



**КАФЕДРА СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ
И КВАНТОВОЙ РАДИОТЕХНИКИ (СВЧКР)**

Г.Г. Куш, В.М. Шандаров

Оптоэлектронные и квантовые приборы и устройства

**Учебно-методическое пособие по организации
самостоятельной работы и практических занятий студентов
специальности 210401 «Физика и техника оптической связи»
очной и заочной форм обучения**

2012

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)**

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧ и КР)

Утверждаю
Зав. кафедрой СВЧ и КР
_____С.Н. Шарангович
"___" _____ 2012г.

Оптоэлектронные и квантовые приборы и устройства

**Учебно-методическое пособие по организации
самостоятельной работы и практических занятий студентов
специальности 210401 «Физика и техника оптической связи»
очной и заочной форм обучения**

Разработчики:
Доцент каф. СВЧ и КР
_____ Г.Г. Куш
Профессор каф. СВЧ и КР
_____ В.М. Шандаров

УДК

УДК 621.391.63

Рецензент:

профессор кафедры СВЧиКР

Мандель А.Е.?

Куц Г.Г., Шандаров В.М.

Оптоэлектронные и квантовые приборы и устройства: Учебно-методическое пособие по организации самостоятельной работы и практических занятий студентов специальности 210401 «Физика и техника оптической связи» очной и заочной форм обучения.

Г.Г. Куц, В.М. Шандаров. – Томск: ТУСУР, 2012. – 61 с.

Самостоятельная работа формирует важнейшие социально-профессиональные компетенции студента. Целью пособия является предметно и содержательно рассмотреть все виды самостоятельной работы при изучении дисциплины «Оптоэлектронные и квантовые приборы и устройства».

Приводится программа курса, его цели и задачи. Каждый раздел программы заканчивается методическими указаниями со ссылкой на литературу. Приведены темы лабораторных и практических занятий.

Представлен перечень вопросов расчетного домашнего задания и даны примеры решения задач, предлагаемых студентам очной формы обучения на практических занятиях и в виде контрольных работ студентам заочной формы обучения. Дан список экзаменационных вопросов и задач по основным разделам курса для самостоятельного решения.

Методические указания предназначены для студентов очной и заочной форм обучения специальности 210401 «Физика и техника оптической связи» и могут быть использованы студентами, обучающимися по направлениям «Телекоммуникации» и «Радиотехника».

УДК
621.391.63

© Томск. гос. ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2012

© Куц Г.Г., Шандаров В.М. 2012

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ.....	7
2. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ.....	8
2.1. Разделы лекционного курса	9
2.2. Лабораторные занятия.	13
2.3. Практические занятия.....	14
2.3.1 Темы практических занятий	14
2.3.2. Примеры решения задач. Тестовые контрольные задания	15
2.3.2.1. Расчет характеристик оптических резонаторов	15
2.3.2.2. Расчет условий усиления и генерации колебаний в квантовых системах	19
2.3.2.3. Изучение процесса селекции мод в оптических резонаторах	23
2.3.2.4. Оценка параметров многослойных диэлектрических зеркал	26
2.3.2.5. Оценка параметров СИД и ЛД на многокомпонентных твердых растворах	30
2.3.2.6. Расчет переходных и частотных характеристик СИД и ЛД	33
2.3.2.7. Расчет параметров планарных оптических волноводов	35
2.3.2.8. Расчет параметров акустооптических модуляторов	38
2.3.2.9. Расчет параметров электрооптических модуляторов	41
2.4. Курсовое проектирование	45
3. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ЗАДАНИЯ	46
4. ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ	51
5. КОНТРОЛЬНЫЕ ЭТАПЫ И ИХ ОЦЕНКА ПО БРС	53
6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	56
Приложение А	58
Приложение Б	60

ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа студентов является одной из важнейших частей учебного процесса при подготовке квалифицированных специалистов, способных самостоятельно и творчески решать стоящие перед ними инженерные задачи. Самостоятельная работа - способ активного, целенаправленного приобретения студентом новых профессиональных знаний и практических навыков без непосредственного участия в этом процессе преподавателей. Особо важное значение самостоятельная работа приобретает для студентов заочной и вечерней форм обучения. В ее ходе формируются важнейшие социально-профессиональные навыки будущего специалиста.

Предметно и содержательно самостоятельная работа студентов определяется образовательным стандартом "Государственные требования к минимуму содержания и уровню подготовки выпускника по направлению 654400 «Телекоммуникации», включающего специальность 210401 - «Физика и техника оптической связи», утвержденным 10.03.2000 (Рег. № 20 тех/дс.) и рабочей программой по дисциплине «Оптоэлектронные и квантовые приборы и устройства», утвержденной в ТУСУРе, а также содержанием учебников, учебных пособий и методических руководств.

К видам самостоятельной работы относятся:

- систематическое чтение и конспектирование литературы;
- выполнение индивидуальных расчетных заданий;
- подготовка к семинарским и практическим занятиям;
- подготовка к лабораторным занятиям;
- самостоятельное углубленное изучение основных вопросов учебной программы;
- написание рефератов по разделам спецкурса;
- подготовка презентаций по вопросам курса, недостаточно освещенным в учебной литературе;
- обработка и анализ экспериментальных данных, полученных при проведении лабораторных работ и выполнении индивидуальных заданий в рамках научно-исследовательских работ и группового проектного обучения;
- подбор материала и выполнение курсовой работы.

Преподаватель знакомит студентов с рабочей программой курса, списком рекомендуемой литературы, методикой работы с литературой, порядком и методикой составления конспектов лекций, с темами и содержанием практических занятий, с методикой написания тезисов, докладов и рефератов, подготовки презентаций.

Профессиональный подход к подготовке специалистов

предусматривает эффективное взаимодействие вуза с работодателями и профессионалами. Кафедра организует консультации, приглашает студентов на обсуждение рефератов, в которых освещаются проблемные материалы, на выставки рекомендованной литературы, пропагандирует наглядные пособия, стенды, видеофильмы. В пользование студентам представляются библиографические списки, в том числе в электронном виде, отечественные и зарубежные. Кафедра организует лекции с приглашением специалистов-практиков.

Умение решать вопросы самообразования позволяет студентам исключить многообразные негативные последствия: консерватизм, приспособленчество, некритический склад мышления, пассивность (познавательная, трудовая, управленческая), неумение и нежелание брать на себя полноту ответственности и т.п.

Мероприятия, создающие предпосылки и условия для реализации самостоятельной работы:

- обеспечение информационными ресурсами (справочники, учебные пособия, банки индивидуальных заданий, пакеты прикладных программ по проверке знаний);
- методические материалы (указания по выполнению лабораторных работ, руководства, практикумы, сборники задач);
- контролируемые материалы (тесты);
- материальные ресурсы (ПК, измерительное и технологическое оборудование);
- консультации преподавателей;
- возможность публичного обсуждения теоретических и/или практических результатов, полученных студентом самостоятельно (конференции, олимпиады, конкурсы);

Контролируемая самостоятельная работа направлена на углубление и закрепление знаний студентов, развитие аналитических навыков по проблематике курса.

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

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ.

1.1. Цели и задачи дисциплины.

Дисциплина “Оптоэлектронные и квантовые приборы и устройства” относится к блоку специальных дисциплин, читаемых для студентов специальности 210401 - “Физика и техника оптической связи”, и является дисциплиной, устанавливаемой государственным образовательным стандартом (ГОС).

Цель преподавания дисциплины “Оптоэлектронные и квантовые приборы и устройства” состоит в подготовке студентов в области элементной базы систем оптической связи.

Основной задачей дисциплины является изучение физических основ, устройства, принципов работы, характеристик и параметров важнейших приборов и устройств, используемых в оптических системах связи. К их числу относятся квантовые генераторы и усилители, оптические модуляторы, фотоприемные устройства, нелинейно-оптические элементы и устройства, голографические и интегрально-оптические компоненты.

В результате изучения настоящей дисциплины студенты получают знания, имеющие не только самостоятельное значение, но и являющиеся фундаментом для изучения ряда последующих специальных дисциплин и практической работы специалистов в области оптической связи.

1.2. Требования к уровню освоения дисциплины.

Студенты должны:

- знать физические основы оптоэлектронных и квантовых приборов;
- знать устройство, особенности, основные характеристики и параметры изучаемых приборов;
- знать основы нелинейной оптики, включая солитоны и голографию;
- знать достоинства интегральной оптики (ИО) и особенности важнейших устройств ИО;
- уметь критически и обосновано подходить к выбору различных оптоэлектронных и квантовых приборов и устройств для конкретных систем оптической связи, сопоставляя особенности используемых материалов и параметры приборов;
- получить навыки практической работы с макетами различных лазеров, модуляторов, дефлекторов и других устройств.

1.3. Перечень обеспечивающих дисциплин.

Данная дисциплина базируется на знаниях, полученных студентами в процессе изучения дисциплин: «Физика», «Электромагнитные поля и волны», «Основы физической и квантовой оптики».

Объем дисциплины и виды учебной работы.

Виды учебной работы	Всего часов	Семестры
Общая трудоемкость дисциплины	136	5, 6
Практические занятия	18	5
Лекции	45	5
Лабораторные работы	18	5
Курсовая работа	16	6
Самостоятельная работа	39	5, 6
Вид итогового контроля	Экзамен	5

2. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ**Разделы дисциплины и виды занятий**

№ п.п.	Раздел дисциплины	Лекции (45 час.)	ЛР (18 час.)	Практ (18 час.)
1	Введение	1	-	-
2	Физические основы и особенности квантовых приборов	4	-	2
3	Оптические резонаторы и селекция мод	4	4	4
4	Типы и режимы работы лазеров	5	4	2
5	Материалы полупроводниковой микро- и оптоэлектроники. Гетеропереходы.	4	-	2
6	Полупроводниковые источники излучения	6	-	2
7	Методы модуляции и управления оптическим излучением	5	6	4
8	Фотодиоды и фотоприемные устройства	4	-	-
9	Оптическое управление СВЧ устройствами	1	-	-
10	Элементы интегральной оптики (ИО)	4	4	2
11	Основы нелинейной оптики	4	-	-
12	Физические основы голографии	3	-	-

2.1. Разделы лекционного курса.

2.1. 1. Введение (1 час).

Этапы развития квантовой электроники. Основные приборы и устройства систем оптической связи и информатики. Задачи курса.

Методические указания.

Необходимо иметь общее представление об особенностях излучения оптического диапазона и областях его применения. По вопросам развития квантовых приборов и оптоэлектронных устройств целесообразно прочитать вводные разделы рекомендуемой литературы.

Следует уяснить, каким образом в различных областях науки и техники используются высокая когерентность и направленность оптического излучения большой мощности, генерация которой может быть осуществлена с помощью приборов оптического диапазона.

2.1.2. Физические основы и особенности квантовых приборов (4 часа).

Виды квантовых переходов. Коэффициенты Эйнштейна. Инверсная населенность. Ширина спектральной линии. Взаимодействие бегущих электромагнитных волн с активной средой. Закон Бугера. Условия усиления и генерации колебаний в квантовых системах.

Методические указания.

При изучении раздела основное внимание необходимо уделить физическим принципам, лежащим в основе работы квантовых приборов оптического диапазона. Следует четко представлять, что излучение и поглощение электромагнитной энергии происходит в результате квантовых переходов атомов (или молекул) с одного энергетического уровня на другой; что излучение может быть спонтанным и вынужденным. Нужно разобраться в процессах, приводящих к уширению уровней, а также к их смещению и расщеплению под действием внешних электрических и магнитных полей.

Требуется иметь представление о характере распределения частиц по энергетическим уровням и о методах создания инверсного распределения в многоуровневых системах.

2.1.3. Оптические резонаторы и селекция мод (4 часа).

Оптические резонаторы. Структуры электрических полей. Схемы оптических резонаторов. Резонатор-интерферометр Фабри-Перо, спектральные характеристики. Многослойные диэлектрические покрытия и интерференционные фильтры. Перестраиваемые резонаторы. Селекция продольных и поперечных мод.

Методические указания.

Необходимо обратить внимание на физику формирования различных типов волн в открытых резонаторах, на физическую суть методов селекции

мод. Литература - [1, 2].

2.1.4. Типы и режимы работы лазеров (5 часов).

Теоретические основы. Трех- и четырех- уровневые лазеры. Стационарные режимы лазеров. Оптимальная обратная связь. Импульсные режимы. Синхронизация мод. Модуляция добротности. Типы лазеров (газовые, твердотельные, жидкостные) и методы их накачки.

Методические указания.

Особое внимание необходимо уделить физическим принципам работы и конструктивным особенностям квантовых приборов оптического диапазона.

При рассмотрении различных активных сред для оптических генераторов и усилителей обратите внимание на способы накачки, к.п.д. преобразования подводимой энергии в световую и степень когерентности излучения, выходную мощность и габариты квантовых приборов.

2.1.5. Материалы полупроводниковой микро- и оптоэлектроники. Гетеропереходы (4 часа).

Одно-, двух-, трех- и четырехкомпонентные полупроводники. Диаграмма связи постоянной кристаллической решетки и ширины запрещенной зоны двойных и тройных полупроводников. Зонная инжекция. Гетеропереходы.

Методические указания.

Наиболее важным при изучении данного разделе является уяснение методики определения составов многокомпонентных полупроводников для обеспечения заданной длины волны излучения полупроводниковых лазеров, а также основных особенностей процесса генерации света в гетеропереходах. Литература - [1, 2, 4д].

2.1.6. Полупроводниковые источники излучения (6 часов).

Полупроводниковые лазеры и светоизлучающие диоды (СИД) на двойных гетеропереходах (на GaAs и InP): устройства, характеристики, параметры. Лазеры с распределенной обратной связью и распределенными брэгговским отражением. Лазеры на квантово- размерных эффектах и сверхрешетках. Оптические усилители: полупроводниковые и волоконные. Шумовые характеристики лазеров.

Методические указания.

Рассмотреть когерентные и некогерентные источники излучения, их свойства, особенности, конструкции, параметры, характеристики. Обратить особое внимание на простоту модуляции излучения инжекционных полупроводниковых излучателей. Иметь представление о различных типах полупроводниковых лазеров, их особенностях и областях применения, достоинствах и недостатках. Иметь четкое представление об

оптических усилителях как полупроводниковых, так и волоконных.

2.1.7. Методы модуляции и управления оптическим излучением (5 час)

Непосредственная модуляция полупроводникового лазера по цепи питания. Внешние модуляторы: электрооптические и акустооптические. Параметры и характеристики модуляторов. Осуществление разных видов модуляции. Дефлекторы.

Методические указания.

Необходимо усвоить принципы построения модуляторов и дефлекторов лазерного излучения, понимать взаимосвязь конструктивных параметров акустооптических и электрооптических модуляторов с характеристиками модуляции излучения, иметь представление об основных рабочих характеристиках и областях применения модуляторов различных типов, способах внешней и внутренней модуляции излучения лазеров. Уделить особое внимание физике электрооптического и акустооптического эффектов, лежащих в основе построения электро- и акустооптических модуляторов и дефлекторов.

2.1.8. Фотодиоды и фотоприемные устройства (4 часа).

Характеристики фотодиодов (ФД). Основные типы ФД: рiп- и лавинные. Гетероструктурные ФД. Фотоприемные устройства. Шумовые характеристики ФД.

Методические указания.

Необходимо иметь четкое представление об особенностях физики процессов разделения зарядов в р-n, р-i-n- и лавинных фотодиодах, их предельных характеристиках, физических причинах шумов фотодиодов и предельно достижимых шумовых характеристиках. Литература - [1, 2, 3д, 4д].

2.1.9. Оптическое управление сверхвысокочастотными (СВЧ) устройствами (1 час).

Достоинства метода. Оптическое управление: усилителями, генераторами (управление, настройка, синхронизация), смесителями и пр. Оптический синтез СВЧ сигналов.

Методические указания.

Необходимо иметь представление о возможностях оптического управления характеристиками СВЧ- устройств, об основных схемах его реализации. Литература - [1, 2, 1д, 3д].

2.1.10. Элементы интегральной оптики (4 часа).

Интегрально-оптические пассивные и управляющие элементы. Полупроводниковые и диэлектрические интегральнооптические лазеры. Оптические устройства информатики.

Методические указания.

Следует четко представлять физическую суть и схемы построения интегрально-оптических пассивных и управляющих элементов на основе планарных диэлектрических волноводов. Обратить внимание на устройства и принцип действия волноводных электрооптических и акустооптических модуляторов, элементов ввода-вывода излучения, на схемы мультиплексирования, устройства обработки радиосигналов в интегральном исполнении.

2.1.11. Основы нелинейной оптики (4 часа).

Нелинейная поляризация. Генерация высших гармоник. Параметрические взаимодействия. Самофокусировка. Многофотонные эффекты. Рассеяние Релея, комбинационное и вынужденное рассеяние. Оптические солитоны.

Методические указания.

Следует четко представлять физическую суть механизмов нелинейно - оптических явлений разного рода и условия их проявления. Литература - [1, 3, 2д].

2.1.12. Оптическая голография (3 часа).

Запись и считывание голограмм. Основные соотношения. Опорный и предметный пучки. Типы голограмм. Голограммы Френеля. Голограммы Фурье: схема записи и структура восстановленного поля. Дифракционная эффективность тонких амплитудных и фазовых голограмм. Объемные голограммы. Пространственный период и ориентация объемной решетки. Условие Брэгга. Дифракционная эффективность пропускающих и отражающих объемных голограмм. Угловая селективность объемных голограмм. Перспективы использования голографии.

Методические указания.

При изучении темы 2.12 обратить особое внимание на основные принципы голографической записи, считывания информации, схемы записи и структуру восстановленного поля.

2.1.13. Разделы, вынесенные на самостоятельную проработку.

- а) Волоконно-оптические лазеры – 2 час.
- б) Лазеры на фотонно-кристаллических структурах – 3 час.
- в) Светодиодные индикаторные элементы – 3 час.
- г) Нелинейно-оптические преобразователи излучения – 3 час.

Формой отчетности по разделам самостоятельной работы (п. 2.2) является реферат, реферат-доклад или презентация. Объем реферата от 10 до 25 печатных страниц. Рекомендации по составлению реферата даны в Приложении В, а рекомендации по оформлению слайдов презентаций - в Приложении Г.

При оценке труда студента преподавателя интересует:

- соответствие содержания выбранной теме;
- глубина проработки материала;
- правильность и полнота использования источников;
- оформление реферата.

2.2. Лабораторные занятия.

Основными целями проведения и выполнения лабораторной работы являются:

- углубленное освоение студентами теоретических положений изучаемой дисциплины “Оптоэлектронные и квантовые приборы и устройства”;
- изучение особенностей строения, принципа действия, исследование основных параметров и характеристик оптоэлектронных приборов и устройств;
- освоение приемов, методов и способов выявления, наблюдения, измерения и контроля характеристик оптоэлектронных приборов и устройств;
- усвоение приемов, методов и способов обработки и представления результатов проведенных исследований.

При выполнении лабораторной работы студент должен продемонстрировать:

- владение соответствующим понятийным и терминологическим аппаратом;
- знакомство с учебно-методической и дополнительной литературой по заданной теме.

Список реальных лабораторных работ:

№ п.п.	№ раздела	Наименование лабораторной работы	Продолж.
1	2.3, 2.4	Исследование пространственной когерентности излучения He-Ne лазера в одномодовом режиме	4 часа
2	2.4	Исследование основных параметров газового лазера	4 часа
3	2.10	Исследование планарных оптических волноводов	4 часа

4	2.7	Устройство ввода информации в оптическую систему	6 часов
---	-----	--	---------

2.3. Практические занятия.

Решение задач способствует развитию навыков практического применения полученных теоретических знаний, а также позволяет глубже понять физическую сущность процессов и явлений в оптоэлектронных и квантовых приборах и устройствах, закрепить в памяти основные формулы, значения и порядок величин их важнейших параметров.

2.3.1 Темы практических занятий (18 час):

№ п/п	№ раздела дисциплины	Тема практических занятий (по 2 час.)
1	3	Расчет характеристик оптических резонаторов
2	2	Расчет условий усиления и генерации колебаний в квантовых системах
3	3	Изучение процесса селекции мод в оптических резонаторах
4	3	Оценка параметров многослойных диэлектрических зеркал
5	5, 6	Оценка параметров СИД и ЛД на многокомпонентных твердых растворах
6	6	Расчет переходных и частотных характеристик СИД и ЛД
7	10	Расчет параметров планарных оптических волноводов
8	7	Расчет параметров акустооптических модуляторов
9	7	Расчет параметров электрооптических модуляторов

Ниже приведен подробный анализ решения некоторых типовых задач на практике, способствующий более глубокому осмыслению студентом изучаемых вопросов, касающихся принципов работы и характеристик оптоэлектронных и квантовых приборов и устройств.

2.3.2. Примеры решения типовых задач. Тестовые контрольные задания.

2.3.2.1. Расчет характеристик оптических резонаторов

Примеры задач, решаемых на практике

Задача №1.

Найдите естественную ширину спектральной линии для квантового перехода в двухуровневой квантовой системе с временем жизни в возбужденном состоянии $t=10^{-9}$ с при частоте перехода 10^{12} Гц.

Решение:

Естественная ширина спектральной линии $\Delta\nu_0$ для двухуровневой квантовой системы определяется соотношением $\Delta\nu_0 = A_{21}/2\pi$, где A_{21} - коэффициент Эйнштейна по спонтанным переходам [1, 4]. Его величина связана с временем жизни системы в возбужденном состоянии τ обратной зависимостью: $A_{21} = 1/\tau$. Соответственно, естественная ширина спектральной линии не зависит от частоты перехода и составляет в данном случае $\Delta\nu_0 = 1/2\pi\tau = 10^9/2\pi \approx 1,59 \cdot 10^8$ Гц = 159 МГц.

Задача №2.

Два сферических зеркала с радиусами кривизны R_1 и R_2 расположены на расстоянии d одно от другого (рис. 1). 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, представляющей поверхность постоянной фазы, то есть поверхности, определяющей возможные положения зеркал, определяется следующим выражением [4]:

$$R(z) = -\frac{z^2 + z_0^2}{z},$$

где z_0 – параметр, связанный с минимальным размером светового пятна в резонаторе (считаем, что поперечное распределение светового поля в резонаторе соответствует фундаментальной моде гауссова пучка и в плоскости перетяжки описывается выражением $\exp(-\frac{r^2}{\rho_0^2})$). Тогда (см. рис

$$1) \rho_0 = \sqrt{\frac{\lambda z_0}{\pi}}.$$

Для каждого зеркала имеем:

$$R_1 = -\frac{z_1^2 - z_0^2}{z_1}; \quad (1a),$$

$$R_2 = -\frac{z_2^2 - z_0^2}{z_2}, \quad (1б)$$

причём $z_2 - z_1 = d > 0$.

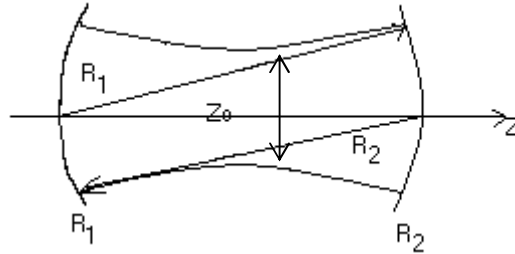


Рис. 1

$$\begin{aligned} R_1 \cdot z_1 &= -z_1^2 - z_0^2 \\ R_2 \cdot z_2 &= -z_2^2 - z_0^2 \\ z_1^2 - R_1 \cdot z_1 + z_0^2 &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z_1 &= -\frac{R_1}{2} \pm \sqrt{\frac{R_1^2}{4} - z_0^2} \\ z_2 &= -\frac{R_2}{2} \pm \sqrt{\frac{R_2^2}{4} - z_0^2} \end{aligned}$$

Учитывая сказанное выше, после простых преобразований 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 и получим:

$$z_0^2 = \frac{99(106 + 106 - 99)(106 - 99)(106 - 99)}{(106 + 106 - 99 \cdot 2)^2} = \frac{548163}{14^2} = (52.8 \text{ см.})^2.$$

Параметр z_0 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 №3.

Ширина линии люминесценции активной среды составляет 10 ГГц при центральной длине волны света $\lambda=0,5$ мкм. Лазер генерирует 10 продольных мод, добротность его оптического резонатора составляет $5 \cdot 10^6$. При какой величине коэффициента отражения зеркал это возможно?

Решение:

При генерировании 10 продольных мод и ширине линии люминесценции 10 ГГц межмодовый частотный интервал составляет 1 ГГц. Из этого условия можно найти расстояние между зеркалами оптического резонатора L (поскольку в условиях иное не оговорено, считаем, что резонатор представляет собой интерферометр Фабри-Перо с плоскими зеркалами): $L=c/2\delta\nu$, где c – скорость света, а $\delta\nu$ – расстояние между соседними продольными модами. Находим $L=3 \cdot 10^8/2 \cdot 10^9=0,15$ м. Поскольку вклад в добротность резонатора Q каких-либо механизмов потерь, кроме коэффициента отражения зеркал, в условиях задачи не сообщается, считаем что ее величина определяется соотношением [2, 3]:

$$Q = \frac{\omega L}{(1-R)c} = \frac{2\pi \cdot L}{\lambda(1-R)},$$

где R – коэффициент отражения зеркал резонатора. Отсюда находим величину R : $R = 1 - \frac{2\pi L}{\lambda Q} = 0,623$.

Пример тестовых контрольных заданий**ВОПРОС 1.**

Каковы размеры открытого оптического резонатора в сравнении с длиной волны света?

ОТВЕТЫ:

- 1) Они одинаковы
- 2) Длина волны света много больше размеров резонатора
- 3) Размеры резонатора много больше длины волны света
- 4) Расстояние между отражающими поверхностями равно половине длины волны света
- 5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 2.

Каким соотношением определяется собственная частота продольных мод открытого оптического резонатора?

ОТВЕТЫ:

- 1) $\nu_p = p \frac{L}{2\lambda}$ 2) $\nu_p = p \frac{c}{2L}$
 3) $\nu_p = p \frac{\lambda}{2c}$ 4) $\nu_p = p \frac{L}{2\lambda}$ 5) правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 3.

Каким соотношением определяется расстояние между соседними продольными модами резонатора Фабри-Перо?

ОТВЕТЫ:

- 1) $\delta\nu = \frac{\lambda}{2c}$ 2) $\delta\nu = \frac{c}{2L}$ 3) $\delta\nu = \frac{c}{L}$ 4) $\delta\nu = \frac{\lambda}{2L}$
 5) правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 4.

Может ли оптический резонатор состоять из двух полностью отражающих зеркал (зеркала с коэффициентом отражения $R=1$)?

ОТВЕТЫ:

- 1) Нет
 2) Да, но тогда он не будет оптическим
 3) Да
 4) Все оптические резонаторы именно такими и являются
 5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 5.

Что понимается под поперечными модами открытого оптического резонатора?

ОТВЕТЫ:

- 1) Поле, образующееся в резонаторе при распространении плоских световых волн в направлениях, ортогональных его оптической оси
 2) Поле, образующееся при распространении в резонаторе плоских световых волн в направлениях, параллельных его оптической оси
 3) Поле, образующееся в резонаторе при распространении и интерференции плоских световых волн в направлениях, составляющих с оптической осью резонатора некоторый угол, меньший чем 90°
 4) Таких мод не бывает
 5) Правильного ответа не приведено.

2.3.2.2. Расчет условий усиления и генерации колебаний в квантовых системах

Примеры задач, решаемых на практике

Задача №1.

Какова добротность резонатора Фабри-Перо (зеркала одинаковы), если в нем возможна лазерная генерация на длине волны $\lambda=0,5$ мкм при коэффициенте усиления активной среды $\kappa_a=0,1$ см⁻¹ и потерях на рассеяние света в этой среде $\alpha = 0,08$ см⁻¹. Длина резонатора $L=50$ см, рассеянием света и его дифракцией при отражении от зеркал можно пренебречь.

Решение:

Величина добротности резонатора может быть найдена из соотношения: $Q = \frac{2\pi \cdot L}{\lambda(1-R)}$. Величину коэффициента отражения зеркал R

можно найти из условия баланса амплитуд, определяющего возможность лазерной генерации при отсутствии дифракционных потерь и потерь на рассеяние света при отражении от зеркал:

$$\kappa_a = \alpha + \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{R}\right), \text{ где } R - \text{коэффициент отражения зеркал по амплитуде [2, 3].}$$

Отсюда $R = \exp[-(\kappa_a - \alpha)L]$ или, подставив значения коэффициентов усиления и потерь, получим $R = \exp(-1) = 0,368$. С учетом этого величина добротности резонатора составит $Q = 9,94 \cdot 10^6$.

Задача №2.

Зеркала резонатора имеют коэффициенты отражения $r_1=1$ и $r_2=0,9$ и нанесены прямо на торцы стержня из активного вещества длиной $L=10$ см. Потерями в стержне и зеркалах (за исключением потерь на излучение) следует пренебречь.

Найти величину коэффициента квантового усиления активной среды, необходимую для возникновения генерации лазера, а также минимальную длину, которую может иметь рубиновый лазер с такими зеркалами, при коэффициенте усиления рубина $0,3$ см⁻¹.

Решение:

Без учета дифракционных потерь и потерь в среде величина порогового коэффициента квантового усиления определяется выражением [2]:

$$\kappa_a = \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{r_1 r_2}\right)$$

Отсюда получаем $\kappa_a = 0,005$ см⁻¹, $L = 0,17$ см.

Задача №3.

Резонатор оптического квантового генератора образован зеркалами с коэффициентами отражения $R_1=R_2=0,5$, расположенными на расстоянии 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. Для простоты считать, что при введении поглотителя размеры активной среды остаются неизменными, толщиной поглотителя пренебречь.)

Решение.

Для получения условия самовозбуждения рассмотрим распространение волны в резонаторе (рис. 2).

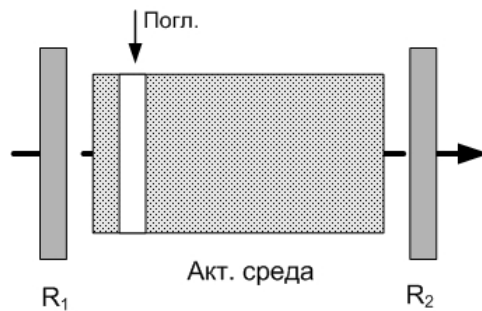


Рис. 2

Пусть от зеркала 1 ($R_1=R$) 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 $I_0 e^{\alpha L_1}$ где α - коэффициент квантового усиления активной среды.

Обозначим через δ_{11} долю поглощаемой поглотителем интенсивности и тогда после поглотителя интенсивность волны равна

$$I_0 (1 - \delta_1) e^{\alpha L_1}.$$

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

$$I_0 (1 - \delta_1) e^{\alpha L_1} e^{\alpha L_2} = I_0 (1 - \delta_1) e^{\alpha L}.$$

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

$$R I_0 (1 - \delta_1) e^{\alpha L}.$$

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

$$R^2 I_0 (1 - \delta_1)^2 e^{2\alpha L}.$$

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

$$I_0 = R^2 I_0 (1 - \delta_1)^2 e^{2\alpha L} \text{ или } R^2 (1 - \delta_1)^2 e^{2\alpha L} = 1.$$

Отсюда условие для порогового коэффициента усиления имеет вид:

$$\alpha_0 L = \frac{1}{2} \ln \frac{1}{R^2 (1 - \delta_1)^2} = \ln \frac{1}{R(1 - \delta_1)}.$$

При отсутствии поглотителя ($\delta_1 = 0$), $\alpha_0 L = \ln \frac{1}{R}$.

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

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = \frac{\ln \frac{1}{R(1 - \delta_1)}}{\ln \frac{1}{R}}.$$

При $R=0,5$ и $\delta_1=50\%$ - $\frac{\alpha}{\alpha_0} = 2$.

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

Пример тестовых контрольных заданий

ВОПРОС 1.

Каким соотношением определяется коэффициент усиления активной среды κ_a ?

ОТВЕТЫ:

1) $\kappa_a = \frac{A_{21} h \omega_{21}}{v_g} \cdot (N_2 - N_1)$, где A_{21} – коэффициент Эйнштейна для спонтанных

переходов, h – постоянная Планка, ω_{21} – частота перехода, v_g – групповая скорость электромагнитной волны, $N_{1,2}$ – населенности уровней.

2) $\kappa_a = \frac{B h \omega_{21}}{v_g} \cdot (N_2 - N_1)$, где B – коэффициент Эйнштейна для вынужденных

переходов, h – постоянная Планка, ω_{21} – частота перехода, v_g – групповая скорость электромагнитной волны, $N_{1,2}$ – населенности уровней.

3) $\kappa_a = \frac{B h \omega_{21}}{v_g} \cdot (N_1 - N_2)$, где B – коэффициент Эйнштейна для вынужденных

переходов, h – постоянная Планка, ω_{21} – частота перехода, v_g – групповая скорость электромагнитной волны, $N_{1,2}$ – населенности уровней.

- 4) $\kappa_a = \frac{Bh\omega_{21}}{kT} \cdot (N_2 - N_1)$, где B – коэффициент Эйнштейна для вынужденных переходов, h – постоянная Планка, ω_{21} – частота перехода, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, $N_{1,2}$ – населенности уровней.
- 5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 2.

Что определяется условием баланса фаз при рассмотрении явлений лазерной генерации?

ОТВЕТЫ:

- 1) Минимальная величина оптических потерь, обеспечивающая генерацию лазерного излучения
- 2) Возможность одномодового режима генерации
- 3) Ширина спектральной линии генерируемого излучения
- 4) Наличие конструктивной интерференции, т.е. положительной обратной связи в оптическом резонаторе
- 5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 3.

Условие баланса амплитуд при рассмотрении явлений лазерной генерации определяет:

- 1) Длину волны излучения лазера
- 2) Ширину спектральной линии генерируемого излучения
- 3) Пороговое условие для возникновения лазерной генерации
- 4) Состояние поляризации лазерного излучения
- 5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 4.

Какое из соотношений определяет пороговую величину коэффициента квантового усиления κ_a активной среды лазера?

ОТВЕТЫ:

- 1) $\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 + \frac{4\pi}{\lambda}L = 2\pi \cdot m$
- 2) $\kappa_a = \alpha + \frac{1}{L}$
- 3) $\kappa_a = \alpha + \frac{1}{L} \ln \sqrt{\frac{R_1 \cdot R_2}{(1-\xi)^2}}$

$$4) \kappa_a = \alpha + \frac{1}{L} \ln \sqrt{\frac{I}{R_1 \cdot R_2 \cdot (1 - \xi)^2}}$$

5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 5.

Какое из утверждений является наиболее правильным?

- 1) Длина волны лазерного излучения определяется условием баланса амплитуд
- 2) Выходная мощность лазера определяется добротностью оптического резонатора
- 3) Ширина спектральной линии излучения лазера определяется добротностью оптического резонатора
- 4) Поляризация лазерного излучения зависит от типа активной среды
- 5) Поляризация лазерного излучения зависит от добротности оптического резонатора

2.3.2.3. Изучение процесса селекции мод в оптических резонаторах

Примеры задач, решаемых на практике

Задача №1.

Ширина спектральной линии активной среды составляет $\Delta\nu=1$ ГГц при центральной длине волны света 0,5 мкм. Найдите расстояние между плоскими зеркалами открытого оптического резонатора, при котором лазер на основе такой среды может генерировать излучение в виде одной продольной моды.

Решение.

Межмодовое расстояние $\delta\nu$ для оптического резонатора составляет $\delta\nu=c/2L$. Для генерирования одной продольной моды необходимо, чтобы это расстояние было больше ширины линии люминесценции активной среды, т.е. $c/2L > \Delta\nu$, откуда получим условие одномодовой генерации в виде $L < c/2\Delta\nu$. Соответственно, получим: $L < 15$ см.

Задача №2.

Ширина спектральной линии активной среды составляет 3 ГГц при центральной длине волны света 0,5 мкм. Лазер генерирует 10 продольных мод. Для уменьшения числа генерируемых мод до 5 используется дополнительное внешнее зеркало, образующее с основными составной резонатор. Какими должны быть расстояния между зеркалами такого резонатора?

Решение.

Межмодовое расстояние $\delta\nu$ для основного оптического резонатора составляет 300 МГц. Этому соответствует расстояние между зеркалами резонатора $L=c/2\delta\nu$, где c – скорость света. Соответственно, $L=3\cdot 10^8/2\cdot 3\cdot 10^8=0,5$ м. Для уменьшения числа генерируемых мод вдвое необходимо вдвое увеличить разность частот соседних продольных мод. Очевидно, что для этого необходимо уменьшить в два раза расстояние между зеркалами дополнительного резонатора в сравнении с таковым для основного. Таким образом, вспомогательное зеркало должно отстоять от основного на 0,25 м.

Задача №3.

Ширина спектральной линии активной среды составляет 10 ГГц при центральной длине волны света 0,5 мкм. Оцените характеристики излучения лазера с использованием данной активной среды при обеспечении режима синхронизации продольных мод в оптическом резонаторе с расстоянием между зеркалами 1 м. Каковы длительность импульса излучения, частота следования импульсов, соотношение пиковой мощности излучения с мощностью излучения в режиме генерации одной продольной моды?

Решение.

В режиме синхронизации продольных мод их число N определяется шириной линии люминесценции $\Delta\nu$ и разностью собственных частот таких мод $\delta\nu$ ($\delta\nu = c/2L$), где c – скорость света и L – длина резонатора. Ответственно, находим $N= \Delta\nu/\delta\nu=66$ продольных мод. Длительность импульса излучения в N раз меньше периода резонатора, под которым понимается время $T=2L/c$ (время двукратного прохода света по длине резонатора). Таким образом, длительность импульса излучения в данном случае составит $\tau=2L/Nc\approx 10^{-10}$ с. Частота следования импульсов излучения определяется временем T и равна $f=1/T=\delta\nu$, т.е. $f=1,5\cdot 10^8$ Гц (150 МГц). В предположении равенства мощностей всех генерируемых продольных мод пиковая мощность излучения в режиме их синхронизации в N^2 , т.е. в 4356 раз превышает мощность излучения в режиме одной продольной моды.

Пример тестовых контрольных заданий**ВОПРОС 1.**

В некоторых газовых лазерах, производимых промышленностью в конце 60-х годов прошлого века, в оптический резонатор вводилась ирисовая диафрагма. С какой целью это делалось?

ОТВЕТЫ:

- 1) Изменяя размер ее отверстия, можно было варьировать число продольных мод, генерируемых лазером.
- 2) Изменяя размер ее отверстия, можно было варьировать число поперечных мод, генерируемых лазером.
- 3) Изменяя размер ее отверстия, можно было перестраивать центральную частоту спектральной линии излучения лазера.
- 4) Изменяя размер ее отверстия, можно было варьировать положение плоскости поляризации лазерного излучения.
- 5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 2.

Во многих газовых лазерах выходные окна газоразрядной трубки наклонены относительно ее оси под углом Брюстера. Приводит ли это к изменению числа генерируемых мод в сравнении с их расположением под другим углом?

ОТВЕТЫ:

- 1) Да, число генерируемых мод уменьшается.
- 2) Да, число генерируемых мод возрастает.
- 3) Нет, это приводит лишь к изменению состояния поляризации излучения.
- 4) Нет, это приводит лишь к увеличению мощности излучения излучения.
- 5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 3.

Можно ли реализовать режим генерации только продольных мод в газовых лазерах, изменяя диаметр газоразрядной трубки при одинаковой длине резонатора?

ОТВЕТЫ:

- 1) Да, для этого диаметр трубки должен составлять 10% от длины резонатора.
- 2) Нет, это приводит лишь к изменению мощности излучения.
- 3) Нет, это приводит лишь к изменению длины волны излучения.
- 4) Да, для этого необходимо максимально уменьшить диаметр трубки.
- 5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 4.

Для трехкратного уменьшения числа продольных мод, генерируемых в газовом лазере, его оптический резонатор выполнен составным, расстояние между двумя зеркалами, между которыми находится газоразрядная трубка, равно L_1 . Дополнительное зеркало расположено от одного из основных на расстоянии L_2 . Каким должно быть соотношение этих расстояний?

ОТВЕТЫ:

- 1) $L_1 = L_2$
- 2) $L_1 = 2L_2$
- 3) $2L_1 = L_2$
- 4) $L_1 = 3L_2$
- 5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 5.

Возможно ли обеспечить режим генерирования только одной продольной моды в лазере за счет уменьшения поперечных размеров объема, занимаемого активной средой?

ОТВЕТЫ:

- 1) Нет, для этого необходимо увеличить расстояние между зеркалами оптического резонатора.
- 2) Нет, для этого предпринять специальные меры.
- 3) Да, для этого поперечные размеры не должны превышать длину волны генерируемого излучения.
- 4) Да, но при этом ухудшается когерентность излучения.
- 5) Правильного ответа не приведено.

2.3.2.4. Оценка параметров многослойных диэлектрических зеркал

Примеры задач, решаемых на практике

Задача №1.

На тонкую плоскопараллельную пластинку из плавного кварца (показатель преломления $n=1,468$) в направлении ее нормали падает плоская световая волна с амплитудой $E_0=100$ В/м. Найдите амплитуду прошедшей через пластинку волны, пренебрегая вкладом вторичных волн, наличие которых обусловлено многократным переотражением света в пластинке. Окружающая среда – воздух.

Решение.

Коэффициент отражения света при его нормальном падении на границу раздела двух диэлектрических сред по амплитуде определяется соотношением $R = \frac{n-1}{n+1}$. Используя понятия отражательной и пропускательной способностей (r и t) или отражения и пропускания по интенсивности, в отсутствие поглощения света на границе (этому соответствует условие $r+t=1$) амплитуда прошедшей в среду волны будет определяться соотношением $E_{\text{пр}}=E_0(1-r)^{1/2}$. При выходе света из пластинки

в среду, очевидно, она составит $E_{\text{вн}}=E_{\text{пр}}(1-r)^{1/2}=E_0(1-r)$, где $r=R^2$. Соответственно, $E_{\text{вн}}=E_0(1-0,468^2/2,468^2)=100 \cdot 0,964=96,4$ В/м.

Задача №2.

На плоскопараллельную пластинку из плавленного кварца (показатель преломления $n=1,468$) толщиной 0,5 мм в направлении ее нормали падает плоская световая волна. Найдите коэффициент пропускания данной пластинки по интенсивности для длин волн света $\lambda=0,5$ мкм и 0,6 мкм с учетом эффекта многолучевой интерференции, обусловленной многократным переотражением света в пластинке. Окружающая среда – воздух.

Решение.

Коэффициент пропускания плоскопараллельной пластины η можно найти из результатов анализа интерферометра Фабри-Перо, в случае нормального падения света он имеет вид:

$$\eta = \frac{t^2}{(1-r)^2 + 4 \cdot r \cdot \sin^2(2\pi nd / \lambda)},$$

где $r = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}$ - коэффициент отражения света по интенсивности при

нормальном падении на границу раздела, $t=1-r$, d – толщина пластинки. Подставляя заданные значения параметров сред и длину волны света в данное соотношение, получим $\eta=1$ и $\eta=0,896$ для длин волн света $\lambda=0,5$ мкм и 0,6 мкм.

Задача №3.

Две пластины из стекла с нанесенными полупрозрачными металлическими покрытиями расположены на расстоянии L с постоянным показателем преломления среды между ними n (рисунок 2). Подобная система представляет собой интерференционный фильтр и требуется получить максимум его пропускания при нормальном падении света на длине волны $\lambda=500$ нм.

Для промежуточного вещества с показателем преломления $n=1,35$ (криолит), определите возможные значения расстояния между зеркальными поверхностями L . Желательно иметь только одну полосу пропускания между $\lambda=400$ и $\lambda=750$ нм (фазовым сдвигом при отражении от металлизированных поверхностей можно пренебречь).

Решение.

Максимумы пропускания соответствуют конструктивной интерференции света в фильтре, т.е. разности хода лучей $2nL=m\lambda_i$, где m –

целые числа, указывающие на порядок интерференции для длин волн λ_i . Очевидно, что максимум пропускания фильтра на заданной длине волны света λ_m достигается при расстоянии между зеркалами $L=m\lambda_m/2n$. При том же расстоянии между зеркалами длин волн, соответствующие соседним (в сторону уменьшения и увеличения) максимумам пропускания определяются соотношениями: $\lambda_{m+1}=2nL/(m+1)$; $\lambda_{m-1}=2nL/(m-1)$. Согласно условию задачи $\lambda_{m+1}<400$ нм, а $\lambda_{m-1}>750$ нм. Соответственно, порядок интерференции m для фильтра должен удовлетворять условиям $m<4$ (из требования $\lambda_m/\lambda_{m+1}>500/400$) и $m<3$ (из требования $\lambda_m/\lambda_{m-1}<500/750$). Таким образом, условию задачи удовлетворяют его значения $m=1$ и $m=2$. Соответственно, параметр интерференционного фильтра L может составлять $L=m\lambda_m/2n=500/2\cdot 1,35=185,19$ нм или $L=500\cdot 2/2\cdot 1,35=370,38$ нм.

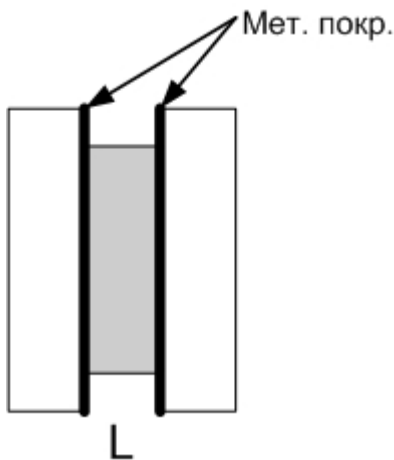


Рис. 2. Схема конструкции интерференционного фильтра

Пример тестовых контрольных заданий

ВОПРОС 1.

Зеркала газовых лазеров, работающих в видимом диапазоне, как правило, представляют собой многослойные диэлектрические структуры на прозрачной диэлектрической подложке. Почему для этого не используются (или очень редко используются) металлические пленки на той же подложке?

ОТВЕТЫ:

- 1) Металлические пленки имеют слишком низкий коэффициент отражения для света видимого диапазона
- 2) Технология нанесения металлических пленок на подложку значительно сложнее, чем процесс получения многослойных диэлектрических зеркал
- 3) Металлические пленки обладают более высоким поглощением света в видимом диапазоне, чем диэлектрические
- 4) Металлические пленки не позволяют получить лазерное излучение с линейной поляризацией

5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 2.

Какова максимальная величина коэффициента отражения многослойных диэлектрических зеркал?

ОТВЕТЫ:

- 1) Практически единица
- 2) 0,5
- 3) От 0,7 до 0,9
- 4) Менее 0,5
- 5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 3.

Зависит ли от длины волны света величина коэффициента отражения зеркал с многослойным диэлектрическим покрытием?

ОТВЕТЫ:

- 1) Нет, не зависит
- 2) Да, зависит
- 3) В видимом диапазоне эта зависимость очень слаба
- 4) Зависит, но только в инфракрасном диапазоне
- 5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 4.

Как устроены интерференционные оптические фильтры?

ОТВЕТЫ:

- 1) Это тонкие диэлектрические пленки, нанесенные на противоположные поверхности диэлектрической пластины.
- 2) Это диэлектрические пленки с толщиной $\lambda/4$, нанесенные на противоположные поверхности диэлектрической пластины.
- 3) Это металлические пленки с толщиной $\lambda/2$, нанесенные на противоположные поверхности диэлектрической пластины.
- 4) Это тонкие полупрозрачные металлические пленки, нанесенные на противоположные поверхности диэлектрической пластины.
- 5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 5.

Что из себя представляют просветляющие покрытия на поверхности оптических элементов?

ОТВЕТЫ:

- 1) Это диэлектрические пленки с толщиной $\lambda/2$ на поверхности оптического элемента.
- 2) Это тонкие полупрозрачные металлические пленки на поверхности оптического элемента.
- 3) Это диэлектрические пленки с толщиной $\lambda/4$ и показателем преломления $n=(n_1 \cdot n_2)^{1/2}$ на поверхности оптического элемента (n_1 и n_2 – показатели преломления окружающей среды и материала, из которого выполнен данный элемент).
- 4) Это диэлектрические пленки с толщиной $\lambda/2$ и показателем преломления $n=(n_1 \cdot n_2)^2$ на поверхности оптического элемента (n_1 и n_2 – показатели преломления окружающей среды и материала, из которого выполнен данный элемент).
- 5) Правильного ответа не приведено.

2.3.2.5. Оценка параметров СИД и ЛД на многокомпонентных твердых растворах

Примеры задач, решаемых на практике

Задача №1.

Оценить угловую расходимость излучения полупроводникового лазера с толщиной активного слоя 0,5 мкм и размером излучающей области в плоскости этого слоя 10 мкм, если средняя длина волны излучения составляет 0,8 мкм.

Решение.

Как известно, распределение интенсивности света в поперечном сечении лазерного пучка может с достаточной точностью аппроксимироваться функцией Гаусса. В этом случае угловая расходимость определяется соотношениями $\theta_v=1,27\lambda/d$ и $\theta_r=1,27\lambda/w$, где λ , d и w – длина волны света и ширина Гауссова пучка в ортогональных направлениях в его поперечном сечении в области перетяжки. В нашем случае плоскость перетяжки совпадает с выходной плоскостью кристалла, поэтому угловая расходимость излучения лазера составит $\theta_v=\lambda/d$

Задача №2.

Определить состав трехкомпонентного твердого раствора $Al_xGa_{1-x}As$, пригодного для получения лазерной генерации на длине волны света $\lambda=0,8$ мкм. Справка: ширина запрещенной зоны для GaAs $E_g=1,42$ эВ; для AlAs $E_g=2,16$ эВ.

Решение.

В случае выбора материала для изготовления излучателя (ППЛ или светодиода) это условие должно быть практически точным. Может оказаться, что ни одно из простых полупроводниковых соединений не отвечает этому условию точно. В этом случае необходимо определить состав твердого раствора (тройного или четверного) таких соединений. При этом ширина запрещенной зоны, найденная по заданной длине волны излучения, должна отвечать условию $E_{gA} < E_g < E_{gB}$, где E_{gA} и E_{gB} – соответствующие величины ширины запрещенной зоны для простых соединений - компонентов твердого раствора.

Для трехкомпонентного твердого раствора типа $A_xB_{1-x}C$ при $E_{gA} < E_{gB}$ коэффициент x может быть найден из соотношения: $x = \frac{E_g - E_{gA}}{E_{gB} - E_{gA}}$. Правда,

необходимо помнить, что изменение состава твердого раствора может привести к изменению зонной структуры (переходу от прямозонной структуры к непрямозонной). Так, для классической системы $Al_xGa_{1-x}As$ материал остается прямозонным лишь при $x < 0,37$. Значение E_g , обеспечивающее генерацию излучения с заданной длиной волны найдем из соотношения: $E_g (\text{эВ}) = 1,24 / \lambda (\text{мкм}) = 1,24 / 0,8 = 1,55$ эВ. Используя данные для ширины запрещенной зоны указанных материалов, найдем:

$$x = \frac{1,55 - 1,42}{2,16 - 1,42} = 0,176. \text{ Таким образом, состав трехкомпонентного}$$

твердого раствора, в котором можно получить лазерную генерацию на длине волны 0,8 мкм, соответствует формуле $Al_{0,176}Ga_{0,824}As$.

Задача №3.

Внешняя квантовая эффективность полупроводникового светоизлучающего диода ($\lambda = 0,7$ мкм) равна 0,6. Определить мощность генерируемого им светового поля, если величина тока инжекции в р-п переход равна 0,5 А.

Решение

Исходя из заданной длины волны света, оценим рабочее напряжение СИД, $U_0 = 1,72$ В [1]. Мощность, потребляемая СИД равна $1,72 \times 0,5 = 0,85$ Вт. В соответствии с определением внешней квантовой эффективности, мощность излучения СИД будет: $0,85 \times 0,6 = 0,51$ Вт.

Пример тестовых контрольных заданий**ВОПРОС 1.**

Каким соотношением определяется условие поглощения света в полупроводниковом материале?

ОТВЕТЫ:

- 1) $h\nu < E_g$, где $h\nu$ - энергия фотона, E_g - ширина запрещенной зоны полупроводника.
- 2) $h\nu < 2E_g$
- 3) $h\nu > E_g$
- 4) $h\nu > 2E_g$
- 5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 2.

Какой полупроводник называется прямозонным?

ОТВЕТЫ:

- 1) Для прямозонного полупроводника «потолок» валентной зоны совпадает с «дном» зоны проводимости.
- 2) Для прямозонного полупроводника «потолок» валентной зоны не совпадает с «дном» зоны проводимости.
- 3) Для прямозонного полупроводника «потолок» зоны проводимости не совпадает с «дном» валентной зоны.
- 4) Для прямозонного полупроводника «потолок» зоны проводимости совпадает с «дном» валентной зоны.
- 5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 3.

Каково основное отличие конструкции лазерного диода и светодиода?

ОТВЕТЫ:

- 1) Светодиод не имеет теплоотвода.
- 2) Светодиод имеет меньшую угловую расходимость излучения.
- 3) Светодиод не имеет оптического резонатора.
- 4) Светодиод требует обратного смещения р-п перехода.
- 5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 4.

Что понимается под гетеропереходом?

ОТВЕТЫ:

- 1) Контакт двух полупроводников с разным типом проводимости.
- 2) Контакт двух полупроводников с одинаковым типом проводимости.
- 3) Контакт двух полупроводников с одинаковой шириной запрещенной зоны.
- 4) Контакт двух полупроводников с разной шириной запрещенной зоны.
- 5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 5.

Какова конструкция оптического резонатора полупроводниковых лазеров с полосковой геометрией на двойной гетероструктуре?

ОТВЕТЫ:

- 1) Это металлические пленки, нанесенные на торцевые поверхности полупроводникового кристалла.
- 2) Это диэлектрические пленки, нанесенные на торцевые поверхности полупроводникового кристалла.
- 3) Это две поверхности, полученные скалыванием кристалла по плоскостям спайности.
- 4) Это две поверхности, полученные путем химико-механической полировки кристалла.
- 5) Правильного ответа не приведено.

2.3.2.6. Расчет переходных и частотных характеристик СИД и ЛД

Примеры задач, решаемых на практике

Задача №1.

Время жизни неосновных носителей в области рекомбинации в излучающей светодиодной структуре равно $t=10^{-8}$ с. Оцените предельную частоту модуляции интенсивности излучения для данного светоизлучающего диода при его прямой токовой модуляции, полагая, что данной частоте соответствует снижение излучаемой световой мощности в два раза в сравнении с таковой при постоянном токе инжекции.

Решение.

Известно, что при гармонической модуляции тока накачки светодиода зависимость излучаемой мощности от частоты $P(f)$ определяется соотношением:

$$P(f) = \frac{P(0)}{\sqrt{1 + (2\pi f \tau)^2}}, \text{ где } P(0) \text{ – мощность излучения при постоянном токе}$$

накачки, τ - время жизни неосновных носителей в области рекомбинации. Соответственно, из условия $P(f_{\max})=0.5P(0)$ найдем: $f_{\max} = \sqrt{3} / 2\pi\tau = 27,57$ МГц.

Задача №2.

При описании динамических свойств полупроводниковых лазеров важным параметром является время жизни фотона в резонаторе лазера (τ_c), которое определяется соотношением [8]:

$$\tau_c = \frac{n}{c[\alpha_p + (1/2L)\ln(1/R_1R_2)]}, \text{ где } n - \text{ показатель преломления активной}$$

среды (полупроводникового материала); c – скорость света в вакууме; α_p – паразитные потери в оптическом резонаторе; L – расстояние между его зеркалами; $R_{1,2}$ – коэффициенты отражения зеркал. Определите время жизни фотона для лазера на основе твердого раствора AlGaAs мм при длине волны излучения $\lambda=0,85$ мкм, если паразитные потери составляют $\alpha_p=10 \text{ см}^{-1}$, время пролета фотона между его зеркалами равно $2,4 \cdot 10^{-12}$ с, а оба зеркала выполнены путем скола полупроводникового кристалла (его показатель преломления на данной длине волны составляет $n=3,6$).

Решение.

Для оценки времени жизни фотона в резонаторе найдем коэффициент отражения света при его падении на зеркально сколотые поверхности кристалла: $R=(n-1)^2/(n+1)^2=0,319$. Заданное время пролета фотона по длине резонатора определяет расстояние между зеркалами:

$$L=c \cdot t/n=3 \cdot 10^8 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12}=0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Наконец, используя эти значения, найдем время жизни фотона в резонаторе:

$\tau_c=3,6/3 \cdot 10^8 \cdot [1000+(1/2 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3}) \cdot \ln(1/0,319^2)]=1,73 \cdot 10^{-12}$ с. Как видим, это время меньше времени пролета фотона через резонатор, поскольку оно учитывает еще и возможность исчезновения фотона вследствие паразитных потерь в среде и отличия коэффициента отражения зеркал от единицы.

Задача №3.

Известно, что динамические свойства полупроводниковых лазеров ограничиваются релаксационными колебаниями мощности излучения при ступенчатом изменении тока накачки. Определите релаксационную частоту для лазера на гетероструктуре GaAs-AlGaAs при его выходной мощности 10 мВт, длине резонатора $L=200$ мкм, при площади поля оптической моды $A=2 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2$, энергии фотона $h\nu=1,4$ эВ, паразитных потерях $\alpha_p=10 \text{ см}^{-1}$ и динамическом усилении $g=3 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$. Показатель преломления полупроводникового материала на длине волны генерации $n=3,6$.

Решение.

Частота релаксационных колебаний определяется соотношением

$$f_R = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{c'gs_0}{\tau_c} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{t_t} + c'gs_0 \right)^2} \approx \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{c'gs_0}{\tau_c}},$$

где $c = c/n$ – скорость света в материале; g – динамическое усиление; s_0 – фотонная плотность, которую можно найти из условия $\frac{P}{A} = (1-R)c' h \nu \cdot s_0$; τ_c – время жизни фотона в резонаторе лазера, определяемое соотношением:

$$\tau_c = \frac{1}{c' [\alpha_p + (1/2L) \ln(1/R_1 R_2)]}$$
; $R_{1,2}$ – коэффициенты отражения зеркал резонатора.

Произведение $c's_0$ найдем, используя заданные значения P , A , R , $h\nu$, в результате получим $c's_0 = 0,328 \cdot 10^{30}$. Далее, определив время жизни фотона в резонаторе лазера $\tau_c = 1,73 \cdot 10^{-12}$ с, найдем частоту релаксационных колебаний, величина которой составит $f_R = 12 \cdot 10^9$ Гц.

2.3.2.7. Расчет параметров планарных оптических волноводов

Примеры задач, решаемых на практике

Задача №1.

Найдите критическую толщину волноводного слоя для направляемой TE_3 моды тонкопленочного асимметричного волновода, если он представляет собой пленку стекла с показателем преломления $n_0 = 1,6$, нанесенную на подложку из стекла с показателем преломления $n_1 = 1,5$. Длина волны света $\lambda = 1,5$ мкм.

Решение:

Из дисперсионного уравнения для планарного оптического волновода со ступенчатым профилем показателя преломления найдем выражение, соответствующее критической толщине волноводного слоя для TE_3 моды:

$$h_{kp} = \frac{3\pi + \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_0^2 - n_1^2}}}{k_0 \sqrt{n_0^2 - n_1^2}}.$$

Подставив в него численные данные, получим:

$$h_{kp} = \frac{3\pi + \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1,5^2 - 1}{1,6^2 - 1,5^2}}}{2\pi \sqrt{1,6^2 - 1,5^2}} \lambda = \frac{3,352\pi}{2\pi \cdot 0,557} \lambda = 3\lambda.$$

Таким образом, критическая толщина волноводного слоя для TE_3 моды равна 4,5 мкм.

Задача №2.

Найдите число направляемых TE мод, которые могут

распространяться в симметричном планарном волноводе на длине волны света $\lambda=0,5$ мкм, если он представляет собой пластинку из стекла толщиной 5 мкм с показателем преломления $n=1,5$.

Решение:

Для симметричного планарного волновода дисперсионное уравнение в случае высшей ТЕ- моды, для которой может достигаться отсечка, принимает вид:

$k_0 h \sqrt{n_0^2 - n_2^2} = m\pi$. Действительно, в случае симметричного волновода $n_1=n_2$, а условие отсечки наблюдается при $N_m=n_2$. Отсюда выразим порядок моды m : $m = \frac{2}{\lambda} h \sqrt{n_0^2 - n_2^2}$ или, подставляя сюда параметры структуры и длину волны света, получим $m=20 \cdot 1,118=22,36$. Таким образом, в данном волноводе могут распространяться 22 ТЕ- моды.

Задача 3.

Найдите длину волны света, для которой исчезают волноводные свойства планарной трехслойной структуры с показателями преломления в разных слоях $n_1=2$, $n_2=1$, $n_0=2,02$ при толщине слоя с наибольшим показателем преломления, равной 2 мкм.

Решение:

Исчезновению волноводных свойств соответствует набор параметров асимметричного волновода, при которых в нем становится невозможным распространение даже ТЕ₀ моды. Из дисперсионного уравнения для планарного оптического волновода со ступенчатым профилем показателя преломления найдем выражение, соответствующее длине волны света, для которой заданная толщина волноводного слоя равна критической:

$$\lambda = \frac{\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_0^2 - n_1^2}}}{2\pi \cdot h_{кр} \sqrt{n_0^2 - n_1^2}}.$$

Подставив в него численные данные, получим:

Пример тестовых контрольных заданий

ВОПРОС 1.

Что из себя представляет электромагнитное поле волноводной моды планарного оптического волновода?

ОТВЕТЫ:

- 1) Оно имеет характер стоячей волны в направлении распространения и в перпендикулярном к плоскости волновода направлении.
- 2) Оно имеет характер бегущей волны в направлении распространения и стоячей волны в перпендикулярном к плоскости волновода направлении.
- 3) Оно имеет характер бегущей волны в направлении распространения и в перпендикулярном к плоскости волновода направлении.
- 4) Оно имеет характер стоячей волны в направлении распространения и бегущей волны в перпендикулярном к плоскости волновода направлении.
- 5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 2.

Какими должны быть соотношения между показателями преломления волноводного слоя (n_0), подложки (n_1) и покровного слоя (n_2) в планарном оптическом волноводе?

ОТВЕТЫ:

- 1) $(n_0) < (n_1) > (n_2)$
- 2) $(n_0) < (n_1) = (n_2)$
- 3) $(n_0) > (n_1) > (n_2)$
- 4) $(n_0) > (n_1) < (n_2)$
- 5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 3.

Какими должны быть соотношения между показателями преломления волноводного слоя (n_0), подложки (n_1) и покровного слоя (n_2) в планарном оптическом волноводе?

ОТВЕТЫ:

- 1) $(n_0) < (n_1) > (n_2)$
- 2) $(n_0) < (n_1) = (n_2)$
- 3) $(n_0) > (n_1) > (n_2)$
- 4) $(n_0) > (n_1) < (n_2)$
- 5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 4.

Число волноводных мод, существующих в планарном оптическом волноводе, возрастает при:

ОТВЕТЫ:

- 1) Возрастании длины волны света.
- 2) Уменьшении разницы показателей преломления волноводного слоя и подложки.
- 3) Уменьшении длины волны света и увеличении толщины волноводного слоя.

- 4) Возрастании длины волны света и снижении толщины волноводного слоя.
- 5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 5.

От чего зависит критическая толщина волноводного слоя для низшей ТЕ-моды в случае симметричного планарного оптического волновода со ступенчатым профилем показателя преломления?

ОТВЕТЫ:

- 1) От длины волны света.
- 2) От показателя преломления материала волноводного слоя.
- 3) Волноводными свойствами такая структура для низшей ТЕ моды обладает даже при бесконечно малой толщине.
- 4) От показателя преломления покровной среды.
- 5) Правильного ответа не приведено.

2.3.2.8. Расчет параметров акустооптических модуляторов

Примеры задач, решаемых на практике

Задача №1.

Возможен ли режим дифракции Брэгга при длине волны света $\lambda=633$ нм на акустическом пучке шириной $L=5$ мм при частоте продольных акустических волн 60 МГц в плавленом кварце ($n=1,46$)? Скорость продольной волны в плавленом кварце $v=5,99 \cdot 10^3$ м/с.

Решение.

Как известно, режим дифракции Брэгга при акустооптическом взаимодействии реализуется, если угловая расходимость акустического пучка существенно меньше угла Брэгга. Этому соответствует условие $Q \geq 1$ (величина параметра Q определяется соотношением $Q = \frac{2\pi L \lambda}{n \Lambda^2}$). Для

заданных условий задачи найдем величину Q :

$$Q = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,5 \cdot 0,633 \cdot 10^{-4} \cdot 3600 \cdot 10^{12} / 1,46 \cdot 5,99^2 \cdot 10^{10} = 1,36 .$$

Таким образом, в рассматриваемом случае режим дифракции Брэгга возможен.

Задача №2.

Найдите скорость акустической волны в ниобате лития и определите ее тип (продольная или поперечная), если после акустооптического модулятора на его основе, при частоте акустической волны 360 МГц наблюдается дифракция Брэгга при длине волны света $\lambda=633$ нм, а величина угла между прошедшим и дифрагированным световыми пучками

в воздухе составляет 2° . Поляризация света соответствует необыкновенной волне в кристалле ($n=2,202$).

Решение.

Скорость акустической волны входит в выражение для угла Брэгга при дифракции света на акустических волнах:

$$\sin(\theta) = \frac{\lambda}{2n\Lambda} = \frac{\lambda}{2nv} \cdot f \quad [3, 6], \text{ где } \lambda - \text{длина волны света; } n - \text{показатель}$$

преломления среды, в которой происходит дифракция; v – скорость акустической волны; f – частота акустических волн. Угол Брэгга – это угол между нормалью к волновому вектору акустической волны и волновым вектором световой волны. Величина угла между прошедшим и дифрагированным световыми лучами вдвое больше, чем угол Брэгга, а в воздухе она еще и в n раз больше этого угла в среде (при не очень высоких частотах угол Брэгга не превышает нескольких градусов). Таким образом, скорость акустической волны можно найти из соотношения:

$$v = \frac{\lambda f}{\sin(\theta)} = \frac{0,633 \cdot 10^{-6} \cdot 3,6 \cdot 10^8}{0,0349} = 6,53 \cdot 10^3 \text{ м/с}. \text{ Обращаясь к справочным данным}$$

[6], найдем, что в ниобате лития это соответствует скорости продольных акустических волн.

Задача №3.

В узкополосном акустооптическом фильтре на основе ниобата лития, предназначенном для спектрального анализа светового поля, используется коллинеарная дифракция света ($\lambda=633$ нм) на акустических волнах. При распространении продольной акустической волны в направлении X ее частота, соответствующая коллинеарной дифракции, составляет 876 МГц. Каким должен быть угол Брэгга в случае обычной дифракции, без преобразования поляризации света, если частота и направление распространения акустической волны, а также поляризация света останутся прежними, но длина волны света составит $\lambda_2=532$ нм? (Справка: показатели преломления ниобата лития $n_o=2,286$; $n_e=2,202$).

Решение.

Частота коллинеарной дифракции света в одноосном кристалле определяется соотношением: $f_A = \frac{v_A}{\lambda} |(n_o - n_e)|$. Отсюда находим длину акустической волны, соответствующей данному режиму:

$$\Lambda_A = \frac{v_A}{f_A} = \frac{\lambda}{|(n_o - n_e)|}. \text{ Угол Брэгга в среде при обычной дифракции без}$$

преобразования поляризации света удовлетворяет соотношению:

$\theta_B = \frac{\lambda_2}{2n\Lambda_A} = \frac{\lambda_2 |n_o - n_e|}{2n\lambda}$. Отсюда находим: $\theta_B = (532/633) \cdot (2,286 - 2,202) / (2 \cdot 2,202) = 0,8404 \cdot 0,084 / 4,404 = 0,016$ радиан или $\theta_B = 0,92^\circ$.

Пример тестовых контрольных заданий

ВОПРОС 1.

Каким соотношением определяется угол θ между соседними дифрагированными пучками в режиме дифракции Рамана-Ната?

ОТВЕТЫ:

- 1) $\theta = \lambda / 2\Lambda$, где λ и Λ длины световой и акустической волн.
- 2) $\theta = \lambda / \Lambda$, где λ и Λ длины световой и акустической волн.
- 3) $\theta = 2\lambda / \Lambda$, где λ и Λ длины световой и акустической волн.
- 4) $\theta = m\lambda / 2\Lambda$, где λ и Λ длины световой и акустической волн, а m – целое число.
- 5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 2.

Из приведенных ниже выберите соотношение, определяющее величину угла Брэгга при дифракции света на акустической волне в оптически изотропной среде.

ОТВЕТЫ:

- 1) $\theta = \lambda / 2\Lambda n_e$, где λ и Λ длины световой и акустической волн, n_e – показатель преломления, соответствующий необыкновенной волне в данной среде.
- 2) $\theta = \lambda / \Lambda$, где λ и Λ длины световой и акустической волн.
- 3) $\theta = \lambda / 2\Lambda n$, где λ и Λ длины световой и акустической волн, n – показатель преломления данной среды.
- 4) $\theta = \lambda / \Lambda n$, где λ и Λ длины световой и акустической волн, n – показатель преломления данной среды.
- 5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 3.

Закончите следующее положение: «Из закона сохранения энергии для дифракции света на акустических волнах вытекает, что частота дифрагированной световой волны ...».

ОТВЕТЫ:

- 1) ... всегда выше, чем частота падающей».
- 2) ... равна частоте падающей».
- 3) ... всегда ниже, чем частота падающей».
- 4) ... сдвинута относительно частоты падающей волны на частоту акустической волны».

5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 4.

Закончите следующее положение: «Из закона сохранения квазиимпульса при дифракции света на акустических волнах вытекает, что в оптически изотропной среде волновые векторы световых и акустической волн ...».

ОТВЕТЫ:

- 1) ... образуют прямоугольный треугольник».
- 2) ... образуют равнобедренный треугольник».
- 3) ... образуют равносторонний треугольник».
- 4) ... коллинеарны».
- 5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 5.

Выберите правильное соотношение, определяющее, что режим дифракции света на акустических волнах в оптически изотропной среде является Брэгговским.

ОТВЕТЫ:

- 1) $\frac{\lambda L}{2n\Lambda^2} \gg 1$;
- 2) $\frac{\lambda L}{2n\Lambda^2} = 1$
- 3) $\frac{\lambda L}{2n\Lambda^2} \ll 1$
- 4) $\frac{\lambda}{2n\Lambda^2} \gg 1$
- 5) Правильного ответа не приведено.

2.3.2.9. Расчет параметров электрооптических модуляторов

Примеры задач, решаемых на практике

Задача №1.

Запишите выражения для приращения компонент тензора относительной диэлектрической непроницаемости ΔB_{ij} ниобата лития (LiNbO_3), обусловленных линейным электрооптическим эффектом, если электрическое поле E приложено вдоль оси X кристалла ($E = E_1$).

Решение.

Приращение компонент тензора относительной диэлектрической непроницаемости в случае линейного электрооптического эффекта определяется соотношением $\Delta B_{ij} = r_{ijk} \cdot E_k$. Индекс k в данном случае определяет направление приложенного к кристаллу электрического поля и по условиям задачи $k=1$ (электрическое поле параллельно оси X). Используя матричные обозначения, указанное соотношение перепишем в виде $\Delta B_i = r_{ik} \cdot E_k$, где $i=1...6$; $k=1$. Соответственно, $\Delta B_1=r_{11}E_1$; $\Delta B_2=r_{21}E_1$; $\Delta B_3=r_{31}E_1$; $\Delta B_4=r_{41}E_1$; $\Delta B_5=r_{51}E_1$; $\Delta B_6=r_{61}E_1$. Матрица отличных от нуля

коэффициентов линейного электрооптического тензора для ниобата лития

$$\text{имеет вид: } \mathbf{r} = \begin{bmatrix} 0 & -r_{22} & r_{13} \\ 0 & r_{22} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ -r_{22} & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Отсюда $r_{11} = r_{21} = r_{31} = r_{41} = 0$, а отличны от нуля r_{51} и r_{61} . Соответственно, ненулевыми приращениями компонент тензора относительной диэлектрической непроницаемости окажутся $\Delta \mathbf{B}_5 = r_{51} \mathbf{E}_1$ и $\Delta \mathbf{B}_6 = r_{61} \mathbf{E}_1$.

Задача №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 – 1 см), приложено электрическое напряжение в 1 кВ. Плоскость поляризации света совпадает с плоскостью XOY, длина волны $\lambda = 633$ нм. Величина обыкновенного и необыкновенного показателей преломления на данной длине волны составляет 2,286 и 2,2.

Решение.

Поскольку плоскость поляризации света совпадает с плоскостью XOY, а свет распространяется в направлении оси X, то вектор E параллелен оси Y (индекс 2, световая волна с такой поляризацией является обыкновенной, показатель преломления материала для нее n_o). Внешнее электрическое поле параллельно оси Z, ему соответствует индекс 3. С учетом этого, для изменения показателя преломления ниобата лития справедливо выражение: $\Delta n_2 = -\frac{1}{2} n_o^3 \cdot r_{13} \cdot E_3 = -\frac{1}{2} n_o^3 \cdot r_{13} \cdot E_3$. Его величина составит $\Delta n_2 = -0.5 \cdot (2.286)^3 \cdot 8.6 \cdot 10^{-12} \cdot 10^5 = 5,137 \cdot 10^{-6}$. (Для LiNbO_3 $r_{13} = 8,6$ пм/В).

Задача №3.

Необходимо спроектировать модулятор фазы линейно поляризованной световой волны ($\lambda = 0,63$ мкм). Найдите размеры электродов модулятора для обеспечения фазового сдвига в 90° , если электрическое напряжение $U = 2$ кВ и имеется кристалл LiNbO_3 , из которого может быть изготовлен модулятор. Диаметр модулируемого светового пучка - 3 мм. Величину r_{33} считать равной $30 \cdot 10^{-10}$ см/В, $n_e = 2,2$.

Решение.

Согласно известным результатам, для электрооптического фазового модулятора предпочтительной является конструкция с поперечным электрическим полем. В случае ниобата лития целесообразно использовать необыкновенно поляризуемую световую волну, а управляющее электрическое поле должно быть параллельным направлению оси Z кристалла. Расстояние между электродами, расположенными на гранях кристалла, перпендикулярных этой оси, определяется диаметром светового пучка. В условии задачи задана его величина 3 мм, однако не указано, по какому уровню интенсивности определен диаметр пучка. Считая пучок гауссовым, необходимо это расстояние задать таким, чтобы дифракционные потери были минимальными. Поэтому с запасом определим расстояние между электродами $D=4$ мм. Величина фазового сдвига определяется соотношением: $\Delta\varphi = \frac{\pi}{\lambda} n_e^3 \cdot r_{33} \cdot U \cdot L / D$. Отсюда находим $L = \Delta\varphi \cdot D \cdot \lambda / \pi \cdot n_e^3 \cdot r_{33} U$ или, с учетом заданного фазового сдвига $L = D \cdot \lambda / 2n_e^3 \cdot r_{33} U$. Соответственно, подставляя сюда заданные величины и параметры, получим $L=0,00197$ м=1,97 мм.

Пример тестовых контрольных заданий**ВОПРОС 1.**

В каких средах проявляется линейный электрооптический эффект?

ОТВЕТЫ:

- 1) Во всех материальных средах.
- 2) В оптически изотропных материалах.
- 3) Во всех кристаллических средах.
- 4) В кристаллических средах без центра симметрии.
- 5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 2.

В каких средах проявляется квадратичный электрооптический эффект?

ОТВЕТЫ:

- 1) Во всех материальных средах и в вакууме.
- 2) Во всех материальных средах, включая жидкости и газы.
- 3) Во всех кристаллических средах.
- 4) В кристаллических средах без центра симметрии.
- 5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 3.

Что называют полуволновым напряжением?

ОТВЕТЫ:

- 1) Величину электрического управляющего напряжения, при которой глубина модуляции интенсивности в электрооптическом модуляторе составляет 50%.
- 2) Величину электрического управляющего напряжения, при которой изменение фазы световой волны, достигаемое в фазовом электрооптическом модуляторе, составляет π .
- 3) Величину электрического управляющего напряжения, при которой изменение фазы световой волны, достигаемое в фазовом электрооптическом модуляторе, составляет $\pi/2$.
- 4) Величину электрического управляющего напряжения, при которой изменение фазы световой волны, достигаемое в фазовом электрооптическом модуляторе, составляет 2π .
- 5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 4.

Можно ли использовать электрооптический эффект для построения элементов сдвига частоты света?

ОТВЕТЫ:

- 1) Нет, можно реализовать лишь электрооптические модуляторы фазы и интенсивности световой волны.
- 2) Да, на основе электрооптического модулятора интенсивности света.
- 3) Да, на основе электрооптического модулятора фазы, используя управляющее напряжение гармонической формы.
- 4) Да, на основе электрооптического модулятора фазы, используя управляющее напряжение пилообразной формы.
- 5) Правильного ответа не приведено.

ВОПРОС 5.

Каким преимуществом обладают электрооптические модуляторы фазы с поперечным электрическим полем перед модуляторами с продольным полем?

ОТВЕТЫ:

- 1) Они обеспечивают большую глубину модуляции, чем элементы с продольным полем.
- 2) Они могут работать с неполяризованным светом.
- 3) Они позволяют снизить величину управляющего напряжения за счет изменения соотношения продольного и поперечного размеров кристалла.
- 4) Их полуволновое напряжение не зависит от размеров кристаллического элемента.
- 5) Правильного ответа не приведено.

2.4. Курсовое проектирование.

Курсовая работа - это первое самостоятельное исследование студента, оформляемое по форме научного отчета. Курсовая работа является обязательной частью учебного плана как для очной, так и для заочной форм обучения.

Курсовая работа выполняется на основе индивидуального технического задания (ТЗ). По желанию студента работа может быть выполнена на реальную тему. Задание выдается в 6 семестре (февраль) – студентам очной формы обучения, в 9 семестре студентам заочной формы обучения; сдача готового проекта в 6 семестре (июнь) – очники, в 9 семестре – заочники.

Курсовая работа предусматривает проектирование оптоэлектронных и квантовых приборов и устройств. Отчетность в течение семестра – еженедельная.

Объем пояснительной записки – 30-40 листов формата А4.

Поощряется рациональное применение средств вычислительной техники и программных продуктов.

Остальные требования к структуре и оформлению курсовой работы изложены в ОС ТУСУР 6.1.97 и учебно – методическом пособии по курсовому проектированию [9], где подробно рассмотрено содержание, этапы выполнения и даны расчетные соотношения.

Тематика курсовых работ

Тематика предлагаемых курсовых работ определяется рабочей программой по дисциплине «Оптоэлектронные и квантовые приборы и устройства», примерный перечень тем курсовых работ включает следующие (для студентов очной формы обучения, принимающих участие в ГПО, перечень может быть дополнен с учетом направлений выполняемых групповых проектов):

- Оптический резонатор твердотельного лазера с модуляцией добротности;
- Электрооптический модулятор интенсивности света с поперечным электрическим полем;
- Электрооптический фазовый модулятор с поперечным электрическим полем.
- Акустооптический модулятор лазерного излучения.
- Волноводный акустооптический модулятор.
- Акустооптический дефлектор.
- Приемный оптический модуль для волоконно-оптических систем связи.
- Передающий оптический модуль для волоконно-оптических систем связи.

3. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ЗАДАНИЯ

(для студентов заочной формы обучения)

Индивидуальное расчетное задание – это контрольная работа для проверки знаний студентов заочной формы обучения по основным разделам курса «Оптоэлектронные и квантовые приборы и устройства».

При выполнении такого задания студентам удобнее всего пользоваться рекомендованными преподавателем учебниками и конспектами лекций, так как вопросы контрольной работы составляются на основе стандартной программы курса обучения.

Индивидуальное задание еще не предполагает навыков исследовательского умения, ответы на вопросы должны демонстрировать достаточно хорошее знание и понимание их существа. Задание дает возможность оценить порядок и уяснить физический смысл процессов, происходящих в оптоэлектронных и квантовых приборах и устройствах.

Расчетное задание для студентов заочной и вечерней форм обучения имеет особое значение, так как требует сосредоточенной работы над вопросами изучаемого курса, что помогает включиться в круг проблем данной дисциплины. Учебной программой предусмотрено выполнение одного такого индивидуального задания для студентов заочной формы обучения, поэтому оно состоит из двух теоретических вопросов и двух задач.

Варианты контрольных работ – индивидуальных расчетных заданий

Вариант №1.

Теоретические вопросы

1. Понятие отрицательной температуры (инверсии населенностей).
2. Принцип действия инжекционного полупроводникового лазера.

Задачи

3. Резонатор оптического квантового генератора образован зеркалами с коэффициентами отражения $R_1=R_2=0,5$, расположенными на расстоянии 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. Считать, что при введении поглотителя длина пути света в активной среде

сокращается на 10% относительно расстояния между зеркалами, толщиной поглотителя пренебречь.)

4. Необходимо спроектировать модулятор фазы линейно поляризованной световой волны ($\lambda = 0,63$ мкм). Найдите размеры электродов модулятора для обеспечения фазового сдвига в 180° , если его рабочее напряжение не должно превышать величину $U=2$ кВ и имеется кристалл LiNbO_3 , из которого может быть изготовлен модулятор. Диаметр модулируемого светового пучка - 1 мм. (Справка: величины линейных электрооптических коэффициентов ниобата лития $r_{33}=30,8 \cdot 10^{-12}$ м/В, $r_{13}=8,6 \cdot 10^{-12}$ м/В, а показатели преломления для обыкновенной и необыкновенной волн в кристалле на заданной длине волны света $n_o=2,286$ и $n_e = 2,2$).

Вариант №2.

Теоретические вопросы

1. Условия самовозбуждения лазера.
2. Основные преимущества полупроводниковых гетеропереходов в сравнении с гомопереходами.

Задачи

3. При какой добротности резонатора Фабри - Перо возможна лазерная генерация на длине волны $\lambda = 0,6$ 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 $L = 30$ см?

4. Необходимо спроектировать модулятор фазы линейно поляризованной световой волны ($\lambda = 0,5$ мкм). Найдите размеры электродов модулятора для обеспечения фазового сдвига в 180° , если его рабочее напряжение не должно превышать величину $U=1$ кВ и имеется кристалл LiNbO_3 , из которого может быть изготовлен модулятор. Диаметр светового пучка - 2 мм. (Справка: величины линейных электрооптических коэффициентов ниобата лития $r_{33}=30,8 \cdot 10^{-12}$ м/В, $r_{13}=8,6 \cdot 10^{-12}$ м/В, а показатели преломления для обыкновенной и необыкновенной волн в кристалле на заданной длине волны света $n_o=2,29$ и $n_e = 2,205$).

Вариант №3.

Теоретические вопросы

1. Коэффициенты Эйнштейна для спонтанных и индуцированных переходов. Соотношение между коэффициентами Эйнштейна.
2. Светоизлучающие диоды. Особенности конструкции и основные отличия полупроводниковых светодиодов и лазеров.

Задачи

3. При какой добротности резонатора Фабри-Перо (зеркала одинаковы) возможна лазерная генерация на длине волны $\lambda=0,8$ мкм, если коэффициент усиления активной среды $\kappa_a=0,8$ см⁻¹, потери на рассеяние света при распространении в среде $\alpha = 0,2$ см⁻¹, а длина резонатора $L=100$ см? Рассеянием света при отражении от зеркал можно пренебречь.

4. 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 – 1 см), приложено электрическое напряжение в 1 кВ. Плоскость поляризации света совпадает с плоскостью XOY, длина волны $\lambda=633$ нм. Величина обыкновенного и необыкновенного показателей преломления на данной длине волны составляет 2,286 и 2,2.

Вариант №4.Теоретические вопросы

1. Взаимодействие плоской световой волны с активной средой.
2. Фотодиоды на основе p-n перехода: принцип работы и факторы, ограничивающие их использование в волоконно-оптических линиях связи.

Задачи

3. Резонатор Фабри - Перо образован двумя одинаковыми зеркалами. Какова пороговая добротность оптического резонатора без активной среды для получения генерации при $\lambda = 0,5$ мкм, если коэффициент усиления превышает потери на рассеяние света при распространении в активной среде на $0,5$ см⁻¹, а длина резонатора $L = 20$ см? Потерями света при отражении от зеркал можно пренебречь.

4. Возможен ли режим дифракции Брэгга при длине волны света $\lambda=633$ нм на акустическом пучке шириной $L=2$ мм при частоте продольных акустических волн 30 МГц в плавленом кварце ($n=1,46$)? Скорость продольной волны в плавленом кварце $v=5,99 \cdot 10^3$ м/с. Если он возможен, определите величину угла Брэгга для указанных условий.

Вариант №5.Теоретические вопросы

1. Механизмы уширения спектральных линий для активных сред в разном агрегатном состоянии. Естественная ширина спектральной линии. Однородное и неоднородное уширение.

2. Фотодиоды со структурой p-i-n: принцип работы и достоинства в сравнении с фотодиодами на основе p-n перехода.

Задачи

3. Каким должен быть коэффициент отражения зеркал (одинаковых) резонатора Фабри Перо с базой $L=20$ см при длине волны света $\lambda=0,5$ мкм для обеспечения добротности резонатора $Q=100000$?

4. Какому режиму дифракции (Рамана – Ната или Брэгга?) соответствует случай дифракции света с длиной волны $\lambda=500$ нм на акустическом пучке шириной $L=30$ мм при частоте поперечных акустических волн 20 МГц в ниобате лития ($n=2,2$)? Скорость поперечной волны в ниобате лития $v=3,7 \cdot 10^3$ м/с.

Вариант №6.

Теоретические вопросы

1. Доплеровское уширение спектральной линии в газах. Суть понятий однородного и неоднородного уширения.

2. Принцип работы лавинных фотодиодов и их типичные характеристики.

Задачи

3. Найдите критическую толщину волноводного слоя для направляемых мод TE_0, TE_1, TE_2, TE_3 тонкопленочного асимметричного волновода, если он представляет собой пленку стекла с показателем преломления $n_1=1,6$, нанесенную на подложку из стекла с показателем преломления $n_1=1,5$. Длина волны света $\lambda=0,6$ мкм.

4. Лазер с составным резонатором генерирует 5 продольных мод. Каково расстояние между дополнительным зеркалом и зеркалом основного оптического резонатора, если без дополнительного зеркала число продольных мод, генерируемых лазером, равно 10, а ширина спектральной линии активной среды 3 ГГц?

Вариант №7.

Теоретические вопросы

1. Виды квантовых переходов (спонтанные и индуцированные переходы). Различия в характеристиках спонтанного и индуцированного излучения.

2. Полупроводниковый гетеролазер: схема конструкции и принцип работы.

Задачи

3. Найдите число направляемых ТЕ мод асимметричного планарного волновода на длине волны света $\lambda=1,5$ мкм, если он образован пленкой стекла толщиной 1 мкм с показателем преломления $n_1=1,6$, нанесенной на подложку из стекла с показателем преломления $n_1=1,5$.

4. Оцените характеристики излучения лазера в режиме синхронизации продольных мод, если расстояние между зеркалами оптического резонатора $L=1$ м, а ширина спектральной линии составляет 50 ГГц при центральной длине волны света 0,5 мкм. Каковы длительность импульса излучения, частота следования импульсов, соотношение пиковой мощности излучения в режиме синхронизации мод с мощностью излучения в режиме генерации одной продольной моды?

Вариант №8.

Теоретические вопросы

1. Добротность открытого оптического резонатора.
2. Условия поглощения и излучения света в полупроводнике. Прямозонные и непрямозонные полупроводники.

Задачи

3. Оцените длительность и частоту следования импульсов излучения лазера в режиме синхронизации продольных мод, а также соотношение пиковой мощности излучения в этом режиме с мощностью излучения одной продольной моды, если расстояние между зеркалами оптического резонатора $L=0,5$ м, а ширина спектральной линии составляет 20 ГГц при центральной длине волны света 0,6 мкм.

4. Возможен ли режим дифракции Брэгга при длине волны света $\lambda=633$ нм на акустическом пучке шириной $L=5$ мм при частоте продольных акустических волн 60 МГц в плавленом кварце (показатель преломления $n=1,46$)? Если да, то определите величину угла Брэгга. Скорость продольной волны в плавленом кварце $v=5,99 \cdot 10^3$ м/с.

Вариант №9.

Теоретические вопросы

1. Способы достижения инверсии населенностей в квантовых системах.
2. Акустооптический модулятор света.

Задачи

3. Линейно поляризованная световая волна распространяется в направлении оси Y 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 YOZ, длина волны $\lambda=514$ нм. Обыкновенный и необыкновенный показатели преломления $n_o=2,3$ и $n_e=2,24$.

4. Каким должно быть расстояние между зеркалами резонатора Фабри-Перо для обеспечения добротности $Q=100000$ на длине волны света $\lambda=0,5$ мкм, если коэффициент отражения зеркал $r=0,8$?

Вариант №10.

Теоретические вопросы

1. Селекция продольных и поперечных мод в открытых оптических резонаторах.
2. Электрооптические модуляторы фазы.

Задачи

3. Найдите граничную длину волны света, для которой в планарной трехслойной структуре с показателями преломления слоев $n_1=1,5$, $n_2=1$, $n_0=1,7$ и толщиной слоя с наибольшим показателем преломления, равной 1 мкм, возможно существование только одной направляемой ТЕ волны (TE_0).

4. При какой добротности резонатора Фабри-Перо (зеркала одинаковы) возможна лазерная генерация на длине волны $\lambda=0,5$ мкм, если коэффициент усиления активной среды $\kappa_a=0,5$ см⁻¹, потери на рассеяние света при распространении в среде $\alpha = 0,05$ см⁻¹, а длина резонатора $L=100$ см? Рассеянием света при отражении от зеркал можно пренебречь.

4. ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ

Подготовка к экзаменам содействует систематизации, обобщению и закреплению знаний, устранению пробелов, возникающих в процессе учебных занятий, и должна вестись в течение всего семестра. *Организация самостоятельной работы в семестре является залогом успешной сдачи зачетов и экзаменов.*

Следует обратить внимание, что экзаменационные вопросы в данном пособии приведены в общей формулировке, в экзаменационных билетах вопросы будут поставлены более конкретно, например «Понятие неоднородного уширения спектральной линии. Доплеровское уширение в газовой среде.» и т.д.

4.1. Список экзаменационных вопросов

1. Постоянная Планка, связь между частотой и энергией, импульсом и волновым вектором фотона.
2. Правило частот Бора.
3. Волна де Бройля, физический смысл волновой функции.
4. Уравнение Шредингера.
5. Типичная структура системы энергетических уровней молекулы.
6. Виды квантовых переходов (спонтанные и индуцированные переходы).
7. Различия в характеристиках спонтанного и индуцированного излучения.
8. Коэффициенты Эйнштейна для спонтанных и индуцированных переходов. Соотношение между коэффициентами Эйнштейна.
9. Механизмы уширения спектральных линий для активных сред в разном агрегатном состоянии. Естественная ширина спектральной линии. Однородное и неоднородное уширение.
10. Условия усиления колебаний в квантовых системах.
11. Понятие отрицательной температуры (инверсии населенностей).
12. Кинетические уравнения для двухуровневой квантовой системы.
13. Взаимодействие плоской световой волны с активной средой.
14. Способы достижения инверсии населенностей в квантовых системах.
15. Открытый оптический резонатор. Продольные и поперечные моды в резонаторе Фабри-Перо. Соотношения для собственных частот продольных мод и межмодового расстояния.
16. Добротность открытого оптического резонатора.
17. Перестраиваемые оптические резонаторы. Селекция продольных и поперечных мод.
18. Условия самовозбуждения лазера.
19. Типы газовых лазеров. Основные отличия атомарных, ионных и молекулярных лазеров.
20. Твердотельные лазеры. Особенности накачки.
21. Материалы полупроводниковой оптоэлектроники. Условия поглощения и излучения света в полупроводнике. Твердые растворы замещения.
22. Инжекционный полупроводниковый лазер. Принцип работы.
23. Гетеропереходы, основные преимущества перед гомопереходами.
24. Полупроводниковый гетеролазер.
25. Светоизлучающие диоды. Особенности конструкции и основные отличия полупроводниковых светодиодов и лазеров.
26. Акустооптические модуляторы света.
27. Электрооптические элементы управления оптическим излучением (модуляторы фазы и интенсивности).
28. Фотодиоды на основе p-n перехода, p-i-n диоды, ЛФД.
29. Основной принцип голографии. Примеры разных типов голограмм.
30. Элементы интегральной оптики.

Подготовка к экзаменам содействует систематизации, обобщению и закреплению знаний, устранению пробелов, возникающих в процессе учебных занятий, и должна вестись в течение всего семестра. *Организация самостоятельной работы в семестре является залогом успешной сдачи зачетов и экзаменов.*

4.2. Структура экзаменационного билета.

Экзаменационный билет состоит из двух теоретических вопросов по основным разделам курса «Оптоэлектронные и квантовые приборы и устройства».

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ЭТАПЫ И ИХ ОЦЕНКА ПО БРС (для очной формы обучения)

5.1. 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 системе оценки успеваемости, действующей с 2009 г., которая включает **текущий** контроль выполнения элементов объема дисциплины по элементам контроля с подведением текущего рейтинга (п.7.2.) и **итоговый** контроль.

Правила формирования пятибалльных оценок за каждую контрольную точку (КТ1, КТ2) осуществляется путем округления величины, рассчитанной по формуле:

$$КТx|_{x=1,2} = \frac{(Сумма_баллов,_набранная_к_КТx)*5}{Требуемая_сумма_баллов_по_балльной_раскладке}.$$

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).

5.2. Таблица распределения баллов в течение 5 семестра

Распределение баллов по элементам контроля в 5 семестре

Элементы учебной деятельности	Кол-во элементов	Длительность элемента, час.	Кол - во баллов за 1 элемент контроля	Срок контроля, (неделя с начала семестра)	Кол - во баллов (всего)
Посещение лекций	22	2	0,5	1-17	11
Тестовый контроль	2	0,2	3	7, 13	6
Выполнение контрольных работ на практических занятиях	2	1	6	4, 8	12
Выполнение и защита результатов лабораторных работ	4	4	8	7, 9, 11, 13	32
Компонент своевременности				1-17	9
Сдача экзамена(максимум)					30
Итог					100

Таблица распределения баллов в течение 5 семестра

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	4	4	3	11
Тестовый контроль	3	3	0	6
Контрольные работы на практических занятиях	6	6	0	12
Выполнение и защита результатов лабораторных работ	0	16	16	32
Компонент своевременности	3	3	3	9
Итого максимум за период:	16	32	22	70
Сдача экзамена (максимум)				30
Нарастающим итогом	16	48	70	100

Распределение баллов по элементам контроля в 6 семестре

Элементы учебной деятельности	Кол-во элементов	Длительность элемента, час.	Кол - во баллов за 1 элемент контроля	Срок контроля, (неделя с начала семестра)	Кол - во баллов (всего)
Курсовая работа	1	16	70	1-17	70
Защита работы (мах)					30
Итог					100

Таблица распределения баллов в течение 6 семестра

Элементы учебной деятельности	Максимальный балл на 1-ую КТ с начала семестра	Максимальный балл за период между 1КТ и 2КТ	Максимальный балл за период между 2КТ и на конец семестра	Всего за семестр
Получение задания на курсовой проект/работу	4	0	0	4
Подбор и обзор литературы	12	0	0	12
Выполнение необходимых расчетов или экспериментальных исследований по проекту (работе)	0	18	0	18
Выполнение необходимых графических работ	0	4	8	12
Полное оформление работы	0	0	12	12
Компонент своевременности	4	4	4	12
Итого максимум за период:	20	26	24	70
Защита работы (мах)				30
Нарастающим итогом	20	46	70	100

Темы контрольных работ:

1. Характеристики оптических резонаторов
2. Расчет характеристик полупроводниковых лазеров и светодиодов
3. Расчет характеристик планарных волноводов
4. Расчет характеристик акустооптических и электрооптических модуляторов

5.3. 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

8.4. 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)
4 (хорошо)	85-89	B (очень хорошо)
	75-84	C (хорошо)
	70-74	D (удовлетворительно)
3 (удовлетворительно)	65-69	

	60-64	Е(посредственно)
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(успешной сдачи экзамена).

6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ.

Учебно-методическое обеспечение дисциплины «Оптоэлектронные и квантовые приборы и устройства» для специальности 210401 Физика и техника оптической связи находится на уровне, соответствующем нормативным требованиям. В процессе обучения следует пользоваться учебниками [1, 2] и учебными пособиями [3, 4]. Для углубленного изучения дисциплины можно пользоваться книгами [5 - 8]. В электронной библиотеке кафедры имеются и доступны студентам при работе в локальной вычислительной сети кафедры электронные версии некоторых из пособий.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

а) основная литература:

1. А.Н.Пихтин Оптическая и квантовая электроника. – М: ВШ. 2001, 572с. (159)
2. В.А. Малышев. Основы квантовой электроники и лазерной техники. - М.: Высшая школа, 2005. - 542 с. (40)
3. В.М. Шандаров. Основы физической и квантовой оптики. – Томск: Томск. гос. Ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2005. – 258 с. (20)
4. Г.Г. Куц, Ж.М. Соколова, Л.И. Шангина. Приборы и устройства оптического и СВЧ-диапазонов. - Томск: Издательство научно-технической литературы, 2003. - 556 с. (10)

б) дополнительная литература:

5. Смирнов А.Г. Квантовая электроника и оптоэлектроника. Мн. ВШ.;1987.-196 с. (11)
6. Ярив А. Введение в оптическую электронику: Пер. с англ.- М.: ВШ.;1983.-398 с. (3)
7. Розеншер Э., Винтер Б. Оптоэлектроника. – М.: Техносфера; 2006-592 с.
8. Байбородин Ю.В. Основы лазерной техники.- К.: ВШ.;1988.-383 с. (38)
9. Куц Г.Г., Шандаров В.М. Проектирование оптоэлектронных и квантовых приборов и устройств – Томск.: ТУСУР, 2007. -100 с.

Приложение А

ВЫПОЛНЕНИЕ РЕФЕРАТИВНЫХ РАБОТ

1. Общие требования

Реферат - краткое изложение содержания первичного документа (или его части) с основными фактическими сведениями. Роль первичного документа выполняет научное издание, монография, статьи. Второе значение этого понятия - доклад на определенную тему, включающий обзор соответствующих литературных и других источников, далее будем называть этот вид работы «реферат-доклад». Обычно студент сталкивается и с той, и с другой формой реферата.

Прежде чем выбрать тему реферата, определите свой интерес, над какой проблемой Вы хотели бы поработать, более глубоко изучить, и сформулируйте тему. Перед началом работы над рефератом следует наметить небольшой план и подобрать литературу. Прежде всего, воспользуйтесь литературой, рекомендованной учебной программой, а затем расширьте список источников, не забудьте использовать реферативные и специальные журналы, где Вы найдете новейшую научную информацию.

Реферат составляется по следующему примерному плану:

1. тема, предмет изучения, цель реферируемой работы;
2. методы проведения исследования в реферируемой работе. Если они новы, то их следует описать, если широко известны, то их следует только назвать;
3. существо работы, конкретные результаты работы. Приводятся основные теоретические, экспериментальные, описательные результаты, при этом предпочтение отдается новым результатам;
4. выводы (оценки, приложения), принятые и отвергнутые гипотезы, описанные в реферируемом источнике.

Если же реферат выполняется по нескольким источникам (реферат-доклад), необходимо написать ***вводную часть***, раскрывающую общие подходы к рассматриваемой проблеме, и показать те особенности темы, которые вы собираетесь раскрыть, основываясь на реферируемых источниках, в конце работы сделать ***обобщающие выводы и заключения***. Также необходимо в реферате-докладе оформлять ***ссылки*** на каждый реферируемый источник.

Обычно в реферате избегают вводных, общих фраз (например, «автор статьи рассматривает...»), излагают материал кратко и точно. Умение отделять основную информацию от второстепенной - одно из основных требований к реферирующему. Хорошие результаты в выработке умения выделять основную информацию дает известный прием, названный условно *фильтрацией и сжатием текста*, который включает в себя две операции:

^

- 1.разбивку текста на части по смыслу;
- 2.нахождение в каждой части текста одного слова, краткой фразы или обобщающей формулировки, выражающих основу содержания (ключевое понятие) этой части.

Основное *отличие реферата от реферируемого текста* - отсутствие избыточного материала, то есть удаление отдельных слов или частей текста, не несущих значимой информации, а также замена развернутых оборотов текста более лаконичными сочетаниями (свертывание).

2. Структура и оформление реферата

Примерный план реферата:

1. Титульный лист.
2. План-оглавление.
3. Введение.

Дается постановка вопроса, объясняется выбор темы, ее актуальность и значимость, указываются цель и задачи реферата, дается характеристика используемой литературы.

4. Основная часть.

Состоит из нескольких разделов. Каждый раздел основной части раскрывает отдельную проблему или одну из ее сторон и логически является продолжением предыдущего. Допускается включение таблиц, графиков, схем.

5. Заключение.

Подводятся итоги или дается обобщенный вывод по теме реферата, даются рекомендации.

6. Библиография. Список реферируемых источников с указанием их полных библиографических данных

При написании реферата используются не менее 8-10 различных источников.

Приложение Б

ПОДГОТОВКА ПРЕЗЕНТАЦИИ В POWER POINT

Основные принципы подготовки информации на слайдах.

1. Принцип контраста — включать контрастные элементы, т.е. использовать разный размер шрифтов, разные цвета, символы.

Контраст — это то, что привлекает внимание.

2. Принцип повторяемости — в одной теме использовать повторение некоторых элементов оформления, например, использовать одинаковые рамки, цвет поля, тип шрифта. Это создает ощущение организованности и единства.

3. Принцип упорядоченности — элементы на странице не должны быть расположены произвольно (хаотично), они должны иметь некоторую видимую связь между собой.

4. Принцип близости — элементы, связанные общим смыслом, должны быть сгруппированы вместе, образуя как бы некоторую визуальную единицу.

Кроме этого, существуют некоторые *конкретные правила представления текстовой и статистической информации на слайдах:*

Занимайте не больше четырех-шести строк. Не включая заголовков и подзаголовков, текстовая информация должна занимать не более 4-6 строк. Чтение большего количества строк отвлекает внимание слушателей и затрудняет понимание.

Используйте не более 40 символов в строке, включая пробелы. Если использовать большее количество символов, то на слайде будет недостаточно свободного (чистого) пространства, которое необходимо оставлять для того, чтобы слушатели могли быстро «схватывать» информацию. Кроме того, плотно заполненный слайд выглядит не структурированным. Необходимо оставлять свободное пространство по краям и с боков.

Не пишите предложения, а только ключевые слова. Поскольку показ слайдов сопровождается объяснениями, нет никакой необходимости перегружать их словами.

Используйте как заглавные, так и строчные буквы. Исследования показывают, что использование заглавных и строчных букв облегчает чтение и распознавание слов. При использовании же только заглавных букв чтение и распознавание слов замедляются.

Используйте одинаковые и стандартные шрифты. Использование слишком замысловатых и непривычных шрифтов (или их чередование) потребует дополнительных усилий, затруднит чтение и восприятие информации.

Используйте цвет, большие буквы для того, чтобы выделить главное. Можно усилить контрастность, используя цвет, буквы большего размера или добавляя простые изображения (картинки). Крупные буквы и яркий цвет направляют взгляд слушателей на то, что необходимо подчеркнуть.

Не увлекайтесь спецэффектами. Они должны применяться обоснованно. Помните, что от «летающих» букв рябит в глазах.

Проверьте соответствие слайдов тексту доклада. Очень неприятно видеть удивленного докладчика, у которого неожиданно закончились слайды.

Пользуйтесь дополнительными возможностями Power Point.

В частности, у него есть возможность включить «представление докладчика». При этом слушателям будут видны только слайды, а на мониторе докладчика будут выводиться также заметки к слайду, идти отсчет времени и показываться следующие слайды.

Презентация - это не текст доклада. Докладчик, превращающий свой доклад в комментарии к слайдам или того хуже - декламирующий текст со слайдов, выглядит неприглядно. Слайды должны дополнять сказанное им, а не повторять. В крайнем случае слайды могут конспективно фиксировать основные пункты, помогая следить за речью.

Принято завершать презентацию слайдом с контактными данными или завершающей фразой. Например, «Спасибо за внимание!». Тогда аудитория не будет шокирована внезапно оборвавшимся показом слайдов.

Учебное издание

**Кущ Галина Григорьевна
Шандаров Владимир Михайлович**

Оптоэлектронные и квантовые приборы и устройства

Учебно-методическое пособие по организации
самостоятельной работы и практических занятий студентов
специальности 210401 «Физика и техника оптической связи» по
дисциплине «Оптоэлектронные и квантовые приборы и
устройства»

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) 533018.