

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

Кафедра электронных приборов

## **ПРИБОРЫ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И ФОТОНИКИ**

Методические указания по самостоятельной работе  
для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика»

2012

## **Мягков Александр Сергеевич.**

Приборы квантовой электроники и фотоники: методические указания по самостоятельной работе для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика» / А.С. Мягков; 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, 2012. - 15 с.

Данные методические указания ставят своей целью оказать помощь студентам в изучении и проектировании новейших квантовых и оптоэлектронных приборов. Это требует овладения навыками самостоятельной работы с учебной и периодической литературой, с описаниями патентов и авторских свидетельств, умения самостоятельно излагать свои мысли и знания в процессе изучения дисциплины.

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению 20600.62 – Фотоника и оптоинформатика.

© Мягков Александр Сергеевич, 2012

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

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

## **ПРИБОРЫ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И ФОТОНИКИ**

Методические указания по самостоятельной работе  
для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика»

Разработчик

д-р техн. наук, проф. каф.ЭП

\_\_\_\_\_ А.С. Мягков

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г

## Содержание

1	Введение .....	5
2	Основные понятия в теории квантовых и оптоэлектронных приборов	5
2.1	Содержание раздела .....	5
2.2	Методические указания по изучению раздела .....	5
2.3	Вопросы для самопроверки .....	5
3	Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках .....	6
3.1	Содержание раздела .....	6
3.2	Методические указания по изучению раздела .....	6
3.3	Вопросы для самопроверки .....	6
4	Полупроводниковые лазеры и светодиоды .....	6
4.1	Содержание раздела .....	6
4.2	Методические указания по изучению раздела .....	7
4.3	Вопросы для самопроверки .....	7
5	Газовые и твердотельные лазеры. Устройства квантовой электроники и оптоэлектроники .....	7
5.1	Содержание раздела .....	7
5.2	Методические указания по изучению раздела .....	8
5.3	Вопросы для самопроверки .....	8
6	Методы и устройства управления лазерным излучением.....	8
6.1	Содержание раздела .....	8
6.2	Методические указания по изучению раздела .....	9
6.3	Вопросы для самопроверки .....	9
7	Моделирование работы и расчет квантовых приборов и устройств ....	9
7.1	Содержание раздела .....	9
7.2	Методические указания по изучению раздела .....	10
7.3	Вопросы для самопроверки .....	10
8	Оптоэлектронные устройства, приборы и элементы оптоэлектроники и методы их расчета и проектирования .....	10
8.1	Содержание раздела .....	10
8.2	Методические указания по изучению раздела .....	11
8.3	Вопросы для самопроверки .....	11
9	Лабораторные работы .....	11
10	Практические занятия .....	14

## **1 Введение**

Данные методические указания ставят своей целью оказать помощь студентам в изучении и проектировании новейших квантовых и оптоэлектронных приборов. Это требует овладения навыками самостоятельной работы с учебной и периодической литературой, с описаниями патентов и авторских свидетельств, умения самостоятельно излагать свои мысли и знания в процессе изучения дисциплины.

Самостоятельная работа направлена на углубление знаний дисциплины и предполагает обобщение изучаемых тем.

## **2 Основные понятия в теории квантовых и оптоэлектронных приборов**

### **2.1 Содержание раздела**

Понятие квантового генератора и усилителя. Принципиальное устройство газового и твердотельного лазера, устройства мазера. Оптические резонаторы. Оптоэлектронные явления на нелинейных оптических кристаллах. Оптические волноводы и волокна. Закон Снелля. Акусто и оптоэлектронные приборы. Светодиоды, магнитооптические приборы, фотодиоды, фотоприборы. Фуллерены.

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

В данной теме следует обратить внимание на общее принципиальное устройство квантовых и оптоэлектронных приборов и устройств. Наиболее результативным будет являться конспект по достижениям науки и техники в этой области.

### **2.3 Вопросы для самопроверки**

1. Какие специфические требования предъявляются к материалам для квантовых и оптоэлектронных приборов?
2. Чем отличается лазер от мазера?
3. Как принципиально устроен газовый лазер?
4. Как устроен одноэлектронный транзистор?
5. Какие оптоэлектронные явления на нелинейных кристаллах Вам известны?
6. Что такое фуллерены?
7. Как принципиально работает акустоэлектронный элемент?
8. На каком принципе работает твердотельный лазер?
9. Принцип работы магнитооптических устройств
10. Принципиальное устройство оптического волновода

### **3 Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках**

#### **3.1 Содержание раздела**

Энергетические состояния в полупроводниковых кристаллах. Оптические переходы в полупроводниках. Оптическое поглощение в кристаллах. Люминесценция. Квантоворазмерные структуры

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

В данной теме следует обратить внимание на зонную теорию твердых тел. На оптические переходы в полупроводниках, на оптическое поглощение в кристаллах, на явление люминесценции.

#### **3.3 Вопросы для самопроверки**

1. Какие методы используются для создания инверсии населенностей уровней в квантовых системах?
2. При каких условиях вещество способно усиливать электромагнитное излучение?
3. Какими свойствами обладают спонтанные и индуцированные излучения?
4. Что понимается под люминесценцией?
5. Как возникают колебания в ОКГ, и какие условия необходимы для существования стационарных колебаний?
6. Почему в ОКГ возможно существование колебаний с различными частотами?
7. Понятие неопределенность энергии  $i$  уровня.
8. Как изменяется спектр частот колебаний при уменьшении длины резонатора ОКГ?
9. Понятие квантоворазмерных структур
10. Понятие формы спектральной линии, ее ширины

### **4 Полупроводниковые лазеры и светодиоды**

#### **4.1 Содержание раздела**

Полупроводниковые лазеры на собственных полупроводниках с оптической накачкой. Инжекционные полупроводниковые лазеры на гомоструктурах и гетероструктурах.

Характеристики излучения полупроводниковых лазеров. Цветовая диаграмма. Цветовое уравнение

Светодиоды, их устройство, принцип работы. Конструкция светодиода Баррасса. Волноводы. Понятие «моды»

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

В данном разделе следует обратить внимание на зонную теорию твердых тел. На оптические переходы в полупроводниках, на оптическое поглощение в кристаллах. Обращается внимание на математические соотношения, моделирующие процесс возбуждения и генерацию излучения.

## **4.3 Вопросы для самопроверки**

1. Полупроводниковые лазеры на собственных полупроводниках с оптической накачкой, принцип работы, устройство, характеристики излучения.

2. Полупроводниковые лазеры с электронной накачкой, принцип работы, устройство, характеристики излучения.

3. Инжекционные полупроводниковые лазеры на гомоструктурах и гетероструктурах. Принцип работы, устройство, характеристики излучения.

4. Материалы для инжекционных лазеров.

5. Характеристики излучения полупроводниковых лазеров.

6. Полосковые гетеролазеры.

7. Светодиоды, их устройство, принцип работы.

8. Цветовая диаграмма

9. Цветовое уравнение

10. Спектральные характеристики светодиодов

## **5 Газовые и твердотельные лазеры. Устройства квантовой электроники и оптоэлектроники**

### **5.1 Содержание раздела**

Газовые лазеры, конструкции и параметры. Основные способы возбуждения активных сред. Электрический разряд, газодинамика, химическое возбуждение, фотодиссоциация, оптическая накачка. Квантовая эффективность.

Резонансная передача энергии возбуждения при столкновениях. Двухуровневый квантовый генератор. Гелий-неоновый лазер.

Устройства квантовой электроники и оптоэлектроники Квантовые парамагнитные усилители и генераторы; типы оптических резонаторов. Резонатор Фабри-Перо: устойчивость, собственные колебания, методы их селекции; стационарная и нестационарная генерация в лазерах; стабильность параметров лазерного излучения; моделирование добротности оптического резонатора. Явление электронного парамагнитного резонанса.

Матрицы лазеров на твердом теле. Рубиновый лазер. Неодимовый лазер на гранате и стекле.

Цикл оптической накачки. Вибронные и бесфононные переходы. Лазер на александрите. Лазер на сапфире с титаном. Тенденции развития лазерной техники

## 5.2 Методические указания по изучению раздела

В данной теме следует обратить внимание на физику процесса возбуждения и генерации излучения, а также на факторы, влияющие на стабильность частоты квантовых генераторов.

## 5.3 Вопросы для самопроверки

1. Каким образом достигается инверсия населенности в двухуровневом квантовом генераторе?
2. За счет чего образуется инверсионный спектр колебаний аммиака?
3. Определите  $H_0$  для парамагнитного иона на частоте перехода, равной 0,9 мкм.
4. На чем основана работа селектора в молекулярном генераторе?
5. Чем определяются условия самовозбуждения аммиачного генератора?
6. Почему квантовые генераторы являются высокостабильными частотными генераторами?
7. Что представляет собой явление электронного парамагнитного резонанса (ЭПР)?
8. Какие схемы накачки используются в квантовых парамагнитных усилителях?
9. Самостоятельный и несамостоятельный разряды в газовых лазерах
10. Чем обусловлен малый уровень шумов в квантовых парамагнитных усилителях?

## 6 Методы и устройства управления лазерным излучением

### 6.1 Содержание раздела

Электрооптические, магнитооптические и пьезооптические эффекты. Оптическая связь. Оптические модуляторы лазерного излучения. Дефлекторы. Методы и устройства управления спектральными и пространственными характеристиками лазерного излучения. Квантовые и оптоэлектронные приборы как информационная система с кодировкой сигналов. Теорема Котельникова. Винеровская фильтрация. Теорема Шеннона. Типы кодировки. Линзы Френеля. Число Френеля. Голографические и дифракционные решетки. Интерферометры Маха-Цандлера, интерферометр Юнга. Монохроматоры. Двухпучковое управление.

## 6.2 Методические указания по изучению раздела

Обращается внимание на физику процессов, происходящих при управлении излучением.

### 6.3 Вопросы для самопроверки

1. Какие активные среды используются в ОКГ на твердом теле и почему?
2. Почему для возбуждения ОКГ на стекле или на иттрий-алюминиевом гранате, активированными неодимом, требуется меньшая энергия, чем для ОКГ на рубине?
3. Какой вид имеет схема устройства управления ОКГ на твердом теле?
4. Чем различаются схемы управления и устройства газовых ОКГ, возбуждаемых переменным и постоянным токами разряда?
5. Почему концы газоразрядной трубки газового He-Ne ОКГ скошены под углом Брюстера к оси резонатора?
6. Какие ОКГ и по каким причинам работают преимущественно в импульсном или в непрерывном режимах?
7. Какими достоинствами и недостатками обладают газовые, твердотельные и полупроводниковые ОКГ по величине выходной мощности, К.П.Д, направленности излучения, стабильности частоты, монохроматичности излучения, габаритам, весу и срокам службы?
8. Чему равна ширина дифракционного максимума на уровне половинной интенсивности для основной моды резонатора с плоскими зеркалами, диаметром 10 мм?
9. Можно ли добиться генерации для активного кристалла длиной 8 см, который дает полуторократное усиление сигнала на длине волны, соответствующей инвертированному переходу при определенном заданном уровне накачки?
10. Определите частоту для каждого из ниже перечисленных источников оптического излучения: а) гелий-неоновый лазер при  $\lambda=0,63$  мкм; б) лазер на неодиме ( $Nd^{3+}$ ) при  $\lambda=1,06$  мкм; в) лазер на углекислом газе при  $\lambda= 10,6$  мкм. Учтите, что частота определяется отношением скорости света к длине волны.

## 7 Моделирование работы и расчет квантовых приборов и устройств

### 7.1 Содержание раздела.

Моделирование изменения параметров и расчет квантового генератора. Расчет и моделирование квантовых переходов. Расчет добротности резонаторов. Моделирование процессов в оптическом резонаторе. Моделирование явлений в квантовом парамагнитном усилителе.

## **7.2 Методические указания по изучению раздела**

В данной теме следует обратить внимание на математические соотношения и физику процесса возбуждения и генерации излучения. Важно определить границы (граничные условия) применимости соотношений. Следует обратить внимание на реальные параметры, которыми обладают аналоги. Важно привести схему работы оптического устройства. Полезно посмотреть примеры решения задач.

## **7.3 Вопросы для самопроверки**

1. Как определяется число Френеля?
2. Как вычисляются дифракционные потери?
3. Как определяется ширина спектральной полосы?
4. Какова математическая связь дифракционных потерь с размерами зеркала?
5. Приведите соотношение, характеризующее условие возникновения стоячих волн в резонаторе.
6. Как определяется интервал между частотами соседних продольных волн?
7. Как определяется характеристическое время затухания в среде с показателем преломления?
8. Как учитываются потери через боковые стенки резонатора?
9. Запишите условие самовозбуждения генератора
10. Запишите условие стационарного режима генерации

## **8 Оптоэлектронные устройства, приборы и элементы оптоэлектроники и методы их расчета и проектирования**

### **8.1 Содержание раздела**

Классификация оптоэлектронных устройств, приборов и элементов оптоэлектроники. Фотоприемники. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта. Приемники оптических изображений. Дифракционные потери и их расчет. Волоконно-оптические линии связи и её элементная база. Элементы интегральной оптики. Моделирование, расчет и проектирование параметров фотоприемника и оптического волокна.

## 8.2 Методические указания по изучению раздела

В данной теме полезно посмотреть примеры решения задач.

## 8.3 Вопросы для самопроверки

### *Оптические квантовые генераторы*

1. Как определяется длина когерентности ОКГ
2. Как математически определяется степень монохроматичности по огибающей спектра, состоящей из нескольких мод?
3. Как определяется расстояние первого дифракционного минимума от центра дифракционной картины при дифракции плоской волны на круглом отверстии?
4. Как определяется инверсия населенности в 3-уровневой схеме?
5. Приведите соотношение для коэффициента инверсии.
6. Как определяется коэффициент усиления в однорезонаторном квантовом парамагнитном усилителе?
7. Как определяется модуль спиновой температуры?
8. Как определяется минимальное значение коэффициента отражения для генерации излучения?
9. Поясните, почему с ростом потерь в резонаторе мощность генератора падает
10. Полиномы Эрмита и их связь с размером пятна.

### *Фотоприемники*

1. Параметры и характеристики фотоприемников
2. Понятие квантового выхода внутреннего фотоэффекта
3. Инерционность фотодиода
4. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта
5. Законы фотоэффекта

### *Оптоволокно.*

1. По какому закону изменяется показатель преломления у градиентного оптоволокна.
2. Как рассчитывается критический угол ввода излучения в оптоволокно?
3. Что понимается под дисперсией материала в оптическом волокне?
4. Фазовая и групповая скорость распространения сигнала
5. Межмодовая дисперсия.

## 9 Лабораторные работы

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

результатов, защита.

*Вступительный этап* включает анализ полученного индивидуального задания, изучение рекомендуемых литературных источников по теме задания, знакомство с приборами, методами и схемами измерений. Исходя из возможностей лабораторного оборудования и условий индивидуального задания, выбирается и обосновывается метод проведения эксперимента, составляется методика и программа выполнения работы. В процессе самостоятельной подготовки к лабораторной работе каждый студент ведет черновик отчета, куда вносятся:

- схема установки;
- методика проведения работы;
- формулы и предполагаемые графики.

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 знакомятся с установкой, 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. Все пропущенные лабораторные работы по уважительным или неуважительным причинам могут быть выполнены в конце семестра на дополнительных занятиях.

*Проведение эксперимента в лаборатории* – это 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.

В экспериментах, когда это важно, всегда следует ставить пробные опыты, которые преследуют несколько целей:

– экспериментатор «знакомится» с данным экспериментом. В каждом эксперименте своя методика и связанные с нею определенные, часто повторяющиеся операции, и экспериментатору необходимо поупражняться или попрактиковаться в их выполнении. Первые несколько измерений в эксперименте почти всегда менее надежны или менее ценны, чем последние, и обычно удается сэкономить время, если в начальный период работы

затратить часть его на то, чтобы найти наилучшие способы проведения измерений и записи результатов;

- проверяется работа отдельных элементов установки аппаратуры;
- определяется соответствующий интервал значений для каждой из величин, измеряющихся в данном эксперименте;
- оцениваются возможные ошибки в различных величинах.

В ходе пробного опыта следует провести некоторые предварительные измерения и составить план с указанием величин, которые необходимо измерять, и оценить время, необходимое на каждое такое измерение.

Прежде чем, приступить к систематическим измерениям, необходимо убедиться, что Вы знаете, как работает прибор, какая взаимосвязь между отдельными элементами установки, т.е. что чем регулируется. Разобраться в этом вопросе студенту поможет внимательное чтение инструкций, описаний приборов и частных методических указаний.

В каждом эксперименте очень важно сразу же записывать все сделанное. Все результаты измерений следует записывать немедленно и без какой-либо обработки. Не проводите никаких, даже самых простых, арифметических расчетов в уме, прежде чем записать результат измерения. *Обработка измерений* - последний этап работы.

Пересчет показаний прибора в истинное значение измеряемой величины выполняется в процессе обработки результатов измерений. При проведении и записи измерений хорошо проверить то, что Вы записали, взглянуть еще раз на прибор. Все записи необходимо датировать и снабжать заголовками.

*Защита работы.* Отчет студента должен быть индивидуальным, и содержать следующие разделы: наименование работы; цель работы; индивидуальное задание; применяемая аппаратура; ее описание (система, класс, цена деления 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.

Здесь нужно привести:

- сопоставление с другими аналогичными результатами, если они имеются, с обязательной ссылкой на литературный источник;
- сопоставление с соответствующими теориями;
- причины, обусловившие погрешности измерений и методы их устранения.

Таким образом, отчет студента должен представлять собой пусть небольшую, но законченную работу, хорошо оформленную и грамотно изложенную.

Ниже приведены названия лабораторных работ.

1. Определение электрооптических параметров анизотропных кристаллов

2. Исследование затухающих колебаний электрического заряда в последовательном колебательном контуре

3. Исследование энергетических и спектральных характеристик фотодиодов

## **10 Практические занятия**

На практических занятиях студенты приобретают навык моделирования и прогнозирования параметров квантовых и оптоэлектронных приборов. Студентам предлагается оценка граничных условий применения соотношений, умение составления программ для расчетов, умение сравнивать полученные результаты с аналогами и достижениями в данной области.

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.

Темы практических занятий

1. Статистическое моделирование квантовых переходов
2. Моделирование процессов в оптическом резонаторе
3. Статистическое моделирование добротности оптических систем и характеристик излучения
4. Моделирование явлений в квантовом парамагнитном усилителе
5. Расчет параметров оптического квантового генератора
6. Моделирование работы фотоприемника
7. Расчетное моделирование параметров оптического волокна

Учебное пособие

Мягков А.С.

Приборы квантовой электроники и фотоники  
Методические указания по самостоятельной работе

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