можно охватить все типы задач.

Рабочей программой предусматривается выполнение пяти расчетно-графических работ в каждом из семестров. Каждая работа содержит по пять задач. Работы выполняются студентами самостоятельно и сдаются преподавателю к указанному сроку.

Несмотря на различие в видах задач, представленных в расчетно-графических работах, их решение можно проводить по следующему общему плану (некоторые пункты плана могут выпадать в некоторых конкретных случаях):

1. Прочитать внимательно условие задачи;
2. Посмотреть, все ли термины в условиях задачи известны и понятны (если что-то неясно, следует обратиться к учебнику, просмотреть решения предыдущих задач, посоветоваться с преподавателем);
3. Записать в сокращенном виде условие задачи (когда введены стандартные обозначения, легче вспоминать формулы, связывающие соответствующие величины, чётче видно, какие характеристики заданы, все ли они выражены в одной системе единиц и т.д.);
4. Сделать чертёж, если это необходимо (делая чертёж, нужно стараться представить ситуацию в наиболее общем виде, например, если решается задача о колебании маятника, его следует изобразить не в положении равновесия, а отклонённым);
5. Произвести анализ задачи, вскрыть её физический смысл (нужно чётко понимать, в чем будет заключаться решение задачи; так, если требуется найти траекторию движения точки, то ответом должна служить запись уравнений кривой, описывающей эту траекторию; на вопрос, будет ли траектория замкнутой линией, следует ответить «да» или «нет» и объяснить, почему выбран такой ответ);
6. Установить, какие физические законы и соотношения могут быть использованы при решении данной задачи;
7. Составить уравнения, связывающие физические величины, которые характеризуют рассматриваемые явления с количественной стороны;
8. Решить эти уравнения относительно неизвестных величин, получить ответ в общем виде. Прежде чем переходить к численным значениям, полезно провести анализ этого решения: он поможет вскрыть такие свойства рассматриваемого явления, которые не видны в численном ответе;
9. Перевести количественные величины в общепринятую систему единиц (СИ), найти численный результат;

10. Проанализировать полученный ответ, выяснить как изменяется искомая величина при изменении других величин, функцией которых она является, исследовать предельные случаи.

В часы самостоятельной работы студенты должны решать задачи, с которыми они не успели решить во время аудиторных занятий, и те задачи, которые не получились дома. Роль преподавателя-консультанта здесь очень велика. Преподаватель помогает найти ошибку, советует к какому учебнику или учебному пособию лучше всего обратиться, делает небольшие подсказки, не нарушая при этом самостоятельности рассуждений студентов, и т.д.

Итак, для более глубокого усвоения материала полезно решать задачи. Умение решать задачи потребуется и на экзамене. Большинство вузов в билеты устного экзамена, помимо теоретических вопросов, включает одну или несколько задач, и во время экзамена вам, кроме дополнительных теоретических вопросов, может быть предложена задача. Экзаменаторы справедливо считают, что одним из критериев усвоения теории является способность решать задачи.

Самостоятельная работа студента при подготовке к контролирующим тестам, контрольной работе, зачету или экзамену.

В высшей школе студент должен прежде всего сформировать потребность в знаниях и научиться учиться, приобрести навыки самостоятельной работы, необходимые для непрерывного самосовершенствования, развития профессиональных и интеллектуальных способностей.

К формам учета знаний по дисциплине «Физика лазеров» кроме зачета и экзамена рабочей программой предусмотрены также контролирующие тесты по модулям, коллоквиум и контрольная работа.

Согласно рабочей программе по дисциплине «Физика лазеров» контролирующий тест проводится по темам соответствующих модулей. В каждом тестовом задании от 7 до 10 заданий.

Цель тестирования - способствовать повышению эффективности обучения учащихся, выявить уровень усвоенных теоретических знаний, выявить практические умения и аналитические способности студентов.

Тест позволяет определить, какой уровень усвоения знаний у того или иного учащегося, т.е. определить пробелы в обучении. А на основе этого идет коррекция процесса обучения и планируются последующие этапы учебного процесса.

При подготовке к контролируемому тесту необходимо повторить теоретический материал по определенным темам, но и просмотреть решение практических задач. Так как тестовые задания в большей степени практически ориентированные.

Контрольная работа согласно рабочей программе дисциплине выполняется в конце семестра по всем практическим темам семестра. В контрольной работе содержится четыре задачи. Контрольная работа направлена на проверку умений студентов применять полученные теоретические знания в отношении определенной конкретной задачи.

При подготовке к контрольной работе рекомендуется еще раз просмотреть принципы решения задач рассматриваемых на практических занятиях.

Зачет – форма итоговой проверки и оценки полноты и прочности знаний студентов, а также сформированности умений и навыков; проводится в виде собеседования по важнейшим вопросам каждого раздела изученного курса или по курсу в целом в индивидуальном порядке. Может проводиться с применением тестирования.

Экзамен – форма заключительной проверки знаний, умений, навыков, степени развития обучающихся в системе образования; по своим целям бывают выпускными, завершающими определенный этап учебного процесса, вступительными.

В процессе подготовки к зачету или экзамену при изучении того или иного физического закона, кроме формулировки и математической записи закона, следует

обратить внимание на опыты, которые обнаруживают этот закон и подтверждают его справедливость, границы и условия его применимости. Также полезно отметить, как этот закон используется на практике. То же самое можно сказать и об изучаемой теории в целом. Помимо основных понятий, положений, законов и принципов теории следует обратить внимание на опыты, благодаря которым была создана эта теория, эксперименты, подтверждающие ее справедливость. Вспомните, как используется данная теория на практике.

Основная цель подготовки к зачету (экзамену) — достичь понимания физических законов и явлений, а не только механически заучить материал. Но все же довольно много вещей придется просто выучить. При этом следует учитывать ваши индивидуальные особенности. К примеру, если у вас зрительный тип памяти, тогда следует уделить особое внимание внешней форме вашего краткого конспекта — недопустим небрежный, неразборчивый, мелкий почерк. Формулы должны быть отделены от текста некоторым пространством, чтобы «бросаться в глаза» сразу. Конечно, аккуратный конспект потребует несколько большего времени, но в итоге время на заучивание сократится, и вы эффективнее подготовитесь к экзамену. Если у вас слуховой тип памяти, следует проговаривать наиболее важную часть материала, возможно даже использовать магнитофон для подготовки. Если же преобладающим у вас является моторный тип памяти, то конспект нужно переписать несколько раз, причем каждый раз надо вычеркивать то, что вы уже выучили достаточно хорошо, оставляя для переписывания только самое необходимое для запоминания.

Для более глубокого усвоения материала полезно решать задачи. Умение решать задачи потребуется и на экзамене. Поскольку в билеты устного экзамена (и как правило зачета), помимо теоретических вопросов, включает одну или несколько задач, и во время экзамена вам, кроме дополнительных теоретических вопросов, может быть предложена задача. Экзаменаторы справедливо считают, что одним из критериев усвоения теории является способность решать задачи. При решении задач в полной мере проявляется ваша математическая грамотность, тогда как при ответе на теоретический вопрос на устном экзамене обычно требуются минимальные математические знания.

Экзаменаторы при затруднениях в ответе обычно все-таки помогают экзаменуемому вспомнить нужную тему, частично указывают путь к правильному решению и только после того, как обнаруживается, что подсказки помогают плохо, со спокойной совестью выставляют неудовлетворительную оценку. Если вам нужна хотя бы тройка, не рассчитывайте на благосклонность экзаменатора: выучите основные определения, формулы и формулировки физических законов из каждого раздела физики, разберитесь в сущности основных физических явлений и смысле основных физических величин и понятий. На это не потребуется много времени. Если же вам необходима более высокая оценка, тогда потребуется регулярная самостоятельная работа в течение достаточно длительного времени.

Пробелы в знаниях на устном экзамене гораздо опаснее, чем на письменном. Обнаружив, что вы ошибаетесь или неверно отвечаете на вопрос, экзаменатор начинает выяснять, насколько глубок ваш пробел. Опытный экзаменатор может обнаружить и другие недостаточно хорошо вами изученные разделы физики.

Экзамены дают возможность также выявить, умеют ли студенты использовать теоретические знания при решении физических задач. На экзамене оцениваются: понимание и степень усвоения теории; методическая подготовка; знание фактического материала; умение приложить теорию к практике, решать физические задачи, правильно проводить расчеты и т. д.; логика, структура и стиль ответа, умение защищать выдвигаемые положения.

Перечисленные формы учета знаний преследуют не только цели, указанные выше. Главная задача состоит в том, чтобы у студента в результате подготовки к коллоквиумам, зачетам и экзаменам из отдельных сведений и деталей составилось представление об

общем содержании соответствующей дисциплины, стала понятной методика предмета, его система. Готовясь к экзамену, студент приводит в систему знания, полученные на лекциях, в лабораториях, на практических занятиях, разбирается в том, что осталось непонятным, и тогда изучаемая им дисциплина может быть воспринята в полном объеме с присущей ей строгостью и логичностью, ее практической направленностью.

4. Контроль знаний.

Контроль знаний, умений и навыков студентов по изучении дисциплины осуществляется на уровне текущего и итогового контроля.

4.1 Текущий контроль знаний

Текущий контроль успеваемости проводится с целью повышения качества и прочности знаний, проверки процесса и результатов усвоения учебного материала. Текущий контроль успеваемости проводится в течении семестра и предполагает вставление каждому студенту отметок, оценивающих выполнение им всех видов работ, предусмотренных учебной программой дисциплины.

Текущий контроль осуществляется при работе на лекциях, практических занятиях, при выполнении заданий для самостоятельной работы, тестировании и выполнении контрольной работы. Образцы различных видов оценочных средств текущего контроля по дисциплине представлены ниже.

Примерный вариант контролирующего теста

Контролирующий тест по модулю 1 «Исходные концепции» по дисциплине «Физика лазеров».

Задание 1. (выберите один вариант ответа)

Излучение, возникающее при переходе атома с вышестоящего энергетического уровня на нижестоящий под действием внешнего электромагнитного излучения называется...

Варианты ответов:

1)	Спонтанное излучение	2)	Вынужденное поглощение
3)	Вынужденное излучение	4)	Безызлучательная дезактивация

Задание 2. (выберите один вариант ответа)

Активной средой называется среда, в которой возникает...

Варианты ответов:

1)	Вынужденное излучение	2)	Усиление спонтанного излучения
3)	Инверсия населенностей	4)	Безызлучательная дезактивация

Задание 3. (выберите один вариант ответа)

Выберите условия, которыми определяется монохроматичность лазерного излучения

Варианты ответов:

1)	Только электромагнитная волна определяемая выражением $\nu=(E_2-E_1)/h$ может быть усилена	2)	Генерация может происходить только на собственных частотах резонатора
3)	Ширина спектра лазерного излучения меньше ширины линии перехода, наблюдаемая при спонтанном излучении	4)	Излучение происходит только на одной частоте, частоте перехода

Задание 4. (выполните согласно задания)

Выберите необходимые условия для создания оптического квантового генератора

Варианты ответов:

1)	Наличие вынужденного излучения	2)	Наличие инверсии населенности
3)	Наличие безызлучательной дезактивации	4)	Наличие процесса резонанса
5)	Работа по трехуровневой схеме	6)	Наличие положительной обратной связи
7)	Обеспечение накачки активной среды	8)	Превышение над порогом генерации
9)	Отсутствие потерь в резонаторе	10)	Наличие усиленного спонтанного излучения

Задание 5. (выберите один вариант ответа)

Какое из свойств лазерного излучения в некотором смысле противоположно монохроматичности

Варианты ответов:

1)	Когерентность	2)	Направленность
3)	Малая длительность импульса	4)	Яркость

Задание 6. (выберите один вариант ответа)

Выберите режим генерации лазера, при котором длительность излучения $\sim 10^{-15}$ с.

Варианты ответов:

1)	Режим модуляции добротности	2)	Режим синхронизации мод
3)	Режим свободной генерации	4)	Режим аттосекундных импульсов

Задание 7. (выберите один вариант ответа)

Выберите тип лазера, в котором отсутствует резонатор

Варианты ответов:

1)	Жидкостный	2)	Твердотельный
3)	Лазеры на свободных электронах	4)	Полупроводниковые

Примерный вариант контрольной работы

1. Лазерный резонатор состоит из двух зеркал с коэффициентами отражения $R_2=1$ и $R_1=0,5$. Длина активной среды $l=7,5$ см, а сечение перехода $\sigma=8,8 \cdot 10^{-19}$ см². Вычислите порог инверсной населенности.

2. Линия лазерного перехода R_1 рубина хорошо описывается лоренцевой кривой, причем ее ширина, определяемая по уровню 0,5 от максимального значения, при комнатной температуре равна 330 ГГц (см. рис. 2.14). Измеренное максимальное значение сечения перехода $\sigma=2,5 \cdot 10^{-20}$ см². Вычислите излучательное время жизни (показатель преломления $n=1,76$). Если экспериментально наблюдаемое время жизни при комнатной температуре составляет 3нс, то чему равен квантовый выход флуоресценции?

3. Вычислите разность частот между двумя соседними модами ТЕМ₀₀ резонатора, описанного в задаче 4.4. Считая, что в СО₂-лазере ширина линии излучения, определяемая по уровню 0,5 от максимального значения, равна 50 МГц, найдите число мод ТЕМ₀₀, частоты которых находятся в пределах

этой линии.

4. Имеется He—Ne лазер, работающий на двух соседних продольных модах, частота одной из которых совпадает с центром лазерного перехода ω_0 . Длина резонатора равна 1 м, а связь на выходе составляет 2 %. Вычислите частотное расстояние между этими модами, если известно, что ширина линии генерации лазера равна $\Delta\nu_0^* = 1,7$ ГГц.

4.2 Итоговый контроль знаний

К итоговым формам контроля, проводимым по данной дисциплине, являются зачет (в восьмом семестре) и экзамен (в девятом семестре). Примерные зачетные и экзаменационные вопросы представлены в пунктах 7.4 и 7.5 рабочей программы дисциплины.

Зачет – форма итоговой проверки и оценки полноты и прочности знаний студентов, а также сформированности умений и навыков.

Экзамен – форма заключительной проверки знаний, умений, навыков, степени развития обучающихся по дисциплине.

Рекомендации по подготовке к зачету и экзамену представлены в пункте 3.3 настоящего учебно-методического комплекса по дисциплине.

Примерный зачетный билет

Амурский государственный университет	
Утверждаю	Факультет ИФ
Зам.зав. кафедрой _____	Физика лазеров
_____	Зачет 8 семестр
«__» _____ 20__ г.	

Билет № 1

1. Схемы накачки. Типы лазеров.
2. Время жизни фотона в резонаторе. Добротность резонатора. Число Френеля. Свойства и основные функции резонатора. Виды потерь в резонаторе.

Примерный экзаменационный билет

Амурский государственный университет	
Утверждаю	Факультет ИФ
Зам.зав. кафедрой _____	Физика лазеров
_____	Зачет 8 семестр
«__» _____ 20__ г.	

Билет № 1

1. Лазеры на центрах окраски.
2. Затягивание частоты и предел монохроматичности.

5. Интерактивные технологии и инновационные методы, используемые в образовательном процессе.

При преподавании дисциплины «Физика лазеров» используется технология модульного обучения. Дисциплина разделена на 5 модулей в восьмом семестре и на 8 модулей в девятом семестре, исходя из того, что модуль, его оптимальный объем логически соответствует завершённому разделу учебной дисциплины. При этом в соответствии с целевым назначением модули являются смешанными, т.е. соединяют в себе познавательные и операционные функции. В модуле излагается принципиально важное содержание учебной информации, дается разъяснение к этой информации, определяются условия погружения в информацию (с помощью средств ТСО, конкретных литературных источников, методов добывания информации), приводятся теоретические задания и рекомендации к ним, указаны практические задания.

Каждый модуль начинается с входного контроля знаний и умений, для определения уровня готовности обучаемых к предстоящей самостоятельной работе (входной контроль проводится в виде устного опроса по основным темам модуля. Модуль заканчивается контрольной проверкой знаний (проведение контролирующего теста).

При чтении лекций по данной дисциплине используется такой неимитационный метод активного обучения, как «Проблемная лекция», а при определенных темах «Лекция-визуализация».

При проведении практических занятий используется либо «Мозговой штурм», либо «Метод Дельфи», которые направлены на вовлечение всех студентов в решении конкретных задач.

При изучении темы «Типы лазеров» используется метод «Деловой игры». Где группа студентов развивается не несколько команд. Каждая, из которых, выбирает себе определенный тип лазера и подготавливает по нему информацию с обязательной презентацией. Преподаватель играет роль директора фирмы использующей лазерные технологии в научно-исследовательских и производственных направлениях. Студенты должны представить свою продукцию (тип лазера) и обосновать необходимость приобретения.