

**КАФЕДРА СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ И КВАНТОВОЙ
РАДИОТЕХНИКИ
(СВЧ и КР)**

Шангина Л.И.

Квантовая и оптическая электроника

Учебно-методическое пособие
по организации самостоятельной работы
для студентов специальности **090106**
«Информационная безопасность телекоммуникационных систем»

2012

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования

**«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)»**

Утверждаю
Зав. Кафедрой СВЧиКР
_____ С. Н. Шарангович
" " _____ 2012г.

Квантовая и оптическая электроника

Учебно-методическое пособие
по организации самостоятельной работы
для студентов специальности **090106**
«Информационная безопасность телекоммуникационных систем»

Разработчик
Доцент кафедры СВЧиКР
_____ Л.И.Шангига

2012

УДК 621.37. (075.8+537.8(0758))

Рецензент:

Зав. каф. СВЧиКР, профессор

Шарангович С.Н.

Шангина Л.И.

Квантовая и оптическая электроника: учебно-методическое пособие по организации самостоятельной работы / Л.И. Шангина.- Томск: ТУСУР, 2012. –110с.

В данном пособии рассмотрены все виды самостоятельной работы при изучении дисциплины «Квантовая и оптическая электроника».

Приводится программа курса, его цели и задачи. Каждый раздел программы заканчивается методическими указаниями со ссылкой на литературу. Представлены темы реальных и компьютерных лабораторных занятий, темы практических занятий с примерами решения задач. Представлен перечень индивидуальных расчетных заданий, даны примеры решения расчетных работ. Приводятся варианты контрольных работ.

Методические указания предназначены для студентов очной формы обучения специальности **090106** «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», а также могут быть использованы для вечерней, заочной и дистанционной форм обучения.

УДК 621.37. (075.8+537.8(0758))

© Томск. гос. ун-т систем управления и
радиоэлектроники,

2012

© Шангина Л.И.

2012

Оглавление

	Введение	6
1.	Цели и задачи дисциплины	7
2.	Содержание лекционного курса	8
2.1.	Разделы дисциплины и виды занятий	9
2.2.	Разделы лекционного курса	16
3.	Лабораторные занятия	20
4.	Практические занятия	21
4.1.	Темы практических занятий	21
4.2.	Примеры решения типовых задач для практических занятий	21
4.2.1.	Расчет вероятностей спонтанных и индуцированных переходов.	21
4.2.2.	Расчет энергетических состояний квантовых систем	22
4.2.3.	Расчет мощности излучения квантового генератора	26
4.2.4.	Расчет параметров оптических резонаторов	29
4.2.5.	Расчет параметров лазеров	31
4.2.6.	Расчет параметров приемников излучения	36
4.2.7.	Расчет параметров модуляторов и дефлекторов	38
4.2.8.	Расчет характеристик оптического волокна (дисперсия, затухание, числовая апертура)	41
5.	Аудиторные контрольные работы	44
5.1.	Контрольная работа 1. Взаимодействие излучения с веществом. Спонтанные и индуцированные переходы. Энергетические состояния квантовых систем. Мощность излучения квантовых генераторов.	45
5.2.	Контрольная работа 2. Лазеры их параметры и характеристики. Параметры и характеристики оптических резонаторов. Параметры и характеристики приемников оптического излучения.	48
5.3.	Контрольная работа 3. Управление лазерным излучением. Параметры и характеристики акустооптических модуляторов и дефлекторов. Характеристики оптического волокна (дисперсия, затухание, числовая апертура)	51
6.	Индивидуальные расчетные задания	53
6.1.	Цели и задачи индивидуальных заданий	53
6.2.	Тематика индивидуальных заданий	54
6.3.	Содержание индивидуальных заданий	54
6.3.1.	Индивидуальное задание №1. Взаимодействие излучения с веществом. Спонтанное и вынужденное излучение.	54

	Вероятности переходов. Ширина спектральной линии. Характеристики лазерного излучения. Усиление электромагнитных колебаний в среде с инверсной населенностью.	
6.3.2.	Индивидуальное задание №2. Резонаторы. Расчет оптических резонаторов. Параметры и характеристики лазеров. Приемники оптического излучения.	59
6.3.3.	Индивидуальное задание №3. Пространственное преобразование лазерного пучка. Расчет устройств, позволяющих управлять амплитудой, фазой, частотой и поляризацией оптического излучения. Расчет параметров оптического волокна.	65
6.4.	Примеры решения типовых задач для индивидуальных расчетных заданий	71
6.4.1.	Решение типовых задач для индивидуального расчетного задания №1. Взаимодействие излучения с веществом. Спонтанное и вынужденное излучение. Вероятности переходов. Ширина спектральной линии. Характеристики лазерного излучения. Усиление электромагнитных колебаний в среде с инверсной населенностью.	71
6.4.2.	Решение типовых задач для индивидуального расчетного задания №2. Резонаторы. Расчет параметров оптических резонаторов. Параметры и характеристики лазеров.	76
6.4.3.	Решение типовых задач для индивидуального расчетного задания №3. Пространственное преобразование лазерного пучка. Расчет устройств, позволяющих управлять амплитудой, фазой, частотой и поляризацией оптического излучения. Расчет параметров оптического волокна.	85
7.	Рейтинговая система для оценки успеваемости студентов	94
7.1.	Методика текущего контроля освоения дисциплины	94
7.2.	Таблица распределения баллов по элементам контроля	95
7.3.	Пересчет баллов в оценки за контрольные точки	96
7.4.	Пересчет итоговой суммы баллов в традиционную международную оценку	96
8.	Учебно методические материалы по дисциплине	96
8.1	Основная литература	96
8.2	Дополнительная литература:	97
8.3	Рекомендуемая литература для самостоятельной работы (для подготовки рефератов и выступлений на семинарах)	98

Введение

Самостоятельная работа студентов является частью учебного процесса при подготовке квалифицированных специалистов, способных самостоятельно и творчески решать стоящие перед ними задачи. В ходе самостоятельной работы формируются важнейшие профессиональные навыки будущего специалиста, такие как: внутренняя готовность к самообразованию в профессиональной сфере, самостоятельность, инициативность и ответственность, умение работать с источниками информации.

Каждая дисциплина должна иметь методическое сопровождение по самостоятельному изучению разделов и тем, указанных в рабочей программе, по написанию рефератов, выполнению расчетно-графических и лабораторных работ. В связи с этим эффективная организация самостоятельной работы студентов требует проведения целого ряда мероприятий, создающих предпосылки и условия для реализации самостоятельной работы, а именно:

- обеспечение студентов информационными ресурсами (учебными пособиями, справочниками, банками индивидуальных заданий);
- обеспечение студентов методическими материалами (учебно-методическими практикумами, сборниками задач, указаниями по выполнению лабораторных работ);
- организация консультаций преподавателей;
- возможность публичного обсуждения теоретических и практических результатов (конференции, олимпиады, конкурсы).

Важным элементом в организации самостоятельной работы студентов является контроль. Контроль требует разработки преподавателем контролирующих материалов в текстовом или тестовом исполнении, а при использовании ПК пакета прикладных программ для проверки знаний студентов. Эффективная система контроля (в т.ч. электронная система контроля), наряду с рейтинговой системой оценки знаний, позволит добиться систематической самостоятельной работы студентов над учебными материалами и повысить качество обучения.

Преподаватель знакомит студентов с рабочей программой курса, списком литературы, методикой работы над литературой, порядком и методикой составления конспектов лекций, методикой проведения практических занятий написанием тезисов, докладов и рефератов, составлением презентаций.

Профессиональный подход к подготовке специалистов предусматривает эффективное взаимодействие ТУСУРа с работодателями и профессионалами. Кафедра организует консультации, приглашает студентов на обсуждение рефератов, в которых освещаются проблемные материалы, на выставки рекомендованной литературы, пропагандирует наглядные пособия, видеофильмы. В пользование студентам представляются библиографические списки, в том числе в электронном виде, отечественные и зарубежные.

К видам самостоятельной работы относятся:

- систематическое чтение и конспектирование литературы;
- выполнение индивидуальных расчетных заданий;

- подготовка к семинарским, практическим занятиям;
- подготовка к лабораторным занятиям;
- углубленное самостоятельное изучение основных вопросов учебной программы;
- написание рефератов по разделам курса;
- представление презентаций по вопросам курса, недостаточно освещенным в учебных пособиях;

Пособие разработано в соответствии с рекомендациями по организации самостоятельной работы студентов (письмо Минобрнауки РФ от 27.11.2002 "Об активизации самостоятельной работы студентов высших учебных заведений").

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ И ЕЕ МЕСТО В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

1.1. Цели и задачи преподавания дисциплины

Целью преподавания дисциплины “Квантовая и оптическая электроника” является подготовка специалистов в области теории физических принципов функционирования современных оптических, нелинейно-оптических устройств, оптических линий связи.

Место дисциплины в учебном процессе. Дисциплина “Квантовая и оптическая электроника” относится к федеральному компоненту цикла специальных дисциплин, читаемых для студентов специальности 090106 - "Информационная безопасность телекоммуникационных систем", и является дисциплиной, устанавливаемой ГОС.

1.2 Задачи изучения дисциплины

Основными задачами изучения дисциплины являются:

- получение необходимых знаний по физическим и теоретическим основам функционирования важнейших приборов и устройств, используемых в оптических системах связи. К их числу относятся квантовые генераторы и усилители, оптические модуляторы, фотоприемные устройства, нелинейно-оптические элементы, голографические и интегрально-оптические компоненты.
- получение необходимых знаний по принципам построения перспективных систем связи и обработки информации.

В результате изучения курса студенты должны:

- **знать** теоретические основы оптической обработки информации; принципы построения и работы, а также характеристики основных функциональных узлов оптических систем.
- **знать** основные положения квантовой физики и квантовой оптики; физические основы и принципы построения оптоэлектронных и квантовых приборов; основы взаимодействия света со средой и нелинейной оптики; физические основы распространения излучения по оптическому волокну,

основные характеристики источников и приемников оптического излучения, принципы построения волоконно-оптических систем передачи информации;

- **уметь** определять и обосновывать целесообразность использования оптических методов обработки информации для решения конкретных радиотехнических задач;
- **иметь** представление об оптических процессорах, применяемых в современных радиоэлектронных комплексах; о принципах управления эксплуатационными процессами в волоконно-оптических линиях с помощью ЭВМ.
- **иметь** навыки практической работы с лазерами и оптоэлектронными приборами разных типов, освоить технику оптических экспериментов.

1.3. Перечень обеспечивающих дисциплин

Дисциплина базируется на знаниях, полученных студентами в процессе изучения следующих дисциплин: «Физика», «Электродинамика и РРВ», «Системы и сети передачи информации», «Устройства приема и обработки сигналов».

2. СОДЕРЖАНИЕ ЛЕКЦИОННОГО КУРСА

Разделы дисциплины и виды занятий

№ п/п	Раздел дисциплины	Лекции (32 час)	Лаб раб. (16 час)	Пр.зан. (16 час)
1	Взаимодействие излучения с веществом	1		-
2	Спонтанное и вынужденное излучение. Вероятности переходов. Ширина спектральной линии	1	-	2
3	Плотность состояний	1	-	2
4	Усиление электромагнитных колебаний в среде с инверсной населенностью	1	-	2
5	Оптические резонаторы	1	-	2
6	Лазеры	3	8	2
7	Моды генерации	1	-	2
8	Оптические квантовые усилители	1	-	-
9	Шумы усилителей и лазеров	1	-	-
10	Нелинейные оптические явления	2	-	-
11	Детектирование световых сигналов	2	-	
12	Фотоприемники. Шумы приемников излучения	4	-	2

13	Квантовый предел чувствительности	1	-	-
14	Модуляция световых сигналов	1	4	2
15	Оптоэлектронные процессоры	1	-	-
16	Волоконно-оптические линии связи. Компоненты оптических линий связи. Уплотнение каналов. Когерентные линии оптической связи.	4	4	2
17	Устройства отображения информации	1	-	-
18	Оптические запоминающие устройства	3	-	-
19	Оптоэлектронные датчики	2	-	-

2.1. Разделы лекционного курса

2.1.1. Взаимодействие излучения с веществом (1 час).

Основные параметры и характеристики взаимодействия излучения с веществом: коэффициенты поглощения и отражения. Свободное и связанное движение частиц, подчиняющихся квантовым законам.

Методические указания. Этот раздел является основополагающим и его правильное понимание является залогом для успешного освоения курса. Материал позволяет получить понятие кантового усиления электромагнитных волн и понять почему в лазерах вся излучаемая мощность сосредоточена в одной или нескольких чрезвычайно узких спектральных линиях, что приводит к колоссальной спектральной интенсивности плотности энергии лазеров; получить понятие о непрерывном и дискретном спектрах; об излучательных процессах в разных средах; понять классификацию энергетических уровней в газах и твердых телах; взаимосвязь между спектром излучения и поглощения в веществах. Материал лучше всего изучать, используя основное пособие[1] и [4,6,7,10,13,22].

2.1.2. Спонтанное и вынужденное излучение. Вероятности переходов. Ширина спектральной линии (1 час).

Спонтанное и вынужденное излучение. Коэффициенты Эйнштейна. Соотношения между коэффициентами Эйнштейна. Средняя продолжительность жизни атома в возбужденном состоянии.

Вероятности переходов. Спонтанные переходы и их вероятность. Индуцированные переходы и их вероятность.. Случай монохроматических полей. Коэффициенты поглощения и усиления.

Ширина спектральной линии. Естественная ширина спектральной линии. Уширение спектральной линии из-за столкновений. Доплеровское уширение спектральной линии. Другие причины уширения спектральной линии.

Методические указания. В этом разделе даются важные понятия спонтанного и индуцированного переходов. Величина, определяющая среднее число частиц, совершивших самопроизвольный (спонтанный, излучательный) переход из верхнего состояния в нижнее называется спонтанным переходом. Этот вероятностный процесс является спонтанным (A_{ij}), причем эта вероятность отнесена к 1с и является коэффициентом Эйнштейна по спонтанным переходам. Случайность спонтанных переходов означает, что различные частицы излучают неодновременно и независимо. В с другой стороны, вероятность вынужденных излучательных (индуцированных) переходов тоже определяется коэффициентом Эйнштейна, но уже по вынужденным переходам. Они между собой связаны.

Главное понятие для этого раздела о том, что энергетические уровни вещества не бесконечно узкие, а имеют конечные значения, однако лазерное излучение очень близко к монохроматическому. При изучении этого вопроса можно воспользоваться [1,4,6,10,18].

2.1.3. Плотность состояний (1час).

Плотность состояний энергетических уровней. Количество энергетических уровней в интервале энергий на единицу площади. Энергия возбуждения (энергия Ферми). Плотность состояний ферми – газа.

Методические указания. Для того чтобы знать как распределяются по энергиям электроны в кристалле, надо установить, как распределены внутри зон разрешенные квантовые состояния, а во-вторых, как они заполняются электронами, т.е. вероятность из заполнения. Концентрация электронов, имеющих энергии, заключены в интервале от E до $E+\Delta E$ прямо зависит от функции плотности состояний и вероятности заполнения энергетических уровней зарядоносителями. Поэтому в этом разделе важно дать понятие, что плотность состояний вплотную зависит от энергии электрона, отсчитанной от границы зоны и от эффективной массы электрона, учитывающая энергетическую связь его с полями частиц кристалла. Для изучения этого вопроса можно воспользоваться [4,20].

2.1.4. Усиление электромагнитных колебаний в среде с инверсной населенностью (1 час).

Возможность усиления и генерации в квантовых системах. Инверсия населенностей. Методы получения инверсной населенности в квантовых генераторах.. Закон Бугера. Метод накачки вспомогательным излучением. Явление насыщения перехода.

Методические указания. В первую очередь, необходимо ввести понятие, что среда (активная среда), в которой может возникнуть усиление, должна обладать возможностью создания инверсией населенности. Особенность усиления излучения в среде с инверсной населенностью заключается в том, что в процессах индуцированного излучения отдельными частицами, преобразуя

энергию множества частиц активной среды в энергию излучения, когерентного с внешним полем. Материал лучше всего изучать, используя основное пособие [1], а также [3,4,6,7,10].

2.1.5. Оптические резонаторы (1 час).

Особенности оптических резонаторов. Волновая теория открытых резонаторов. Схемы оптических резонаторов: конфокальный, полуконфокальные, концентрические,

Методические указания. Необходимо дать понятие, что в квантовых генераторах излучение возникает независимо от воздействия внешнего поля и поддерживается благодаря тому, что часть энергии с выхода усилительного элемента подводится ко входу (положительная обратная связь), обеспечивая повторение колебательного процесса. В большинстве случаев генерирование осуществляется с помощью резонансной системы (открытые резонаторы). Необходимая обратная связь создается в результате многократных отражений от зеркал и прохождения излучения через активную среду, расположенную между зеркалами резонатора. Литература [2,4,6,14,15,24,29].

2.1.6. Лазеры (3 час). Диапазон оптических волн и его особенности. Физические принципы работы источников оптического излучения. Когерентные источники оптического излучения. Основные типы квантовых генераторов, их устройство. Параметры и характеристики электромагнитного излучения: монохроматичность, когерентность, направленность, поляризованность и возможность фокусирования излучения. Пороговые условия генерации и мощность излучения.

Методические указания. В этом разделе необходимо дать понятие уникальности оптических квантовых генераторов: их возможности получения больших плотностей энергии, совершеннейших параметров излучения. Так что такое лазер? Лазер – это устройство, в котором энергия (тепловая, химическая, электрическая) преобразуется в энергию электромагнитного поля - лазерный луч, в виде индуцированного излучения. В качестве литературы могут быть рекомендованы [1,2,3,4,6].

2.1.7. Моды генерации (1 час).

Определение моды. Структуры электрических полей. Спектральные характеристики. Селекция продольных и поперечных мод, синхронизация мод. Формирование спектра излучения оптических генераторов: спектр излучения при неоднородном и однородном уширении спектральной линии.

Методические указания. Здесь необходимо внести разъяснение, что на практике в лазерах применяют большей частью открытые резонаторы, имеющие большое преимущество из-за частотной селекции по сравнению с закрытыми резонаторами, но осевые и наклонные волны остаются как и в закрытых

резонаторах. В резонаторе создается спектр собственных частот – три системы стоячих волн в направлении осей x, y, z , которые характеризуются индексами m_1, m_2, m_3 . Индекс m_3 , равный числу полуволн, укладываемых в промежутке между зеркалами, называют индексом продольной моды. Индексы m_1, m_2 называют индексами поперечных мод, что и типы колебаний в закрытых резонаторах. При изучении можно воспользоваться [1,4,6,7,18,23].

2.1.8. Оптические квантовые усилители (1 час).

Возможности квантового усиления в оптических системах. Временные и пространственные особенности усиления нелинейно-оптического отклика поверхности при возбуждении поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ).

Методические указания. Оптический квантовый усилитель представляет собой активную лазерную среду. Распространяющийся вдоль активной среды оптический сигнал усиливается в среде за счет индуцированного излучения, которое по своим параметрам совпадает с оптическим сигналом. Использование лазерного усилителя повышает чувствительность, спектральную и пространственную селективность приема слабых оптических сигналов. Квантовые усилители обычно работают при температуре жидкого гелия (4,2 К), когда практически все частицы находятся на самом нижнем уровне энергии (самофокусировка света). Литература [4,6,18,23,25,26].

2.1.9. Шумы усилителей и лазеров (1 час).

Шумы за счет усиленной спонтанной эмиссии. Шум - фактор как отношение сигнал/шум на входе к отношению сигнал/шум на выходе. Дробовые шумы. Фликкер шумы. Мощность теплового шума. Эффективная тепловая температура.

Методические указания. В этом разделе необходимо ввести понятие о потерях, приводящих к значительному уменьшению интенсивности излучения, а эти потери в значительной мере вносятся шумами. В идеальном усилителе уровень шума на выходе равен уровню на входе, умноженному на коэффициент усиления. Реальный усилитель добавляет собственный шум к входному сигналу. Лазерный усилитель имеет два источника шума: спонтанное и тепловое излучения, с которыми в какой-то мере можно бороться [4,25].

2.1.10. Нелинейные оптические явления (2 час).

Понятие о «нелинейной оптике». Нелинейное взаимодействие электромагнитных полей. Нелинейная поляризация.

Методические указания. В этом разделе особое внимание нужно уделить тому, что под действием световой волны характеристики вещества изменяются.

Эти изменения зависят от соотношения напряженности полей светового поля, а это примерно 10^7 - 10^8 В/см и напряженностями полей в атомах и молекулах, а это

10^9 - 10^{10} В/см. В этом случае, напряженность поля световой волны почти сопоставима с напряженностью поля в атомах и молекулах. Под действием световых полей диэлектрики поляризуются: происходит смещение электронных оболочек атомов относительно ядер, в результате чего атомы приобретают электрический дипольный момент единицы объема среды. Поляризованность при больших полях имеет нелинейный характер. Отсюда происходят термины нелинейная оптика, нелинейно-оптические явления [4,5,10,].

2.1.11. Детектирование световых сигналов. Фотоприемники. (2 часа).

Параметры и характеристики приемников излучения светового потока: частотная (амплитудная) характеристики, реакция ФП на импульсное излучение, инерционные свойства ФП, битовая скорость передачи информации, коэффициенты ошибок. Детекторы световых сигналов. Классификация фотоприемников (по среде, в которой происходит движение фотоэлектронов, по области применения, по времени отклика на оптический сигнал, по частотным свойствам, по структуре полупроводникового материала фотоприемника.

Методические указания. В данном разделе надо дать понять что детектирование (демодуляция) - это преобразование электрических колебаний, в результате которого получается постоянный ток и колебания более низкой частоты. Детектирование в оптическом диапазоне частот возможно с помощью нелинейных кристаллов. Детекторами в оптическом диапазоне являются фотоприемники. Фотоприемник — это прибор, который поглощает энергию оптического излучения и преобразует её в электрическую с определенным КПД, т.е.здесь энергия оптического излучения преобразуется в энергию свободных электронов [4,5,7,18].

2.1.12. Фотоприемники. Шумы приемников излучения (4 часа)

Элементы зонной теории твердого тела. Поглощение света в твердых телах. Явление фотоэффекта. Эффект Дембера. Физические принципы и основные элементы регистрации оптического излучения. Принцип восприятия изображения фотоприемниками.

Шумы приемников излучения. Основные параметры и характеристики шумов фотоприемников приемного устройства: ширина полосы шума, напряжение шума, мощность шума - эквивалента (МШЭ), площадь чувствительной поверхности, обнаружительная способность приемника. Определение значения (МШЭ).Отношение сигнал-шум на выходе приемного устройства.

Методические указания. Здесь важно понять, что является источником шума. Так в полупроводниковых устройствах шумы складываются из дробовых и тепловых шумов носителей тока в полупроводнике - «почти свободных электронов проводимости и дырок [4,18,31,35].

2.1.13. Квантовый предел чувствительности (1 час).

Понятие квантового предела чувствительности. Предельные чувствительности в линейных и нелинейных квантовых измерениях.

Методические указания. И этом разделе важно понимание принципов действия помехоустойчивых приёмопередающих устройств ближнего ИК диапазона длин волн с квантовым пределом чувствительности, в которых используются активные квантовые фильтры, созданные на основе иодных фотодиссоционных квантовых усилителей, и иодные лазеры. применения таких устройств в лазерной локации, лазерной космической связи, для поиска сигналов внеземных цивилизаций. [10,16].

2.1.14. Модуляция световых сигналов (1 час). Устройства, позволяющие управлять амплитудой, фазой, частотой и поляризацией оптического излучения.

Методические указания. Оптические системы обработки радиосигналов являются специализированными вычислителями, позволяющими получить такие технические характеристики устройств, которые пока еще недостижимы при использовании других средств. Наиболее просто в них в аналоговой форме осуществляются операции перемножения, формирования спектров Фурье, вычисления корреляционных интегралов и некоторые другие преобразования сигналов.

В публикациях, посвященных этим системам, отмечается их предельно высокое быстродействие, широкополосность, двумерность, адаптивность и т. д.

Непосредственная модуляция полупроводникового лазера по цепи питания. Во многих случаях естественное световое излучение можно с достаточной степенью точности рассматривать как монохроматическое (как гармонические колебания одной единственной частоты) и модулировать его принудительно. Акустооптическое и электрооптическое управление оптического излучения, осуществляемое с помощью модуляторов рассмотрено в работах [4,5,6,34].

2.1.15. Оптоэлектронные процессоры (1 час).

Фотоны как основные носители информации. Высокое быстродействие оптических вычислительных устройств. Преимущества оптических технологий.

Методические указания. Важно знать, что когерентные оптические процессоры, ориентированы на обработку радиосигналов. Акустооптические процессоры, для ввода радиосигналов и оптическую систему используют акустооптические модуляторы, работающие на эффекте акустооптического взаимодействия. [4,6,27,28,37].

2.1.16. Волоконно-оптические линии связи. Компоненты оптических линий связи. Уплотнение каналов. Когерентные линии оптической связи. (4 часа).

Основные достоинства волоконно – оптических линий связи (ВОЛС). Типы оптических волокон (ОВ) и их конструкции. Основные параметры ОВ: профиль показателя преломления, числовая апертура, коэффициент затухания, полоса пропускания, виды дисперсии. Одномодовый и многомодовый режимы передачи сигнала. **Компоненты оптических линий связи.** Оптические кабели и разъемы: волоконно-оптические жгуты. Источники излучения передатчиков оптических линий связи: светодиоды и полупроводниковые лазеры, их основные рабочие характеристики. **Уплотнение каналов.** Принципы уплотнения каналов. Методы увеличения коэффициента использования пропускной способности оптического волокна: временное и спектральное уплотнение. **Когерентные линии оптической связи.** Элементная база когерентных волоконно-оптических систем передачи информации (ВОСПИ).

Методические указания. В этом разделе нужно понять физику процессов передачи света по ОВ. Нужно довести до понимания почему ВОЛС наиболее выгодны. Указать причины выбора того или иного источника излучения, например, почему в системах малой мощности используют гелий – неоновые лазеры, а в системах большой мощности – аргонные лазеры.. Важно дать понятие

О способах преобразования передаваемых сообщений в оптический сигнал. Узнать суть физических эффектов, для модуляции оптического сигнала. Понять достоинства цифровых методов передачи сигналов по сравнению с аналоговыми. Знать в методы уплотнения каналов (увеличения коэффициента использования пропускной способности оптического волокна: временное, спектральное уплотнение. [4,6,8,11,12,13,23,37]

2.1.17. Устройства отображения информации. (1 час).

Основные параметры и характеристики устройств отображения оптических сигналов: интерактивность, наглядность, автоматизация.

Методические указания. Значение устройств отображения можно посмотреть на применениях флэш-памяти: флэш-память используют в принтерах, КПК, видеоплатах, роутерах, брандмауэрах, сотовых телефонах, электронных часах, записных книжках, телевизорах, кондиционерах, микроволновых печах, в стиральных машинах, в сменной памяти, используемой в цифровых и мультимедийных устройствах, таких как mp3-плееры и игровые приставки и т.д.

При записи на флэш-памяти заряд помещается на плавающий затвор методом инъекции «горячих» электронов или методом туннелирования их. Стирание содержимого ячейки производится также методом туннелирования. Самый большой на настоящее время объем USB устройств составляет 128Гб. Такие же достоинства можно отметить всех устройств отображения. Просмотреть их устройства и принципы работы можно на [4,5,17].

2.1.18. Оптические запоминающие устройства (3 часа).

Принципы построения оптико-электронных запоминающих устройств. Эффективность оптических методов хранения информации: высокая плотность упаковки данных, надежность считывания данных. Оптическая голография. Запись и считывание голограмм.

Методические указания. Использование когерентного светового поля (лазерного излучения) в качестве переносчика информации позволяет создать достаточно гибкую систему обработки информации, способную обрабатывать большой объем данных в очень короткое время. Лазерный луч, несущий информацию, можно представить в виде суммы плоских монохроматических волн с различными параметрами (амплитуды напряженности поля E_0 ; частоты изменения поля во времени ω ; начальной фазы колебаний ϕ_0 ; вида поляризации; направления вращения поляризации; направления распространения волны).

Чем больший объем информации может быть закодирован в параметрах носителя информации, чем больше скорость его прохождения через систему обработки, тем больше быстродействие такого устройства [4,6,718].

2.1.19. Оптоэлектронные датчики (2 часа).

Преобразование различных физических воздействий в электрические сигналы. Лазерные и светодиодные датчики влажности и загрязнения атмосферы. Волоконно-оптические датчики. Изменение характеристик оптического сигнала (фазы, амплитуды, поляризации) под действием внешних воздействий

Методические указания. Чтобы понять работу и применимость большого разнообразия оптических датчиков необходимо знать сущность влияния различных физических воздействий при амплитудной, поляризационной, частотной и фазовой модуляции световых полей в волоконно-оптических элементах; распределенных волоконно-оптических измерительных систем; волоконно-оптических лазеров [5,9,10,33,34].

2.2. Разделы, вынесенные на самостоятельную работу

2.2.1. Взаимодействие излучения с веществом. Образование электронных, колебательных и вращательных уровней энергии. Взаимодействие оптического излучения с твердыми и газообразными телами. Взаимодействие оптического излучения с газовыми средами (1 час).

Методические указания: В этом разделе надо понять сущность усиления в квантовом диапазоне: инвертированность, квантованность населенности в средах. В случае газа, состоящего из свободных атомов, квантуется энергия электронов в атоме, обусловленная притяжением электронов к ядру. В твердых телах существует коллективное движение частиц, образующих кристаллическую решетку. При сильных внутренних полях соседние энергетические уровни сливаются, образуя непрерывные разрешенные зоны, между которыми имеются

запрещенные зоны [1,4,6,7,22].

2.2.2. Плотность состояний. Распределение электронов по энергиям в металлах. Распределение разрешенных квантовых состояний внутри зон (1 час).

Методические указания. Потенциальная энергия электрона предполагается равной нулю на бесконечном расстоянии от протона. Следовательно, чтобы перевести электрон из бесконечности на расстояние r от протона, необходимо произвести работу. Полная энергия электрона равна сумме кинетической и потенциальной энергий. Энергия, которую приобретает фотон квантуется и ее плотность распределяется по разрешенным уровням. Потенциальная энергия и импульс электрона в твердом теле определяются эффектами квантовых взаимодействий. Модель энергетических зон вводится для того, чтобы связать между собой энергию и импульс носителей заряда в кристалле [19,20].

2.2.3. Оптические резонаторы. Резонатор-интерферометр Фабри-Перо. Многослойные диэлектрические покрытия и интерференционные фильтры. Перестраиваемые резонаторы (0,5 часа).

Методические указания. Из этого раздела нужно понять, что использование многослойных интерференционных диэлектрических отражающих покрытий изменяет показатель преломления переменного от слоя к слою. Слои наносятся вакуумным напылением или химическим путем, они имеют толщину, равную четверти длины волны в диэлектрике на рабочей частоте. С увеличением количества слоев коэффициент отражения возрастает. При $n=15$ и больше он превышает 99% [24,29].

2.2.4. Оптические квантовые усилители. Генерация суммарной, разностной частот (ГСЧ и ГРЧ) квантового усилителя. Максимальная эффективность генерации второй оптической гармоники от периодической металлической поверхности: симметричная схема взаимодействия (1 час).

Методические указания. Знание материала этого раздела помогает студентам узнать, что генерация оптических гармоник в оптических усилителях позволяет создавать оптические преобразователи, квантовые усилители и генераторы, плавно перекрывающие широкий диапазон излучений от видимого до далекого инфракрасного при фиксированной частоте накачки [25,26].

2.2.5. Нелинейные явления. Нелинейно оптические явления в средах с квадратичной и кубической нелинейностью? Фоторефрактивный эффект и где он находит применение. Генерация второй гармоники. (1 час).

Методические указания. Что представляет собой преобразование частоты, подчиняющееся законам нелинейной оптики? Плотность мощности лазерного

излучения может быть настолько велика, что в среде индуцируются переходы, относящиеся к нелинейным эффектам. Спектр отклика нелинейной системы всегда шире спектра возмущения, поэтому при нелинейном взаимодействии лазерного излучения со средой могут наблюдаться процессы преобразования частоты лазерного излучения. При определенных условиях преобразованное по частоте лазерное излучение может усиливаться, распространяясь в нелинейной среде. На основе таких процессов возможно создание усилителей и генераторов на новых оптических частотах. Все это можно узнать из [4,10,21]

2.2.6. Детектирование световых сигналов. Принцип работы ячейки фотоматрицы, ПЗС матрицы (0,5 часа).

Методические указания. Самыми простыми из фотоприемников являются фотодиодные матрицы. Они предназначены для преобразования оптических сигналов в электрические и для коммутации электрических сигналов. Фотоматрицы представляют собой двухмерную решетку $\{A_{i,j}\}$ фотоячеек $A_{i,j}$, объединенных системой вертикальных и горизонтальных шин, а также общих проводящих шин. Каждая горизонтальная и вертикальная шина имеет вывод. Всего у матрицы 32 вывода горизонтальных шин, 32 вывода вертикальных шин и пять выводов общих шин. Подробнее об этом можно узнать из [4,33].

2.2.7. Кантовый предел чувствительности Предельный переход непрерывных квантовых измерений. Динамические и шумовые характеристики линейных квантовых систем (0,5 часа).

Методические указания. Как с помощью помехоустойчивых лазерных приёмопередающих устройств с квантовым пределом чувствительности получают рекордное значение чувствительности 30...70 пА/Гц, соответствующее теоретическим оценкам для случая тепловых флуктуаций, можно узнать из [10,16].

2.2.8. Модуляция световых сигналов. Элементы управления оптическим излучением. Электрооптические и акустооптические модуляторы оптического излучения (1 час).

Методические указания. Приёмники света всех типов реагируют только на изменение интенсивности света, т.е. амплитуды его колебаний. Поэтому на практике и частотную модуляцию сигнала (ЧМ), и фазовую (ФМ), и модуляцию по поляризации (ПМ) преобразуют тем или иным способом в амплитудную модуляцию сигнала (АМ) — либо непосредственно в схеме модулятора, либо перед фотоприёмником (т.н. гетеродинный приём). При этом гармонический состав амплитудно-модулированного света зависит от первоначального вида модуляционного сигнала и способа его преобразования в АМ [32].

2.2.9. Когерентный оптический процессор. Акустооптические спектроанализаторы. Акустооптические процессоры корреляционного типа (0,5 часа).

Методические указания. Фотоны, являющиеся основными носителями информации в оптическом компьютере, по своим физическим характеристикам принципиально отличаются от электронов. Полевая природа света обуславливает многочисленные преимущества оптических технологий для задач передачи, записи, обработки и хранения информации. В современном электронном компьютере можно отметить следующие оптические узлы и элементы: устройства ввода информации – оптический сканер, оптическая мышь; устройства обмена информацией – инфракрасный порт, оптоволоконно; устройства вывода информации – лазерный принтер, дисплей, голографический (объемный) дисплей; устройства памяти – долговременная память на перезаписываемых оптических дисках, магнитооптические диски, голографические диски [36].

2.2.10. Волоконно-оптические линии связи. Одномодовые световоды с устойчивой поляризацией. Одномодовые соединители, изоляторы и поляризаторы. Помехоустойчивость и информативность когерентных систем связи (0,5 часа).

Методические указания. Понятие когерентности оптической линии очень важно хотя бы потому, что по одномодовой линии связи можно передать на частоте 4 кГц телефонных разговоров $125 \cdot 10^{10}$ или на частоте 8 МГц телевизионных программ $500 \cdot 10^{13}$. Подробно узнать о возможностях и достоинствах когерентных оптических линиях можно из литературы [22,23,37].

2.2.11. Типы устройств отображения: ЖК мониторы, плазменные мониторы. Терминал ввода, вывода. Панельная рабочая станция с процессором. Проекторы (0,5 часа).

Методические указания. Все устройства визуального отображения информации находящейся в оперативной памяти, позволяющее обеспечить взаимодействие пользователя с аппаратным и программным обеспечением компьютера-дисплей. Дисплей -это важнейший компонент пользовательского интерфейса [22,23,37].

2.2.12. Оптические запоминающие устройства. Основные преимущества голографической записи. Соотношения между опорным и сигнальным пучками. Типы голограмм. Голограммы Френеля (1 час).

Методические указания. В этом разделе нужно понять принципы голографической записи и считывания. На первом этапе, для записи голограммы фотопластинку с толстым эмульсионным слоем устанавливают

перед объективом со стороны источника. После экспозиции и проявления в эмульсионном слое фотопластинки образуется трехмерная слоистая структура, моделирующая пространственное распределение интенсивности в стоячей волне, образованной в результате наложения излучения, рассеянного объектом, и излучения источника. Такая структура обладает избирательностью по отношению к падающему на нее излучению, т. е. работает как интерференционный фильтр. Полученная голограмма допускает восстановление изображения не обязательно от монохроматического источника. Источник может быть со сплошным спектром: либо лампа накаливания, либо Солнце. Более подробно о всех запоминающих устройствах можно познакомиться в [4,5,6,7,18].

2.2.13. Датчики. Волоконно-оптические брэгговские решетки и датчики на их основе. Датчики на основе нелинейно-оптических эффектов в волоконных световодах. Датчики на основе интерференции света (1 час).

Методические указания. Датчики с оптическим преобразователем – это устройства, содержащие оптический материал или чувствительный к механическому воздействию оптический элемент, преобразующий изменение величины внешнего воздействия в изменение параметров светового луча. Преобразователь помещают между торцами передающего и приемного световодов. В таких датчиках используются, в основном, многомодовые ВС и пучки световодов (волоконно-оптические жгуты). В качестве источников света, как правило, применяются светодиоды с малым уровнем шума, а в некоторых случаях – полупроводниковые лазеры. Роль фотоприемников выполняют рpн-фотодиоды или обычные фотодиоды [34,39].

3. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ

Основными целями выполнения лабораторной работы являются:

- углубленное освоение студента теоретических положений изучаемой дисциплины «Квантовая и оптическая электроника»;
- изучение особенностей конструкции, поведения и функционирования элементов оптических устройств;
- усвоение приемов, методов и способов обработки, представления и интерпретации результатов проведенных исследований;

При выполнении лабораторной работы студент должен продемонстрировать:

- владение соответствующим понятийным и терминологическим аппаратом;
- изучение учебно-методической и дополнительной литературой по теме.

Список натуральных лабораторных работ:

1. Исследование основных параметров газового He-Ne лазера;
2. Исследование дисперсионных характеристик ОВ;
3. Устройство ввода информации в оптическую систему.

Продолжительность каждой работы - 4 час.

Список компьютерных лабораторных работ:

1. Исследование полупроводниковых лазеров (компьютерная по выбору).
Методические указания к виртуальной лабораторной работе представлены в локальной вычислительной сети кафедры СВЧиКР.

4. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

Решение задач способствует развитию навыков практического применения полученных теоретических знаний, а также позволяет глубже понять физическую сущность происходящих в веществе при взаимодействии его с излучением. Изучить физические основы оптических генераторов, процессов и явлений происходящих в лазерах, оптических модуляторах, оптических резонаторах, фотоприемниках.

4.1 Темы практических занятий:

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование практических занятий (по 2 час.)
1	2	Расчет вероятностей спонтанных и индуцированных переходов.
2	3	Расчет энергетических состояний квантовых систем
3	4	Расчет мощности излучения квантового генератора
4	5	Расчет параметров оптических резонаторов
5	6	Расчет параметров лазеров
6	7	Расчет параметров приемников излучения
7	14	Расчет параметров модуляторов и дефлекторов
8	16	Расчет характеристик оптического волокна (дисперсия, затухание, числовая апертура)

4.2. Примеры решения типовых задач для практических занятий

4.2.1. Расчет вероятностей спонтанных и индуцированных переходов

Задача 1

Атом водорода образует диполь. Электрический момент этого диполя равен $\vec{P} = e\vec{r}$. Величина диполя постоянна, а направление переменного. Разложим \vec{P} на две ортогональные составляющие $P_x(t)$ и $P_y(t)$ по гармоническому закону и определить вероятность спонтанного перехода на частоте $\nu_{21} = 5,4 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$.
Справка: $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ К}$.

Решение:

Из курса электродинамики известно, что элементарный излучатель с током эквивалентен системе двух зарядов разного знака, находящихся на расстоянии l . Мощность такого излучателя определяется как

$$P_{изл} = \frac{2}{3} \pi W_0 I^2 \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2. \quad (1)$$

Перейдем к нашему случаю, найдем составляющую дипольного момента по оси x т.е. $P_x = ql$, где $l = 3 \cdot 10^{-7}$ м. Ток связан с зарядом следующим образом

$i = \frac{dq}{dt}$. Дипольный момент P_x изменяется по гармоническому закону, следовательно аналогично изменяется и заряд в комплексной форме $\dot{i} = j\omega \dot{q}$.

Обозначим $\omega = 2\pi\nu$, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, $\lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$, $W_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$, $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$.

$$P_{изл} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} (\omega q)^2 \frac{l^2 \omega^2}{4\pi c^2} = \frac{2}{3} \frac{\omega^4 P^2}{4\pi \epsilon_0 c^2} \text{ Вт} = \frac{2}{3} \frac{\omega^4 P^2}{c^2} \frac{\epsilon_0}{c}; \quad P_{изл.x} = \frac{2}{3} \frac{\omega^4 P^2}{c^2}; \quad P_{изл.y} = \frac{2}{3} \frac{\omega^4 P^2}{c^2};$$

$$P_{изл.\Sigma} = \frac{4}{3} \frac{\omega^4 P^2}{c^2}. (*)$$

Запишем еще раз формулу для излучаемой мощности, выразив ее через ω и \hbar : $P_{изл} = \hbar \omega_{ki} W_{ki} N_k$. Аналогично для спонтанного перехода $P_{изл} = \hbar \omega_{ki} A_{ki}$. Учитывая (*), получим

$$A_{ki} = \frac{4}{3} \frac{\omega_{ki}^3 P_{ki}^2}{\hbar c^3} = \frac{4}{3} \frac{(2\pi\nu)^3 \cdot (1,6 \cdot 10^{-16} \cdot 3 \cdot 10^{-7})^2 \cdot 2\pi}{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot (3 \cdot 10^8)^3} = 4,2 \cdot 10^8 \quad 1/\text{сек}. \quad (2)$$

1. В СВЧ диапазоне A_{ki} пренебрежимо мало, в оптическом - велико.
2. На разных переходах вероятности спонтанных переходов различны. Существуют такие переходы, для которых $P_{ki} = 0$, следовательно и $A_{ki} = 0$, такие переходы запрещенные. Уровни с $A_{ki} \rightarrow 0$ называются метастабильными.

Задача 2

Атом водорода образует диполь. Электрический момент этого диполя равен $\vec{P} = e\vec{r}$. Величина диполя постоянна, а направление переменное.

Определить вероятность индуцированного перехода на частоте $\nu_{21} = 5,4 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$, если вероятность спонтанного перехода равна $4,2 \cdot 10^8 \text{ 1/сек}$.

Решение:

$$B = \frac{A_{21} \cdot c^3}{8\pi h \cdot \nu_{21}^3} = \frac{4,2 \cdot 10^8 \cdot (3 \cdot 10^8)^3}{8 \cdot 3,14 \cdot 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot (5,4 \cdot 10^{14})^3} = 4,33 \cdot 10^{21} \quad 1/\text{сек}. \quad (3)$$

4.2.2. Расчет энергетических состояний квантовых систем

Взаимодействие оптического излучения с веществом определяется как свойствами излучения, так и энергетическими и кристаллическими характеристиками вещества. Поглощение энергии фотонов твердым телом сопровождается переходом электронов на более высокие разрешенные энергетические уровни и может привести к выходу электронов в вакуум. Переходы электронов на низкие энергетические уровни сопровождается излучением фотонов. Эти процессы можно качественно описать с помощью уравнения Эйнштейна для фотоэффекта. Поглощение фотонов существенно

меняет электрические свойства полупроводников, а изменение населенности энергетических уровней с помощью электрического поля или тока приводит к стимулированному излучению фотонов полупроводниковыми приборами. Рассмотрите эти явления на примере ряда задач.

Задача 3

Опишите модель атома Бора, постройте диаграммы энергетических уровней для атома водорода. Почему электронные орбиты могут иметь лишь определенные радиусы? Объясните, каким образом это приводит к появлению энергетических уровней в атоме, и укажите, какую роль играют эти уровни в спектре водорода (см. рис. 1).

Энергетический уровень орбиты наименьшего радиуса (т.е. при $n=1$) в атоме водорода составляет $-13,6$ эВ. С какой длиной волны излучения связан переход электрона с этой орбиты на орбиту, для которой $N=3$?

Решение:

m_p – масса протона, с зарядом $+e$

m_e – масса электрона с зарядом $-e$

$$\frac{m_p}{m_e} = \frac{1}{1833} \quad (m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}, \quad e = 1.6 \cdot 10^{-19}).$$

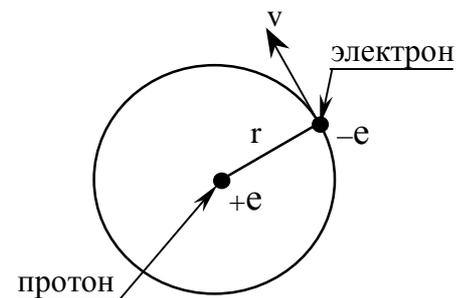


Рис. 1.

Электростатическая сила, действующая между электроном и ядром, подчиняется

$$\text{закону Кулона: } F = \frac{e^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r^2} \quad (4)$$

где: r - радиус орбиты электрона; $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ - диэлектрическая проницаемость свободного пространства;

При движении электрона со скоростью v по орбите с радиусом r , возникает центробежная сила: $F_{ц} = \frac{m_e \cdot v^2}{r}$. В случае равновесия центробежная сила равна кулоновской силе притяжения.

$$\frac{m_e \cdot v^2}{r} = \frac{e^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r^2} \quad (5)$$

Бор постулировал, что электрон может вращаться только на некоторых определенных орбитах. При этом электрон не излучает энергии. Угловой момент электрона, находящегося на какой-либо фиксированной орбите равен целому числу величин $h/2\pi$, где: $h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ - постоянная Планка.

Таким образом, для углового момента можно записать

$$m_e \cdot v \cdot r = \frac{n \cdot h}{2 \cdot \pi} \quad (6)$$

Откуда находим скорость электрона на орбите:

$$v = \frac{n \cdot h}{2 \cdot \pi \cdot m_e \cdot r}$$

Возведем последнее выражение в квадрат:

$$v^2 = \left(\frac{n \cdot h}{2 \cdot \pi \cdot m_e \cdot r} \right)^2 \quad (7)$$

Из уравнения (7) получим:

$$v^2 = \frac{e^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r \cdot m_e} \quad (8)$$

Приравняем (7) и (8) и получим:

$$\frac{n^2 \cdot h^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot m_e^2 \cdot r^2} = \frac{e^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r \cdot m_e}$$

$$\text{Откуда радиус орбиты:} \quad r = \frac{n^2 \cdot h^2 \cdot \epsilon_0}{\pi \cdot m_e \cdot e^2} \quad (9)$$

Подставляя численные значения констант в (9), получаем

$$r = \frac{n^2 \cdot 6.63^2 \cdot 10^{-68} \cdot 8.85 \cdot 10^{-12}}{\pi \cdot 9.11 \cdot 10^{-31} \cdot 1.6^2 \cdot 10^{-38}} = n^2 \cdot 0.53 \cdot 10^{-10} \text{ (м);} \quad n=1,2,3,\dots$$

Для: $n=1$ $r_1 = 0.53 \cdot 10^{-10}$ м; $r_2 = 2.12 \cdot 10^{-10}$ м; $r_3 = 4.78 \cdot 10^{-10}$ м;

$r_4 = 8.5 \cdot 10^{-10}$ м; $r_5 = 13.3 \cdot 10^{-10}$ м.

Потенциальная энергия электрона предполагается равной нулю на бесконечном расстоянии от протона. Следовательно, для того чтобы перевести электрон из бесконечности на расстояние r от протона, необходимо произвести работу, которая определяется выражением (для потенциальной энергии):

$$\epsilon_p = \int_{\infty}^r F dr = \int_{\infty}^r \frac{e^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r^2} dr \quad \text{или} \quad \epsilon_p = -\frac{e^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r} \quad (10)$$

Кинетическая энергия $\epsilon_k = \frac{m \cdot v^2}{2}$. Подставляя сюда выражение (8) для v^2 , получаем:

$$\epsilon_k = \frac{1}{2} m_e \frac{e^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r \cdot m_e} = \frac{e^2}{8 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r} \quad (11)$$

Полная энергия электрона на любой орбите

$$\epsilon_p = -\frac{e^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r} + \frac{e^2}{8 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r} = -\frac{e^2}{8 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r} \quad (12)$$

Подставляя в (12) значение r из (8) получаем:

$$\epsilon_n = -\frac{e^2 \cdot e^2 \cdot \pi \cdot m_e}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot n^2 \cdot h^2 \cdot \epsilon_0} = -\frac{1}{n^2} \frac{e^4 \cdot m_e}{8 \cdot \epsilon_0^2 \cdot h^2} \quad (13)$$

Подстановка численных значений констант в (13) дает:

$$\epsilon_n = -\frac{1}{n^2} \frac{(1.6 \cdot 10^{-19})^4 \cdot 9.11 \cdot 10^{-31}}{8 \cdot (8.85 \cdot 10^{-12})^2 \cdot (6.63 \cdot 10^{-34})^2} = -\frac{1}{n^2} 2.17 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = -\frac{13.6}{n^2} \text{ эВ}.$$

Следовательно, мы имеем распределение энергетических уровней показанное на рисунке 2:

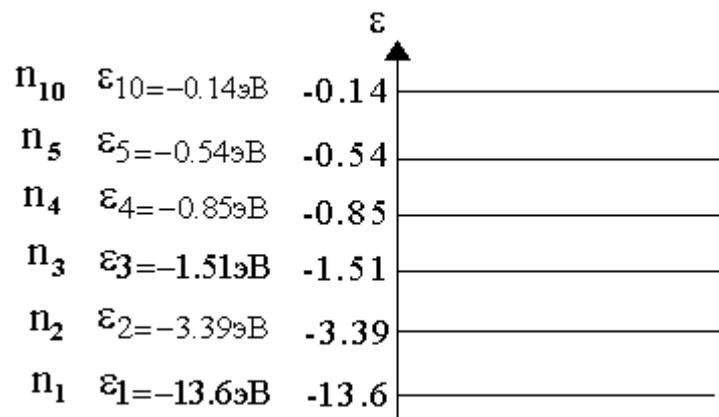


Рис. 2

Таким образом, если электрон находится на орбите с квантовым числом $n=3$ и возвращается на первую орбиту, то при этом высвобождается энергия

$$\epsilon_3 - \epsilon_1 = h \cdot \nu$$

Следовательно, частота излучения

$$\nu = \frac{\epsilon_3 - \epsilon_1}{h} = \frac{13.6 - 1.51}{6.63 \cdot 10^{-34}} 1.6 \cdot 10^{-19} = 2.92 \cdot 10^{15} \text{ Гц}.$$

Отсюда соответствующая длина волны:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \cdot 10^8}{2.92 \cdot 10^{15}} = 1.03 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 103 \text{ нм}.$$

Задача 4

Определить неопределенность энергии i -того уровня и ширину естественной линии вещества, имеющего время жизни уровня $7 \cdot 10^{-6} \text{ с}$.

Решение. Если в данный момент времени атом находится в одном возбужденном состоянии E_k , то такое состояние атома неустойчиво. Через время τ атом перейдет в одно из состояний с меньшей энергией E_i . Это время характеризуется изменением населенности уровня E_k в 2,7 раз. А вероятность спонтанного перехода определяется из выражения $A_{21} = 1/\tau$.

Но даже в идеальном случае, когда на частицу не действуют внешние силы, ширина энергетических уровней конечна. Энергия изолированного атома в возбужденном состоянии записывается выражением: $\Delta E \geq h/2$.

Подставляя численные значения для τ и h в формулы для A_{21} и ΔE , получим

$$A_{21} = \frac{1}{7 \cdot 10^{-6}} = 0,142 \cdot 10^6; \quad \Delta E = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{7 \cdot 10^{-6}} = 0,945 \cdot 10^{-28} \text{ Дж} = 5,9 \cdot 10^{-10} \text{ эВ}.$$

Задача 5

Для получения инверсной населенности рубинового образца длиной $L=1,9\text{см}$ необходимо облучать активный элемент широкой полосой зеленого света. Плотность энергии облучения будет определяться формулой

$$w_{21}^{\min} = \frac{A_{21} \cdot h\nu_{31}n}{c \cdot \sigma_{10}}, \quad (14)$$

где n – показатель преломления рубина (1,7), данные необходимые для расчета взяты из справочника по лазерной технике [37] следующие: число ионов хрома в единице объема рубина $N= 1,62 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$; при $A < 0,2 \cdot 10^8 \text{ 1/сек}$; $\lambda_{21}=0,54 \cdot 10^{-6} \text{ м}$; поперечное сечение усиления $\sigma = 10^{-19} \text{ см}^2$; получаем

$$w_{21}^{\min} = \frac{A_{21} \cdot h\nu_{31}n}{c \cdot \sigma_{10}} = \frac{0,2 \cdot 10^8 \cdot 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 5,4 \cdot 10^{14} \cdot 1,7}{3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-19}} = 4,1 \cdot 10^{-1} = 0,41 \text{ Дж/см}^2 \text{ сек}.$$

4.2.3. Расчет мощности излучения (коэффициента усиления) квантовых генераторов

Задача 6.

Пусть имеется активный кристалл длиной 5 см, имеющий коэффициент усиления $K_0=1,5$ на длине волны, соответствующей инвертированному переходу при определенном заданном уровне накачки. Показатель рассеяния равен $0,02 \text{ см}^{-1}$. Можно ли получить генерацию на таком кристалле при использовании зеркал с коэффициентами отражения $r_1 = 0,8$ и $r_2 = 0,5$?

Решение:

Сравним усиление с потерями за один проход волны. В результате однократного отражения излучения на зеркалах в резонаторе остается относительная величина потока, равная $r_1 \cdot r_2$. Поскольку однократному отражению на каждом зеркале соответствуют два прохода, то условие возникновения генерации соответствует неравенству

$$K_0^2 (r_1 \cdot r_2) > 1, \quad (15)$$

где K_0 – ненасыщенный коэффициент усиления. В нашем случае $K_0 = 1,5$; $r_1 \cdot r_2 = 0,4$, поэтому генерация невозможна, ибо потери не компенсируются усилением:

$$1,5^2 \cdot 0,4 = 0,9 < 1.$$

Найдем показатель усиления среды. В линейном режиме работы

$$K_0 = \exp[(\chi_0 - \delta) \cdot \ell]. \quad (16)$$

Отсюда

$$(\chi_0 - \delta) = \frac{1}{\ell} \ln K_0 = \frac{\ln 1,5}{5} \approx 0,08 \text{ см}^{-1};$$

поскольку $\delta = 0,02 \text{ см}^{-1}$, то $\chi = 0,10 \text{ см}^{-1}$.

Используя пороговое условие $[\chi_0 - \delta - \frac{1}{\ell} \ln(\rho \cdot \rho_0)^{-1/2}] > 0$

$$0,08 - \frac{1}{5} \cdot \ln \frac{1}{\sqrt{0,4}} = -0,01 < 0,$$

получим, что генерация в таком кристалле возникнуть не может.

Задача 7.

Резонатор оптического квантового генератора образован зеркалами с коэффициентами отражения $R_1 = R_2 = 0,5$, расположенными на длине L друг от друга. Активная среда занимает всё пространство между зеркалами.

Как нужно изменить коэффициент квантового усиления активной среды для выполнения условия самовозбуждения генератора, если в резонатор вносится поглотитель, поглощающий 50% падающего на него излучения? (В расчёте не учитывать дифракционные потери на зеркалах и потери излучения в материале активной среды и зеркал.

Решение. Пусть от зеркала 1 к зеркалу 2 начинает распространяться волна с интенсивностью I_0 . Если поглотитель расположен на расстоянии L_1 от первого зеркала, то до поглотителя дойдет волна интенсивностью $I_0 e^{\delta L_1}$, где δ – коэффициент квантового усиления активной среды.

Пусть α_1 определяет долю поглощаемой поглотителем интенсивности и тогда после поглотителя интенсивность волны равна

$$I_0 (1 - \alpha_1) e^{\delta L_1}.$$

Далее волна опять усиливается в среде и на зеркало 2 приходит с интенсивностью

$$I_0 (1 - \alpha_1) e^{\delta L_1} e^{\delta L_2} = I_0 (1 - \alpha_1) e^{\delta L}.$$

После отражения от зеркала 2 в направлении зеркала 1 будет распространяться волна с интенсивностью

$$R I_0 (1 - \alpha_1) e^{\delta L}$$

На обратном пути к зеркалу 1 она испытывает усиление в активной среде и поглощение в поглотителе, после отражения от зеркала 1 интенсивность волны составит

$$R^2 I_0 (1 - \bar{\sigma}_1)^2 e^{2\alpha L}$$

Условие существования в резонаторе самоподдерживающейся волны получается, если приравнять интенсивность исходной волны и волны, совершившей обход резонатора.

$$I_0 = R^2 I_0 (1 - \bar{\sigma}_1)^2 e^{2\alpha L}$$

$$R^2 (1 - \bar{\sigma}_1)^2 e^{2\alpha L} = 1$$

Откуда условие для порогового коэффициента усиления имеет вид:

$$\bar{\sigma} L = \frac{1}{2} \ln \frac{1}{R^2 (1 - \bar{\sigma}_1)^2} = \ln \frac{1}{R(1 - \bar{\sigma}_1)}$$

При отсутствии поглотителя $\bar{\sigma}_1 = 0$

$$\bar{\sigma}_0 L = \ln \frac{1}{R}$$

Очевидно, что отношение пороговых коэффициентов усиления для среды без поглотителя и с поглотителем будет:

$$\frac{\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_0} = \frac{\ln \frac{1}{R(1 - \bar{\sigma}_1)}}{\ln \frac{1}{R}}$$

При $R=0,5$ и при $\bar{\sigma}_1=50\%$, $(\alpha/\alpha_0) = 2$.

Таким образом, пороговый коэффициент усиления среды с поглотителем вдвое выше.

Задача 8.

Лазерный резонатор состоит из 2-х зеркал с коэффициентами отражения $r_2=0,5$; $r_1=1$. Длина активной среды рубина $l = 7,7$ см, с диаметром $0,2$ см, а сечение перехода $\sigma = 8,8 \cdot 10^{-1} \text{ см}^2$, $N=1,6 \cdot 10^{17} \text{ 1/см}^3$. Вычислите порог инверсной населенности и выходную мощность, если ненасыщенный показатель усиления среды $\chi_0 = 0,1 \text{ см}^{-1}$.

Решение. Порог инверсной населенности определяется по формуле

$$N_{2\text{пор}} = \frac{1}{2} \cdot N = \frac{1}{2} \cdot N \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \ell \quad (17)$$

$$N_{2\text{пор}} = \frac{1}{2} \cdot N = \frac{1}{2} \cdot N \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \ell = \frac{1}{2} \cdot 1,6 \cdot 10^{19} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \ell =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 1,6 \cdot 10^{19} \cdot \frac{3,14 \cdot 4 \cdot 10^{-2}}{4} \cdot 7,5 = 18,84 \cdot 10^{17}.$$

По формуле

$$P = \frac{\tau\sigma}{\eta(1+\rho)} \left[\frac{\chi_0 l}{\delta l + \ln(\rho \cdot \rho_0)^{-1/2}} - 1 \right], \quad (18)$$

где P – выходная мощность генерации; τ – коэффициент пропускания выходного зеркала; σ – эффективное сечение среды; η – параметр насыщения; ρ – коэффициент отражения выходного зеркала; χ_0 – ненасыщенный показатель усиления среды; l – эффективная длина активного элемента; ρ_0 – коэффициент отражения глухого зеркала, (2) определяем выходную мощность.

$$P = \frac{\tau \cdot \sigma}{\eta \cdot (1 + \rho)} \cdot \left[\frac{\chi_0 \cdot l}{\delta \cdot l + \ln(r_1 \cdot r_2)^{-1/2}} - 1 \right] = \frac{0,5 \cdot 8,8 \cdot 10^{-1}}{0,5(1 + 0,5)} \left[\frac{0,1 \cdot 7,5}{0,02 \cdot 7,5 + 0,346} - 1 \right] = 0,3 \text{ Вт.}$$

Ответ: $N_{2\text{пор}} = 18,84 \cdot 10^{17}$, $P = 0,3$ Вт.

4.2.4. Расчет параметров оптических резонаторов

Задача 9.

Определить время затухания в резонаторе для продольных мод (τ_p), частоту генерации, скорость вынужденного излучения. Если заданы следующие параметры: $L=0,05$ см, $r_1 \cdot r_2=0,32$; $\alpha=10$ см⁻¹; $n=3,6$; $\Delta E = 2 \cdot 10^{-2}$ эВ; $E = 1,5$ эВ.

Решение: Время затухания в резонаторе определим по формуле

$$\tau_p = \frac{Q}{\omega} = \frac{\bar{n}}{c} \left(\alpha + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{\sqrt{r_1 r_2}} \right)^{-1},$$

где Q – добротность резонатора для соответствующего типа колебаний.

Из этого же выражения определим угловую частоту генерации $\omega=Q/\tau_p$.

Скорость вынужденного излучения (r_{st}) определим по следующей формуле:

$$r_{st} \rightarrow \frac{P}{\tau_p} = \frac{\bar{n}^2 E^2}{\pi^2 h^3 c^3 \tau_p} = j \eta_i / cd \Delta E \gamma,$$

где P – плотность мод (число фотонов в единичном энергетическом интервале и единице объема); j – плотность тока накачки; η_i – внутренний квантовый выход излучения; d – толщина активного слоя; ΔE – ширина спектра генерации; γ – некоторый множитель, зависящий от формы спектра и степени вырождения (т.е. от формы энергетического спектра и температур).

Пороговую плотность можно выразить следующим образом:

$$j_t = \frac{e \bar{n}^2 d}{\pi^2 c^2 h^3} \cdot \frac{E^2 \Delta E \gamma}{\eta_i} \left(\alpha + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{r_1 \cdot r_2} \right),$$

Усиление в активной среде равно [40]

$$g = \frac{\pi^2 c^2 h^3 \eta_i \cdot j_t}{e \bar{n}^2 d \cdot E^2 \Delta E \cdot \gamma},$$

так как скорость вынужденного излучения (r_{st}) равна

$$r_{st} = \frac{c}{n} \cdot P(E) \cdot g,$$

где

$$P(E) = \frac{\bar{n}^2 \cdot (h\nu)^2}{\pi^2 h^3 c^3}.$$

Задача 10.

Определить нагруженную добротность резонатора полупроводникового лазера тремя вариантами: 1) обусловленную активным поглощением на свободных носителях, 2) определяемую через отражения от торцевых граней кристалла, 3) обусловленную дифракцией.

Численные значения параметров, необходимых при решении следующие:

ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость ($\epsilon_0 = 10$), σ – проводимость ($\sigma = 0,5 \cdot 10^3 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$), τ – время релаксации носителей тока ($\tau \approx 0,2 \cdot 10^{-12} \text{ с}$), длина волны λ ($\lambda = 0,84 \text{ мкм}$), коэффициент отражения граней r ($r=0,3$), длина резонатора ($L = 5 \cdot 10^{-2} \text{ см}$), толщина области локализации поля d ($d = 10 \text{ см}$).

Решение: Нагруженная добротность для первого варианта может быть определена следующим выражением

$$Q_H = \frac{\epsilon_0 \cdot \omega^2 \cdot \tau^2}{4 \cdot \pi \cdot \sigma}. \quad (19)$$

Вычислим угловую частоту, при заданной длине волны

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \frac{2 \cdot \pi \cdot 3 \cdot 10^8}{0,84 \cdot 10^{-6}} = \frac{18,84 \cdot 10^8}{0,84 \cdot 10^{-6}} = 22,43 \cdot 10^{14} \text{ рад.}$$

Подставляя (19) заданные числа, получим величину нагруженной добротности

$$Q_H = \frac{10 \cdot (22,43)^2 \cdot 10^{28} \cdot (0,2 \cdot 10^{-12})^2}{4 \cdot \pi \cdot 0,5 \cdot 10^3} = \frac{10 \cdot 503 \cdot 10^{28} \cdot (0,2)^2 \cdot 10^{-24}}{6,28 \cdot 10^3} = \frac{160 \cdot 10^4}{6,28 \cdot 10^3} = 320.$$

Для второго варианта нагруженная добротность определяется по формуле (1) и равна

$$Q_H = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot L}{\lambda \cdot (1-r)} = \frac{6,28 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 10^{-2}}{0,84 \cdot 10^{-4} \cdot 0,7} = 5,3 \cdot 10^2 \cdot 10^{-2} \cdot 10^4 = 5,3 \cdot 10^4.$$

Для третьего варианта нагруженная добротность определяется по

формуле
$$Q_H = \frac{4 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \epsilon_0}{\lambda^2}, \quad (20)$$

где d – толщина области локализации поля.

Подставляя в формулу (20) численные значения параметров, получим $Q_H = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-6} \cdot 10}{0,84 \cdot 10^{-4}} = 15,0 \cdot 10^{-1} = 1,5.$

Ответ: Для первого варианта $Q_H=320$,

для второго варианта – $Q_H = 5,3 \cdot 10^4$,
 для третьего варианта – $Q_H = 1,5$.

4.2.5. Расчет параметров лазеров

Задача 11.

Определить энергию, поглощенную ионами хрома в рубиновом стержне длиной 100 мм ($100 \cdot 10^{-3}$ м), диаметром 6 мм ($6 \cdot 10^{-3}$ м). Произвести численную оценку минимальной мощности накачки и выходной мощности излучения. При $A_{21} = 330 \text{ с}^{-1}$. Принять, что статистические веса верхнего и нижнего уровней соответственно $q_2=2$; $q_1=4$ (соответствует отношению $(n_2/q_2) > (n_1/q_1)$). Длина волны излучения $\lambda_{\text{ген}} = 0,69 \text{ мкм}$, концентрация частиц в рубине $n_0 = 4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, избыток частиц на верхнем уровне $n_2 = 0,8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, вероятность спонтанных переходов $A_{21} = 330 \text{ с}^{-1}$. Справочные данные: $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ [Дж}\cdot\text{с]}$.

Решение: За основу возьмем формулу, определяющую мощность поглощения ($P_{\text{погл}}$) в 3-уровневой схеме рубинового лазера (см. рис. 3).

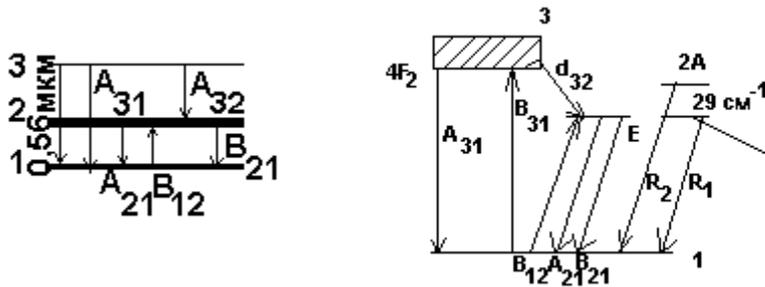


Рис. 3

Энергию, поглощенную в стационарном режиме внутри всего объема $V = \ell \cdot S$ активной среды за 1с во всем спектральном интервале, соответствующем переходу между двумя лазерными уравнениями, называют мощностью поглощения ($P_{\text{погл}}$) или поглощенной энергией

$$P_{\text{погл}} = B_{21} \cdot N_2 \cdot U_v \cdot \ell \cdot S, \quad (21)$$

где $N_1 = n_1$ – количество частиц на 1-ом уровне, S – площадь поперечного сечения рубина, равная $S = \pi \cdot d^2 = 3,14 \cdot 0,6^2 = 1,13 \text{ см}^2$, $\ell = 100 \text{ мм} = 10 \text{ см}$; U_v – плотность энергии ($\text{Дж}/\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$). Плотность энергии можно определить из формулы

$$U_{v_{21}} = \frac{8 \cdot \pi \cdot h \cdot \nu_{21}^3}{\vartheta_{\text{гр}}^3} \cdot \frac{q_1 (n_2 / n_0)}{[q_2 - (q_1 + q_2) \cdot \frac{n_2}{n_0}]} \quad [\text{Дж}/\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}], \quad (22)$$

где $\vartheta_{\text{гр}} = c/n$ – групповая скорость, отношение n_2/n_0 берется в пределах $0,1 \div 1$ (возьмем это отношение, равное 0,2). Подставляя в (22) численные значения параметров, получаем

$$U_{\nu_{21}} = \frac{8 \cdot \pi \cdot 6,625 \cdot 10^{-34} \cdot \left(\frac{3 \cdot 10^{10}}{0,69 \cdot 10^{-4}}\right)^3}{\left(\frac{3 \cdot 10^{10}}{1,7}\right)^3} \cdot \frac{4 \cdot 0,2}{[2 - (4 + 2) \cdot 0,2]} = 2,5 \cdot 10^{-19} \quad \text{Дж/см}^3 \cdot \text{с}^{-1}.$$

Из уравнения $A_{21} = \frac{8\pi h \nu_{21}^3}{c^3} B$, определяющего связь спонтанных и вынужденных переходов, выразим коэффициент Эйнштейна по вынужденным переходам

$$B_{21} = \frac{A_{21} \cdot (\lambda)^3}{8 \cdot \pi \cdot h} = \frac{330 \cdot (0,69 \cdot 10^{-4})^3}{8 \cdot 3,14 \cdot 6,625 \cdot 10^{-34}} = 0,65 \cdot 10^{22} [\text{м}^3/\text{с}^2 \cdot \text{Дж}].$$

Определим поглощаемую энергию, подставляя числа в (21)

$$P_{\text{погл}} = 0,65 \cdot 10^{22} \cdot 2,5 \cdot 10^{-19} \cdot 10 \cdot 1,13 \cdot 0,8 \cdot 10^{19} = 14,65 \cdot 10^{22} \text{ Вт}.$$

Произведем численную оценку минимальной мощности накачки и выходной мощности излучения при $A_{21} = 330 \text{ с}^{-1}$.

Минимальная плотность энергии накачки определяется по формуле

$$\rho_{31}^{\min} = \frac{A_{21} + d_{21}}{B_{13}} \cdot \left(1 + \frac{A_{31} + d_{31}}{A_{32} + d_{32}}\right), \quad (23)$$

где $A_{32} + d_{32} \gg A_{31} + d_{32}$.

При $\rho \rightarrow \infty$, достигается предельная мощность генерации

$$P_{\text{ген}}^{\text{пред}} = \frac{N \cdot h_{21}}{3} \cdot (A_{32} + d_{32}). \quad (24)$$

Второй член в круглых скобках мал по сравнению с единицей. Вероятности неоптических переходов $2 \rightarrow 1$, $3 \rightarrow 1$ равны нулю.

Для определения B_{13} воспользуемся формулой [Степанов]

$$B_{13} = \frac{c \cdot k \cdot \Delta \nu_{31}}{h \cdot \nu_{31} \cdot \left(N_1 - \frac{q_1}{q_3} \cdot N_3\right) \cdot n} \quad \text{или} \quad B_{13} = \frac{c \cdot \Delta \nu_{31} \cdot \sigma_{13}}{h \cdot \nu_{31} \cdot n}, \quad (25)$$

где k – коэффициент поглощения $k = \frac{P \cdot n}{e \cdot w}$.

По определению, поперечным сечением поглощения частоты ν_{31} является

$$\sigma_{13} = \frac{k}{N_1 - \frac{q_1}{q_3} \cdot N_3}, \quad (26)$$

из (23), (25) получим минимальную плотность энергии накачки

$$w_{31}^{\min} = \frac{A_{21} \cdot h \cdot \nu_{31} \cdot n}{c \cdot \Delta \nu_{31} \cdot \sigma_{13}}. \quad (27)$$

Рассматривая эту величину как среднее значение плотности энергии при облучении широкой полосой зеленого света и пользуясь

$w = \int_{\Delta v} \rho(v) dv = \rho_{ik} \cdot \Delta v$, получили для плотности энергии облучения:

$$w_{31}^{\min} = \frac{A_{21} \cdot h \cdot \nu_{31} \cdot n}{c \cdot \sigma_{13}}, \quad (28)$$

где n – показатель преломления рубина.

Этой энергии соответствует поток на единицу площади (при равномерном освещении изотропной радиацией)

$$S^{\min} = \frac{w_{31}^{\min} \cdot c}{4 \cdot n} = \frac{A_{21} \cdot h \cdot \nu_{31}}{4 \cdot \sigma_{13}}. \quad (29)$$

В формулы (27) и (28) еще должна быть внесена поправка, учитывающая то, что уровень 2E состоит из двух компонент 2A и 2E (см. рис. 3). Это увеличивает значение коэффициента A_{21} на множитель $1 + \exp\left(\frac{h \cdot \nu_{AE}}{kT}\right) = 1,865$,

где $\nu_{AE} = 29 \text{ c}^{-1}$, $\nu_{31} = 5,4 \cdot 10^{14} \text{ c}^{-1}$; $\sigma_{13} = 10^{-19} \text{ см}^2$; поток энергии на единицу площади $S^{\min} = 550 \text{ Вт/см}^2$; т.о., подводимая в единицу времени энергия должна быть порядка килоджоуля.

Подставляя данные, необходимые для расчета по (1): число ионов хрома в единице объема рубина $N = 1,62 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $L = 1,9 \text{ см}$, при $\lambda_{21} = 6943 \text{ \AA}$ и $A_{32} \ll d_{32} = \frac{1}{5 \cdot 10^{-8}} \text{ с}$, получим следующие значения энергии $W_{\text{пред}}^{\text{генер}} = 3,1 \cdot 10^8 \text{ Дж/см}^2 \cdot \text{с}$.

Если теперь учесть, что сечение имеет характер импульса длительностью порядка 300 мкс, то излучаемая энергия составит около 100 Дж/см²·с. Разумеется, фактическая выходная энергия значительно меньше предельной энергии.

Задача 12.

Определить КПД и пороговое напряжение рубинового лазера, размеры которого заданы в следующем виде: $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}$, $\omega_{31} = 2 \cdot \pi \cdot 0,5 \cdot 10^{14} \text{ c}^{-1}$; $\omega_{21} = 2 \cdot \pi \cdot 4,33 \cdot 10^{14} \text{ c}^{-1}$; $\ell = 80 \text{ мм}$, диаметр кристалла 6,5 мм; $N_0 = 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$; $\tau = 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$; $n = 1,76$; $\eta = 0,7$; $\Delta\omega_{\text{л}} = 2 \cdot \pi \cdot 300 \cdot 10^9 \text{ c}^{-1}$; $r_1 \cdot r_2 = 0,9$; $G = 0,25$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$; $\eta_{\text{н}} = 50\%$; $\eta_{\text{л}} = 40\%$; $\eta_0 = 40\%$, $c_1 = 300 \text{ мкФ}$, если при $U_0 = 1,4 \text{ кВ}$ излучаемая энергия равна $P_{\text{изл}}$.

$$S = \pi \cdot R = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (6,5)^2 \cdot 10^{-4}}{4} = 33,16 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2.$$

Решение. Для рубинового лазера порог генерации может быть определен формулой

$$P = \frac{1}{2} \cdot h \cdot \omega_{31} \cdot \ell \cdot S \cdot \left[\frac{N_0}{\eta \cdot \tau} + \frac{n^2 \cdot \omega_{31}^3 \cdot \Delta \omega_{\text{л}} \cdot \left(\sigma + \ln \frac{1}{r} \right)}{4 \cdot \pi \cdot c^2 \cdot \ell \cdot \eta} \right], \quad (30)$$

где N_0 – общее число активных частиц в единице объема вещества; ω_{31} – частота излучения накачки; η – квантовый выход излучения накачки ($\eta = 0,7$); ℓ – длина рубинового стержня, S – площадь поперечного сечения ($S = \pi \cdot d^2$); σ – поперечное сечение; τ – время жизни метастабильного уровня;

Уравнение (30) для рубинового генератора может быть сокращено до первого слагаемого в скобках, т.е. его можно переписать в виде

$$P_{\text{пор}} = \frac{1}{2} \cdot h \cdot \omega_{31} \cdot \ell \cdot S \cdot \frac{N_0}{\eta \cdot \tau}. \quad (31)$$

Подставляя численные данные в (31), получим значение $P_{\text{пор}}$:

$$P_{\text{пор}} = \frac{1}{2} \cdot 1,054 \cdot 10^{-34} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 10^{14} \cdot 8 \cdot 33,16 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{2 \cdot 10^{19}}{0,7 \cdot 5 \cdot 10^{-3}} = 3260 \text{ Вт.}$$

Не вся световая энергия накачки концентрируется осветителем в объеме активного элемента, что можно учесть коэффициентом эффективности осветителя (в нашем случае $\eta_0 = 40\%$). Не вся световая энергия, подводимая к лампе накачки, преобразуется в световую, т.е. эффективность лампы $\eta_{\text{л}} = 40\%$. Энергия накачки, реально используемая, определяется коэффициентом $\eta_{\text{н}} = 50\%$. С учетом этих ограничений формула (31) переписывается так

$$P'_{\text{пор}} = \frac{P_{\text{пор}}}{\eta_{\text{л}} \cdot \eta_0 \cdot \eta_{\text{н}}}. \quad (32)$$

Энергия, соответственно, также определится из следующего выражения:

$$W'_{\text{пор}} = \frac{W_{\text{пор}}}{\eta_{\text{л}} \cdot \eta_0 \cdot \eta_{\text{н}}}. \quad (33)$$

Просчитывая по формулам (32) и (33), получим

$$P'_{\text{пор}} = \frac{32,6}{0,5 \cdot 0,4 \cdot 9,4} = 407625 \text{ Вт и } W'_{\text{пор}} = 407625 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 204 \text{ Вт} \cdot \text{с.}$$

Энергия накачки определяется формулой

$$W_{\text{нак}} = \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot U_{\text{нак}}^2 \quad \text{откуда} \quad U_{\text{нак}} = \sqrt{\frac{2W_{\text{нак}}}{C_1}}. \quad (34)$$

Следовательно, пороговое напряжение равно

$$U_{\text{нак}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 204}{3 \cdot 10^{-4}}} = 1166 \text{ В.}$$

Ответ: $U_{\text{нак}} = 1,16 \text{ кВ.}$

Задача 13.

Определить время развития импульса генерации в рубиновом лазере при следующих параметрах:

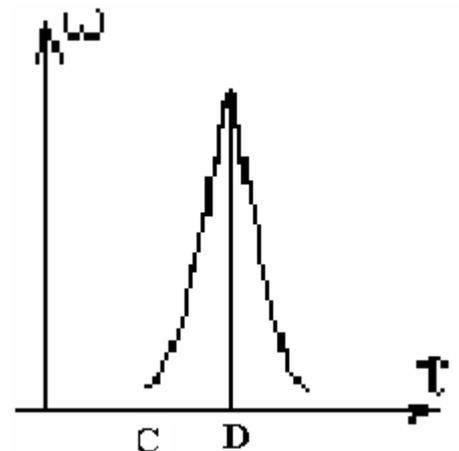


Рис. 4

$$\chi_0 = 0,4 \text{ см}^{-1}, \alpha = 2, l = 10 \text{ см}, n = 1,7.$$

Решение. Рассмотрим технику получения гигантских импульсов.

Для реализации режима модуляции добротности необходимо ввести в резонатор быстродействующий затвор. Интервал времени открытия затвора не должен превышать постоянной времени развития гигантского импульса, отрезок CD (см. рис. 4). На рисунке изображена временная зависимость плотности энергии (w) в режиме гигантских импульсов. Оценка постоянной времени развития гигантского импульса проводится по следующей формуле

$$\tau = \frac{n \cdot L}{c(\chi_0 l - \alpha)},$$

где L – длина резонатора ($L=1\text{м}$), c – скорость света в вакууме, l – длина активного элемента, n – показатель преломления активного материала, χ_0 – ненасыщенный показатель усиления, α – коэффициент потерь за проход.

Задача 14.

Лазер на двойной гетероструктуре (ДГС) GaAs/GaAlAs имеет длину резонатора $L=300$ мкм, коэффициент потерь $\alpha_a = 10 \text{ см}^{-1}$ и коэффициент отражения граней 0,33. Рассчитать, насколько снизится пороговый коэффициент усиления в результате увеличения коэффициента отражения на одном торце (решать в см).

Решение: Используя соотношение

$$x_a = \alpha_a + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{\sqrt{r_1 r_2}} \right),$$

определяющее коэффициент усиления вещества: где r_2 – коэффициент отражения выходного зеркала примем равным 0,55; r_1 – коэффициент отражения глухого зеркала равен $r_1 = r/r_2 = 0,6$. Подставляя в него все параметры, получим:

$$x_a = 10 + \frac{1}{3 \cdot 10^{-2}} \ln \left(\frac{1}{\sqrt{0,33}} \right) = 10 + \frac{0,56}{3 \cdot 10^{-2}} = 10 + 18 = 28 \text{ см}^{-1}.$$

Если сделаем $r_1=1$, тогда полное значение коэффициента отражения будет равно $r = 0,55$ и

$$x'_a = 10 + \frac{1}{3 \cdot 10^{-2}} \ln \left(\frac{1}{\sqrt{0,55}} \right) = 10 + \frac{0,3}{3 \cdot 10^{-2}} = 10 + 10 = 20 \text{ см}^{-1}.$$

При увеличении коэффициента отражения отношение коэффициентов усиления равно $\frac{x_a}{x'_a} = \frac{28}{20} = 1,4$.

Ответ: Коэффициент усиления уменьшился в 1,4 раза.

4.2.6. Расчет параметров приемников излучения.

Задача 15

На сурьмяно-цезиевый фотоэлемент с интегральной чувствительностью $K=100$ мкА/лм падает световой поток Φ , равный 0,15 лм. Последовательно с фотоэлементом включен резистор сопротивлением $R=400$ кОм, с которого сигнал снимается на усилитель управляющим реле с током срабатывания 10 мА при напряжении 220 В. Определить необходимые коэффициенты усиления по мощности и по напряжению, если входной нагрузкой усилителя является сопротивление R и темновой ток фотоэлемента равен нулю.

Решение. Определяем ток фотоэлемента:

$$I_{\Phi} = K_{\Phi} \Phi = 100 \cdot 0,15 = 15 \text{ мкА.} \quad (35)$$

Входная мощность усилителя:

$$P_{\text{вх}} = I^2 R = (15 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 4 \cdot 10^5 = 225 \cdot 10^{-12} \cdot 4 \cdot 10^5 = 9 \cdot 10^{-5} \text{ Вт.} \quad (36)$$

Мощность срабатывания реле:

$$P_p = 220 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 2,2 \text{ Вт.}$$

Коэффициент усиления по мощности:

$$K_p = P_p / P_{\text{вх}} = 2,2 / 9 \cdot 10^{-5} = 2,44 \cdot 10^4. \quad (37)$$

Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = U_p / U_R = U_p / (I_{\Phi} R) = 220 / (15 \cdot 10^{-6} \cdot 400 \cdot 10^3) = 36,7. \quad (38)$$

Задача 16

Свет падает на поверхность натрия, работа выхода которого равна 2,11 эВ. Найдите максимальные скорости всех фотоэлектронов, если длина волны падающего света принимает указанные выше значения.

Решение.

$$E = h \cdot \nu = hc / \lambda = 1,24 / \lambda.$$

$$\text{а) } 1,24 / 0,33 = 3,76 \text{ эВ;}$$

$$\text{б) } 1,24 / 0,589 = 2,11 \text{ эВ; } 1,24 / 0,25 = 4,96 \text{ эВ;}$$

$$\text{в) } 1,24 / 0,644 = 1,93 \text{ эВ.}$$

Скорости фотоэлектронов, обладающих наибольшей энергией, определяются из уравнения Эйнштейна.

$$(1/2)m \cdot v_{\text{max}}^2 = h\nu - \phi,$$

где ϕ – фотоэлектрическая работа выхода данного материала, а $h\nu$ – энергия падающего излучения.

а). В УФ электроны эмигрируют с максимальными скоростями.

для $\lambda = 0,33$ мкм

$$v_{\text{max}} = \sqrt{2(h\nu - \phi)m} = \sqrt{2(3,76 - 2,11) \cdot 1,6^{-19} / 9,11 \cdot 10^{-31}} = 0,76 \cdot 10^6 \text{ м/с;}$$

для $\lambda = 0,25$ мкм $v_{\text{max}} = 1,0 \cdot 10^6 \text{ м/с.}$

б). На длине λ желтого света энергии равны (хотя электроны имеют достаточную энергию выхода для преодоления потенциального барьера, но они остаются на поверхности).

в). При освещении красным светом электроны испускаться не будут.

Задача 17

Уравнение фотоэффекта Эйнштейна. Фотоэлектрическая работа выхода для калия равна 2,0 эВ. На поверхность калия падает свет $\lambda=0,35$ мкм.

Определить:

а) Запирающий потенциал V_s .

б) Кинетическую энергию E_k самых быстрых электронов.

в) Скорости этих электронов.

г) Вычислить, насколько изменится запирающий потенциал, если длина волны уменьшится до 348 Нм.

Решение: Энергия фотона

$$E = hc/\lambda \text{ эВ.} \quad (39)$$

$$E = 1,24/0,35 = 3,54 \text{ эВ.}$$

Энергия эмиттирования электрона (E_e) представляет собой разность между энергией падающего излучения и работой выхода материала ϕ , т.е.

$$E_e = E_{\text{изл}} - \phi = 3,54 - 2 = 1,54 \text{ эВ.}$$

а) запирающий потенциал будет $V_s = 1,54$ эВ;

б) E_k наиболее быстрых электронов также равна 1,54 эВ;

в) скорость наиболее быстрых электронов определяется

$$\frac{1}{2}mv^2 = 2,46 \cdot 10^{-19} \text{ Дж,}$$

где $v_{\text{макс}} = 0,74 \cdot 10^6$ м/с.

Уравнение Эйнштейна

$$h\nu - \phi \text{ или } e \cdot V_s = (hc/\lambda) - \phi. \quad (40)$$

Предполагая, что λ мало, запишем в дифференциальной форме:

$$\delta V_s = hc/\lambda^2 - \delta\lambda/\lambda^2.$$

Поскольку $\delta\lambda = 348 - 350$ Нм, а $\lambda = 350$ Нм, получаем, что запирающий потенциал уменьшается на величину $\delta V_s = 20,4$ мВ.

4.2.7. Расчет параметров модуляторов и deflectоров

Большинство модуляторов работают по схеме с сосредоточенными параметрами. На частотах ниже 100 – 200 МГц модуляцию света можно осуществлять, используя электрооптические кристаллы, помещенные в зазоре конденсатора, включенного в контур с сосредоточенными элементами.

Задача 18.

Расчитать мощность, необходимую для работы модулятора на продольном эффекте. Расчет провести для кристалла LiNbO_3 , изготовленного в виде прямоугольного стержня (рис. 5.), где 1-

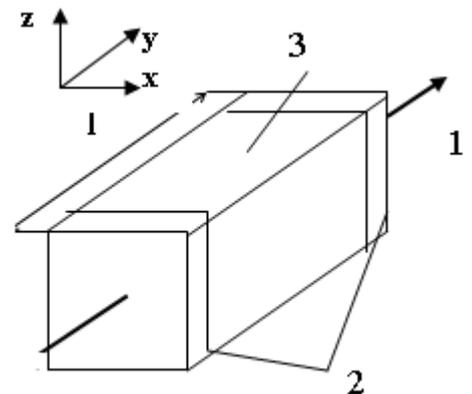


Рис. 5

оптическое излучение, 2-электроды, 3- электрооптический кристалл. Возбуждение конденсаторное. Длина волны оптического излучения $\lambda=0,63\text{мкм}$; частота модулирующего сигнала $f=2\cdot 10^9$ Гц, $l=2$ см, $h=4$ мм, $m=80\%$, $V_0=2,9\cdot 10^3$ В.

Решение: Мощность, необходимая для создания на кристалле напряжения V , равна

$$P = \frac{V^2}{2}(G + G_p) = \frac{V^2}{4}(C + C_p)\Delta\omega. \quad (41)$$

Таким образом, мощность P пропорциональна полосе модуляции, полной емкости модулирующего контура и квадрату напряжения.

В случае использования продольного электрооптического эффекта модулирующее напряжение, соответствующее заданной глубине модуляции m , не зависит от размеров кристалла и определяется только длиной волны света, показателем преломления n и электрооптической константой r . При этом уменьшение модулирующей мощности может быть достигнуто за счет уменьшения потерь контура и кристалла. Для пропускания сквозь кристалл пучка света, определенного диаметра, необходимо, чтобы поперечные размеры кристалла были больше диаметра пучка. Емкость кристалла длиной l (вдоль направления света) с квадратным поперечным сечением h^2 равна

$$C = \varepsilon h^2 / 4\pi l, \quad (42)$$

а утечка
$$G = \varepsilon h^2 \omega \operatorname{tg} \delta / 4\pi l. \quad (43)$$

Если паразитная утечка контура мала по сравнению с утечкой кристалла G , то модулирующая мощность пропорциональна величине h^2/l :

$$P = \frac{\lambda^2 (\arcsin m)^2}{32\pi^3} \frac{\varepsilon \operatorname{tg} \delta}{n^6 r^2} \frac{h^2}{l} \omega. \quad (44)$$

Для получения мощности подставляем в (47) заданные значения и необходимые параметры из табл. 1

Материал	$r_{ij} \cdot 10^{-14}$, см / в	Показатель прелом-я	λ , мкм	V_0 , кВ	$\varepsilon / \varepsilon_0$	$\operatorname{tg} \delta \cdot 10^4$
КДР	$r_{63}=10,6$; $r_{41}=8,6$	$n_0=1,51$ $n_H=1,47$	1,34	0,8	$\varepsilon_{\perp z}=443$ $\varepsilon_{\parallel z}=205$	5
АДР	$r_{63}=25$; $r_{41}=62$	$n_0=1,52$ $n_H=1,48$	1,7	10	$\varepsilon_{\perp z}=559$ $\varepsilon_{\parallel z}=147$	55,9
GaAs	$r_{41}=1,7$	$n_0=3,6$	0,9	11,5	32	-

LiNbO ₃	r ₃₃ =30,9; r ₁₃ =9,6 r ₂₂ =7	n ₀ =2,28 n _H =2,2	0,546 0,63	9	ε _{Lz} =32 ε _z =28	-
--------------------	--	---	---------------	---	---	---

$$P = \frac{\lambda^2 (\arcsin m)^2 \varepsilon \operatorname{tg} \delta h^2}{32\pi^3 n^6 r^2 l} \omega =$$

$$\frac{0,63 \cdot 10^{-6} (\arcsin 0,8)^2}{32 \cdot 3,14^3} \cdot \frac{28 \cdot \operatorname{tg} \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{2,2^6 \cdot (37 \cdot 10^{-12})^2} \cdot \frac{(4 \cdot 10^{-3})^2}{1} \omega = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ Вт.}$$

Задача 19

Оцените порядок величины угла θ , в случае дифракции света длиной волны $\lambda=0,5$ мкм на звуковой волне частотой 500МГц, если угловая ширина полосы пропускания определяется выражением

$$\Delta\omega \equiv \frac{2\pi\vartheta}{\Lambda} = \Omega. \quad (45)$$

Решение. Выбирая из табл. 2 скорость звука, равную $\vartheta=1,5 \cdot 10^3$ м/с и используя (45), определяем ширину оптической частоты $\Delta\omega$. Связь между $\Delta\omega$ и θ осуществляется через ϑ_{Π} – проекцию скорости объекта на направление распространения волн ($\vartheta_{\Pi}=\vartheta\sin\theta$)

$$\Delta\omega = 2\omega \frac{\vartheta_{\Pi}}{c/n}. \quad (46)$$

Следовательно,
$$\Delta\omega = 2\omega \frac{\vartheta \sin \theta}{c/n}. \quad (47)$$

Таблица 2 – Свойства некоторых материалов, используемых обычно для получения дифракции света на звуке

Материал	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	ϑ , км/с	n	p	M	M _w
вода	1,0	1,5	1,33	0,31	160	1/0
плавленый кварц (SiO ₂)	6,3	3,1	1,92	0,25	1,51	0,12
ниобат лития (LiNbO ₃)	4,7	7,4	2,25	0,150	6,99	0,012
сапфир (Al ₂ O ₃)	4,0	11,00	1,76	0,17	0,34	0,001
PbMoO ₄	6,95	3,75	2,30	0,28	73	0,22

ρ – плотность, ϑ – скорость звука, n – показатель преломления, p –

эффективный коэффициент фотоуругости, M_W – относительная эффективность дифракции.

Из условия брегговской дифракции (см. рис. 6) определяем длину звуковой волны $\Lambda = 3 \cdot 10^{-6}$ м и, подставляя в (46), определяем θ .

$$2\Lambda \sin \theta = \frac{\lambda}{n}, \quad (48)$$

Ответ: $\theta = 6 \cdot 10^{-2}$ рад = $3,6^\circ$.

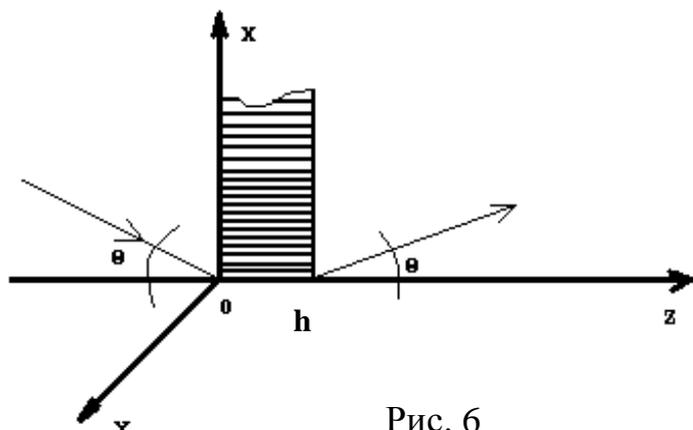


Рис. 6

Задача 20

Электрооптический дефлектор

предназначен для сканирования сходящегося светового пучка со следующими параметрами: $D_{вх} = 1$ см, $\lambda = 0,63$ см, $\xi = 1,2$. Ширина дефлектора $b = 1$ см, фокусное расстояние оптической системы $F = (4/3)L$. Показатель преломления материала дефлектора $n = 1,5$, максимальное изменение показателя преломления $\Delta n = 2 \cdot 10^{-4}$. Определить максимальную длину пути луча в дефлекторе L_{\max} , расстояние от дефлектора до точки фокусирования L' , фокусное расстояние F , максимальный угол отклонения луча $\Delta \alpha_{\max}$, угловую расходимость γ , диаметр сфокусированного пятна, разрешающую способность дефлектора N , линейный диапазон перемещения пятна в фокальной плоскости, диаметр пучка на выходе, линейный диапазон перемещения пятна в фокальной плоскости l .

Решение. 1. Находим коэффициент, характеризующий приращение угла отклонения на единицу длины пути луча в активной среде:

$$k_L = \frac{4\Delta n}{2nD_{вх}} = \frac{4 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 1,5 \cdot 1 \cdot 10^{-2}} = 2,67 \cdot 10^{-2} \frac{\text{рад}}{\text{м}}.$$

2. Находим максимальную длину пути луча в дефлекторе:

$$L_{\max} = \left(\frac{3b}{4k_L} \right)^{1/2} = \left(\frac{3 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 2,67 \cdot 10^{-2}} \right)^{1/2} = 0,53 \text{ м}.$$

3. Находим фокусное расстояние:

$$F = \frac{4}{3} L_{\max} = \frac{4}{3} \cdot 0,53 = 0,706 \text{ м}.$$

4. Находим расстояние от дефлектора до точки фокусирования L' :

$$L' = F - L_{\max} = 0,706 - 0,53 = 0,176 \text{ м}.$$

5. Определяем максимальный угол отклонения луча:

$$\begin{aligned} \Delta \alpha_{\max} &= 2 \left[\frac{bk_L L_{\max}}{F} \right]^{1/2} = 2 \left(\frac{1 \cdot 10^{-2} \cdot 2,67 \cdot 10^{-2} \cdot 0,53}{0,706} \right)^{1/2} = \\ &= 2,82 \cdot 10^{-2} \text{ рад} = 1^{\circ} 37'. \end{aligned}$$

6. Определяем угловую расходимость γ :

$$\gamma = \xi \left(\frac{\lambda}{nD} \right) = \frac{1,2 \cdot 6,63 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 10^{-2}} = 0,755 \cdot 10^{-4} \text{ рад.}$$

7. Находим диаметр сфокусированного пятна:

$$D_n = \gamma F = 0,755 \cdot 10^{-4} \cdot 0,706 = 0,534 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 53,4 \text{ мкм.}$$

8. Определяем разрешающую способность:

$$N = \frac{k_L D_{\text{ex}} L}{\xi \lambda} \left[1 - \frac{L}{2F} \right]^{1/2} = \frac{1 \cdot 10^{-2} \cdot 2,67 \cdot 10^{-2} \cdot 0,53}{1,2 \cdot 0,63 \cdot 10^{-6}} * \left(1 - \frac{0,53}{2 \cdot 0,706} \right) = 117 \text{ эл.}$$

9. Находим линейный диапазон перемещения пятна в фокальной плоскости l :

$$l = D_n N = 53,4 \cdot 10^{-6} \cdot 117 = 62,3 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 6,23 \text{ мм.}$$

4.2.8. Расчет характеристик оптического волокна

В этом разделе в основном используются задачи из [23]

Задача 21.

Найти расстояние, на котором оптическая мощность пучка P уменьшится в 10 раз при распространении в волокнах, имеющих следующие коэффициенты потерь: а) 2000 дБ/км, б) 20 дБ/км, в) 0,2 дБ/км.

Решение:

Пересчитаем заданное затухание (в разгах) в децибелы. $P_0/P = 10 \text{ раз}$

$$\alpha_3 = 10 \lg \frac{P_0}{P} = 10 \lg 10 = 10 \text{ дБ.}$$

Найдем расстояние l , при котором мощность сигнала уменьшится на 10 дБ в волокнах с разными коэффициентами потерь.

$$\text{а) } l = \frac{\alpha_3 (\text{дБ})}{\alpha_1 (\text{дБ/км})} = \frac{10}{2000} = 5 \cdot 10^{-3} (\text{км}) = 5 \text{ м};$$

$$\text{б) } l = \frac{\alpha_3 (\text{дБ})}{\alpha_2 (\text{дБ/км})} = \frac{10}{20} = 500 \text{ м};$$

$$\text{в) } l = \frac{\alpha_3 (\text{дБ})}{\alpha_3 (\text{дБ/км})} = \frac{10}{0,2} = 50 \text{ км.}$$

Задача 22.

Ослабление оптической мощности $P(x)$ при прохождении расстояния x можно выразить через коэффициенты поглощения α с помощью формулы

$P(x) = P_0 \exp(-\alpha x)$. Найти соотношение между a , выраженному в $[M^{-1}]$, и коэффициентом поглощения α , выраженным в $[дБ/км]$. Исходя из этого, вычислить значения для трех типов стекол, имеющих следующие коэффициенты потерь: а) 2000 дБ/км, б) 20 дБ/км, в) 0,2 дБ/км.

Решение:

$$P(x) = P_0 e^{-\alpha x}, \quad x = 1 \text{ м}, \quad a = \frac{P_0}{P(x)} - \text{затухание.}$$

Зная что $\alpha = 10 \lg \frac{P_0}{P}$, найдем соотношение между a и α :

$$\frac{P(x)}{P_0} = \frac{1}{\alpha^1} = e^{-\alpha x} \Rightarrow a = -\ln(\alpha^1)^{-1}, \text{ при чем } \alpha^1 \text{ измеряется в размах на метр.}$$

$$\alpha^1 = (10)^{\frac{\alpha}{10}}, \quad a = \ln(10^{\frac{\alpha}{10}}), \quad \alpha_1 = \frac{2000}{1000} = 2 (\text{дБ}/\text{м}), \quad \alpha_2 = \frac{20}{1000} = 2 \cdot 10^{-2} (\text{дБ}/\text{м}),$$

$$\alpha_3 = 2 \cdot 10^{-4} (\text{дБ}/\text{м}); \quad a_1 = \ln 10^{\frac{\alpha_1}{10}} = \ln 10^{\frac{2}{10}} = 0,46 (M^{-1});$$

$$a_2 = \ln 10^{\frac{\alpha_2}{10}} = \ln 10^{\frac{2 \cdot 10^{-2}}{10}} = 4,6 \cdot 10^{-3} (M^{-1});$$

$$a_3 = \ln 10^{\frac{\alpha_3}{10}} = \ln 10^{\frac{2 \cdot 10^{-4}}{10}} = 4,6 \cdot 10^{-5} (M^{-1}).$$

Задача 23.

Определить толщину волноводного слоя планарного волновода, имеющего числовую апертуру $NA = 0,154$, нормированную частоту $V = 20$, а длина волны распространяющегося в нем света $\lambda = 0,85 \mu\text{м}$.

Решение: Из формулы $V = \pi d \cdot \frac{NA}{\lambda}$ необходимо выразить параметр d

$$d = \frac{V \cdot \lambda}{\pi \cdot NA} = \frac{20 \cdot 0,85 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 0,154} = 35 \mu\text{м}.$$

Задача 24.

Рассчитать лучевую дисперсию и пространственное уширение импульса для ПВ с параметрами: $n_2 = 1,58$, $\Delta = 0,003$, $z = 1 \text{ м}$.

Решение:

$$n_1 = \frac{n_2}{1 - \Delta} = \frac{1,58}{1 - 0,003} \approx 1,58,$$

лучевую дисперсию рассчитаем по формуле

$$\tau_d = t_{\max} - t_{\min} = \frac{z}{c} n_1 \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) = \frac{z}{c} n_1 \left\{ \sqrt{\frac{1}{1 - 2\Delta}} - 1 \right\};$$

$$\tau_d = \frac{1}{3 \cdot 10^8} \cdot 1,58 \left(\sqrt{\frac{1}{1 - 2 \cdot 0,003}} - 1 \right) = 1,59 \cdot 10^{-11} \text{ с} = 15,9 \text{ пс}.$$

Пространственное уширение импульса за время 1нс рассчитаем по

формуле $z_d = \frac{c \cdot t}{n_1} \left(1 - \frac{n_2}{n_1} \right) \approx \frac{c \cdot t}{n_1} \Delta \approx \frac{c \cdot t}{n_1} \frac{\theta_C^2}{2}$ (1.4) из [23]:

$$Z_\partial = \frac{c \cdot t}{n_1} \Delta = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-9}}{1,58} \cdot 0,003 \approx 570 \text{ мкм.}$$

Задача 25

Определить толщину волноводного слоя планарного волновода, имеющего числовую апертуру $NA = 0,154$, нормированную частоту $V = 20$, а длина волны распространяющегося в нем света $\lambda = 0,85 \text{ мкм}$.

Решение: Из формулы [23] $V = \pi d \cdot NA / \lambda$ необходимо выразить параметр d

$$d = \frac{V \cdot \lambda}{\pi \cdot NA} = \frac{20 \cdot 0,85 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 0,154} = 35 \text{ мкм.}$$

Задача 26.

Ступенчатый волоконный световод имеет диаметр сердцевины 200 мкм и числовую апертуру $NA = 0,44$. Определить число направляемых мод при $\lambda = 850 \text{ нм}$.

Решение:

$$N = \frac{2\pi^2 r^2 NA^2}{\lambda^2},$$

где r – радиус, $r = \frac{200 \text{ мкм}}{2} = 100 \text{ мкм}$

$$N = \frac{2 \cdot 3,14^2 \cdot 100^2 \cdot 0,44^2 \cdot 10^{-12}}{850^2 \cdot 10^{-18}} = 22953.$$

Задача 27.

Определить возможность работы ОВ в одномодовом режиме на длине волны $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$, имеющего числовую апертуру $NA = 0,145$ и диаметр сердцевины $d = 9 \text{ мкм}$.

Решение:

$$V = \frac{\pi \cdot d}{\lambda} NA = \frac{3,14 \cdot 9 [\text{мкм}]}{1,55 [\text{мкм}]} \cdot 0,145 = 2,64 > 2,405.$$

При заданном диаметре сердцевины режим работы ОВ будет многомодовым.

Задача 28

Многомодовое ОВ (рек G.651 МСЭ-Т), с числовой апертурой $NA = 0,3$, имеет диаметр сердцевины $d = 50 \text{ мкм}$ и ПП $n_1 = 1,47$. Рассчитать потери на макроизгибах при $R_{изг} = 5 \text{ см}$.

Решение:

$$\alpha_{МАКР} = -10 \lg \left| 1 - \frac{d \cdot n_1^2}{R_{изг} (NA)^2} \right| = -10 \lg \left| 1 - \frac{50 \cdot 10^{-6} \cdot 1,47^2}{5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,3^2} \right| \approx 0,11 \text{ дБ/км.}$$

Задача 29

Одномодовое ОВ (рек G.652 МСЭ-Т) имеет следующие параметры $n_1 = 1,46$; $NA = 0,12$; $d = 8 \text{ мкм}$, $D = 125 \text{ мкм}$. Рассчитать потери на микроизгибах, если высота микроизгибов $h = 0,2 \text{ мкм}$, а их число на 1 км $N = 1$.

Решение:

Потери на микроизгибах:

$$\alpha_{МИКР} = N \cdot \frac{32h^2 \cdot d^4 \cdot n_1^2}{D^6 \cdot NA^6} = 1 \cdot \frac{32 \cdot 0,2^2 \cdot 8^4 \cdot 1,46^2}{125^6 \cdot 0,12^6} = 9,8 \cdot 10^{-4} \text{ дБ/км.}$$

Задача 30

Рассмотрим ОВ со ступенчатым ППП, $n_1 = 1,475$; $n_2 = 1,460$; $\rho = 25 \text{ мкм}$. Каково значение критического угла скольжения θ_c , при котором лучи являются направляемыми. Определите число отражений такого луча на однокilометровом участке ОВ.

Решение

$$\theta_c = \arccos \left(\frac{n_2}{n_1} \right) = \arccos \left(\frac{1,46}{1,475} \right) = 8,2^\circ.$$

Число отражений для луча, распространяющегося под углом $\theta = \theta_c$ в ОВ длиной L определим по следующей формуле:

$$N = \frac{tg \theta_c}{2\rho} = \frac{tg 8,2}{2 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^3 = 1,44 \cdot 10^6,$$

таким образом, около $1,44 \cdot 10^6$ отражений происходит в ОВ длиной 1 км.

5. Контрольные работы

Ниже приводятся темы и вопросы контрольных работ: Цель контрольных работ: закрепление, проверка знаний по основным разделам лекционного курса в течение семестра для студентов дневной формы обучения

5.1. Контрольная работа 1

Тема: Взаимодействие излучения с веществом. Спонтанные и индуцированные переходы. Энергетические состояния квантовых систем. Мощность излучения квантовых генераторов.

1. Квантовые системы со свободными и связанными движениями частиц. Энергия свободной и связанной частицы.
2. Спонтанные и индуцированные переходы.
3. Энергетические уровни и зонная теория
4. Какие методы используются для создания инверсии населенностей уровней в

квантовых системах?

5. Соотношения между коэффициентами Эйнштейна
6. Причины уширения спектральных линий
7. В чем состоит взаимодействие оптического излучения и вещества ?
8. Что характеризует монохроматичность, когерентность, поляризованность лазерного излучения?
9. При каких условиях вещество способно усиливать электромагнитное излучение?
10. Доплеровское уширение
11. Уширение из-за столкновений
12. Возможность усиления и генерации в квантовых системах
13. Оптическая накачка лазерных активных сред. Спектры поглощения и структуры энергетических уровней
14. Какими свойствами обладают спонтанные и индуцированные излучения?
15. Учет неоптических переходов и нелинейных эффектов.
16. Что понимается под отрицательной температурой вещества?
17. Как возникают колебания в ОКГ, и какие условия необходимы для существования стационарных колебаний?
18. Энергетические характеристики лазеров и лазерного излучения.
19. Почему в ОКГ возможно существование колебаний с различными частотами?
20. Поперечные структуры лазерного излучения.
21. Как изменяется спектр частот колебаний при уменьшении длины резонатора ОКГ?
22. Если инверсная населенность в среде равна 2, то чему равна отрицательная температура при длине волны 1 мкм, излучаемой в среде.
23. Характеристики излучения ОКГ. Монохроматичность, когерентность, направленность лазерного излучения
24. Чему равна ширина естественной спектральной линии вещества, если время жизни по спонтанным переходам равно $5 \cdot 10^{-7}$ с и рабочая длина волны 0,63 мкм?
25. Населенность верхнего и нижнего уровней равна соответственно $1 \cdot 10^{10}$ и $0,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Кратность вырождения верхнего уровня 2, нижний уровень не вырожден. Возможно ли в рассматриваемой системе усиление? Поглощение?
26. Каково соотношение между населенностями энергетических уровней двухуровневой системы при эффекте насыщения.
27. Используя принцип детального равновесия, найти соотношения между спонтанными и индуцированными переходами.
28. Чему равна ширина естественной спектральной линии вещества, если время жизни по спонтанным переходам равно $5 \cdot 10^{-7}$ с и рабочая длина волны 0,7 мкм?
29. Если коэффициент усиления в активной среде равен $3 \cdot 10^{-1} \text{ см}^{-1}$, то чему равна мощность сигнала в процессе прохождения через активное вещество при мощности на входе в активное вещество $P(0, v_0) = 1 \text{ мВт}$?
30. Система энергетических уровней атома образует электронные уровни. Определить рабочий частотный диапазон переходов для электронных уровней.

(Справка: $1\text{эВ} = 1.6 \times 10^{-19}$ Дж).

31. Если газ состоит из молекул, то следует рассматривать поступательное движение атомов внутри молекулы. Определить рабочий частотный диапазон переходов для колебательных энергетических уровней. (Справка: $1\text{эВ} = 1.6 \times 10^{-19}$ Дж).

32. Определить число степеней свободы в молекуле (NH_3) аммиака и углекислого (CO_2) газа.

32. Между колебательными уровнями находятся вращательные уровни. Определить рабочий частотный диапазон переходов для вращательных энергетических уровней. (Справка: $1\text{эВ} = 1.6 \times 10^{-19}$ Дж).

33. Какие методы используются для создания инверсии населенностей уровней в квантовых системах?

34. При каких условиях вещество способно усиливать электромагнитное излучение?

35. Какими свойствами обладают спонтанные и индуцированные излучения?

36. Что понимается под отрицательной температурой вещества?

37. Как возникают колебания в ОКГ, и какие условия необходимы для существования стационарных колебаний?

37. Почему в ОКГ возможно существование колебаний с различными частотами?

38. Определить неопределенность энергии i уровня и ширину естественной линии вещества, имеющего время жизни уровня $7 \cdot 10^{-6}$ с.

39. Как изменяется спектр частот колебаний при уменьшении длины резонатора ОКГ?

40. Определить число степеней свободы в молекуле (NH_3) аммиака и углекислого (CO_2) газа.

41. На двухуровневую квантовую систему воздействуют электромагнитным полем с частотой равной $\omega = \omega_{12}$ и большой амплитудой. Каков результат воздействия поля?

42. Укажите выражение, являющееся результатом взаимодействия двухуровневой квантовой системы с монохроматическим электромагнитным полем.

43. Объясните почему в p-n-гетеропереходах инжекция основных носителей заряда происходит всегда из широкозонного в узкозонный полупроводник?

44. Изобразите энергетическую гетероперехода $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-GaAs}$, иллюстрирующую образование двумерного электронного газа.

45. Изобразите энергетическую гетероперехода p- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-n-GaAs}$. Определите длину рекомбинационного излучения, возникающего при подаче прямого напряжения на гетеропереход.

46. Вычислить ширину полосы частот излучения на уровне 0,5 следующих источников:

а) лазер на GaAlAs, имеющий ширину спектральной линии 3 нм, при средней длине волны излучения 0,82 мкм.

б) p-n лазер, световод которого выполнен на InGaAsP/InP, имеющий ширину

спектральной линии поглощения.

47. Вычислите энергию фотонов для красного излучения ($\lambda=0,7$ мкм). Укажите, какие полупроводники прозрачны для этого излучения, какие поглощают его?
48. Почему излучение лазеров обладает высокой временной и пространственной когерентностью.
49. В чем особенность генераторов оптического диапазона по сравнению с генераторами радиотехнического диапазона?
50. Каково назначение метастабильных уровней в квантовой системе?
51. Что необходимо для возникновения генерации в лазере?
52. Чем обусловлен низкий КПД в атомарных и ионных лазерах, работающих в непрерывном режиме?
53. Какие лазеры широко используются в настоящее время в бытовой радиоэлектронике?
54. В чем причина высоких когерентных свойств лазерного излучения?
55. В каком случае (в ламповом генераторе или лазере) необходима специально сконструированное устройство для осуществления обратной связи?
56. При каких условиях активная среда из поглощающей превращается в усиливающую?
57. Условия самовозбуждения и мощность резонатора.
58. Что является количественной характеристикой степени монохроматичности излучения?
59. Почему яркость лазера, даже небольшой мощности, на несколько порядков превосходит яркость обычных источников.
60. Какие основные факторы, влияющие на мощность, которую отдаёт полупроводниковый лазер на переходе?
61. В чем причина высоких когерентных свойств лазерного излучения?
62. Какие типы излучательных переходов возможны в полупроводниковых генераторах?
63. На 3^x уровне квантовую систему действует электромагнитное поле, частота которого равна частоте перехода $\omega=\omega_{13}$. От каких параметров зависит поглощаемая системой мощность $P_{\text{погл}}$, если амплитуда поля велика?
64. Рубиновый лазер имеет ширину спектральной линии в одномодовом режиме, $\Delta\nu=50$ Гц. Определите расстояние L , на котором излучение когерентно.
65. Какое явление является следствием естественного расширения лазерного пучка по мере движения световых волн в пространстве?
66. Каким приближенным выражением можно определить расходимость дифракционно-ограниченного пучка Θ_d .
66. От каких факторов главным образом зависит ширина спектральных линий излучения?

5.2. Контрольная работа 2

Тема: Лазеры их параметры и характеристики. Параметры и характеристики оптических резонаторов. Параметры и характеристики приемников оптического излучения.

1. Почему в генераторах оптического диапазона нельзя использовать объемные закрытые резонаторы?
2. Основное назначение резонаторов, их типы
3. Собственные колебания оптических резонаторов
4. Как возникает возникновение и продольных и поперечных мод?
5. Потери оптических резонаторов.
6. Условия самовозбуждения и мощность резонатора.
7. Чему равна ширина дифракционного максимума на уровне половинной интенсивности для основной моды резонатора с плоскими зеркалами, диаметром 10 мм?
8. Записать выражение, определяющее минимальный коэффициент отражения выходного зеркала, при значениях ниже которого генерация возбуждаться не будет.
9. Какой добротностью обладает резонатор Фабри Перо с коэффициентом отражения зеркал $r=0,5$ (зеркала одинаковы) и базой $L=50$ см при длине волны света $\lambda=0,6$ мкм?
10. Определите расстояние между двумя соседними продольными модами резонатора Фабри-Перо, если длина резонатора $L=10$ см.
11. Укажите выражение, являющееся результатом взаимодействия двухуровневой квантовой системы с монохроматическим электромагнитным полем.
12. Почему в настоящее время интенсивно разрабатываются полупроводниковые лазеры с двойной гетероструктурой, генерирующее либо при $\lambda=1,3$ мкм, либо при $\lambda=1,6$ мкм?
13. Каким образом можно перестраивать длину волны излучения в полупроводниковых лазерах?
14. Как следует изменить конструкцию полупроводникового лазера, чтобы с меньшими потерями передать излучение в световод?
15. Вычислите межмодовое расстояние для полупроводникового лазера с длиной активного слоя 0,5 мм при показателе преломления $\mu=4$.
16. Измерения поля в дальней зоне изменения анодов из GaAs дают угловую ширину $\Omega \approx 30^\circ$. Определите соответствующую высоту области d , занятой полем излучающей моды, если длина волны излучения $\lambda = 0,84$ мкм.
17. Определите полосу частот излучения лазера, работающего на длине волны $\lambda=1$ мкм. Резонатор образован зеркалами с коэффициентом отражения $r = 0,98$, размер отражающих пластин $D=1$ см, длина резонатора $L=100$ см.
18. Оцените пороговую населенность $\Delta_{\text{пор}}$ метастабильного уровня, при которой начинается генерация в рубине, полагая, что коэффициент отражения выходного зеркала $r = 0,5$, длина активного стержня $L=10$ см, сечение лазерного перехода $\delta_{21}=2,5 \cdot 10^{-20}$ см².
19. Определить добротность резонатора Q полупроводникового лазера, работающего на $\lambda=0,84$ мкм, если время жизни фотона в лазерном диоде составляет $\tau_p=10^{-12}$ с.

20. В каком случае (в ламповом генераторе или лазере) необходима специально сконструированное устройство для осуществления обратной связи?
21. Укажите условие стационарной генерации (α -коэффициент потерь в активной среде, R_1, R_2 -коэффициенты отражения зеркал, L -длина резонатора).
22. Определите ширину спектральной моды резонатора $\Delta\omega_c$ лазера, работающего на длине волны $\lambda=0,63$ мкм, добротность резонатора $Q=10^8$.
22. За счет какого эффекта локализуется поле в резонаторе полупроводникового лазера?
24. Определите длину волны света, излученного СИД, если ширина запрещенной зоны составляет $\Delta E_g=1,42$ эВ.
25. Почему желательно в лазерных диодах использовать короткие резонаторы?
26. Каков физический смысл энергии уровня Ферми в полупроводниковом образце?
27. Каким параметром определяется концентрация собственных носителей в полупроводнике?
28. Для получения излучения с длиной волны $1,55$ мкм какая требуется ширина запрещенной зоны полупроводника?
29. Какая требуется ширина запрещенной зоны полупроводника, для получения излучения с $\lambda=1,3$ мкм?
30. За счет каких переходов в полупроводниковых приборах электроны в зоне проводимости заселяют энергетические уровни, лежащие вблизи дна проводимости.
31. Укажите условия усиления в полупроводниковом лазере на p-n переходе (ΔE_d -энергия заряженного перехода, F_n, F_p -энергия уровней Ферми).
32. Какие качества полупроводниковых лазеров расширяют область применения их в бытовой радиоаппаратуре?
33. В чем основное отличие полупроводниковых лазеров от всех прочих?
34. Какая схема накачки используется в газовом лазере на молекулах CO_2 и аргонном лазере?
35. Какой самый простой метод модуляции излучения полупроводниковых лазеров?
36. Чем ограничивается быстродействие светодиода?
37. Определите угол расходимости лазерного луча Θ при $\lambda=1$ мкм, диаметр передающей антенны $D=0,1$ м.
38. Рассчитать плотность порогового тока $j_{пор}$ лазера работающего на $\lambda=0,84$ мкм, если коэффициент отражения зеркал 30%, длина резонатора 100 мкм, толщина активного слоя $d=10$ мкм, $\tau=10^{-10}$ с.
39. Укажите важное достоинство оптической обработки информации.
40. Какие из перечисленных ниже оптических генераторов работают на основе спонтанного излучения?
41. Какие фотоны играют роль первичных, дающих начало процессу лазерной генерации?
42. Каким должно быть расстояние между зеркалами резонатора Фабри-Перо для обеспечения добротности $Q=10000$ на длине волны света $\lambda=0,5$ мкм, если коэффициент отражения зеркал $r=0,2$?
43. На двухуровневую квантовую систему воздействуют электромагнитным

полем с частотой равной $\omega = \omega_{12}$ и большой амплитудой. Каков результат воздействия поля?

44. Чем ограничена максимальная фото-ЭДС фотодиода, работающего в вентильном режиме

45. Пользуясь характеристиками фотодиода, работающего в вентильном (фотогальваническом) режиме построить график зависимости выходной мощности от значения сопротивления нагрузки. Найти: а) оптимальное сопротивление нагрузки $R_{н.опт}$; б) напряжение холостого хода U_0 .

46. Каков принцип восприятия изображения матричными фотоприемниками, что такое электрический рельеф?

47. Какими параметрами определяется изменение заряда на емкости фотодиода?

48. Нарисуйте и объясните характеристики фотодиода в вентильном режиме для нескольких световых потоков. Укажите на характеристиках режимы холостого хода и короткого замыкания. Приведите схему включения фотодиода, работающего в этом режиме.

49. Нарисуйте и объясните вольт-амперные и световые характеристики фотодиода в фотодиодном режиме. Приведите схему включения фотодиода, работающего в этом режиме.

50. Основные параметры тепловых приемников.

51. Элементы теории тепловых приемников (Термоэлементы, Болومتر).

52. Чем определена вольт-ваттная чувствительность фотоприемника.

53. Чем объяснить, что чем выше чувствительность, тем, обычно, проще усилительный тракт для работы с приемником.

54. Провести сравнительную оценку быстродействующих р-і-п-фотодиодов и лавинных фотодиодов (ЛФД).

55. Что лежит в основе работы быстродействующих р-і-п-фотодиодов и лавинных фотодиодов (ЛФД)?

56. Что является причиной возникновения фото ЭДС?

57. Что представляют собой фотогальванический и фотодиодный режимы

58. Какие процессы в диоде влияют на его быстродействие

59. Что происходит с импульсом фотона с ростом дисперсии времени задержки?

60. Как определяется время диффузии?

61. Чем обусловлены шумы ФПУ?

62. Перечислить основные виды шумов, имеющих место в ФПУ.

62. Какие бывают типы фотоприемников, в чем их различия?

63. Какие основные характеристики ФПУ вы знаете?

64. Чем определяются нижний и верхний пределы характеристики преобразования?

65. Что такое верхняя частота отсечки, как она связана с полосой пропускания, чем определяется?

66. Чем определяется уровень собственных шумов ФПУ?

67. Чем определяется отношение сигнал-шум ФПУ?

68. Что такое порог чувствительности ФПУ, от чего он зависит?

69. Фоточувствительность детекторов. Основные процессы, определяющие токовую чувствительность р-і-п фотодиода.
70. Учет вклада неосновных носителей в токовую чувствительность р-і-п фотодиода.
71. Лавинные фотодиоды, их характеристики и область применения.
72. Быстродействие фотодетекторов
73. Шумы в фотодетекторах и их пороговая фоточувствительность.
74. Принцип действия и пороговые характеристики п/п инжекционных лазеров

5.3. Контрольная работа 3

Тема: Управление лазерным излучением. Параметры и характеристики акустооптических модуляторов и дефлекторов. Характеристики оптического волокна (дисперсия, затухание, числовая апертура)

1. Понятие оптической индикатрисы оптически анизотропной среды.
2. Линейный электрооптический эффект.
3. Фазовый электрооптический модулятор. Основные расчетные соотношения.
4. Суть акустооптического эффекта.
5. Дифракция Рамана-Ната и Брэгга. Основные соотношения.
6. Акустооптический модулятор. Основные расчетные соотношения
7. Изобразить направление оптических лучей в волокне.
8. Что наблюдается при прохождении луча вдоль сердцевины волокна с n_1 при выполнении условия $\sin \alpha = n_1 \sin \varphi_m = n_2 \cos \theta_c$?
9. Волноводные моды на основе лучевой теории. Исследование волноводной моды. Определение критических углов в планарных волноводах. Что определяет критический угол в оптическом волноводе?
10. Затухающие поля в волноводах. Эффективная толщина волноводов. Волновые уравнения для планарных волноводов.
11. Волноводная дисперсия в объемной среде оптического волокна.
12. Какие виды дисперсии наблюдаются в волокне.?
13. Как определяют ширину спектра источника излучения?
14. Как определяется длительность импульса τ в волокне на уровне половинной мощности сигнала?
15. Интегральная оптика. Элементы интегральной оптики и их назначения. Материалы интегрально-оптических элементов.
16. Связь между планарными волноводами. Связь между волноводами и преобразователями мод. Волноводные элементы связи между планарными и линейными волноводами. Призмный ввод в волновод. Эффективность связи.
17. Элементы связи между волноводами и волокнами. Элементы связи между линейными волноводами. Торцевой ввод в волновод. Связь с тонкопленочным волноводом с суживающимся краем. Эффективность связи.

18. Излучательные моды и моды подложек. Волновая теория излучения, как аппарат анализа оптического тракта. Дисперсионные уравнения планарных волноводов и их анализ.
19. Рассчитать показатели преломления для одномодового ($n_{\text{оов}}$) и многомодового волокон ($n_{\text{мов}}$) при $n_2=4$.
20. Определить диаметр одномодового волокна, работающего на длине волны 0,85 мкм, показатель преломления сердцевины $n_1=1,47$, $\Delta n=0,005$.
21. Рассчитать числовую апертуру и критический угол для одномодового и многомодового волокна с ($\Delta_{\text{мов}}$)=0,03, а ($\Delta_{\text{оов}}$)=0,003, при $n_2=3,6$
22. Определить длину волны отсечки $\Delta\lambda$ и $\Delta\nu$ для $\lambda=0,85$ мкм и $\lambda=1,54$ мкм.
23. Влияние дисперсии материала и межмодовой дисперсии.
24. Как записать межмодовую дисперсию градиентных волокон?
25. Межмодовая дисперсия с учетом материальной дисперсии в градиентных волокнах.
26. Среднеквадратичная длительность импульсов
27. Найти расстояние, на котором оптическая мощность пучка уменьшится в 40 раз при распространении в волокнах, имеющих следующие коэффициенты потерь: а) 15000 дБ/км, б) 120 дБ/км, в) 0,8 дБ/км.
28. Вычислить число модовых групп, а также значение M для типичного многомодового ступенчатого волокна при $n_1=1,447$, $n_2=1,44$ $2a=35$ мкм, $\lambda=1,3$ мкм.
29. Среднеквадратичная длительность импульсов.
30. Нормированная частота и число мод.
31. Потери в оптических волокнах.
32. Поглощение в оптическом волокне.
33. Потери на рассеяние. Инфракрасное поглощение. Ультрафиолетовое поглотение.
34. Потери, полученные при соединении волокон: несоосность волокон, осевые сдвиги, расстояние между осями волокон, изгибы.
35. Чему равен коэффициент передачи от влияния микроизгибов и макроизгибов.

6. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ЗАДАНИЯ

Индивидуальное расчетное задание - это форма проверки знаний по отдельным вопросам курса «Квантовая и оптическая электроника», своего рода контрольная работа. В данном разделе мы имеем в виду те работы, которые задаются студентам как домашние.

При написании контрольной работы удобнее всего пользоваться рекомендованными преподавателем учебниками и конспектами лекций, вопросы контрольной составляются на основе стандартной программы курса обучения.

Индивидуальное задание еще не предполагает навыков исследовательско-

го умения, ответы должны демонстрировать достаточно хорошее знание и понимание существа рассматриваемых вопросов. Задание дает возможность уяснить физический смысл процессов, происходящих в оптических источниках излучения. Попробовать применить знание предлагаемого материала для успешного освоения специальности «Информационная безопасность телекоммуникационных систем».

Материал для выполнения расчетного задания достаточно подробно изложен [1,5,8,].

6.1. Цель и задачи индивидуального расчетного задания

Целью индивидуальной работы по дисциплине «Квантовая и оптическая электроника» является закрепление знания устройств и работы оптических приборов. В процессе самостоятельной работы студентом (под руководством преподавателя) решаются следующие задачи:

- составление последовательности организационных мер и приемов при выполнении работ большого объема;
- изучение вопросов теории, необходимых для выполнения задания;
- наработка навыков решения конкретных параметров оптических приборов, выборов их оптимальности при использовании математической модели или формул для полного решения задачи
- применение полученной математической модели или формул для решения конкретной задачи и обоснование конечных результатов;
- составление схемы установки и методики необходимых измерений;
- развитие навыков использования справочной литературы и поиска необходимых данных (включая источники в Интернет);

Курсовая работа выполняется по индивидуальным заданиям. Общее руководство осуществляет преподаватель.

За проводимые в работе решения и правильность использования формул или математических моделей, за правильность расчета основных параметров и характеристик, за качество подготовки текстовых документов, а также за своевременность подготовки и защиты своей работы в целом отвечает студент. В процессе выполнения работы студент должен правильно организовать свой труд, регулярно работать над заданием, проявлять максимум инициативы и самостоятельности для решения поставленных задач.

6.2. Тематика индивидуальных расчетных заданий

Тематика предлагаемых заданий определяется рабочей программой по дисциплине «Квантовая и оптическая электроника» и может быть выделена в такие разделы:

1. Взаимодействие излучения с веществом. Спонтанное и вынужденное излучение. Вероятности переходов. Ширина спектральной линии. Характеристики лазерного излучения. Усиление электромагнитных колебаний в среде с инверсной населенностью.

2. Резонаторы. Расчет параметров оптических резонаторов. Параметры и характеристики лазеров. Приемники оптического излучения.

3. Расчет устройств, позволяющих управлять амплитудой, фазой, частотой и поляризацией оптического излучения. Расчет параметров оптического волокна.

6.3. Содержание индивидуального расчетного задания

В результате выполнения индивидуальной работы студент должен получить представление обо всех этапах решения поставленной задачи: выбора формул для получения требуемых результатов. Анализ графиков (если это требуется), расчет более оптимального варианта. Сделать соответствующую оценку результатов решения. Оформление индивидуальной работы.

6.3.1. Индивидуальное расчетное задание №1.

Взаимодействие излучения с веществом. Спонтанное и вынужденное излучение. Вероятности переходов. Ширина спектральной линии. Характеристики лазерного излучения. Усиление электромагнитных колебаний в среде с инверсной населенностью.

Вариант 1

1. Определить вероятность индуцированных переходов на длине волны $\lambda = 0,56$ мкм, если время жизни по спонтанным переходам равно $\tau = 0,5 \cdot 10^{-7}$ с.

2. Населенность верхнего и нижнего уровней равна соответственно $1 \cdot 10^{10}$ и $0,5 \cdot 10^{10}$ см⁻³. Кратность вырождения верхнего уровня 2, нижний уровень не вырожден. Возможно ли в рассматриваемой системе усиление? Поглощение?

3. Определить форму спектральной линии, если ширина контура спектральной линии на длине волны излучения в 0,63 мкм равна 150 МГц.

4. Если инверсная населенность в среде равна 2, то чему равна отрицательная температура при длине волны 1 мкм, излучаемой в среде.

Вариант 2

1. Определить неопределенность энергии i уровня и ширину естественной линии вещества, имеющего время жизни уровня $7 \cdot 10^{-6}$ с.

2. Рассчитать доплеровскую ширину линии для гелий-неонового лазера с плоско - параллельным резонатором Фабри - Перо длиной $L = 1$ м и потерями 2% на переходе 1,15 мкм неона. Необходимые постоянные: $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; $T = 300^0$ К, $M = 2 \cdot 10^{-24}$ г, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

3. Населенность верхнего и нижнего уровней равна соответственно $1 \cdot 10^{10}$ и $0,5 \cdot 10^{10}$ см⁻³. Кратность вырождения верхнего уровня 2, нижний уровень не вырожден. Возможно ли в рассматриваемой системе усиление? Поглощение?

4. Атом излучает фотон с длиной волны $\lambda = 0,55 \mu\text{м}$. Известно, что время излучения $\tau \approx 10^{-8}$ с: с какой точностью может быть определено местонахождение данного фотона в направлении его движения; оценить исходя из соотношений неопределенностей для энергии неточности в определении указанной длины волны.

Вариант 3

1. Населенность верхнего и нижнего уровней равна соответственно $9 \cdot 10^{12}$ и $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Кратность вырождения верхнего уровня 2, нижний уровень не вырожден. Возможно ли в рассматриваемой системе усиление?

2. Пусть отношение населенностей N_2/N_1 двух уровней, находящихся в термодинамическом равновесии при температуре $T=300 \text{ К}$ равно $1/e$. Вычислите частоту излучения ν , соответствующую переходу между этими уровнями. В какую область электромагнитного спектра попадает излучение с такой частотой?

3. Используя принцип детального равновесия, найти соотношения между спонтанными и индуцированными переходами.

4. При одном из переходов электрона в атоме водорода с одного устойчивого уровня на другой произошло излучение кванта света с частотой $\nu = 4,57 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$. Определить, на какую величину изменилась энергия электрона в атоме за счет излучения.

Вариант 4

1. Чему равна ширина естественной спектральной линии вещества, если время жизни по спонтанным переходам равно $5 \cdot 10^{-7}$ с и рабочая длина волны $0,7 \mu\text{м}$?

2. Если коэффициент усиления в активной среде равен $3 \cdot 10^{-1} \text{ см}^{-1}$, то чему равна мощность сигнала в процессе прохождения через активное вещество при мощности на входе в активное вещество $P(\omega, \nu_0) = 1 \text{ мВт}$?

3. Если газ состоит из молекул, то следует рассматривать поступательное движение атомов внутри молекулы. Определить рабочий частотный диапазон переходов для колебательных энергетических уровней. (Справка: $1 \text{ эВ} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Дж}$).

4. Просчитать плотность энергии собственного поля U_ν , на резонансной частоте ($\lambda = 0,84 \mu\text{м}$), при $T = 300 \text{ К}$ по формуле Планка для равновесного излучения абсолютно черного тела

$$U_\nu = \frac{8 \cdot \pi \cdot \nu^2}{c^3} \cdot h\nu / [\exp(h\nu / kT) - 1],$$

где k – постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot (\text{°К})^{-1}$), h – постоянная Планка ($h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$), частота при заданной длине $\nu = 3,6 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$.

Вариант 5

1. Рассчитать доплеровскую ширину линии для лазера с плоско-параллельным резонатором Фабри–Перо на переходе 3,36 мкм. При следующих значениях активной среды: $\kappa = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ – постоянная Больцмана;

$$T = 300^0 \text{ K}, \quad M = 5 \cdot 10^{-22} \text{ г}, \quad c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

2. Провести сравнительную оценку длины когерентности для некоторых наиболее применяемых источников света:

- 1) для белого света $\tau \leq 10^{-4}$ с;
- 2) для зеленой линии ртутной лампы ($\lambda_0 = 0,546$ мкм) со спектральной шириной $\Delta\lambda = 100 \text{ \AA}$; $\tau = 10^{-13}$ с;

3. Определить ширину спектра генерации He-Ne лазера ($\lambda = 0,63$ мкм) с длиной резонатора $L = 1$ м и количество продольных мод, укладывающихся в пределах спектральной линии, если длина когерентности в одном случае равна $L_{\text{когер}1} = 20$ см, а в другом $L_{\text{когер}2} = 2 \cdot 10^2$ м.

4. Опыт показывает, что световой поток представляет собой поток отдельных корпускул - фотонов или, иначе, квантов света. Каждый фотон несет с собой энергию $E = h\nu$, где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка, ν частота световой волны. Определить энергию фотонов, испускаемых желтым натриевым пламенем, если частота, соответствующая желтой линии натрия, равна $\nu = 5 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$.

Вариант 6

1. Какой шириной запрещенной зоны должен обладать полупроводник, чтобы излучение лазера наблюдалось на длине волны $\lambda = 0,84$ мкм, лежащей в инфракрасной части оптического диапазона, если длина резонатора равна 500 мкм, показатель преломления 3,59.

2. Учитывая принцип детального равновесия для $n_{21} = n_{12}$, записать соотношение тепловых переходов Γ_{21}/Γ_{12} если учесть, что $h\nu \gg kT$, что обычно справедливо для квантовых приборов оптического диапазона.

3. Какой шириной запрещенной зоны должен обладать полупроводник, чтобы излучение лазера наблюдалось на длине волны $\lambda = 3,36$ мкм, лежащей в инфракрасной части оптического диапазона, если длина резонатора равна 0,42 мм, показатель преломления 3,15.

4. Определите частоту и энергию фотона для каждого из ниже перечисленных источников оптического излучения: а) гелий-неоновый лазер при $\lambda = 0,6328$ мкм; б) лазер на неодиме (Nd^{3+}) при $\lambda = 1,16$ мкм; в) лазер на углекислом газе при $\lambda = 9,8$ мкм.

Вариант 7

1. Вычислить ширину полосы частот излучения на уровне 0,5 следующих

источников:

- а) лазер на GaAlAs, имеющий ширину спектральной линии бнм, при средней длине волны излучения 1,26 мкм.
- б) лазер на стекле с неодимом, длина волны которого равна 1,16 мкм и ширина спектральной линии 23 нм.

2. Величина излучаемой мощности определена следующим уравнением

$$P = \frac{\tau\sigma}{\eta(1+R_1)} \left[\frac{\chi_0 l}{\delta l + \ln(R_1 R_0)^{-1/2}} - 1 \right],$$

где τ - коэффициент пропускания выходного зеркала; σ - эффективное сечение среды; η - параметр насыщения; χ_0 - ненасыщенный показатель усиления среды; R_1 - коэффициент отражения выходного зеркала; l - эффективная длина активного элемента; δ - показатель распределенных потерь в среде; R_0 - коэффициент отражения глухого зеркала.

При заданных значениях $\chi_0 = 0,1 \text{ см}^{-1}$, $\delta = 0,02 \text{ см}^{-1}$, $l = 5 \text{ см}$, $RR_0 = 0,4$ определить показатель рассеяния $(\chi_0 - \delta)_{\min}$, при котором возможна генерация в кристалле.

3. Просчитав несколько значений $g(\nu)$ вблизи ν_0 , изобразить контур спектральной линии, если ширина контура спектральной линии на длине волны излучения в $\lambda_0 = 0,63 \text{ мкм}$ равна $\Delta\lambda = 150 \text{ МГц}$.

4. Лазер, работающий на длине волны 10,6 мкм, дает излучение с гауссовой формой линии с шириной $\Delta\nu_{\text{ген}} = 10 \text{ кГц}$. Вычислите длину когерентности, степень монохроматичности данного лазера.

Вариант 8

1. Определить вероятность индуцированных переходов на длине волны $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$, если время жизни по спонтанным переходам равно $\tau = 0,8 \cdot 10^{-9} \text{ с}$.

2. Какой шириной запрещенной зоны должен обладать полупроводник, чтобы излучение лазера наблюдалось на длине волны $\lambda = 0,7 \text{ мкм}$, лежащей в видимой части оптического диапазона?

3. Определить ширину спектральной линии генерации инжекционного полупроводникового лазера, спектральную чистоту, допустимое отклонение длины резонатора от заданной, если лазер работает на длине волны $\lambda = 3,36 \text{ мкм}$, длина резонатора $L = 0,5 \text{ мм}$, $P_{\text{вых}} = 15 \text{ мВт}$.

4. Провести сравнительную оценку длины когерентности для некоторых наиболее употребительных источников света:

1. для белого света $\tau \leq 10^{-4} \text{ с}$;
2. для зеленой линии ртутной лампы ($\lambda_0 = 0,546 \text{ мкм}$) со спектральной шириной $\Delta\lambda = 100 \text{ А}$, $\tau = 10^{-13} \text{ с}$;

3. для He-Ne лазера $\lambda_0 = 0,63$ мкм, $\Delta f = 1,5$ ГГц, $\tau = 2 \cdot 10^{-10}$ с – для многомодового режима;
4. для He-Ne лазера $\lambda_0 = 0,63$ мкм, $\Delta f = 15$ ГГц, $\tau = 2 \cdot 10^{-2}$ с – для одномодового режима;

Вариант 9

1. Определить вероятность спонтанных переходов на длине волны $\lambda = 0,56$ мкм, если время жизни по индуцированным переходам равно $\tau = 0,5 \cdot 10^{-10}$ с.

2. Диаметр светового пучка на выходе газового лазера составляет $D = 3$ мм. Оценить угол расхождения луча лазера, если на расстоянии 2 м диаметр пятна равен 5,4 мм. Сравнить вычисленный угол расхождения с величиной, определенной теорией дифракции. Длина волны излучения $\lambda = 0,63$ мкм. Зеркало круглое.

3. Определить ширину спектральной линии генерации инжекционного полупроводникового лазера, спектральную чистоту если лазер работает на длине волны $\lambda = 0,67$ мкм, длина резонатора $L = 0,3$ мм, $P_{\text{вых}} = 4,5$ мВт.

4. Просчитать плотность энергии собственного поля U_ν , на резонансной частоте ($\lambda = 0,84$ мкм), при $T = 300$ К по формуле Планка для равновесного излучения абсолютно черного тела

$$U_\nu = \frac{8 \cdot \pi \cdot \nu^2}{c^3} \cdot h\nu \left[\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1 \right]^{-1},$$

где k – постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж \cdot (°К) $^{-1}$), h – постоянная Планка ($h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж \cdot с), частота при заданной длине $\nu = 3,8 \cdot 10^{14}$ Гц.

Вариант 10

1. Населенность верхнего и нижнего уровней равна соответственно $1 \cdot 10^{10}$ и $0,5 \cdot 10^{10}$ см $^{-3}$. Кратность вырождения верхнего уровня 2, нижний уровень не вырожден. Возможно ли в рассматриваемой системе усиление? Поглощение? Определить неопределенность энергии i уровня и ширину естественной линии вещества, имеющего время жизни уровня $7 \cdot 10^{-6}$ с.

2. Рассчитать доплеровскую ширину линии для гелий-неонового лазера с плоско - параллельным резонатором Фабри - Перо длиной $L = 0,8$ м и потерями 5% на переходе 3,36 мкм неона. Необходимые постоянные: $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; $T = 300^0$ К, $M = 1,35 \cdot 10^{-24}$ г, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

3. Провести сравнительную оценку длины когерентности для некоторых наиболее применяемых источников света:

а) для He-Ne лазера $\lambda_0 = 0,63$ мкм; $\Delta f = 1,5$ ГГц; $\tau = 2 \cdot 10^{-10}$ с – для многомодового режима;

б) для He-Ne лазера $\lambda_0 = 0,63$ мкм; $\Delta f = 1,5$ ГГц; $\tau = 2 \cdot 10^{-2}$ с – для

одномодового режима.

4. Определить энергию, поглощенную ионами хрома, в стержне из кристалла Al_2O_3 , который имеет длину 80 мм, диаметр 6 мм, если избыток частиц на верхнем уровне перехода составляет $0,8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Принять, что статические веса верхнего и нижнего уровней соответственно $g=2$, $g=4$; длина волны накачки $\lambda_{\min} = 0,69 \cdot 10^6 \text{ м}$, концентрация активных частиц в рубиновом кристалле $N_0 = 1,6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $r = 0,5$. Все необходимые параметры заданы: $\omega_{31} = 2\pi \cdot 6,5 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$, $\omega_{21} = 2\pi \cdot 4,33 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$, $l = 80 \text{ мм}$, диаметр кристалла 6,5 мм, $N_0 = 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $\tau = 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$, $n = 1,76$, $\eta = 0,7$, $\Delta\omega_l = 2\pi \cdot 300 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$, $R_1 R_2 = 0,9$, $\sigma = 0,25$, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$, $\eta_H = 50\%$, $\eta_L = 40\%$, $\eta_0 = 40\%$, $C_1 = 300 \text{ мкф}$, если при $U_0 = 1,4 \text{ кВ}$ излучаемая энергия равна $P_{\text{изл}}$.

6.3.2. Индивидуальное расчетное задание №2

Резонаторы. Расчет оптических резонаторов для формирования спектрального разрешения лазерного излучения. Параметры и характеристики лазеров. Приемники оптического излучения.

Вариант 1

1. Определить нагруженную добротность резонатора полупроводникового лазера обусловленную активным поглощением на свободных носителях. Численные значения параметров, необходимых при решении следующие:

ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость ($\epsilon_0 = 10$), σ – проводимость ($\sigma = 0,5 \cdot 10^3 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$), τ – время релаксации носителей тока ($\tau \approx 0,2 \cdot 10^{-12} \text{ с}$), длина волны λ ($\lambda = 0,84 \text{ мкм}$), коэффициент отражения граней r ($r = 0,3$), длина резонатора ($L = 5 \cdot 10^{-2} \text{ см}$), толщина области локализации поля d ($d = 10 \text{ см}$).

2. Два сферических зеркала с радиусом кривизны R_1 и R_2 расположены на расстоянии одно l от другого. Найти минимальный размер пятна светового пучка в резонаторе, его положения и размеры пятен на зеркалах, если длина волны излучения λ . Апертурный размер зеркал достаточно велик, так что дифракционными потерями можно пренебречь. Для числовых оценок взять $R_1 = 84 \text{ см}$, $R_2 = 59 \text{ см}$, $l = 134 \text{ см}$, $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$.

3. Вычислить оптимальный диаметр активного элемента в случае кристалла со следующими параметрами для рубина: $\chi_0 = 0,1 \text{ см}^{-1}$, $\delta = 0,02 \text{ см}^{-1}$, $r_1 = 0,8$, $r_2 = 0,5$, $l = 20 \text{ см}$, $\chi_H = 1,4 \text{ см}^{-1}$, χ_H – показатель поглощения излучения накачки, $\chi_H^0 = w_H \exp(-\chi_H \cdot a)$, a – радиус активного элемента, w_H – плотность энергии накачки на поверхности.

4. Пусть отношение населенностей N_2/N_1 двух уровней, находящихся в термодинамическом равновесии при температуре $T = 300 \text{ К}$ равно $1/e$. Вычислите на какую частоту ν , соответствующую переходу между этими уровнями нужно выбрать приемник. В какую область электромагнитного спектра попадает излучение с такой частотой?

Вариант 2

1. Чему равен размер пятна на зеркалах конфокального резонатора длиной $L=R=1\text{ м}$, используемого в лазере на $\lambda=0,63\text{ мкм}$?

2. Определить нагруженную добротность резонатора полупроводникового лазера тремя вариантами определяемую через отражения от торцевых граней кристалла. Численные значения параметров, необходимых при решении следующие: ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость ($\epsilon_0 = 10$), σ – проводимость ($\sigma = 0,5 \cdot 10^3 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$), τ – время релаксации носителей тока ($\tau \approx 0,2 \cdot 10^{-12} \text{ с}$), длина волны λ ($\lambda = 0,67 \text{ мкм}$), коэффициент отражения граней r ($r=0,3$), длина резонатора ($L = 8 \cdot 10^{-2} \text{ см}$), толщина области локализации поля d ($d = 10 \text{ см}$).

3. Определить оптимальный коэффициент отражения зеркал $r_{\text{отр}}$ (зеркала одинаковые) резонатора лазера, позволяющий получить максимальную выходную мощность. Коэффициент ненасыщенного усиления на проход G_0 , коэффициент потерь на проход α . Длина резонатора L . Дифракционными потерями можно пренебречь. Для численных оценок считать: $L = 10 \text{ см}$, $\chi_{\text{анор}}^0 = 0,01 \text{ см}^{-1}$, $\alpha_a = 0,063 \text{ см}^{-1}$, $v_{\text{гр}} = 2,8 \cdot 10^8 \text{ м/с}$. Активная среда заполняет весь резонатор.

4. На сурьмяно-цезиевый фотоэлемент с интегральной чувствительностью $K=100 \text{ мкА/лм}$ падает световой поток Φ , равный $0,15 \text{ лм}$. Последовательно с фотоэлементом включен резистор сопротивлением $R=400 \text{ кОм}$, с которого сигнал снимается на усилитель управляющим реле. Определить ток фотоэлемента и входную мощность усилителя, если входной нагрузкой усилителя является сопротивление R (темновой ток фотоэлемента равен нулю).

Вариант 3

1. Определить нагруженную добротность резонатора полупроводникового лазера обусловленную дифракцией. Численные значения параметров, необходимых при решении следующие: ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость ($\epsilon_0 = 8$), σ – проводимость ($\sigma = 0,8 \cdot 10^3 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$), τ – время релаксации носителей тока ($\tau \approx 0,2 \cdot 10^{-10} \text{ с}$), длина волны λ ($\lambda = 0,45 \text{ мкм}$), коэффициент отражения граней r ($r=0,3$), длина резонатора ($L = 12 \cdot 10^{-2} \text{ см}$), толщина области локализации поля d ($d = 10 \text{ мм}$).

2. Два сферических зеркала с радиусом кривизны R_1 и R_2 расположены на расстоянии одно l от другого. Найти минимальный размер пятна светового пучка в резонаторе, его положения и размеры пятен на зеркалах, если длина волны излучения λ . Апертурный размер зеркал достаточно велик, так что дифракционными потерями можно пренебречь. Для числовых оценок взять $R_1 = 84 \text{ см}$, $R_2 = 59 \text{ см}$, $l = 134 \text{ см}$, $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$.

3. Вычислить оптимальный диаметр d рубинового активного элемента со

следующими параметрами: $\chi_0 = 0,3 \text{ см}^{-1}$, $\delta = 0,04 \text{ см}^{-1}$, $r_1 = 0,87$, $r_2 = 0,55$, $l = 18 \text{ см}$,
 $\chi_n = 1,4 \text{ см}^{-1}$, χ_n – показатель поглощения излучения накачки,
 $\chi_n^0 = w_n \exp(-\chi_n \cdot a)$, где a – радиус активного элемента, w_n – плотность энергии накачки на поверхности.

4. Дайте описание фотоэффекта и объясните, каким образом с его помощью можно определить работу выхода для некоторой поверхности. Вычислите максимальную скорость электронов, эмитируемых из фотокатода, имеющего работу выхода 1,9 эВ и освещаемого монохроматическим светом с длиной волны $0,59 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

Вариант 4

1. При какой добротности резонатора Фабри - Перо возможна лазерная генерация на длине волны $\lambda = 0,6 \text{ мкм}$, если коэффициент усиления активной среды $\kappa_a = 0,1 \text{ см}^{-1}$, потери на рассеяние света при распространении в активной среде $\alpha = 0,03 \text{ см}^{-1}$, а длина резонатора $L = 30 \text{ см}$?

2. Оценить, насколько частота типа колебаний TEM_{01} отличается от частоты основного типа колебаний TEM_{01} для пустого резонатора. Резонатор образован плоским и сферическим (радиус кривизны $R = 100 \text{ см}$) зеркалами. Длина резонатора $L = 50 \text{ см}$.

3. Пусть имеется активный кристалл длиной 5 см, на котором было измерено полуторократное усиление сигнала на длине волны, соответствующей инвертированному переходу при определенном заданном уровне накачки. Показатель рассеяния равен $0,02 \text{ см}^{-1}$. Можно ли получить генерацию на таком кристалле при использовании зеркал с коэффициентами отражения $r_1 = 0,8$ и $r_2 = 0,5$, если условие возникновения генерации соответствует неравенству $K_0^2(r_1 \cdot r_2) > 1$?

4. Свет падает на поверхность натрия, работа выхода которого равна 2,11 эВ ($1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$). Найдите максимальную скорость фотоэлектронов, если на поверхность натрия падает желтый свет ($\lambda = 580 \text{ нм}$).

Вариант 5

1. Какой добротностью обладает резонатор Фабри Перо с коэффициентом отражения зеркал $r = 0,8$ (зеркала одинаковы) и базой $L = 50 \text{ см}$ при длине волны света $\lambda = 0,5 \text{ мкм}$?

2. Резонатор Фабри - Перо образован двумя одинаковыми зеркалами. Какова пороговая добротность оптического резонатора без активной среды для получения генерации при $\lambda = 0,6 \text{ мкм}$, если коэффициент усиления превышает потери на рассеяние света при распространении в активной среде на $0,03 \text{ см}^{-1}$, а длина резонатора $L = 50 \text{ см}$? Потерями света при отражении от зеркал можно пренебречь.

3. Спектральная ширина линии излучения He-Ne лазера составляет 600 МГц, центральная частота излучательного перехода $\nu_0 = 8,8 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$. Определить какое число продольных типов колебаний может возбудиться в лазере если

длина резонатора $L = 80$ см? Определить при какой длине будет возбуждаться один продольный тип колебаний?

4. Фотоэлектрическая работа выхода для калия равна $2,0$ эВ. На поверхность калия падает свет $\lambda = 0,35$ мкм. Определить на основе явления фотоэффекта Эйнштейна запирающий потенциал V_s , если энергия фотона равна $E = 1,24/\lambda$ эВ.

Вариант 6

1. Два сферических зеркала с радиусом кривизны R_1 и R_2 расположены на расстоянии одно l от другого. Найти минимальный размер пятна светового пучка в резонаторе, его положения и размеры пятен на зеркалах, если длина волны излучения λ . Апертурный размер зеркал достаточно велик, так что дифракционными потерями можно пренебречь. Для числовых оценок взять $R_1 = 84$ см, $R_2 = 59$ см, $l = 134$ см, $\lambda = 1,06$ мкм.

2. Лазер на двойной гетероструктуре GaAs/GaAlAs имеет длину резонатора 500 мкм, коэффициент потерь $\alpha_a = 10 \text{ мм}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ и коэффициент отражения граней $0,33$, одно из граней имеет коэффициент отражения $0,4$. Рассчитать, насколько снизится пороговый коэффициент усиления в результате увеличения коэффициента отражения на одном торце до $0,5$.

3. Определить оптимальный коэффициент отражения зеркал $r_{\text{отр}}$ (зеркала одинаковые) резонатора лазера, позволяющий получить максимальную выходную мощность. Коэффициент ненасыщенного усиления на проход G_0 , коэффициент потерь на проход α . Длина резонатора L . Дифракционные потерями можно пренебречь. Для численных оценок считать: $L = 40$ см, $N_{\text{пор}} = \frac{1}{2}N = 0,01 \text{ см}^{-1}$, $\alpha_a = 0,063 \text{ см}^{-1}$, $v_{\text{гр}} = 2,8 \cdot 10^8$ м/с. Активная среда заполняет весь резонатор.

4. Дать определение фоточувствительности детекторов. Каковы основные процессы, определяющие токовую чувствительность p-i-n фотодиода.

Вариант 7

1. Какой добротностью обладает резонатор Фабри Перо с коэффициентом отражения зеркал $r = 0,5$ (зеркала одинаковы) и базой $L = 100$ см при длине волны света $\lambda = 0,5$ мкм?

2. Спектральная ширина линии излучения He-Ne лазера составляет 600 МГц, центральная частота излучательного перехода $\nu_0 = 8,8 \cdot 10^{14}$ Гц. Определить какое число продольных типов колебаний может возбуждаться в лазере если длина резонатора $L = 80$ см? Определить при какой длине будет возбуждаться один продольный тип колебаний?

3. Предположим, что по конструктивным соображениям длину кристалла увеличивать нежелательно. Можно ли на кристалле с показателем рассеяния $0,02 \text{ см}^{-1}$, длиной 5 см, на котором было замерено полуторократное усиление сигнала на длине волны, соответствующей инвертированному переходу при определенном заданном уровне накачки получить генерацию, уменьшив показатель рассеяния среды?

4. Свет падает на поверхность натрия, работа выхода которого равна 2,11 эВ. Найдите максимальные скорости всех фотоэлектронов, если длина волны падающего света имеет красный цвет ($\lambda=644$ нм), энергия фотона $E=hc/\lambda=1,24/\lambda$, т.е. $1,24/0,644=1,93$ эВ.

Вариант 8

1. Каким должно быть расстояние между зеркалами резонатора Фабри-Перо для обеспечения добротности $Q=1000$ на длине волны света $\lambda=0,5$ мкм, если коэффициент отражения зеркал $r=0,8$?

2. Открытый оптический резонатор образован плоскими зеркалами квадратной формы с размером D (10 мм). Расстояние между зеркалами L (1 м), а их непараллельность составляет угол δ (1 мин). Резонатор заполнен диэлектриком с показателем преломления n (2,3), коэффициенты отражения зеркал $R_1=1$, $R_2=R$ (0,5). Определить добротность резонатора с учётом связи с нагрузкой непараллельности зеркал, дифракционных потерь на длине волны λ (1,06 мкм).

3. Определить и сравнить между собой дифракционные потери типов колебаний TEM_{00} (основной тип) и TEM_{01} для резонатора с плоскими зеркалами круглой формы. Длина резонатора $L = 60$ см, длина волны излучения $\lambda = 1,15$ мкм, апертурный размер зеркал $a = 0,5$ см.

4. Электронно-дырочный переход полупроводникового лазерного диода имеет площадь, определяемую размерами $0,245 \times 0,048$ см². Пороговый ток через диод составляет 1,1 А. В рабочем режиме, при десятикратном превышении порогового значения по току и напряжению на диоде $U_d = 1,7$ В, излучаемая мощность составляет 1,9 Вт. Определить плотность тока в пороговом и рабочем режимах;

Вариант 9

1. Два сферических зеркала с радиусом кривизны R_1 и R_2 расположены на расстоянии одно l от другого. Найти минимальный размер пятна светового пучка в резонаторе, его положения и размеры пятен на зеркалах, если длина волны излучения λ . Апертурный размер зеркал достаточно велик, так что дифракционными потерями можно пренебречь. Для числовых оценок взять $R_1 = 75$ см, $R_2 = 63$ см, $l = 124$ см, $\lambda = 1,06$ мкм.

2. Оценить угол расхождения пучка основного типа колебаний в конфокальном резонаторе. Для оценок принять $\lambda=1$ мкм, расстояние между зеркалами $L = 2$ м. Апертурный размер зеркал велик, а дифракционные эффекты пренебрежимо малы.

3. Найдите расстояние между продольными модами резонатора Фабри-Перо с расстоянием между зеркалами 1 м. Определите сколько мод резонатора находится в полосе $\Delta\lambda = 0,01$ мкм с центральной длиной волны $\lambda=600$ нм. Резонатор объемом $V=1$ см³.

4. Чему равен размер пятна на зеркалах конфокального резонатора длиной $L=R=1$ м, используемого в лазере на $\lambda=0,63$ мкм.

Вариант 10

1. Резонатор Фабри - Перо образован двумя одинаковыми зеркалами. Какова пороговая добротность оптического резонатора без активной среды для получения генерации при $\lambda = 0,6$ мкм, если коэффициент усиления превышает потери на рассеяние света при распространении в активной среде на $0,3 \text{ см}^{-1}$, а длина резонатора $L = 10$ см? Потерями света при отражении от зеркал можно пренебречь.

2. Определить оптимальный коэффициент отражения зеркал $r_{\text{отр}}$ (зеркала одинаковые) резонатора лазера, позволяющий получить максимальную выходную мощность. Коэффициент ненасыщенного усиления на проход G_0 , коэффициент потерь на проход α . Длина резонатора L . Дифракционными потерями можно пренебречь. Для численных оценок считать: $L = 100$ мкм, $\chi_{\text{анор}}^0 = 0,01 \text{ см}^{-1}$, $\alpha_a = 0,063 \text{ см}^{-1}$, $v_{\text{гр}} = 2,8 \cdot 10^8$ м/с. Активная среда заполняет весь резонатор.

3. Рассчитать добротность Q_R и время жизни фотона t_p в резонаторе Фабри-Перо с плоскими зеркалами. Расстояние между зеркалами $L = 1$ м. В резонаторе возбуждается основной тип колебаний TEM_{00} , образуемый двумя бегущими навстречу друг другу плоскими волнами ($\lambda = 0,6$ мкм). Среда, заполняющая резонатор, слабо поглощаемая (коэффициент поглощения $\alpha = 0,001 \text{ см}^{-1}$). Эти потери могут быть связаны с рассеиванием в среде и т.д. Коэффициент отражения каждого из зеркал $r_{\text{отр}} = 95\%$. Диаметр зеркал много больше диаметра светового пучка, так что дифракционными потерями можно пренебречь.

4. Пусть фотодиод имеет работу выхода $2,08$ эВ и спектральная чувствительность 20 мкА/пм при освещении его $\lambda = 0,546$ мкм. Считая, что световой поток $0,625$ мкм на этой λ эквивалентен 1 Вт, вычислить: пороговую частоту, запирающий потенциал, при котором фототок равен нулю,

6.3.2. Индивидуальное расчетное задание №3.

Пространственное преобразование лазерного пучка. Расчет устройств, позволяющих управлять амплитудой, фазой, частотой и поляризацией оптического излучения. Расчет параметров оптического волокна.

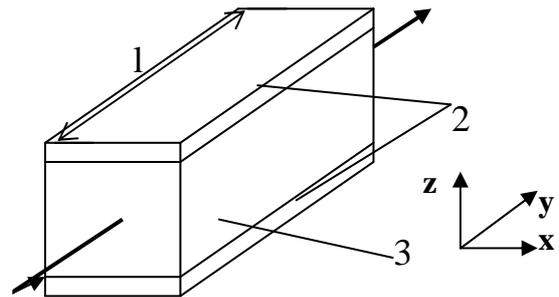
Вариант 1

1. Размер пятна в перетяжке гауссова пучка, излучаемого He-Ne лазером видимого диапазона, равен $\omega_0 = 0,5$ мм. Вычислить размер пятна пучка и радиус кривизны поверхности равных фаз на расстоянии 10 м от перетяжки.

2. Рассчитать геометрические размеры, V_{π} , фазовый сдвиг и предельную частоту фазового электрооптического модулятора с поперечной геометрией, когда вектор напряженности управляющего поля и излучение взаимно ортогональны. Расчет провести для кристалла LiNbO_3 в виде прямоугольного стержня (рис.1), входная и выходная грани которого параллельны плоскости главных осей xz . Возбуждение конденсаторное. Длина волны оптического луча

$\lambda=0,63\text{мкм}$; частота модулирующего сигнала $f=2\cdot 10^9$ Гц, $l=2$ см, $V_0=2,9\cdot 10^3$ В.

Рис. 1– Фазовый электрооптический модулятор с поперечной геометрией: 1 – оптическое излучение; 2 – электроды; 3 – электрооптический кристалл.



Электрические коэффициенты некоторых кристаллов.

Таблица 1

Мат-ал	$r_{ij}\cdot 10^{-14}$, см / в	Показ-ль прелом-я	λ , мкм	V_0 , кВ	ϵ/ϵ_0	$\text{tg } \delta\cdot 10^4$
КДР	$r_{63}=10,6$; $r_{41}=8,6$	$n_0=1,51$ $n_H=1,47$	1,34	0,8	$\epsilon_{\perp z}=443$ $\epsilon_{\parallel z}=205$	5
АДР	$r_{63}=25$; $r_{41}=62$	$n_0=1,52$ $n_H=1,48$	1,7	10	$\epsilon_{\perp z}=559$ $\epsilon_{\parallel z}=147$	55,9
GaAs	$r_{41}=1,7$	$n_0=3,6$	0,9	11,5	32	-
LiNbO ₃	$r_{33}=30,9$; $r_{13}=9,6$ $r_{22}=7$	$n_0=2,28$ $n_H=2,2$	0,546 0,63	9	$\epsilon_{\perp z}=32$ $\epsilon_{\parallel z}=28$	-

3. Определить фазовую скорость и фазовую задержку на выходе из кристалла КДР, если электрическое поле, приложенное к кристаллу длиной $l=2\cdot 10^{-2}$ м, направлено вдоль оси oz и равно $E=2\cdot 10^6$ в/м.

Наложение электрического поля деформирует круг в эллипс с главными осями Ox' и Oy' , составляющими 45° с осями Ox и Oy (рис. 2).

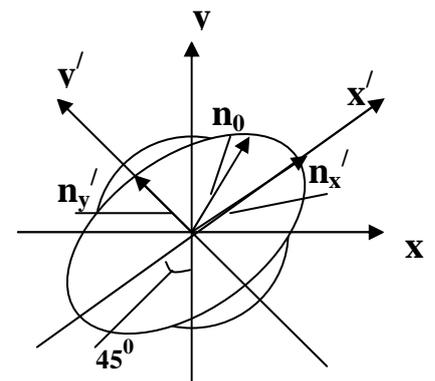


Рис. 2

4. Исходя из формулы $\beta_c = kn_2 \leq kn_1$, найдите максимальное значение критического угла ввода θ_c из соотношения, за пределами которого постоянная распространения β меньше критического значения $\beta_c = kn_2$ и распространение света в световоде становится невозможным.

Вариант 2

1. Гауссов пучок с $\omega_0=0,5$ мм нужно сфокусировать таким образом, чтобы

перетяжка пучка с размером 50 мкм образовалась на расстоянии 1 м от перетяжки исходного пучка. Какое фокусное расстояние должна иметь линза и где она должна быть расположена?

2. Определить интенсивность света, модулированного по амплитуде на выходе из модулятора, если пропустить модулированный свет через анализатор

Модулятор, в котором при помощи двух прозрачных электродов создается электрическое поле в направлении распространения света называется продольным. В этом случае $h=l$, где l - протяженность материала в направлении распространения света. Зависимость вносимой разности фаз $\Delta\varphi$ от напряжения модуляции имеет вид $\Delta\varphi_m = \pi \frac{V_m}{V_\pi}$. Длина волны луча $\lambda=0,63$ мкм; частота модулирующего сигнала $f=2 \cdot 10^9$ Гц, $l=2$ см, $V_0=2,9 \cdot 10^3$ В.

3. На кристалл подан переменный сигнал $V = V_m \sin \omega t$. Определить глубину модуляции при продольном эффекте. Расчет провести для кристалла LiNbO_3 , изготовленного в виде прямоугольного стержня (рис.1). Возбуждение конденсаторное. Длина волны оптического луча $\lambda=0,63$ мкм; частота модулирующего сигнала $f=2 \cdot 10^9$ Гц, $l=2$ см, $V_0=2,9 \cdot 10^3$ В.

4. Светоизлучающий диод с $P_e=7$ мВт, $m=3$, и A_e определяемой толщиной $t=60$ мкм и шириной $w=170$ мкм, соединен с волокном с $NA=0,19$ и диаметром сердцевины 68 мкм. Определить мощность, введенную в волокно.

Вариант 3

1. Лазер имеет полуконфокальный резонатор, длиной 50 см. Для уменьшения расходимости выходного пучка за сферическим (выходным) зеркалом резонатора помещается линза. Какое фокусное расстояние должна иметь эта линза, чтобы размер пятна в образованной за линзой перетяжке пучка составлял 0,95 размера пятна на сферическом зеркале?

2. Рассчитать брэгговский дефлектор, работающий в сканирующем устройстве, в которое входит также источник оптического излучения и формирующая оптика. Исходные параметры для расчета: $N=100$ эл., $f_c=1$ кГц, $D_{\text{п}}=10$ мкм, $D_{\text{окг}}=2$ мм, $\lambda_{\text{окг}}=1'$, $\lambda=0,63$ мкм.

Выбрать активную среду дефлектора и оптическую схему сканирующего устройства. Определить геометрические размеры активной среды дефлектора: высоту h , длину L , ширину b ,

3. Вычислить долю мощности с длиной волны 0,633 мкм, которая дифрагирует при выполнении условия Брэгга на звуковой волне в PbMoO_4 со следующими характеристиками: акустическая мощность = 1 Вт, поперечное сечение акустического пучка 1 мм x 1 мм, оптическая длина пути L в акустическом пучке равна 1 мм. Из табл. 2 определяем M_w , равное 0,22.

Свойства некоторых материалов, используемых обычно для получения дифракции света на звуке

Таблица 2

Материал	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	ϑ , км/с	n	p	M	M _w
вода	1,0	1,5	1,33	0,31	160	1/0
плавленый кварц (SiO ₂)	6,3	3,1	1,92	0,25	1,51	0,12
ниобад лития(LiNbO ₃)	4,7	7,4	2,25	0,150	6,99	0,012
сапфир(Al ₂ O ₃)	4,0	11,00	1,76	0,17	0,34	0,001
PbMoO ₄	6,95	3,75	2,30	0,28	73	0,22

4. Ступенчатый волоконный световод имеет диаметр сердцевины 200 мкм и числовую апертуру NA = 0,19. Определить число направляемых мод при $\lambda = 1,16$ нм.

Вариант 4

1. В He-Ne-лазере, работающем на длине волны $\lambda = 0,6328$ мкм, используется конфокальный резонатор длиной L=1м. Вычислите размер пятна в центре резонатора и на зеркалах.

2. На кристалл подан переменный сигнал $V = V_m \sin \omega t$. Определить глубину модуляции при продольном эффекте. Расчет провести для кристалла LiNbO₃, изготовленного в виде прямоугольного стержня. Возбуждение конденсаторное. Длина волны оптического луча $\lambda = 0,63$ мкм; частота модулирующего сигнала $f = 2 \cdot 10^9$ Гц, $l = 2$ см, $V_0 = 2,9 \cdot 10^3$ В.

3. Электрооптический дефлектор предназначен для сканирования коллимированного светового пучка с апертурой $D_{вх} = 1$ см. Ширина дефлектора $b = 2$ см. Длина волны управляемого излучения $\lambda = 0,63$ мкм. Световой пучок имеет круглое сечение, для которого $\xi = 1,2$. Показатель преломления материала дефлектора $n = 1,5$, максимальное изменение показателя преломления $\Delta n = 2 \cdot 10^{-4}$. Определить максимальную длину пути луча в дефлекторе L_{max} , максимальный угол отклонения светового луча ΔL_{max} и разрешающую способность дефлектора N.

4. Одномодовое ОВ (рек. G.652) с параметрами $n_1 = 1,46$; NA = 0,12; $d = 8$ мкм, $D = 125$ мкм, имеет собственные потери 0,15 дБ/км. Определить допустимое значение числа микроизгибов на длине 1 км, если $h = 0,2$ мкм.

Вариант 5

1. Для резонатора, длиной L=1м на $\lambda = 0,63$ мкм. вычислите разность частот между двумя соседними продольными модами $\left(\nu = \frac{2n + (1 + m + l)}{4l} \right)$.

2. Определить интенсивность амплитудно – модулированного света на выходе из модулятора, если пропустить модулированный свет через анализатор,

Расчет провести для кристалла LiNbO_3 в виде прямоугольного стержня (рис.1), входная и выходная грани которого параллельны плоскости главных осей xz . Возбуждение конденсаторное. Длина волны оптического луча $\lambda=0,63\text{мкм}$; частота модулирующего сигнала $f=2 \cdot 10^9$ Гц, $l=2$ см, $V_0=2,9 \cdot 10^3$ В (Табл.1).

3. Вычислить долю мощности с длиной волны $0,633$ мкм, которая дифрагирует при выполнении условия Брэгга на звуковой волне в PbMoO_4 со следующими характеристиками: акустическая мощность = 1 Вт, поперечное сечение акустического пучка = 1мм x 1мм, оптическая длина пути L в акустическом пучке = 1 мм, M_W (из табл. 2) = 0,22. Таблица 2.– Свойства некоторых материалов, используемых обычно для получения дифракции света на звуке в ней: ρ – плотность, v – скорость звука, n – показатель преломления, \bar{p} – эффективный коэффициент фотопрозрачности, M_W – относительная эффективность дифракции.

4. Найти нормализованные частоты V_c , ниже которых распространение света в волокне ограничивается единственной модой, для волокон со следующими видами профиля показателя преломления: а) ступенчатый профиль ($a=\infty$); б) параболический профиль ($a=2$); в) треугольный профиль ($a=1$)

Вариант 6

1. Вычислите размер пятна на обоих зеркалах полуконфокального резонатора длиной $L=2\text{м}$, используемого в CO_2 -лазере, работающем на длине волны $\lambda = 10,6\text{мкм}$.

2. Рассчитать мощность, необходимую для работы модулятора на продольном эффекте. Расчет провести для кристалла LiNbO_3 , изготовленного в виде прямоугольного стержня (рис. 4.4). Возбуждение конденсаторное. Длина волны оптического луча $\lambda=0,63\text{мкм}$; частота модулирующего сигнала $f=2 \cdot 10^8$ Гц, $l=4$ см, $h=2$ мм, $m=85\%$, $V_0=9 \cdot 10^3$ В.

3. Определить эффективность дифракции для воды, в предположении, что падающая и дифрагированная световые волны поляризованы параллельно плоскости падения (плоскости xz). В этом случае, задаваясь $L=1\text{мм}$, $\lambda=0,6328$ мкм и выбираем из табл.2 все остальные постоянные, а именно $n=1,33$, $\bar{p}=0,31$, $v=1,5 \cdot 10^3$ м/с, $\rho=1000$ кг/м³ и определить из выражения $I_{\text{диф}} / I_{\text{пад}} = \sin^2(1,4L\sqrt{I_{\text{зс}}})$ эффективность дифракции, где $I_{\text{зс}}$ – интенсивность звука.

4. Имеются два одинаковых волокна, соединенных без зазора. Центры их торцов совмещены, их оси составляют угловое несоответствие (θ). Для $\lambda=1$ мкм, апертурного размера $\omega_0=5$ мкм, показателя преломления $n_2=1,465$ построить

зависимость потерь T от θ ($T_\theta = \exp\left\{-\left(\frac{\pi n_2 \omega_0}{\lambda}\right)^2\right\}$).

Вариант 7

1. В He-Ne-лазере, работающем на длине волны $\lambda = 1,15\text{мкм}$, используется конфокальный резонатор длиной $L=1.2$ м. Вычислите размер пятна в центре

резонатора и на зеркалах.

2. Определить интенсивность амплитудно – модулированного света на выходе из модулятора, если пропустить модулированный свет через анализатор, Расчет провести для кристалла LiNbO_3 в виде прямоугольного стержня (рис.2), входная и выходная грани которого параллельны плоскости главных осей хz. Возбуждение конденсаторное. Длина волны оптического луча $\lambda=0,63\text{мкм}$; частота модулирующего сигнала $f=2 \cdot 10^9$ Гц, $l=2$ см, $V_0=2,9 \cdot 10^3$ В (Табл.1).

3. Определите величину поперечного напряжения, необходимого для поворота плоскости поляризации входного линейно поляризованного светового пучка на 90° в продольном модуляторе при $\lambda=0,547$ мкм для кристаллов: а) дигидрофосфата калия – КДР; б) дигидрофосфата алюминия – АДР.

4. Определить число мод в ступенчатом многомодовом и одномодовом волокне, у которого $n_2=1,4$, $2a_{\text{мод}} = 85$ мкм и $\lambda= 0,85$ мкм, $2a_{\text{ов}} = 8$ мкм, $\Delta_{\text{мб}}=0,05$, $\Delta_{\text{ов}}=0,007$.

Вариант 8

1. В лазере, работающем на длине волны $\lambda=0,69$ мкм и имеющим усиление по мощности за проход $4 \cdot 10^{-2}$ 1/м, используется симметричный резонатор длиной $L=1,2$ м, радиус кривизны обоих зеркал резонатора $R=8$ м. Выберите такой размер апертуры зеркал, чтобы подавить моды кроме основной.

2. Оцените порядок величины угла θ , в случае дифракции света длиной волны $\lambda=0,5$ мкм на звуковой волне частотой 500 МГц, если угловая ширина полосы пропускания определяется выражением

$$\Delta\omega \equiv \frac{2\pi\vartheta}{\Lambda} = \Omega .$$

3. Вычислить долю мощности с длиной волны 0,633 мкм, которая дифрагирует при выполнении условия Брэгга на звуковой волне в PbMoO_4 со следующими характеристиками: акустическая мощность = 1 Вт, поперечное сечение акустического пучка 1 мм x 1 мм, оптическая длина пути L в акустическом пучке равна 1 мм. Из табл. 2 определяется M_w ,

4. Рассчитать коэффициент затухания в ООВ для центральной длины волны стандартного диапазона при ПП сердцевины $n_1 = 1,46$. Потери в кабеле не учитывать.

Вариант 9

1. Размер пятна в перетяжке гауссова пучка, излучаемого He-Ne лазером видимого диапазона, равен $\omega_0 = 0,5\text{мм}$. Вычислить размер пятна пучка и радиус кривизны поверхности равных фаз на расстоянии 10 м от перетяжки.

2. Линейно поляризованная световая волна распространяется в направлении оси X кристалла ниобата лития. Найти величину изменения показателя преломления, если к электродам, нанесенным на грани кристалла, перпендикулярные оси Z (толщина кристалла в этом направлении – 0,5 см), приложено электрическое напряжение в 2 кВ. Плоскость поляризации света

совпадает с плоскостью XOY, длина волны $\lambda=514$ нм. Величина обыкновенного и необыкновенного показателей преломления на данной длине волны составляет 2,3 и 2,24.

3. Какому режиму дифракции (Рамана – Ната или Брэгга) соответствует случай дифракции света с длиной волны $\lambda=633$ нм на акустическом пучке шириной $L=5$ мм при частоте продольных акустических волн 360 МГц в ниобате лития ($n=2,2$)? Скорость продольной волны в ниобате лития $v=6,42 \cdot 10^3$ м/с.

4. Определить возможность работы ОВ в одномодовом режиме на длине волны $\lambda = 1,55$ мкм, имеющего числовую апертуру $NA = 0.145$ и диаметр сердцевинки $d = 9$ мкм.

Вариант 10

1. В лазере, работающем на длине волны $\lambda=0,6$ мкм и имеющим усиление по мощности за проход $2 \cdot 10^{-2}$ 1/м, используется симметричный резонатор длиной $L=1$ м, радиус кривизны обоих зеркал резонатора $R=10$ м. Выберите такой размер апертуры зеркал, чтобы подавить моды кроме основной.

2. Дифракционная эффективность фоторефрактивной решетки составляет 10%. Оценить величину поля пространственного заряда E_{sc} , если решетка сформирована в пластине ниобата лития толщиной 1 мм, вектор решетки параллелен оси Z, считывание осуществляется излучением He-Ne лазера с обыкновенной поляризацией, а период решетки равен 5 мкм.

3. В случае ячейки Поккельса, изготовленной из кристалла KD_2PO_4 (дейтерированный дигидрофосфат калия), при $\lambda=1,06$ мкм, имеем $r_{63}=26,4 \cdot 10^{-12}$ м/В и $n_o=1,51$. Вычислите напряжение, которое необходимо приложить к ячейке, чтобы система находилась в закрытом положении.

4. Межмодовая дисперсия $\Delta T/l$ для волокна со скачкообразным показателем преломления равна 34 нс/км и 2500 нс/км для волокна без оболочки. Определить полосу пропускания для этих волокон.

6.4. Примеры решения типовых задач для индивидуальных расчетных заданий

6.4.1. Взаимодействие излучения с веществом. Спонтанное и вынужденное излучение. Вероятности переходов. Ширина спектральной линии. Характеристики лазерного излучения. Усиление электромагнитных колебаний в среде с инверсной населенностью.

Задача 1.

Создание инверсии населенности при неупругих столкновениях второго рода

Важными процессами при создании инверсии населенности являются:

- процесс электронного возбуждения;
- обмен энергиями между атомами.

Допустим, имеется смесь газов А и Б. Атомы газа А возбуждены за счет столкновений первого рода $A + \bar{e} \rightarrow A^* + e$.

Уровень E_2^A является метастабильным уровнем с большим временем жизни.

$$E_1^A = E_1^B \text{ и } E_2^A = E_3^B.$$

За счет неупругих столкновений возбужденных атомов газа A^* с невозбужденными атомами газа Б происходит заселение уровня E_3^B газа Б, атомы газа А переходят в исходное состояние: $A^* + B \rightarrow A + B^*$.

Обозначим вероятность перехода атома Б с первого уровня на третий за счет столкновения с атомом A^* как W_{AB} и W_{BA} - вероятность обратного процесса, W_{13} - вероятность перехода атомов газа Б за счет столкновений первого рода $B + \bar{e} \rightarrow B^* + e$, W_3 - вероятность процесса девозбуждения третьего уровня.

Скорость изменения населенности третьего уровня газа Б:

$$\frac{dN_3^B}{dt} = N^B(W_{AB} + W_{13}) - N_3^B(W_3 + W_{BA}) - N_3^B \frac{1}{\tau_3}. \quad (1)$$

Второй уровень газа Б практически пуст и процессами перехода со второго уровня на третий пренебрежем. Третий уровень газа Б метастабильный уровень с временем жизни τ_3 .

$$\frac{dN_2^B}{dt} = N_1^B W_{12} + N_3^B \left(W_{32} + \frac{1}{\tau_3} \right) - N_2^B \left(W_{21} + \frac{1}{\tau_3} \right), \quad (2)$$

где W_{32} и W_{31} - вероятности девозбуждения на второй и первый уровни соответственно.

Решаем уравнение (1) считая процесс стационарным ($\frac{d}{dt} = 0$)

$$N_1^B = N_3^B \frac{W_3 + W_{BA} + \frac{1}{\tau_3}}{W_{13} + W_{AB}}.$$

Из (2) $N_3^B \frac{W_3 + W_{BA} + \frac{1}{\tau_3}}{W_{13} + W_{AB}} W_{12} + N_3^B \left(W_{32} + \frac{1}{\tau_3} \right) - N_2^B \left(W_{21} + \frac{1}{\tau_3} \right) = 0$ или $N_3^B \alpha_{13} = N_2^B \alpha_{12}$.

$$\frac{N_3^B}{N_2^B} = \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{13}} > 1 - \text{(условие достижения инверсии населенности.)}$$

Задача 2

Определить коэффициент Эйнштейна по индуцированным переходам на длине волны $\lambda = 0,56$ мкм, если время жизни по спонтанным переходам $\tau = 0,5 \cdot 10^{-7}$ с.

Решение. Спонтанные и индуцированные переходы линейно связаны между собой. Так как в задаче задано время жизни по спонтанным переходам $\tau = 0,5 \cdot 10^{-7}$ с, то легко определить A_{21} - вероятность спонтанных переходов. Подставляя все численные значения в получим величину, определяющую индуцированные переходы

$$V = \frac{c^3 \cdot \lambda^3}{\tau \cdot 8 \cdot \pi \cdot h \cdot c^3} = \frac{\lambda^3}{\tau \cdot 8 \cdot \pi \cdot h} = \frac{(0,56)^3 \cdot 10^{-18}}{0,5 \cdot 10^{-7} \cdot 8 \cdot \pi \cdot 6,63 \cdot 10^{-34}} = 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^3 / (\text{Дж} \cdot \text{с}^2).$$

При $A_{21} = 2 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ частота перехода равна $\nu = 5,36 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$.

Задача 3

Рассчитать доплеровскую ширину линии для лазера с плоско-параллельным резонатором Фабри–Перо на переходе 1,15 мкм. При следующих значениях активной среды: $K = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ – постоянная Больцмана;

$$T = 300^0 \text{ К}, \quad M = 2 \cdot 10^{-24} \text{ г}, \quad c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Решение. Произведем оценку $\Delta \nu_D$ с учетом условий задачи по следующей формуле:

$$\Delta \nu_D = 2\nu_0 \sqrt{\frac{2kT^0 \ln 2}{Mc^2}}. \quad (3)$$

Центральная частота, при заданном переходе 1,15 мкм, равна $\nu_0 = 1,15 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

Подставляя числовые значения, получим: $\Delta \nu_D = 800 \text{ МГц}$.

Задача 4

Изобразить контур спектральной линии, если ширина контура спектральной линии на длине волны излучения в 0,63 мкм равна 150 МГц.

Решение. Так как в задаче заданы резонансная частота и ширина контура, то для изображения контура спектральной линии необходимо использовать формулу контура спектральной линии, которая определяется из следующего выражения

$$g(\nu) = \frac{1/\tau\pi}{\frac{1}{\tau^2} + (2 \cdot \pi \cdot \nu - 2 \cdot \pi \cdot \nu_0)^2}, \quad (4)$$

Так как время естественной релаксации равно $\tau = 1/2\pi\Delta\nu$, то преобразуем (4) к виду

$$g(\nu) = \frac{2 \cdot \Delta\nu}{(2\pi\Delta\nu)^2 + (2\pi \cdot \nu - 2\pi\nu_0)^2} = \frac{2 \cdot \Delta\nu}{(2\pi)^2 \cdot 10^6 \cdot [\Delta\nu^2 + 10^4 \cdot (\nu^2 - 2 \cdot \nu \cdot \nu_0 + \nu_0^2)]},$$

где $\nu_0 = 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Просчитываем несколько значений $g(\nu)$ вблизи ν_0 .

$$g(\nu) := \frac{2 \cdot 150}{4 \cdot \pi^2 \cdot 10^6 \cdot [150^2 + 10^4 \cdot (\nu^2 - 2 \cdot \nu \cdot 4,7 + 4,7^2)]}$$

с интервалом $\nu := -3, -2.9005.. 10$, получим график зависимости $g(\nu)$. Вид требуемой кривой представлен на рис. 1.

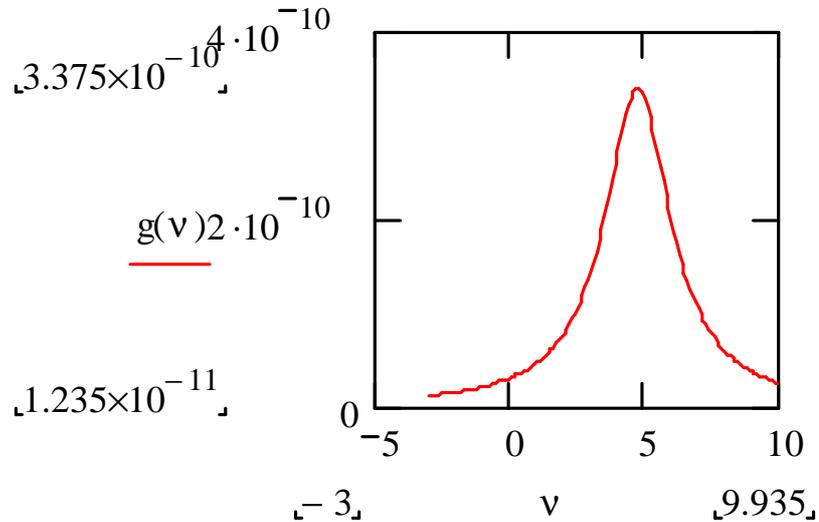


Рис. 1

Задача 5

Атом излучает фотон с длиной волны $\lambda = 0,55 \mu\text{м}$. Известно, что время излучения $\tau \approx 18 \cdot 10^{-14}$ с. Оценить, исходя из соотношений неопределенностей для энергии, неточности в определении указанной длины волны.

Решение. При $\lambda = 0,55 \mu\text{м}$; $\tau = 18 \cdot 10^{-14}$ с неопределенность энергии i уровня согласно уравнению $\Delta E_i = h\nu_{ik}$, где i, k – рабочие уровни (i – верхний, k – нижний уровни), τ_i – время жизни частицы на i -том уровне) равна

$$\Delta E_1 = \frac{h}{\tau} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{18 \cdot 10^{-14}} = 0,3683 \cdot 10^{-20} \text{ Дж.} \quad (5)$$

С другой стороны, частоту определяем из соотношения Эйнштейна

$$\nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{0,3683 \cdot 10^{-20}}{6,63 \cdot 10^{-34}} = 5,55 \cdot 10^{14} \text{ Дж.}$$

Определим длину волны

$$\lambda = c/\nu = 3 \cdot 10^8 / 5,55 \cdot 10^{14} = 0,54 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

При сравнении с заданным значением длины волны видно, что несоответствие равно $0,01 \mu\text{м}$.

Задача 6

Если газ состоит из молекул, то следует рассматривать поступательное движение атомов внутри молекулы. Определить рабочий частотный диапазон переходов для колебательных энергетических уровней. (Справка: $1 \text{эВ} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Дж}$).

Решение. Расстояние между колебательными уровнями разных молекул

находится в пределах $0,1 \div 0,01 \text{ эВ}$.

Определим частоту и длину волны для колебательных энергетических уровней с энергией $0,1 \text{ эВ}$

$$\nu = \frac{0,16 \cdot 10^{-19}}{6,62 \cdot 10^{-34}} = 0,024 \cdot 10^{15} \text{ Гц}, \quad \lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{0,024 \cdot 10^{15}} = 12,5 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Определим частоту и длину волны для колебательных энергетических уровней с энергией $0,01 \text{ эВ}$

$$\nu = 0,0024 \cdot 10^{15} \text{ Гц}, \quad \lambda = 125 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Задача 7

Провести сравнительную оценку длины когерентности для некоторых наиболее применяемых источников света: 1) для белого света $\tau \leq 10^{-4} \text{ с}$;

2) для зеленой линии ртутной лампы ($\lambda_0 = 0,546 \text{ мкм}$) со спектральной шириной $\Delta\lambda = 100 \text{ \AA}$; $\tau = 10^{-13} \text{ с}$; 3) для He-Ne лазера $\lambda_0 = 0,63 \text{ мкм}$; $\Delta f = 1,5 \text{ ГГц}$; $\tau = 2 \cdot 10^{-10} \text{ с}$ – для многомодового режима; 4) для He-Ne лазера $\lambda_0 = 0,63 \text{ мкм}$; $\Delta f = 1,5 \text{ ГГц}$; $\tau = 2 \cdot 10^{-2} \text{ с}$ – для одномодового режима.

Решение. Расстояние, проходимое светом за время когерентности, называют длиной когерентности

$$L_{\text{когер}} = c \cdot \tau \quad (6)$$

1. Для белого света, согласно формуле (6)

$$L_{\text{когер}} = c \cdot \tau = 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-4} = 3 \cdot 10^4 \text{ м.}$$

2. Для зеленой линии, зная ширину спектра генерации, длину когерентности можно определить также по формуле

$$L_{\text{когер}} \approx \frac{c}{\Delta\nu} \quad (7)$$

Подставляем в (6) численные значения параметров, получим

$$L_{\text{когер}} \approx c \cdot \tau = 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-13} = 3 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

3. Для одномодового He-Ne лазера с временем жизни $\tau = 2 \cdot 10^{-10}$ длина когерентности будет равна

$$L_{\text{когер}} = c \cdot 2 \cdot 10^{-10} = 6 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

4. Для He-Ne многомодового лазера с временем жизни $\tau = 2 \cdot 10^{-2}$ длина когерентности будет равна

$$L_{\text{когер}} = c \cdot 2 \cdot 10^{-2} = 6 \cdot 10^6 \text{ м.}$$

6.4.2. Резонаторы. Расчет параметров оптических резонаторов. Параметры и характеристики лазеров. Приемники оптического излучения.

Задача 8

Определить оптимальный коэффициент пропускания зеркал T_p (зеркала одинаковые) резонатора, позволяющий получить максимальную $\chi_0 = 0,1 \text{ см}^{-1}$ выходную мощность. Коэффициент ненасыщенного усиления на проход, коэффициент потерь $\alpha = 0,01 \text{ см}^{-1}$, длина резонатора $L=10 \text{ см}$. Активная среда заполняет весь резонатор. Дифракционными потерями пренебречь.

Решение. Стоячую волну в резонаторе лазера можно рассматривать как суперпозицию двух бегущих волн. Пусть каждая из волн характеризуется интенсивностью J . Выходная мощность лазерного резонатора равна

$$P = T_p J. \quad (8)$$

Удобнее характеризовать потери за счет пропускания зеркал.

$$\alpha_{\text{зер}} = \frac{T_p}{\lambda}. \quad (9)$$

В лазере коэффициент усиления из-за насыщения имеет вид:

$$\alpha = \frac{\chi_0}{1 + \frac{J}{J_0}}, \quad (10)$$

где J_0 – насыщенная интенсивность.

При генерации потери на проход плюс потери на зеркалах должны компенсироваться усилением на проход, т.е. должно выполняться равенство

$$\frac{\chi_0}{1 + \frac{J}{J_0}} = \alpha_{\text{зер}} + \alpha. \quad (11)$$

Выразим из (11) χ_0

$$\chi_0 = \left(1 + \frac{J}{J_0}\right) \cdot (\alpha_{\text{зер}} + \alpha) = \alpha_{\text{рез}} + \alpha + \frac{J\alpha_{\text{рез}}}{J_0} + \frac{J\alpha}{J_0} = \alpha_{\text{зер}} + \alpha + J \left(\frac{\alpha_{\text{зер}}}{J_0} + \frac{\alpha}{J_0} \right),$$

$$J = \frac{\chi_0 - \alpha_{\text{зер}} - \alpha}{\alpha_{\text{зер}} + \alpha} \cdot J_0 = J_0 \cdot \left(\frac{\chi_0}{\alpha_{\text{зер}} + \alpha} - 1 \right). \quad (12)$$

Подставляя (12) в (8), получим

$$P = T_p \cdot J = \alpha_{\text{зер}} L J_0 \left(\frac{\chi_0}{\alpha_{\text{зер}} + \alpha} - 1 \right). \quad (13)$$

Оптимальный коэффициент пропускания зеркал определяется из условия нахождения экстремума выражения (9), т.е. $\frac{\partial p}{\partial \alpha_{\text{зер}}} = 0$

$$\frac{\partial p}{\partial \alpha_{\text{зер}}} = \frac{\partial p}{\partial \alpha_{\text{зер}}} \left(\frac{L J_0 \alpha_{\text{зер}} \chi_0}{\alpha_{\text{зер}} + \alpha} - \alpha_{\text{зер}} L J_0 \right) = 0.$$

Отсюда:

$$T_{p,\text{опт}} = L \alpha_{\text{зеропт}} = L (\sqrt{\chi_0 \alpha} - \alpha).$$

Подставим численные значения

$$T_{p,\text{опт}} = 10 (\sqrt{0,1 \cdot 0,01} - 0,01) = 0,22.$$

Таким образом, оптимальный коэффициент пропускания зеркал резонатора равен $T_{p,\text{опт}} = 22\%$.

Задача 9

Имеется резонатор длиной $L=1$ см. Найдите, сколько мод резонатора находится на полосе $\Delta\lambda = 0,01$ мкм с центральной длиной волны $\lambda_q = 0,6$ мкм.

Решение. Предполагая, что резонатор образован плоскими зеркалами, определим расстояние в Гц между модами резонатора по формуле

$$\Delta\nu_q = \frac{c}{2 \cdot L}. \quad (14)$$

Подставив в (14) числовые значения параметров, получим

$$\Delta\nu_q = \frac{c}{2 \cdot L} = \frac{3 \cdot 10^{10}}{2 \cdot 1} = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ Гц.}$$

При длине волны в 0,6 мкм, частота будет

$$\nu_q = \frac{3 \cdot 10^8}{0,6 \cdot 10^{-6}} = 5 \cdot 10^{14} \text{ Гц.}$$

Число частиц на уровне определяется выражением

$$N = \frac{8 \cdot \pi \cdot \nu^2 \cdot \Delta\nu}{c^3} \cdot V. \quad (15)$$

$$N = \frac{8 \cdot 3,14 \cdot 25 \cdot 10^{28} \cdot 3 \cdot 10^{16} \cdot 1 \cdot 10^{-6}}{27 \cdot 10^{24}} = 0,69 \cdot 10^{16}.$$

В пустом резонаторе уложится

$$q = \frac{\nu_q \cdot 2 \cdot L}{c} = \frac{5 \cdot 10^{14} \cdot 2 \cdot 1 \cdot 10^{-2}}{3 \cdot 10^8} = 3,3 \cdot 10^4 \text{ мод.}$$

На заданной полосе частот $\Delta\nu_{\text{л}} = \frac{3 \cdot 10^8}{1 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-6}} = 3 \cdot 10^{16}$ уложится

$$\frac{\Delta\nu_{\text{л}}}{\Delta\nu_q} = \frac{3 \cdot 10^{16}}{1,5 \cdot 10^{10}} = 2 \cdot 10^6 \text{ мод.}$$

Задача 10

Чему равна ширина первого (главного) дифракционного максимума резонатора с плоскими зеркалами диаметром 10 мм, при длине рабочей волны

$\lambda=0,69$ мкм.

Решение. Максимумы интерференции получаются при условии

$$D \cdot \sin \alpha = 2 \cdot k \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (16)$$

где $k = 1, 2, 3, 4$.

Расстояние от первого дифракционного максимума, заключенного между двумя первыми минимумами, будет определяться из условия

$$\sin \theta_1 = \frac{\lambda}{D}, \quad (17)$$

где θ_1 – угол дифракции, в направлении которого расположен первый минимум. Под таким же углом будет расположен симметричный ему первый минимум. Следовательно, ширина первого (главного) максимума дифракции равна:

$$\Delta \theta_1 = 2 \cdot \arcsin \frac{\lambda}{D},$$

если θ_1 мал, то и $\sin \theta_1 \approx \theta$, и для $\Delta \theta_1$ можем написать

$$\Delta \theta_1 = \frac{2 \cdot \lambda}{D}.$$

Подставляя численные данные получим,

$$\Delta \theta_1 = \frac{2 \cdot 0,69 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 10^{-3}} = 1,38 \cdot 10^{-4} \text{ рад.} \quad \text{Ответ: } \Delta \theta_1 = 1,38 \cdot 10^{-4} \text{ рад.}$$

Задача 11

Имеется активный кристалл длиной 5 см, на котором было замерено усиление сигнала на длине волны равное $\chi_0 = 0,10 \text{ см}^{-1}$, соответствующей инвертированному переходу при определенном заданном уровне накачки. Показатель рассеяния равен $\delta=0,02 \text{ см}^{-1}$, зеркала с коэффициентами отражения $r_1 = 0,8$ и $r_2 = 0,5$. 1) Можно ли добиться генерации с более длинными кристаллами? 2) Можно ли на этом кристалле получить генерацию, уменьшив показатель рассеяния среды?

1. Минимальная длина среды, при которой возникает генерация, определяется по формуле

$$l_{\text{мин}} = \frac{1}{\chi_0 - \delta} \ln(r_1 \cdot r_2)^{-1/2}, \quad (18)$$

где χ_0 – показатель усиления; δ – показатель распределенных потерь в рассматриваемой среде (рассеяние).

$$1. \text{ В нашем случае } l_{\text{мин}} = \frac{1}{0,08} \cdot 0,457 \approx 5,7 \text{ см.}$$

Следовательно, необходимо выбирать кристаллы длиной более 5,7 см.

2. Уменьшим показатель рассеяния δ до величины, меньшей чем $0,001 \text{ см}^{-1}$ (примем $\delta=0,009 \text{ см}^{-1}$).

Выразим из (18) $(\chi_0 - \delta)_{\min}$

$$(\chi_0 - \delta)_{\min} = \frac{1}{l} \ln(r_1 \cdot r_2)^{-1/2} \quad (19)$$

и, подставив в (19) заданные параметры, получим

$$(\chi_0 - \delta)_{\min} = \frac{1}{5} \cdot 0,457 = 0,091.$$

Следовательно, если уменьшить показатель рассеяния до величины, меньшей чем $0,009 \text{ см}^{-1}$, можно получить генерацию на кристалле длиной 5 см.

Задача 12

Вывести оптимальную величину мощности, используя формулу

$$P = \frac{\tau\sigma}{\eta(1+\rho)} \left[\frac{\chi_0 l}{\delta l + \ln(\rho \cdot \rho_0)^{-1/2}} - 1 \right], \quad (20)$$

где P – выходная мощность генерации; τ – коэффициент пропускания выходного зеркала; σ – эффективное сечение среды; η – параметр насыщения; ρ – коэффициент отражения выходного зеркала; χ_0 – ненасыщенный показатель усиления среды; l – эффективная длина активного элемента; ρ_0 – коэффициент отражения глухого зеркала.

Из (20) следует, что мощность генерации возрастает с увеличением ненасыщенного показателя усиления χ_0 и уменьшается с увеличением параметра насыщения рабочего перехода η . Максимально возможное значение мощности генерации получается, если положить $l \rightarrow \infty$ в выражении (20):

$$P = \frac{\tau\sigma}{\eta(1+\rho)} \left[\frac{\chi_0}{\delta} - 1 \right]. \quad (21)$$

Если основной характеристикой является КПД прибора, то длина должна быть такой, чтобы обеспечить максимум удельной мощности, снимаемой с единицы длины кристалла. В этом случае оптимальная длина находится из условия:

$$l_{\text{opt}} = \frac{\ln(r_1 \cdot r_2)^{-1/2}}{\sqrt{\chi_0 \delta} - \delta}. \quad (22)$$

Например, для рассмотренного примера (Задача 11), где $\chi_0 = 0,10 \text{ см}^{-1}$, $\delta = 0,02 \text{ см}^{-1}$, $l = 5 \text{ см}$, находим $l_{\text{опт}}$

$$l_{\text{opt}} = \frac{0,457}{\sqrt{0,1 \cdot 0,02} - 0,02} = 18,5 \text{ см}.$$

Обратимся к зависимости мощности генерации от параметров выходного зеркала r_2 и τ . Из выражения (20) видно, что коэффициент отражения выходного зеркала не должен быть меньше некоторого минимального значения:

$$r_{\text{мин}} = \frac{1}{r_1} \exp[-2(\chi_0 - \delta)l]. \quad (23)$$

При $r_2 < r_{\text{мин}}$ генерация не возбуждается. Но при очень плотных зеркалах выход мощности из резонатора очень мал; в предельном случае, когда $r_2 = 1$ и, следовательно, $\tau = 0$, выходная мощность равна нулю.

Мощность генератора значительно падает с ростом потерь на зеркалах резонатора. Обычно интересуются зависимостью мощности излучения от какого-либо одного вида потерь на глухом зеркале. При этом, очевидно, в общей величине потерь будут присутствовать переменная α и постоянная α_0 . Зависимость мощности излучения от переменной компоненты потерь можно записать так:

$$P_0 = \frac{\tau\sigma}{2\eta} \left[\frac{2\chi_0 l}{(\tau + \alpha_0) + \alpha} - 1 \right], \quad (24)$$

где α – коэффициент анализируемых потерь.

Генерация срывается при значении α , равном

$$\alpha_{\text{пор}} = 2\chi_0 l - \tau - \alpha_0. \quad (25)$$

При очень малых значениях τ мощность генерации растет приблизительно пропорционально τ :

$$P = \frac{\tau\sigma}{2\eta} \left[\frac{2\chi_0 l}{\alpha} - 1 \right]. \quad (26)$$

Затем рост мощности замедляется, функция $P(\tau)$ имеет максимум при некотором оптимальном значении коэффициента пропускания и, наконец, падает до нуля.

Оптимальное значение легко находится приравниванием нулю производной $dP/d\tau$. Таким образом, для случая малых усилений

$$\tau_{\text{опт}} = \sqrt{2\chi_0 l \alpha} - \alpha. \quad (27)$$

Оптимальная величина мощности получается, если подставить значение в исходное выражение (26):

$$P_{\text{max}} = \frac{c}{2\eta} (\sqrt{2\chi_0 l \alpha} - \alpha) \left(\sqrt{\frac{2\chi_0}{\alpha}} - 1 \right). \quad (28)$$

Задача 13

Определить КПД и пороговое напряжение рубинового лазера, размеры которого заданы в следующем виде: $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж, $\omega_{31} = 2 \cdot \pi \cdot 0,5 \cdot 10^{14}$ с⁻¹; $\omega_{21} = 2 \cdot \pi \cdot 4,33 \cdot 10^{14}$ с⁻¹; $l = 80$ мм, диаметр кристалла 6,5 мм; $N_0 = 2 \cdot 10^{19}$ см⁻³; $\tau = 5 \cdot 10^{-3}$ с; $n = 1,76$; $\eta = 0,7$; $\Delta\omega_{\text{л}} = 2 \cdot \pi \cdot 300 \cdot 10^9$ с⁻¹; $r_1 \cdot r_2 = 0,9$; $G = 0,25$; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с; $\eta_{\text{н}} = 50\%$; $\eta_{\text{л}} = 40\%$; $\eta_0 = 40\%$, $c_1 = 300$ мкФ, если при $U_0 = 1,4$ кВ излучаемая энергия равна $P_{\text{изл}}$.

$$S = \pi \cdot R = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (6,5)^2 \cdot 10^{-4}}{4} = 33,16 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2.$$

Решение. Для рубинового лазера порог генерации может быть определен формулой

$$P = \frac{1}{2} \cdot h \cdot \omega_{31} \cdot \ell \cdot S \cdot \left[\frac{N_0}{\eta \cdot \tau} + \frac{n^2 \cdot \omega_{31}^3 \cdot \Delta\omega_{\text{л}} \cdot \left(\sigma + \ln \frac{1}{r} \right)}{4 \cdot \pi \cdot c^2 \cdot \ell \cdot \eta} \right], \quad (29)$$

где N_0 – общее число активных частиц в единице объема вещества; ω_{31} – частота излучения накачки; η – квантовый выход излучения накачки ($\eta = 0,7$); ℓ – длина рубинового стержня, S – площадь поперечного сечения ($S = \pi \cdot d^2$); σ – поперечное сечение; τ – время жизни метастабильного уровня;

Уравнение (29) для рубинового генератора может быть сокращено до первого слагаемого в скобках, т.е. его можно переписать в виде

$$P_{\text{пор}} = \frac{1}{2} \cdot h \cdot \omega_{31} \cdot \ell \cdot S \cdot \frac{N_0}{\eta \cdot \tau}. \quad (30)$$

Подставляя численные данные в (3.61), получим значение $P_{\text{пор}}$:

$$P_{\text{пор}} = \frac{1}{2} \cdot 1,054 \cdot 10^{-34} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 10^{14} \cdot 8 \cdot 33,16 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{2 \cdot 10^{19}}{0,7 \cdot 5 \cdot 10^{-3}} = 3260 \text{ Вт}.$$

Не вся световая энергия накачки концентрируется осветителем в объеме активного элемента, что можно учесть коэффициентом эффективности осветителя (в нашем случае $\eta_0 = 40\%$). Не вся световая энергия, подводимая к лампе накачки, преобразуется в световую, т.е. эффективность лампы $\eta_{\text{л}} = 40\%$. Энергия накачки, реально используемая, определяется коэффициентом $\eta_{\text{н}} = 50\%$. С учетом этих ограничений формула (3.0) переписывается так

$$P'_{\text{пор}} = \frac{P_{\text{пор}}}{\eta_{\text{л}} \cdot \eta_0 \cdot \eta_{\text{н}}}. \quad (31)$$

Энергия, соответственно, также определится из следующего выражения:

$$W'_{\text{пор}} = \frac{W_{\text{пор}}}{\eta_{\text{л}} \cdot \eta_0 \cdot \eta_{\text{н}}}. \quad (32)$$

Просчитывая по формулам (31) и (32), получим

$$P'_{\text{пор}} = \frac{32,6}{0,5 \cdot 0,4 \cdot 9,4} = 407625 \text{ Вт} \text{ и } W'_{\text{пор}} = 407625 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 204 \text{ Вт} \cdot \text{с}.$$

Энергия накачки определяется формулой

$$W_{\text{нак}} = \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot U_{\text{нак}}^2 \quad \text{откуда} \quad U_{\text{нак}} = \sqrt{\frac{2W_{\text{нак}}}{C_1}}. \quad (33)$$

Следовательно, пороговое напряжение равно

$$U_{\text{нак}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 204}{3 \cdot 10^{-4}}} = 1166 \text{ В.}$$

Ответ: $U_{\text{нак}} = 1,16 \text{ кВ.}$

Задача 14

Вычислить оптимальный диаметр активного элемента в случае кристалла со следующими параметрами для рубина: $\chi_0 = 0,1 \text{ см}^{-1}$, $\delta = 0,02 \text{ см}^{-1}$, $r_1 = 0,8$, $r_2 = 0,5$, $l = 20 \text{ см}$, $\chi_{\text{н}} = 1,4 \text{ см}^{-1}$, $\chi_{\text{н}}$ – показатель поглощения излучения накачки, $\chi_{\text{н}}^0 = w_{\text{н}} \exp(-\chi_{\text{н}} \cdot a)$, a – радиус активного элемента, $w_{\text{н}}$ – плотность энергии накачки на поверхности.

Решение. Рациональный диаметр активного элемента можно найти из уравнения:

$$2a = \frac{2}{\chi_{\text{н}}} \ln \left(\frac{w_{\text{н}}}{w_{\text{н}}^*} \right), \quad (34)$$

где $w_{\text{н}}^*$ – плотность энергии накачки в центре. Заменяя в (34) отношение плотностей энергии накачки приблизительно равным ему отношению показателей усиления, найдем радиус активного элемента из следующего соотношения:

$$2a = \frac{2}{\chi_{\text{н}}} \ln \left(\frac{\chi_0}{\chi_0^*} \right), \quad (35)$$

где χ_0^* – пороговое значение параметра усиления записывается в виде

$$\chi_a = \alpha_a + \frac{1}{L} \cdot \ln(r_1 r_2)^{-1/2}, \quad (36)$$

где α_a – потери в активном веществе, $\alpha_s = (1/L) \cdot \ln(r_1 r_2)^{-1/2}$ – потери на зеркале. Из выражения (36), учитывая, что в качестве коэффициента поглощения α , необходимо использовать коэффициент распределенных потерь δ .

Найдем пороговое значение величины χ_0^* :

$$\chi_0^* = \delta + \frac{1}{l} \ln \frac{1}{\sqrt{r_1 r_2}} = 0,02 + \frac{0,457}{20} = 0,043, \text{ см}^{-1}$$

и, подставляя это значение в (35), получим значение диаметра активного элемента

$$2a = \frac{2}{\chi_{\text{н}}} \ln \left(\frac{\chi_0}{\chi_0^*} \right) = \frac{1,68}{\chi_{\text{н}}} = \frac{1,68}{1,4} = 1,2, \text{ см.}$$

Таким образом, оптимальный диаметр в данном случае оказывается

равным 1,2 см.

Задача 15

Свет падает на поверхность натрия, работа выхода которого равна 2,11 эВ.

Найдите энергию фотонов в областях спектра, указанных в а), б), в); максимальные скорости всех фотоэлектронов, если длина волны падающего света принимает следующие значения:

- а) в ультрафиолетовой (УФ) области спектра ($\lambda=330$ и 250 Нм),
- б) в области желтого света ($\lambda=580$ Нм),
- в) в области красного света ($\lambda=644$ Нм).

Решение.

Определяем энергию фотонов по формуле:

$$E=h \cdot \nu = hc / \lambda = 1,24 / \lambda \text{ эВ} \quad (37)$$

- а) $1,24 / 0,33 = 3,76$ эВ;
- б) $1,24 / 0,589 = 2,11$ эВ; $1,24 / 0,25 = 4,96$ эВ;
- в) $1,24 / 0,644 = 1,93$ эВ.

Скорости фотоэлектронов, обладающих наибольшей энергией, определяются из уравнения Эйнштейна.

$$(1/2)m \cdot v_{\max}^2 = h\nu - \phi, \quad (38)$$

где ϕ – фотоэлектрическая работа выхода данного материала, а $h\nu$ – энергия падающего излучения.

- а). В УФ электроны эмигрируют с максимальными скоростями.
для $\lambda=0,33$ мкм

$$v_{\max} = \sqrt{2(h\nu - \phi)m} = \sqrt{2(3,76 - 2,11) \cdot 1,6^{-19} / 9,11 \cdot 10^{-31}} = 0,76 \cdot 10^6 \text{ м/с}; \quad (39)$$

для $\lambda=0,25$ мкм $v_{\max} = 1,0 \cdot 10^6$ м/с.

б). На длине λ желтого света энергии равны (хотя электроны имеют достаточную энергию выхода для преодоления потенциального барьера, но они остаются на поверхности).

- в). При освещении красным светом электроны испускаться не будут.

Задача 16

Уравнение фотоэффекта Эйнштейна. Фотоэлектрическая работа выхода ϕ для калия равна 2,0 эВ. На поверхность калия падает свет $\lambda=0,35$ мкм.

Определить:

- а) Запирающий потенциал V_s .
- б) Кинетическую энергию E_k самых быстрых электронов.
- в) Скорости этих электронов.
- г) Вычислить, насколько изменится запирающий потенциал, если длина волны уменьшится до 348 Нм.

Решение. Энергия фотона определяется формулой (37) $E=1,24/\lambda$ эВ.
Для $\lambda=0,35$ мкм имеем энергию фотона

$$E=1,24/0,35=3,54 \text{ эВ.}$$

Энергия эмиттирования электрона (E_e) представляет собой разность между энергией падающего излучения и работой выхода материала ϕ , т.е.

$$E_e=E_{\text{изл}}-\phi=3,54-2=1,54 \text{ эВ.} \quad (40)$$

а) запирающий потенциал будет $V_s=1,54$ эВ;

б) E_k наиболее быстрых электронов также равна 1,54 эВ;

в) скорость наиболее быстрых электронов определяется выражением $(1/2)mv^2 = 2,46 \cdot 10^{-19}$ Дж;

Получаем $v_{\text{макс}} = 0,74 \cdot 10^6$ м/с.

Уравнение Эйнштейна:

$$h\nu-\phi \text{ или } e \cdot V_s=(hc/\lambda)-\phi, \quad (41)$$

предполагая, что λ мало. Запишем в дифференциальной форме:

$$\delta V_s=hc/l - \delta\lambda/\lambda^2.$$

Поскольку $\delta\lambda=348-350$ Нм, а $\lambda=350$ Нм, получаем, что запирающий потенциал уменьшается на величину $\delta V_s=20,4$ мВ.

Задача 17

Пусть фотодиод имеет работу выхода 2,08 эВ и спектральная чувствительность 20 мкА/пм при освещении его $\lambda=0,546$ мкм. Считая, что световой поток 0,625 мкм на этой λ эквивалентен $\Phi=1$ Вт, вычислить:

а) пороговую частоту,

б) запирающий потенциал, при котором фототок равен нулю,

в) квантовый выход.

Решение. Работа выхода – это разница между падающей энергией излучения и энергией, характеризующей эмиссионные свойства материала.

а) Пороговая частота находится из условия $\phi = h\nu$, где $\nu=\phi/h=502 \cdot 10^{-12}$ Гц, а пороговая длина волны $\lambda=c/F=5,98$ Нм, запирающий потенциал $V_s=h\nu-\phi$, энергия фотонов равна $E=1,24/0,546=2,27$ эВ.

б) Запирающий потенциал – это потенциал, при котором фототок уменьшается до нуля. Запирающий потенциал равен $V_s=h\nu-\phi / \Phi=2,27-2,08=0,19$ В.

в) Квантовый выход – это есть отношение числа испускаемых электронов к числу падающих. Квантовый выход определяется соотношением

$$Q=n_e/n_p=(I/\Pi)/(P/h\nu)=I \cdot h\nu / (\Phi \cdot P),$$

где n_e – число фотонов, падающих на фотокатод в 1с, а излучение с частотой ν несет мощность P .

Подставляя заданные значения, имеем $Q=I \cdot h\nu / \Phi \cdot P=0,03$.

Задача 18

На сурьмяно-цезиевый фотоэлемент с интегральной чувствительностью

$K=100$ мкА/лм падает световой поток Φ , равный 0,15 лм. Последовательно с фотоэлементом включен резистор сопротивлением $R=400$ кОм, с которого сигнал снимается на усилитель управляющим реле с током срабатывания 10 мА при напряжении 220 В. Определить необходимые коэффициенты усиления по мощности и по напряжению, если входной нагрузкой усилителя является сопротивление R и темновой ток фотоэлемента равен нулю.

Решение. Определяем ток фотоэлемента:

$$I_{\Phi} = K_{\Phi} \Phi = 100 \cdot 0,15 = 15 \text{ мкА.} \quad (42)$$

Входная мощность усилителя:

$$P_{\text{вх}} = I^2 R = (15 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 4 \cdot 10^5 = 225 \cdot 10^{-12} \cdot 4 \cdot 10^5 = 9 \cdot 10^{-5} \text{ Вт.} \quad (43)$$

Мощность срабатывания реле:

$$P_p = 220 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 2,2 \text{ Вт.}$$

Коэффициент усиления по мощности:

$$K_p = P_p / P_{\text{вх}} = 2,2 / 9 \cdot 10^{-5} = 2,44 \cdot 10^4. \quad (44)$$

Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = U_p / U_R = U_p / (I_{\Phi} R) = 220 / (15 \cdot 10^{-6} \cdot 400 \cdot 10^3) = 36,7. \quad (45)$$

6.4.3. Пространственное преобразование лазерного пучка. Расчет устройств, позволяющих управлять амплитудой, фазой, частотой и поляризацией оптического излучения. Расчет параметров оптического волокна.

Задача 19

Два сферических зеркала с радиусами кривизны R_1 и R_2 расположены на расстоянии d одно от другого (см рис. 2). Найти минимальный размер пятна светового пучка в резонаторе, его положение и размеры пятен на зеркалах, если длина волны излучения λ . Размер зеркал достаточно велик, так что дифракционными потерями можно пренебречь. $R_1=106$ см., $R_2=-109$ см., $d=99$ см., $\lambda=3,39$ мкм.

Решение:

Радиус кривизны сферической поверхности представляет поверхность постоянной фазы, то есть поверхности, определяющей возможные положения зеркала, и определяется следующим выражением:

$$R(z) = -\frac{z^2 + z_0^2}{z},$$

где z_0 – параметр, определяющий минимальный

размер пятна луча в резонаторе $\rho_0 = \sqrt{\frac{\lambda z_0}{\pi}}$.

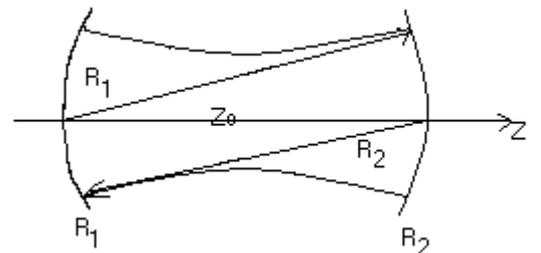


Рис. 2

Для каждого зеркала имеем:

$$\text{а) } R_1 = -\frac{z_1^2 - z_0^2}{z_1} \quad \text{и б) } R_2 = -\frac{z_2^2 - z_0^2}{z_2}, \quad (46)$$

причём $z_2 - z_1 = d > 0$.

$$\begin{aligned} R_1 \cdot z_1 &= -z_1^2 - z_0^2 & z_1 &= -\frac{R_1}{2} \pm \sqrt{\frac{R_1^2}{4} - z_0^2} \\ R_2 \cdot z_2 &= -z_2^2 - z_0^2 & z_2 &= -\frac{R_2}{2} \pm \sqrt{\frac{R_2^2}{4} - z_0^2} \\ z_1^2 - R_1 \cdot z_1 + z_0^2 &= 0 & & \end{aligned} \quad (47)$$

Вычитая из второго равенства (47) первое, учитывая, что $z_2 - z_1 = d$ и возводя результат вычитания дважды в квадрат, имеем:

$$z_0^2 = (-4d^2 + 4d \cdot (R_1 - R_2) - (R_1 - R_2)^2) = d(-d + R_1 - R_2) \cdot (R_1 \cdot R_2 + d(-d + R_1 - R_2))$$

отсюда
$$z_0^2 = \frac{d(R_1 - R_2 - d) \cdot (R_1 - d) \cdot (-R_2 - d)}{((R_1 - R_2) - 2d)^2};$$

подставим данные:

$$z_0^2 = \frac{99(106 + 106 - 99)(106 - 99)(106 - 99)}{(106 + 106 - 99 \cdot 2)^2} = \frac{548163}{14^2} = (52.8 \text{ см.})^2$$

$z_0 = 52.8$ см. – этот параметр определяет минимальный размер пятна в резонаторе:

$$\rho_0 = \sqrt{\frac{3.39 \cdot 10^{-4} \cdot 52.8}{3.14}} = 7.55 \cdot 10^{-2} \text{ см.} = 0.75 \text{ мм.}$$

Тогда:

$$z_1 = -\frac{106}{2} - \sqrt{\left(\frac{106}{2}\right)^2 - (52.8)^2} = -58.1 \text{ см.}$$

$$z_2 = 99 - 58.1 = 40.9 \text{ см.}$$

Таким образом, минимальный размер пятна расположен в плоскости, отстоящей от одного зеркала примерно на 41 см., а от другого на 58 см.

Размеры пятен на зеркалах:

$$\rho_{1,2} = \rho_0 \cdot \sqrt{\left(\frac{z_{1,2}}{z_0}\right)^2}$$

$$\rho_1 = 0.75 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{58}{52.8}\right)^2} = 1.11 \text{ мм.}$$

$$\rho_2 = 0.75 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{40.8}{52.8}\right)^2} = 0.95 \text{ мм.}$$

Задача 20

Оценить угол расхождения пучка основного типа колебаний конфокального резонатора, если $\lambda = 1 \text{ мкм.}$, расстояние между зеркалами $d = R_1 = -R_2 = 2 \text{ м.}$ Апертурный размер зеркал велик и дифракционные эффекты пренебрежимо малы.

Решение:

Угол расхождения пучка основного колебания определяется по формуле: $\Theta = \frac{\lambda}{\pi \rho_0}$, где ρ_0 - минимальный размер луча в резонаторе. Воспользуемся формулой для z_0 из предыдущей задачи при условии, что $R_1 = R_2 = L = d$, тогда:

следовательно, $\rho_0 = \sqrt{\frac{\lambda z_0}{2\pi}} = \sqrt{\frac{\lambda d}{2\pi}}$, тогда

$$\Theta = \sqrt{\frac{2\lambda}{2\pi}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-6}}{3.14 \cdot 2}} = 5.6 \cdot 10^{-4} \text{ рад.} = 1.9'$$

Задача 21

Электрооптический дефлектор предназначен для сканирования коллимированного светового пучка с апертурой $D_{\text{вх}} = 1 \text{ см.}$ Ширина дефлектора $b = 2 \text{ см.}$ Длина волны управляемого излучения $\lambda = 0.63 \text{ мкм.}$ Световой пучок имеет круглое сечение, для которого $\xi = 1.2$. Показатель преломления материала дефлектора $n = 1.5$, максимальное изменение показателя преломления $\Delta n = 2 \cdot 10^{-4}$. Определить максимальную длину пути луча в дефлекторе L_{max} , максимальный угол отклонения светового луча ΔL_{max} и разрешающую способность дефлектора N .

Находим коэффициент, характеризующий приращение угла отклонения на единицу длины пути луча в активной среде (принимаем $D_{\text{вых}} = D_{\text{вх}}$):

$$K_L = \frac{4\Delta n}{2nD_{\text{вых}}D_{\text{вх}}} = \frac{4 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 1.5 \cdot 1 \cdot 10^{-2}} = 2.67 \cdot 10^{-2}, \frac{\text{рад}}{\text{м}}.$$

Определяемый максимальный угол отклонения луча:

$$\begin{aligned}\Delta\alpha_{\max} &= 2[K_L(b - D_{\text{вых}})]^{1/2} = 2 \cdot 2,67 \cdot 10^{-2} (2 \cdot 10^{-2} - 10^{-2})^{1/2} \\ &= 3,26 \cdot 10^{-2} \text{ рад} = 1^{\circ}52' .\end{aligned}$$

Находим максимальную длину пути луча в дефлекторе:

$$L_{\max} = \left(\frac{b - D_{\text{вых}}}{K_L} \right)^{1/2} = \left(\frac{2 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-2}}{2,67 \cdot 10^{-2}} \right)^{1/2} = 0,61 \text{ м}$$

Определяем разрешающую способность

$$N = \frac{2D_{\text{вых}}}{\xi\lambda} [(b - D_{\text{вых}})K_L]^{1/2} = \frac{\Delta\alpha_{\max} D_{\text{вых}}}{\xi\lambda} = \frac{3,26 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-2}}{1,2 \cdot 0,63 \cdot 10^{-6}} = 430 \text{ эл.}$$

Задача 22

Оцените порядок величины угла θ , в случае дифракции света длиной волны $\lambda=0,5$ мкм на звуковой волне частотой 500МГц, если угловая ширина полосы пропускания определяется выражением

$$\Delta\omega \equiv \frac{2\pi\vartheta}{\Lambda} = \Omega . \quad (48)$$

Решение. Выбирая из табл. 1 скорость звука, равную $\vartheta=1,5 \cdot 10^3$ м/с и используя (48), определяем ширину оптической частоты $\Delta\omega$. Связь между $\Delta\omega$ и θ осуществляется через ϑ_{Π} – проекцию скорости объекта на направление распространения волн ($\vartheta_{\Pi}=\vartheta\sin\theta$)

$$\Delta\omega = 2\omega \frac{\vartheta_{\Pi}}{c/n} . \quad (49)$$

Следовательно,

$$\Delta\omega = 2\omega \frac{\vartheta \sin \theta}{c/n} . \quad (50)$$

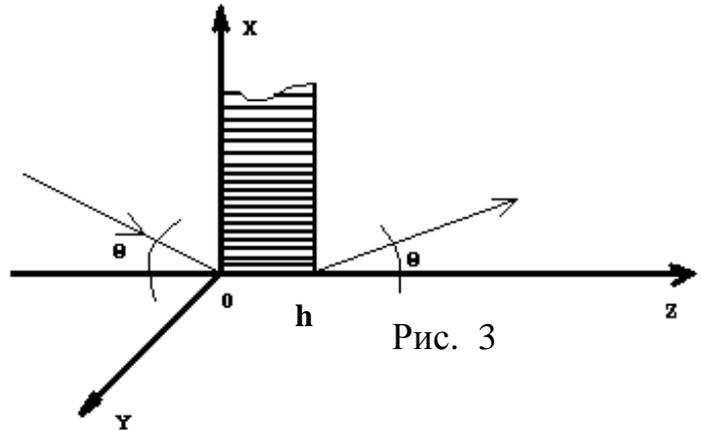
Таблица 1. – Свойства некоторых материалов, используемых обычно для получения дифракции света на звуке

Материал	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	ϑ , км/с	n	p	M	M _w
вода	1,0	1,5	1,33	0,31	160	1/0
плавленый кварц (SiO ₂)	6,3	3,1	1,92	0,25	1,51	0,12
ниобат лития (LiNbO ₃)	4,7	7,4	2,25	0,150	6,99	0,012
сапфир (Al ₂ O ₃)	4,0	11,00	1,76	0,17	0,34	0,001
PbMoO ₄	6,95	3,75	2,30	0,28	73	0,22

ρ – плотность, ϑ – скорость звука, n – показатель преломления, p – эффективный коэффициент фотоурогости, M_w – относительная эффективность дифракции.

Из условия брэгговской дифракции (рис. 3) определяем длину звуковой волны $\Lambda = 3 \cdot 10^{-6}$ м и, подставляя в (48), определяем θ .

$$2\Lambda \sin \theta = \frac{\lambda}{n}, \quad (51)$$



Ответ: $\theta = 6 \cdot 10^{-2}$ рад = $3,6^\circ$.

Задача 23

Определить эффективность дифракции для воды, в предположении, что падающая и дифрагированная световые волны поляризованы параллельно плоскости падения (плоскости xz). В этом случае, задаваясь $L = 1$ мм, $\lambda = 0,6328$ мкм и выбирая из табл.1. все остальные постоянные, а именно $n = 1,33$, $\bar{p} = 0,31$, $\vartheta = 1,5 \cdot 10^3$ м/с, $\rho = 1000$ кг/м³, для нашего примера получаем

$$I_{\text{диф}} / I_{\text{пад}} = \sin^2(1,4L\sqrt{I_{\text{зв}}}), \quad (52)$$

где $I_{\text{зв}} = \frac{1}{2}\rho\vartheta^3\bar{S}^2$ – интенсивность звука.

Из (52) следует, что при низкой эффективности дифракции интенсивность дифрагированного света пропорциональна интенсивности звука. Это явление используется в акустических модуляторах оптического излучения. Для модуляции звука используется сигнал, содержащий передаваемую информацию. Модулированный сигнал, в соответствии с (52), преобразуется в модуляцию интенсивности оптического пучка.

Задача 24

Вычислить долю мощности с длиной волны 0,633 мкм, которая дифрагирует при выполнении условия Брэгга на звуковой волне в PbMoO_4 со следующими характеристиками: акустическая мощность = 1 Вт, поперечное сечение акустического пучка 1 мм x 1 мм, оптическая длина пути L в акустическом пучке равна 1 мм. Из табл. 1. определяем M_w , равное 0,22.

Подставляя эти значения в формулу (52)

$$I_{\text{диф}} / I_{\text{пад}} = \sin^2 \left(1,4 \frac{0,6328}{\lambda(\text{мкм})} \sqrt{M_W I_{\text{зв}}} \right), \quad (53)$$

получаем $I_{\text{диф}} / I_{\text{пад}} \approx 40\%$.

Задача 25

Определить выполняется ли условие одномодового режима для ОВ с $d_c = 6 \text{ мкм}$; $\Delta = 0,005$; $n_2 = 1,447$ на длине волны $\lambda_p = 1,3 \text{ мкм}$.

Решение

Определяем величину $n_1 = \frac{n_2}{1 - \Delta} = \frac{1,447}{1 - 0,005} = 1,454$.

$$\lambda_{\text{отс}} = \frac{d\pi\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{2,405} = \frac{d\pi n_1 \sqrt{2\Delta}}{2,405} = \frac{6\pi \cdot 1,454 \sqrt{2 \cdot 0,005}}{2,405} = 1,14 \text{ мкм}.$$

Полученная длина волны отсечки $\lambda_{\text{отс}} = 1,14 < \lambda_p = 1,3$, т.е. условие одномодового режима выполняется.

Задача 26

Рассчитать коэффициент затухания в ООВ для центральной длины волны стандартного диапазона при ПП сердцевины $n_1 = 1,46$. Потери в кабеле не учитывать.

Решение

Центральная длина волны С диапазона $\lambda = 1550 \text{ нм}$, тогда потери на Релеевское рассеяние:

$$\alpha_{\text{расс}} = \frac{C_R (n_1^2 - 1)}{\lambda^4} = \frac{0,6}{1,55^4} (1,46^2 - 1) \approx 0,12 \text{ дБ / км};$$

потери за счет поглощения в УФ и ИК диапазонах:

$$\alpha_{\text{уф}} = \frac{10^{\frac{2}{\lambda}}}{2154} = \frac{10^{\frac{2}{1,55}}}{2154} = 0,01 \text{ дБ / км}$$

$$\alpha_{\text{ик}} = 10^{\left(\frac{-21,9}{\lambda} + 12,4\right)} = 10^{\left(\frac{-21,9}{1,55} + 12,4\right)} = 0,02 \text{ дБ / км}$$

$$\alpha_{\text{пол}} = \alpha_{\text{уф}} + \alpha_{\text{ик}} = 0,01 + 0,02 = 0,03 \text{ дБ / км}$$

Суммарные потери:

$$\alpha_{\text{собр}} = \alpha_{\text{расс}} + \alpha_{\text{пол}} = 0,12 + 0,03 = 0,15 \text{ дБ / км}.$$

Это теоретический предел затухания на данной длине волны. Типичное значение $\alpha = 0,22 \text{ дБ / км}$ обусловлен наличием микроизгибов.

Задача 27

Многомодовое ОВ (рек G.651 МСЭ-Т), с числовой апертурой $NA = 0,3$, имеет диаметр сердцевины $d = 50 \text{ мкм}$ и ПП $n_1 = 1,47$. Рассчитать

потери на макроизгибах при $R_{изг} = 5 \text{ см}$.

Решение:

$$\alpha_{МАКР} = -10 \lg \left| 1 - \frac{d \cdot n_1^2}{R_{изг} (NA)^2} \right| = -10 \lg \left| 1 - \frac{50 \cdot 10^{-6} \cdot 1,47^2}{5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,3^2} \right| \approx 0,11 \text{ дБ/км.}$$

Задача 28

Одномодовое ОВ (рек. G.652) с параметрами $n_1 = 1,46$; $NA = 0,12$; $d = 8 \text{ мкм}$, $D = 125 \text{ мкм}$, имеет собственные потери $0,15 \text{ дБ/км}$. Определить допустимое значение числа микроизгибов на длине 1 км , если $h = 0,2 \text{ мкм}$.

Решение:

В соответствии с рек. G.652 затухание в ОВ должно быть не более $0,22 \text{ дБ/км}$. Т.к. собственные потери составляют $0,15 \text{ дБ/км}$, то максимально допустимые потери на микроизгибах будут равны $0,22 - 0,15 = 0,07 \text{ дБ/км}$.

Из формулы (2.18) выразим N , получим:

$$N = \frac{\alpha_{МИКР} \cdot D^6 \cdot NA^6}{32 \cdot h^2 \cdot d^4 \cdot n_1^2} = \frac{0,07 \cdot 125^6 \cdot 0,12^6}{32 \cdot 0,2^2 \cdot 8^4 \cdot 1,46^2} \approx 70.$$

Задача 29

Найти нормализованные частоты V_c , ниже которых распространение света в волокне ограничивается единственной модой, для волокон со следующими видами профиля показателя преломления: а) ступенчатый профиль ($\alpha = \infty$); б) параболический профиль ($\alpha = 2$); в) треугольный профиль ($\alpha = 1$)

Решение:

Для волокон с α профилем значение V_c определяется формулой:

$$V_c = 2,405 \cdot \left(1 + \frac{2}{\alpha} \right)^{1/2},$$

При $\alpha = \infty$ имеем $V_c = 2,405 \cdot \left(1 + \frac{2}{\infty} \right)^{1/2} = 2,405,$

$\alpha = 2$ имеем $V_c = 2,405 \cdot \left(1 + \frac{2}{2} \right)^{1/2} = 3,401,$

$\alpha = 1$ имеем $V_c = 2,405 \cdot \left(1 + \frac{2}{1} \right)^{1/2} = 4,165.$

Задача 30

Запишите нормализованные частоты, при которых двенадцать мод низших порядков, распространяющихся в ступенчатых волокнах, испытывают отсечку.

Решение:

Воспользуемся формулой (3.22)

Для мод TE_{0m} , TM_{0m} , EN_{km} . $V_{отс} = t_{km} = U_{km} a.$

Для мод HE_{1m}

$$V_{отс} = t_{s,m-1} = U_{1ma},$$

где $V_{отс}$ – нормализованная частота отсечки, $t_{k,m}$ – корни функции Бесселя.

Следовательно, для мод:

$$\begin{aligned} HE_{11}: & \quad V=0; \\ TE_{01}, TM_{01}, HE_{21}: & \quad V=2,405; \\ HE_{12}, HE_{31}, EH_{11}: & \quad V=3,832; \\ HE_{41}, EH_{21}: & \quad V=5,136; \\ TE_{20}, HE_{22}: & \quad V=5,520. \end{aligned}$$

Задача 31.

Градиентный световод имеет диаметр сердцевины 50 мкм, числовую апертуру $NA=0,2$ и $\alpha=1,85$, α – параметр, определяющий профиль показателя преломления. Определить число мод на длине волны $\lambda=1300\text{нм}$.

Решение:

$$2N = \frac{2\alpha}{\alpha + 2} \cdot \frac{2\pi^2 r^2 NA^2}{\lambda^2} = \frac{2 \cdot 1,85}{1,85 + 2} \cdot \frac{2 \cdot 3,14^2 \cdot 0,2^2 \cdot 25^2 \cdot 10^{-12}}{1,3^2 \cdot 10^{-12}} = 280.$$

Для того чтобы по волокну распространялась только одна мода необходимо выполнение следующего условия

$$d < \frac{0,766\lambda}{NA}.$$

Задача 32

Рассчитать лучевую дисперсию и пространственное уширение импульса для ПВ с параметрами: $n_2 = 1,58$, $\Delta = 0,003$, $z=1\text{м}$.

Решение:
$$n_1 = \frac{n_2}{1 - \Delta} = \frac{1,58}{1 - 0,003} \approx 1,58,$$

лучевую дисперсию рассчитаем по формуле (1.13) из [23] :

$$\tau_\delta = \frac{1}{3 \cdot 10^8} \cdot 1,58 \left(\sqrt{\frac{1}{1 - 2 \cdot 0,003}} - 1 \right) = 1,59 \cdot 10^{-11} \text{с} = 15,9 \text{пс}.$$

Пространственное уширение импульса за время 1нс рассчитаем по формуле (1.14) из [23]:

$$Z_\delta = \frac{c \cdot t}{n_1} \Delta = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-9}}{1,58} \cdot 0,003 \approx 570 \text{мкм}.$$

Задача 33

Вычислить значения числовой апертуры $(NA)^2$, углов α_m и φ_m , а так же величину межмодовой дисперсии $(\Delta T/c)$ и пропускную способность волокна со следующими значениями $n_1=1,470$ $n_2=1,455$.

Решение:

$$(NA)^2 = n_1^2 - n_2^2 = 1,470^2 - 1,455^2 = 0,044$$

числовая апертура волокна. Зная, что $NA = \sin \alpha_m$, найдем α_m :

$$\alpha_m = \arcsin(NA) = \arcsin \sqrt{0,044} = 12,1^\circ.$$

Аналогично выразим и найдем φ_m из $NA = n_1 \sin \varphi_m$, где

$$\varphi_m = \arcsin \frac{NA}{n_1} = \arcsin \frac{\sqrt{0,044}}{1,470} = 8,2^\circ.$$

Величина межмодовой дисперсии:

$$\left(\frac{\Delta T}{c}\right) = \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \left(\frac{n_1 - n_2}{c}\right) = \left(\frac{1,470}{1,455}\right) \left(\frac{1,470 - 1,455}{3 \cdot 10^8}\right) = 5,05 \cdot 10^{-11} = 50,5 \frac{\text{нс}}{\text{км}}.$$

Информационная пропускная способность волокна:

$$\left(\frac{\text{В}}{\text{с}}\right) = \frac{1}{\Delta T/c} = \frac{1}{5,05 \cdot 10^{-11}} = 19,8 \frac{\text{Мбит}}{\text{с}} \cdot \text{км}.$$

Мощность, введенная в световод, является важным параметром системы, который описывается с помощью числовой апертуры NA. Можно записать следующее соотношение:

$$P_c = \left(\frac{m+1}{2}\right) \left(\frac{A_f}{A_e}\right) NA^2 P_e,$$

где P_c – введенная оптическая мощность; P_e – оптическая мощность источника излучения; A_f – площадь сердцевины волокна; A_e – площадь излучающей площадки. Отношение $\frac{A_f}{A_e}$ описывает перекрытие между излучающей площадкой и поверхностью сердцевины волокна

Задача 34

Светоизлучающий диод с $P_e = 5 \text{ мВт}$, $m = 2$, и A_e определяемой толщиной $t = 50 \text{ мкм}$ и шириной $w = 150 \text{ мкм}$, соединен с волокном с $NA = 0,37$ и диаметром сердцевины 85 мкм . Определить мощность, введенную в волокно.

Решение: Площадь сердцевины волокна, перекрываемая прямоугольной поверхностью источника излучения,

$$A_0 = t \sqrt{\left(a^2 - \frac{t^2}{4}\right)} + 2a^2 \arcsin\left(\frac{t}{2a}\right) = 50 \sqrt{\left(42,5^2 - \frac{50^2}{4}\right)} + 2 \cdot 42,5^2 \arcsin\left(\frac{50}{85}\right) = 3990 \text{ мкм}^2$$

$$\frac{A_f}{A_e} = \frac{3990}{50 \cdot 150} = 0,53 < 1.$$

Введенная в волоконный световод мощность излучения:

$$P_c = \frac{3}{2} \cdot 0,53 \cdot 0,37^2 \cdot 5 = 0,546 \text{ мВт}.$$

Обусловленные вводом излучения в волокно потери:

$$\Pi = 10 \lg \frac{5}{0,546} = 9,6 \text{ дБ}.$$

7. РЕЙТИНГОВАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОЦЕНКИ УСПЕВАЕМОСТИ СТУДЕНТОВ

7.1. Методика текущего контроля освоения дисциплины

Осуществляется в соответствии с **Положением о порядке использования рейтинговой системы для оценки успеваемости студентов** (приказ ректора 25.02.2010 № 1902) и основана на бально - рейтинговой системы оценки успеваемости, действующей с 2009 г., которая включает **текущий** контроль выполнения элементов объема дисциплины по элементам контроля с подведением текущего рейтинга (раздел 7) и **итоговый** контроль.

Правила формирования пятибалльных оценок за каждую контрольную точку (КТ1, КТ2) осуществляется путем округления величины, рассчитанной по формуле:

$$КТх|_{x=1,2} = \frac{(Сумма _ баллов, _ набранная _ к _ КТх) * 5}{Требуемая _ сумма _ баллов _ по _ балльной _ раскладке}.$$

Итоговый контроль освоения дисциплины осуществляется на экзамене по традиционной пятибалльной шкале. Обязательным условием перед сдачей экзамена является выполнение студентом необходимых по рабочей программе для дисциплины видов занятий: выполнение и защита результатов лабораторных работ, сдача контрольных работ.

Формирование итоговой суммы баллов осуществляется путем суммирования семестровой (до 70 баллов) и экзаменационной составляющих (до 30 баллов).

7.2. Таблица распределения баллов по элементам контроля (зачет, лекции, лабораторные работы)

Элементы учебной деятельности	Кол-во элементов	Длительность элемента, час.	Кол - во баллов за 1 элемент контроля	Срок контрольная, (неделя с начала семестра)	Кол - во баллов (всего)
Посещение лекций	16	2	0,5	10-18	8
Выполнение контрольных работ на занятиях (КТ1 и КТ2)	3	1	10	12,15.17	30
Выполнение и защита результатов лабораторных работ	3	4	5	10, 12, 14,	15
Выполнение и защита индивидуальных заданий (рефератов)	2	1	16	13, 18	32
Компонент своевременности	5	5	5	10-18	15

Итог					100
-------------	--	--	--	--	------------

Элементы учебной деятельности	Максимальный балл на 1-ую контрольную точку с начала семестра	Максимальный балл за период между 1КТ и 2КТ	Максимальный балл за период между 2КТ и на конец семестра	Всего за семестр
Посещение занятий	5	5,5	5,5	16
Контрольные работы на занятиях (КТ1 и КТ2)	11	5,5	5,5	22
Выполнение и защита результатов лабораторных работ	5	5	5	15
Выполнение и защита индивидуальных заданий (рефератов)	8	16	8	32
Компонент своевременности	5	5	5	15
Итого максимум за период:	34	37	29	100
Контрольный опрос(максимум)				0
Нарастающим итогом	34	37	29	100

7.3. Пересчет баллов в оценки за контрольные точки

Баллы на дату контрольной точки	Оценка
≥ 90 % от максимальной суммы баллов на дату КТ	5
От 70% до 89% от максимальной суммы баллов на дату КТ	4
От 60% до 69% от максимальной суммы баллов на дату КТ	3
< 60 % от максимальной суммы баллов на дату КТ	2

7.4. Пересчет итоговой суммы баллов в традиционную международную оценку

Оценка (ГОС)	Итоговая сумма баллов (учитывает успешно сданный экзамен)	Оценка (ECTS)
5 (отлично)	90-100	A (отлично)
	85-89	B (очень хорошо)

4 (хорошо)	75-84	C (хорошо)
	70-74	D (удовлетворительно)
3 (удовлетворительно)	65-69	E(посредственно)
	60-64	
2(неудовлетворительно)	Ниже 60 баллов	F (неудовлетворительно)

Преобразование суммы баллов в традиционную оценку и в международную буквенную оценку происходит один раз в конце семестра после подведения итогов изучения дисциплины.

8. Учебно – методические материалы по дисциплине

8.1. Основная литература

- 1 Киселев Г.Л. Квантовая и оптическая электроника. Издательство Лань.2011.- 320с.: Режим доступа: <http://e.lanbook.com/view/book/627>(10).

8.2. Дополнительная литература:

2. Калитеевский Н.И. Волновая оптика. - СПб.: Лань, 2006. - 480 с.. (29)
3. Малышев В.А. Основы квантовой электроники и лазерной техники. - М.: Высшая школа, 2005. - 542 с. (39)
- 4.Шангина Л.И. Квантовая и оптическая электроника. УП. Томский государствен-ный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра сверхвысоко-частотной и квантовой радиотехники. - Электрон. текстовые дан. - Томск: [б.и.], 2012.- 228 с.Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/training/publications/714>.
- 5.Ушаков В.Н и др. Оптические устройства в радиотехнике: Учеб. пособие для вузов.- М.: Радиотехника, 2005. -240 с. (70)
- 6.Куш Г.Г., Соколова Ж.М., Шангина Л.И.. Приборы и устройства оптического и СВЧ-диапазонов. - Томск: Издательство научно-технической литературы, 2003. - 556 с. (10)
- 7.Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника. – М: Высшая школа. 2001, - 572с. (159)
- 8.Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи: Пер. с англ. - М.: Техносфера, 2006. – 447 с. (15)
- 9.Бусурин В.И., Носов Ю.Р.. Волоконно - оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения. - М.: Энергоатомиздат, 1990.-240с. (11)
10. В.М. Шандаров. Основы физической и квантовой оптики. – Томск: Томск. гос. Ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2005. – 258 с. (20)
- 11.Заславский К.Е.Волоконно-оптические системы передачи со спектральным уплотнением: Учебное пособие для вузов- Новосибирск: СибГУ , 2005, 136 с. (20)
12. Ефанов В.И. Электрические и волоконно-оптические линии связи : учеб, пособие / В.И. Ефанов. - 2-е изд., доп. - Томск : Томск, гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. — 256 с. ISBN 5-86889-356-5.

13. Оптические и лазерные технологии: Сб. ст. / Под ред. В.Н. Васильева. СПб.: РИО СПбГИТМО, 2001. 252 с.
14. Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и лазерные пучки. М.: Наука, 1990. 263 с.
15. Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения. М.: Наука, 1979. 328 с.
16. Кутаев Ю.Ф., Манкевич С.К., Носач О.Ю., Орлов Е.П. Лазерное приемное устройство с квантовым пределом чувствительности в ближнем ИК диапазоне
Режим доступа: <http://www.fineprint.com>.
17. Богатырева В.В., Дмитриев А. Л. Оптические методы обработки информации/ Учебное пособие. СПб:СПбГУИТМО, 2009. 74 с: [Электронный ресурс].
Режим доступа: http://window.edu.ru/window/library?p_rid=64067 .

8.3. Рекомендуемая литература для самостоятельной работы (для подготовки рефератов и выступлений на семинарах)

18. Шангина Л.И. Квантовая и оптическая электроника. УМП. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники. - Электрон. текстовые дан. - Томск: [б. и.], 2012. - 303 с. Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/training/publications/326>.
19. Линч П. Николайдес А. Задачи по физической электронике. М: «Мир». 1985.
20. Легостаев Н.С. Электроника и микроэлектроника: Учебное пособие. - Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2000. - 176 с.
21. Иванов В.А. О зависимости интенсивности второй гармоники, возбуждаемой в нелинейно-оптическом кристалле, от его структурных и симметричных особенностей /В.А. Иванов, В.А. Бурдов, Н.Ю. Иванов, М.О. Марычев, М.А. Фаддеев, Е.В. Чупрунов //IV Национальная кристаллохимическая конференция. Черноголовка. 26-30 июня 2006 г. Сб. тезисов докладов. доклад С4-13. С.288-289.
22. Краснов В.С. Оптические квантовые генераторы: Режим доступа: <http://www.nstudent.ru/shon.php?id=52787&:1>
23. Ефанов В.И. Сборник задач по волоконно оптическим линиям связи. - Томск: ТУСУР, 2007.-50с.
24. Официальный сайт компании Википедия. Энциклопедический словарь [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http/ wik2. norcon.ru/niki/Резонатор Фабри-Перо](http://wik2.norcon.ru/niki/Резонатор Фабри-Перо).
25. Официальный сайт компании Википедия. Энциклопедический словарь. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.nstudent.ru/shon.php?id=52787&:1>
26. Иванов В.А. О зависимости интенсивности второй гармоники, возбуждаемой в нелинейно-оптическом кристалле, от его структурных и симметричных особенностей/В.А. Иванов, В.А. Бурдов, Н.Ю. Иванов, М.О. Марычев, М.А. 22.Фаддеев, Е.В. Чупрунов //IV Национальная

- кристаллохимическая конференция. Черноголовка. 26-30 июня 2006 г. Сб. тезисов докладов. доклад С4-13. С.288-289.
27. Морозов В. Н. - Оптоэлектронные матричные процессоры...[Электронный ресурс].Режим доступа: <http://www.nstudent.ru/shon.php?id=52787&=:1>
28. Васильев Ю.С. новые технологии № 10 2008. Многофункциональный оптоэлектронный процессор. [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.unn.ru/pages/issues/aids/2007/80.pdf.
- 29.Официальный сайт компании Википедия. Энциклопедический словарь. Многослойные зеркала.[Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.nstudent.ru/shon.php?id=52787&=:1>
- 30.Официальный сайт компании Википедия. Энциклопедический словарь. Резонатор.[Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.nstudent.ru/shon.php?id=52787&=:1>
- 31.Фадеев, Е.В. Чупрунов //IV Национальная кристаллохимическая конференция. Черноголовка. 26-30 июня 2006 г. Сб. тезисов докладов. доклад С4-13 (шумы фотоприемников).. С.288-289.
- 32.Морозов В. Н. - Оптоэлектронные матричные процессоры...[Электронный ресурс].Режим доступа: <http://www.nstudent.ru/shon.php?id=52787&=:1>
- 33.Обзор современной продукции компании Hamamatsu. Особенности и параметры ПЗС- и InGaAs-датчиков изображения, (Компоненты и технологии №10'2011). Статьи представляют собой обзор продукции японской компании Hamamatsu Photonics К. К., в частности ПЗС- и InGaAs-сенсоров из категории оптоэлектронных приборов.
34. Куц Г.Г., Шандаров В.М./ Под ред. Г.Г. Куц. Проектирование оптоэлектронных и квантовых приборов и устройств.УП: Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2007. -101 с.
- 35.Марычев М.О., Горшков А.П. Практическое руководство по оптической спектроскопии твердотельных наноструктур и объемных материалов. «Физико-химические основы нанотехнологий» Нижний Новгород, 2007,89с.
- 36.Белов П.А., Беспалов В.Г., Васильев В.Н., Козлов С.А., Павлов А.В., Симовский К.Р, Шполянский Ю.А. Официальный сайт компании Википедия. оптические процессоры. Режим доступа: [ysa.ifmo.ru>data/publications/BOOK008/paper1-...](http://ysa.ifmo.ru/data/publications/BOOK008/paper1-...)
- 37.Когерентные волоконно-оптические линии связи, предназначенные для работы в цифровых волоконно-оптических линиях связи со скоростью передачи информации 2.155 Мбит/с. Режим доступа: Википедия. [zadachi.org.ru>?n=8605](http://zadachi.org.ru/?n=8605)
- 38.Шандаров В.М. Волоконно-оптические устройства технологического назначения: учебное пособие. – Томск: Томск. Гос. Ун-т систем упр.и радиоэлектроники, 2007. – 190 с. ISBN 978-5-86889-377-3.
39. Справочник по лазерной технике. Под редакцией Ю.В. Байбородина и др. Из-во «Техника»,252601, Киев, 1978.-287с.
40. Богданкевич О.В., и др Полупроводниковые лазеры. М:- Наука. 1976.415с.
41. Свистунова Е.В. Как грамотно оформить, правильно презентовать и успешно защитить письменную работу: Практические рекомендации для студентов вузов. М.: Стерео МИР.2006.-114с.ил.

Учебное издание

Шангина Лидия Ивановна

КВАНТОВАЯ И ОПТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Учебно-методическое пособие
по организации самостоятельной работы
для студентов по дисциплине
«Квантовая и оптическая Электроника»

Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л.-----.
Тираж 30 экз. Заказ-----.

Отпечатано в Томском государственном университете
систем управления и радиоэлектроники.
634050, Томск, пр. Ленина, 40. Тел. (3822) 701518.