

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

## **КВАНТОВАЯ И ОПТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**

Методические указания по самостоятельной работе  
для студентов направлений  
210100.62 – Электроника и наноэлектроника,  
222900.62 – Нанотехнологии и микросистемная техника

Башкиров Александр Иванович

Квантовая и оптическая электроника = Квантовая и оптическая электроника: Методические указания по самостоятельной работе для студентов направлений 210100.62 – Электроника и наноэлектроника, 222900.62 – Нанотехнологии и микросистемная техника / А.И. Башкиров. Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск: ТУСУР, 2014. – 20 с.

Целью преподавания дисциплины «Квантовая и оптическая электроника» является подготовка студентов к разработке, исследованию и эксплуатации приборов и устройств квантовой и оптической электроники на основе изучения студентами базовых физических принципов функционирования основных элементов квантовой и оптической электроники.

Задачей дисциплины «Квантовая и оптическая электроника» является изучение явлений, используемых для анализа, расчета и основных методов и приемов реализации устройств и приборов квантовой и оптической электроники, рассмотрение конкретных устройств, методов их расчета и проектирования.

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

- готовность выполнять расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения в соответствии с техническим заданием с использованием средств автоматизации проектирования (ПК-10);

- способность аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения (ПК-20).

Предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлениям 210100.62 – Электроника и наноэлектроника, 222900.62 – Нанотехнологии и микросистемная техника по курсу «Квантовая и оптическая электроника».

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ  
Зав.кафедрой ЭП  
\_\_\_\_\_ С.М. Шандаров  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2014 г.

## **КВАНТОВАЯ И ОПТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**

Методические указания по самостоятельной работе  
для студентов направлений  
210100.62 – Электроника и наноэлектроника,  
222900.62 – Нанотехнологии и микросистемная техника

Разработчик  
канд. физ.-мат. наук,  
доц. каф. ЭП  
\_\_\_\_\_ А.И. Башкиров  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2014 г.

## Содержание

Введение.....	5
Раздел 1       Способы описания и характеристики электромагнитного излучения оптического диапазона.....	6
1.1 Содержание раздела.....	6
1.2 Методические указания по изучению раздела.....	6
1.3 Вопросы для самопроверки.....	6
Раздел 2 Взаимодействие оптического излучения с квантовыми системами .....	7
2.1 Содержание раздела.....	7
2.2 Методические указания по изучению раздела.....	7
2.3 Вопросы для самопроверки.....	7
Раздел 3       Усиление оптического излучения. Генерация оптического излучения .....	8
3.1 Содержание раздела.....	8
3.2 Методические указания по изучению раздела.....	8
3.3 Вопросы для самопроверки.....	9
Раздел 4 Когерентные и некогерентные источники оптического излучения ....	10
4.1 Содержание раздела.....	10
4.2 Методические указания по изучению раздела.....	10
4.3 Вопросы для самопроверки.....	10
Раздел 5       Модуляция, отклонение, передача и обработка оптического излучения .....	11
5.1 Содержание раздела.....	11
5.2 Методические указания по изучению раздела.....	11
5.3 Вопросы для самопроверки.....	11
6 Лабораторные работы .....	12
7 Практические занятия .....	13
8 Темы для самостоятельного изучения .....	15
8.1 Теоретические вопросы для тестового опроса по теме «Квантовые переходы. Энергетические уровни».....	15
8.2 Теоретические вопросы для тестового опроса по теме «Оптические резонаторы» .....	16
8.3       Теоретические вопросы для тестового опроса по теме «Пространственные характеристики излучения ОКГ».....	16
Заключение .....	17
Рекомендуемая литература .....	18

## Введение

Целью преподавания дисциплины «Квантовая и оптическая электроника» является подготовка студентов к разработке, исследованию и эксплуатации приборов и устройств квантовой и оптической электроники на основе изучения студентами базовых физических принципов функционирования основных элементов квантовой и оптической электроники.

Задачей дисциплины «Квантовая и оптическая электроника» является изучение явлений, используемых для анализа, расчета и основных методов и приемов реализации устройств и приборов квантовой и оптической электроники, рассмотрение конкретных устройств, методов их расчета и проектирования.

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

- готовность выполнять расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения в соответствии с техническим заданием с использованием средств автоматизации проектирования (ПК-10);

- способность аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения (ПК-20).

В результате изучения дисциплины студент должен:

**знать:** основы физики вакуума, плазмы и твердого тела; принципы использования физических эффектов в вакууме, плазме и в твердом теле в приборах и устройствах квантовой и оптической электроники; конструкции, параметры, характеристики и методы моделирования приборов квантовой и оптической электроники;

**уметь:** применять методы расчета параметров и характеристик приборов квантовой и оптической электроники; применять методы моделирования и проектирования приборов и устройств квантовой и оптической электроники; анализировать информацию о новых типах оптических квантовых приборов;

**владеть:** методами экспериментальных исследований параметров и характеристик материалов, приборов и устройств квантовой и оптической электроники; современными программными средствами моделирования и проектирования приборов квантовой и оптической электроники; методикой расчета основных узлов приборов квантовой и оптической электроники.

## **Раздел 1 Способы описания и характеристики электромагнитного излучения оптического диапазона**

### **1.1 Содержание раздела**

Уравнения Максвелла в дифференциальной форме, материальные уравнения и граничные условия. Волновое уравнение для немагнитной безграничной среды. Одномерное волновое уравнение, плоские скалярные волны, гармонические волны. Плоская волна, распространяющаяся в произвольном направлении. Электромагнитные плоские волны. Поляризация плоских электромагнитных волн. Закон сохранения энергии для электромагнитного поля, вектор Пойнтинга. Распространение волновых пакетов. Групповая скорость.

### **1.2 Методические указания по изучению раздела**

При изучении раздела «Способы описания и характеристики электромагнитного излучения оптического диапазона» следует обратить внимание на электромагнитные волны оптического диапазона, волновые уравнения, электромагнитные плоские волны, виды поляризации плоских электромагнитных волн, уравнение баланса энергии электромагнитных волн, вектор Пойнтинга.

### **1.3 Вопросы для самопроверки**

1. Дайте определение понятию фазового или волнового фронта волны.
2. Запишите материальные уравнения для изотропной среды, не обладающей дисперсией. Поясните все обозначения.
3. Запишите уравнения Максвелла в дифференциальной форме. Поясните все обозначения.
4. Выведите волновое уравнение из уравнений Максвелла в дифференциальной форме для непроводящей изотропной среды, в которой отсутствуют свободные заряды и сторонние токи.
5. Запишите математическую формулировку одномерного волнового уравнения. Поясните все обозначения.
6. Запишите математическое выражение для напряженности электрического поля плоской электромагнитной волны, распространяющейся в произвольном направлении. Поясните все обозначения.
7. Запишите уравнения Максвелла для плоских гармонических волн в непроводящей среде, в которой также отсутствуют свободные заряды и сторонние токи. Поясните все обозначения.
8. Какое поле называют поляризованным, а какое неполяризованным?

9. Чем отличаются волны с линейной, эллиптической и круговой (левой и правой) поляризациями?

10. Запишите математическое выражение для волнового сопротивления среды, поясните все обозначения. Чему равно волновое сопротивление вакуума как среды распространения?

11. Запишите математическое выражение для фазовой скорости света через материальные параметры среды распространения, а также через скорость света в вакууме и коэффициент преломления. Поясните все обозначения.

12. В чем состоит достоинство комплексного метода при описании гармонических плоских волн?

## **Раздел 2 Взаимодействие оптического излучения с квантовыми системами**

### **2.1 Содержание раздела**

Смешанные и чистые ансамбли. Матрица плотности. Термостатированный ансамбль. Безызлучательные переходы. Описание релаксации. Общие уравнения для матрицы плотности. Электрические и магнитные дипольные моменты и энергия взаимодействия микрочастиц с внешним полем. Двухуровневая система частиц во внешнем поле: основные уравнения; вероятности индуцированных переходов. Анализ поглощения электромагнитного поля двухуровневой системой, эффект насыщения. Спонтанные переходы. Балансные уравнения.

### **2.2 Методические указания по изучению раздела**

При изучении раздела «Взаимодействие оптического излучения с квантовыми системами» следует обратить внимание на интерпретацию энергетических состояний квантовых систем, описание термостатированного ансамбля, описание релаксации, уравнения для матрицы плотности, индуцированные переходы, эффект насыщения поглощения электромагнитного поля, спонтанные переходы.

### **2.3 Вопросы для самопроверки**

1. Каков физический смысл диагональных элементов матрицы плотности?

2. Каков физический смысл недиагональных элементов матрицы плотности? Чему они равны в стационарном состоянии?

3. Запишите математическое выражение для среднего по ансамблю значения некоторой физической величины, считая матрицу плотности данного ансамбля известной. Поясните все обозначения.

4. Запишите математическую формулировку для уравнения движения матрицы плотности смешанного ансамбля. Поясните все обозначения.

5. Какая система частиц называется термостатированным ансамблем? Приведите пример термостатированного ансамбля.

6. Что такое релаксация для термостатированного ансамбля?

7. Запишите уравнение движения для недиагонального элемента матрицы плотности термостатированного ансамбля. Поясните все обозначения.

8. Запишите уравнение движения для диагонального элемента матрицы плотности термостатированного ансамбля. Поясните все обозначения.

9. В чем заключается принцип детального равновесия при тепловых переходах?

10. Что такое тепловые (безызлучательные) переходы?

11. В чем суть полуклассического описания при рассмотрении электродипольного взаимодействия микрочастиц с электромагнитным полем?

12. Чему равны диагональные матричные элементы оператора электродипольного момента? Поясните свой ответ.

13. Каковы основные свойства спонтанных переходов?

### **Раздел 3 Усиление оптического излучения. Генерация оптического излучения**

#### **3.1 Содержание раздела**

Принцип квантового усиления электромагнитных волн. Методы создания инверсной населенности в активных средах по двухуровневой схеме. Многоуровневые схемы создания инверсной населенности. Балансные уравнения. Элементарная теория открытых оптических резонаторов. Добротность резонаторов. Волновая теория открытых резонаторов. Классификация оптических резонаторов. Селекция типов колебаний в оптических резонаторах. Характеристики лазерного излучения. Уширение спектральных линий.

#### **3.2 Методические указания по изучению раздела**

При изучении раздела «Усиление оптического излучения. Генерация оптического излучения» следует обратить внимание на содержание принципа квантового усиления электромагнитных волн, основные методы создания инверсной населенности по двухуровневой и трехуровневой

схемам, особенности оптических резонаторов, способы повышения добротности резонаторов, временную и пространственную когерентность.

### 3.3 Вопросы для самопроверки

1. Запишите полную систему уравнений, которая позволяет описать взаимодействие электромагнитного поля с двухуровневой системой частиц. Поясните все обозначения.
2. Запишите математическое выражение, описывающее частотную зависимость вероятности индуцированного перехода для двухуровневой системы, взаимодействующей с внешним электромагнитным полем с частотой, близкой к частоте квантового перехода. Поясните все обозначения.
3. Запишите уравнение, описывающее динамику диагонального элемента матрицы плотности  $\rho_{11}$  двухуровневой системы, взаимодействующей с внешним полем, с учетом индуцированных и тепловых переходов. Поясните все обозначения.
4. Запишите математическое выражение для вероятности спонтанного перехода через коэффициент Эйнштейна. Поясните все обозначения.
5. Запишите балансное (кинетическое) уравнение для числа частиц на энергетическом уровне. Поясните все обозначения.
6. Выведите выражение для собственной частоты продольной моды резонатора Фабри-Перо.
7. Опишите способы селекции поперечных мод в оптических резонаторах.
8. Опишите способы селекции продольных мод в оптических резонаторах.
9. Дайте определение одночастотному режиму генерации лазера.
10. Что такое длина когерентности? Какова длина когерентности различных источников излучения?
11. Дайте определение понятия когерентности.
12. Нарисуйте картину распределения светового поля на зеркале оптического резонатора для лазера, генерирующего моду  $TEM_{11q}$ .
13. Что собой представляет полуконфокальный оптический резонатор? Каковы его достоинства?
14. Выведите выражение для добротности оптического резонатора с учетом только полезных потерь, на связь с нагрузкой.
15. По каким причинам свойство временной когерентности лазерного излучения очень важно для голографии?
16. Для какой из поперечных мод расходимость лазерного пучка минимальна? Каково распределение амплитуды и фазы по сечению такого пучка, каков угол его расходимости?

## **Раздел 4 Когерентные и некогерентные источники оптического излучения**

### **4.1 Содержание раздела**

Особенности газов как активного вещества для лазеров. Механизмы возбуждения газоразрядных лазеров. Атомарный гелий-неоновый лазер. Ионный аргоновый лазер. Молекулярный лазер на углекислом газе. Жидкостные лазеры на растворах органических красителей. Схемы функционирования твердотельных лазеров. Системы накачки твердотельных лазеров. Балансные уравнения и режим непрерывной генерации в твердотельных лазерах. Режим свободной генерации. Лазеры с модуляцией добротности резонатора. Оптические явления в полупроводниках. Полупроводниковые лазеры с электронной и оптической накачкой. Гетероструктуры для инжекционных лазеров. Инжекционные лазеры на гетеропереходах. Светоизлучающие диоды.

### **4.2 Методические указания по изучению раздела**

При изучении раздела «Когерентные и некогерентные источники оптического излучения» следует обратить внимание на особенности газовых лазеров, газоразрядные лазеры, твердотельные лазеры на рубине, стеклах с  $\text{Nd}^{3+}$ , лазеры с модулированной добротностью резонатора, полупроводниковые лазеры, светоизлучающие диоды.

### **4.3 Вопросы для самопроверки**

1. Перечислите особенности газов, как активного вещества для лазеров.
2. Перечислите способы реализации инверсии населенностей в газах.
3. Назовите основные процессы, создающие инверсию населенностей в газовом разряде.
4. Что такое столкновения 1-го рода?
5. Что такое столкновения 2-го рода?
6. Нарисуйте схему энергетических уровней для газов гелия и неона.
7. Чем обусловлено ограничение поперечных размеров газоразрядной трубки для гелий-неонового лазера.
8. Какие энергетические уровни используют для генерации в лазере на углекислом газе.
9. Назовите системы накачки твердотельных лазеров.
10. Запишите балансные уравнения для режима непрерывной генерации в твердотельных лазерах.
11. Опишите режим свободной генерации в твердотельных лазерах.

12. Опишите принцип действия лазера с модулированной добротностью резонатора.

13. Опишите методы получения инверсной населенности в полупроводниках.

14. Дайте определение понятию внешнего квантового выхода излучающего диода.

15. Назовите условия получения вынужденного излучения в полупроводниках.

16. Перечислите основные материалы, применяемые для светодиодов, их основные характеристики.

17. Опишите принцип действия светодиодов.

## **Раздел 5 Модуляция, отклонение, передача и обработка оптического излучения**

### **5.1 Содержание раздела**

Описание электрооптического и фотоупругого эффектов. Электрооптические модуляторы. Акустооптические модуляторы, дефлекторы. Полупроводниковые фотодиоды. Волоконно-оптические линии связи. Элементы интегральной оптики. Принципы голографии и голографические методы обработки информации.

### **5.2 Методические указания по изучению раздела**

При изучении раздела «Модуляция, отклонение, передача и обработка оптического излучения» следует обратить внимание на фотодиоды, электрооптические и акустооптические модуляторы, волоконно-оптические линии связи.

### **5.3 Вопросы для самопроверки**

1. Перечислите основные параметры приемников оптического излучения.
2. Опишите фотогальванический режим работы фотодиода.
3. Опишите фотомагнитоэлектрический эффект.
4. Какими преимуществами обладает фотодиодный режим по сравнению с фотогальваническим при работе фотоприемников
5. Перечислите типы фотоприемников.
6. Объясните принцип работы лавинного фотодиода.
7. Что такое линейный электрооптический эффект?
8. В чем отличие продольного электрооптического эффекта от поперечного?
9. За счет каких эффектов происходит изменение диэлектрической проницаемости среды под действием акустической волны?

10. Что такое коллинеарное акустооптическое взаимодействие?
11. Что такое планарный волновод?
12. Что такое волноводная мода?
13. Нарисуйте траекторию распространения волноводной моды тонкоплёночного волновода.
14. Что такое номер моды?
15. Перечислите типы оптических волокон. Ответ поясните рисунком.
16. Опишите процесс распространения света в оптическом волокне.
17. Объясните механизмы потерь в оптических волокнах.
18. Как осуществляется ввод и вывод излучения для оптического волокна?

## **6 Лабораторные работы**

В процессе выполнения лабораторных занятий студент не только закрепляет теоретические знания, но и пополняет их. Вся работа при выполнении лабораторной работы разбивается на следующие этапы: вступительный, проведение эксперимента и обработка результатов.

Вступительный этап включает анализ полученного индивидуального задания, изучение рекомендуемых литературных источников по теме задания, знакомство с приборами, методами и схемами измерений.

В процессе домашней подготовки студент проверяет качество усвоения проработанного материала по вопросам для самоконтроля, относящимся к изучаемой теме. Без проведения такой предварительной подготовки к лабораторной работе студент не допускается к выполнению эксперимента.

Помимо домашней работы студенты готовятся к выполнению эксперимента также на рабочем месте: они уточняют порядок выполнения работы распределяют рабочие функции между членами бригады. В ходе аудиторной подготовки преподаватель путем собеседования выявляет и оценивает степень готовности каждого студента к проведению эксперимента и знание им теоретического материала. Студенты, не подготовленные к выполнению работы или не представившие отчеты по предыдущей работе, к выполнению новой работы могут быть не допущены и все отведенное время для лабораторной работы должны находиться в лаборатории, изучать по рекомендованной литературе тот материал, с которым они не познакомились дома. К выполнению работы они могут быть допущены только после собеседования и в часы сверх расписания по договоренности с преподавателем. Все пропущенные лабораторные работы по уважительным или неуважительным причинам могут быть выполнены в конце семестра на дополнительных занятиях.

Второй этап работы – проведение эксперимента в лаборатории. На этом этапе очень важно, чтобы студент выполнил самостоятельно и грамотно необходимые измерения и наблюдения, укладываясь в отведенное для этого время. При организации своей работы для

проведения эксперимента целесообразно исходить из рекомендаций, изложенных в руководствах для выполняемой лабораторной работы.

На последнем этапе работы студент производит обработку данных измерений и анализ полученных результатов.

Отчет студента по работе должен быть индивидуальным, составленным по установленной форме, и содержать следующие разделы: наименование работы; цель работы; индивидуальное задание; применяемая аппаратура; ее описание (система, класс, цена давления и т.д.); краткое изложение методики, схемы опытов; таблицы данных измерений; итог обработки результатов и расчетные формулы; графики; анализ результатов и погрешностей; фрагмент конструкции соединения. Анализ результатов является важной частью отчета.

На лабораторных работах студент приобретает готовность выполнять расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения в соответствии с техническим заданием с использованием средств автоматизации проектирования (ПК-10), способность аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения (ПК-20).

Ниже приведены названия лабораторных работ.

1. Исследование основных параметров полупроводникового лазера
2. Определение электрооптических параметров анизотропных кристаллов
3. Полупроводниковые детекторы оптического излучения

## **7 Практические занятия**

На практических занятиях студенты приобретают навыки расчета физических процессов, происходящих в устройствах квантовой и оптической электроники, учатся рассчитывать параметры этих устройств.

Целью занятий является углубление понимания процессов, происходящих при распространении электромагнитных волн в резонаторе, усилении и генерации оптического излучения в квантовых системах, управлении характеристиками лазерного излучения. Уделяется внимание поляризации, монохроматичности, когерентности, направленности света, твердотельным и полупроводниковым лазерам.

Перед практическими занятиями студент должен повторить лекционный материал, ответив на вопросы для самоконтроля по необходимой теме, а также просмотреть рекомендации по решению типичных задач этой темы.

На практических занятиях студент приобретает готовность выполнять расчет и проектирование электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения в соответствии с

техническим заданием с использованием средств автоматизации проектирования (ПК-10), способность аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения (ПК-20).

Темы практических занятий приведены ниже:

1. Уравнения Максвелла. Плоские световые волны в безграничных средах
2. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом
3. Оптические резонаторы. Характеристики лазерного излучения. Уширение спектральных линий
4. Твердотельные, газовые и полупроводниковые лазеры

### **Методические указания по решению задач**

Материал пособия должен помогать закреплению теоретических знаний, а также вырабатывать навык в решении практических вопросов и задач.

Прежде чем решить задачу или ответить на поставленный вопрос, надо понять их сущность, физический смысл заданных величин, вспомнить физические процессы, законы и соотношения, относящиеся к данному вопросу.

Все аналитические решения следует проводить, используя общеизвестные физические законы, физические постоянные и физические системы единиц. Сначала надо написать исходные формулы, сделать, если это необходимо, соответствующие преобразования, получить конечные формулы, а затем подставить в эти формулы числовые значения и найти результат. Помните, что все физические величины в формуле должны быть в одной системе единиц. Не забывайте в ответе давать размерность полученной величины.

Ход всех преобразований и вычислений должен быть четко показан в решении задачи. Вычисления, как правило, достаточно делать до третьего знака, а в ряде случаев и до второго.

Полученный в виде числа ответ надо постараться проверить каким-либо способом. Полезно обратиться к справочной литературе и сравнить полученную величину с известными подобными величинами в справочнике. Если отличие в несколько порядков, то ищите ошибку в своем решении.

Примеры решения типичных задач и задачи для самостоятельного решения приведены в [11, 12].

## 8 Темы для самостоятельного изучения

Темы для самостоятельного изучения обобщают приобретенные знания и позволяют студенту самостоятельно решать задачи. Тематика самостоятельных работ предполагает углубленное изучение ниже предложенных тем.

1. Распространение волновых пакетов. Групповая скорость
  2. Спонтанные переходы
  3. Селекция типов колебаний в оптических резонаторах
  4. Жидкостные лазеры на растворах органических красителей
  5. Акустооптические модуляторы и дефлекторы
- Студент защищает реферат, по выбранной теме.

### 8.1 Теоретические вопросы для тестового опроса по теме «Квантовые переходы. Энергетические уровни»

1. Дайте математическую формулировку для закона распределения частиц по энергетическим уровням в состоянии термодинамического равновесия.
2. Почему для реализации принципа квантового усиления электромагнитных волн необходимо создать в веществе состояние инверсии населенностей?
3. Почему для реализации принципа квантового усиления электромагнитных волн необходимо использование индуцированного излучения?
4. Почему спонтанное излучение не может быть использовано для реализации принципа квантового усиления электромагнитных волн?
5. Каков физический смысл диагональных элементов матрицы плотности?
6. Каков физический смысл недиагональных элементов матрицы плотности?
7. Чему недиагональных элементов матрицы плотности равны в стационарном состоянии?
8. Запишите математическое выражение для среднего по ансамблю значения некоторой физической величины.
9. Запишите математическую формулировку для уравнения движения матрицы плотности смешанного ансамбля.
10. Какая система частиц называется термостатированным ансамблем?

## 8.2 Теоретические вопросы для тестового опроса по теме «Оптические резонаторы»

1. Запишите выражение для собственной частоты продольной моды резонатора Фабри-Перо.
2. Запишите способы селекции поперечных мод в оптических резонаторах.
3. Запишите способы селекции продольных мод в оптических резонаторах.
4. Дайте определение одночастотного режима работы резонатора.
5. К чему приводит жесткая связь между фазами колебаний генерируемых лазером продольных мод?
6. Нарисуйте картину распределения светового поля на зеркале оптического резонатора для лазера, генерирующего моду  $TEM_{11q}$ .
7. Что собой представляет полуконфокальный оптический резонатор?
8. Каковы достоинства полуконфокального оптического резонатора?
9. Запишите выражение для добротности оптического резонатора с учетом только полезных потерь.
10. Запишите выражение для добротности оптического резонатора с учетом полезных и дифракционных потерь.

## 8.3 Теоретические вопросы для тестового опроса по теме «Пространственные характеристики излучения ОКГ»

1. Что такое длина когерентности?
2. Дайте определение понятия когерентности.
3. Для какой из поперечных мод расходимость лазерного пучка минимальна?
4. Каким образом можно уменьшить расходимость лазерного пучка, соответствующего основной поперечной моде  $TEM_{00q}$ ?
5. Что такое естественная ширина спектральной линии?
6. Какие причины приводят к однородному уширению спектральных линий?
7. Какие причины приводят к неоднородному уширению спектральных линий?
8. Какое из условий принципа квантового усиления электромагнитных волн определяет большую длину когерентности лазерного излучения?
9. Какое из условий принципа квантового усиления электромагнитных волн определяет высокую пространственную когерентность лазерного излучения?
10. Какой кривой может описываться неоднородно уширенная спектральная линия?

## Заключение

В итоге изучения тем студент должен твердо, как минимум знать следующие вопросы.

1. Запишите материальные уравнения для изотропной среды, не обладающей дисперсией. Поясните все обозначения.

2. Запишите уравнения Максвелла в дифференциальной форме. Поясните все обозначения.

3. Выведите волновое уравнение из уравнений Максвелла в дифференциальной форме для непроводящей изотропной среды, в которой отсутствуют свободные заряды и сторонние токи.

4. Запишите математическую формулировку одномерного волнового уравнения. Поясните все обозначения.

5. Запишите математическое выражение для напряженности электрического поля плоской электромагнитной волны, распространяющейся в произвольном направлении. Поясните все обозначения.

6. Запишите уравнения Максвелла для плоских гармонических волн в непроводящей среде, в которой также отсутствуют свободные заряды и сторонние токи. Поясните все обозначения.

7. Какое поле называют поляризованным, а какое неполяризованным?

8. Каков физический смысл диагональных элементов матрицы плотности?

9. Каков физический смысл недиагональных элементов матрицы плотности? Чему они равны в стационарном состоянии?

10. Запишите математическое выражение для среднего по ансамблю значения некоторой физической величины, считая матрицу плотности данного ансамбля известной. Поясните все обозначения.

11. Запишите математическую формулировку для уравнения движения матрицы плотности смешанного ансамбля. Поясните все обозначения.

12. Запишите выражение для мощности, поглощаемой двухуровневой системой частиц, взаимодействующей с внешним полем, с учетом эффекта насыщения. Поясните все обозначения.

13. Запишите выражение для мощности, поглощаемой двухуровневой системой частиц, взаимодействующей с внешним полем, в приближении слабого поля. Поясните все обозначения.

14. Запишите выражение для мощности, поглощаемой двухуровневой системой частиц, взаимодействующей с внешним полем, в приближении сильного поля. Поясните все обозначения.

15. В чем заключается эффект насыщения при взаимодействии двухуровневой системы частиц с внешним электромагнитным полем?

16. Опишите способы селекции продольных мод в оптических резонаторах.
17. Дайте определение одночастотному режиму генерации лазера.
18. Что такое длина когерентности? Какова длина когерентности различных источников излучения?
19. Дайте определение понятия когерентности.
20. Назовите основные процессы, создающие инверсию населенностей в газовом разряде.
21. Что такое столкновения 1-го рода?
22. Что такое столкновения 2-го рода?
23. Опишите методы получения инверсной населенности в полупроводниках.
24. Дайте определение понятию внешнего квантового выхода излучающего диода.
25. Назовите условия получения вынужденного излучения в полупроводниках.
26. Перечислите основные параметры приемников оптического излучения.
27. Опишите фотогальванический режим работы фотодиода.
28. Что такое линейный электрооптический эффект?
29. В чем отличие продольного электрооптического эффекта от поперечного?
30. За счет каких эффектов происходит изменение диэлектрической проницаемости среды под действием акустической волны?

### Рекомендуемая литература

1. Пихтин А. Н. Квантовая и оптическая электроника: Учебник. - М.: Абрис, 2012. —656 с.
2. Шандаров С.М., Башкиров А.И. Введение в квантовую и оптическую электронику: Учебное пособие. – Томск: ТУСУР, 2012. – 98 с., <http://edu.tusur.ru/training/publications/1578>
3. Игнатов А. Н. Оптоэлектроника и нанофотоника: Учебное пособие. — СПб.: Издательство «Лань», 2011. — 528 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература). ISBN 978 5 8114 1136 8, [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=684](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=684)
4. Киселев Г.Л. Квантовая и оптическая электроника. – СПб.: Изд-во "Лань", 2011. – 320 с. - 2-е изд. испр. и доп.. ISBN: 978-5-8114-1114-6, [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=627](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=627)
5. Шандаров В.М. Основы физической и квантовой оптики: Учебное пособие. — Томск. ТУСУР, 2012. – 197 с., <http://edu.tusur.ru/training/publications/750>
6. Верещагин И.К., Косяченко Л.А., Кокин С.М. Введение в оптоэлектронику: Учебное пособие для вузов. - М.: Высшая школа, 1991. - 191 с.

7. Шангин А.С. Квантовая и оптическая электроника: Учебное пособие. — Томск: ТУСУР, 2008. – 112 с.

8. Башкиров А.И., Щербина В.В. Исследование основных параметров полупроводникового лазера. Методические указания к лабораторной работе по курсу «Квантовая и оптическая электроника». – Томск: ТУСУР, 2014. - 17 с. <http://edu.tusur.ru/training/publications/>

9. Башкиров А.И., Щербина В.В. Полупроводниковые детекторы оптического излучения. Методические указания к лабораторной работе по курсу «Квантовая и оптическая электроника». – Томск: ТУСУР, 2014. - 13 с., <http://edu.tusur.ru/training/publications/>

10. Шандаров С.М., Буримов Н.И. Определение электрооптических параметров анизотропных кристаллов: методические указания к лабораторной работе. – Томск: ТУСУР, 2012. - 18 с., : <http://edu.tusur.ru/training/publications/>

11. Шандаров С.М. Физические основы квантовой и оптической электроники: методические указания к практическим занятиям. – Томск: ТУСУР, 2013. - 31 с., <http://edu.tusur.ru/training/publications/3483>

12. Шангина Л.И. Квантовая и оптическая электроника: Учебно-методическое пособие по практическим занятиям. – Томск: ТУСУР, 2012. – 228 с., <http://edu.tusur.ru/training/publications/714>

Учебное пособие

Башкиров А.И.

Квантовая и оптическая электроника

Методические указания по самостоятельной работе

Усл. печ. л.                      Препринт  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники  
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40