

Министерство науки и высшего образования РФ  
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет»  
Инженерно-физический факультет высоких технологий  
Кафедра радиоп физики и электроники

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
для самостоятельной работы по дисциплине  
«Практикум по квантовой электронике»  
студентов бакалавриата по направлению 03.03.03 «Радиофизика»  
Очная форма обучения

Санников Д.Г.

Ульяновск 2019

**Методические указания для самостоятельной работы по дисциплине «Практикум по квантовой электронике» для студентов бакалавриата по направлению 03.03.03 «Радиофизика», очная форма обучения. Санников Д.Г. Ульяновск: УлГУ, 2019.**

Настоящие методические указания предназначены для студентов направления 03.03.03 «Радиофизика», изучающих дисциплину «Практикум по квантовой электронике». Приводится литература по дисциплине, основные темы курса и вопросы в рамках каждой темы, а также контрольные вопросы для самопроверки.

Указания могут быть полезны при подготовке к лабораторным работам и зачету по данной дисциплине.

Рекомендованы к использованию Ученым советом инженерно-физического факультета высоких технологий УлГУ, протокол №11 от «18» июня 2019 г.

## ЛИТЕРАТУРА ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

- [1] Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике. М.: Наука, 1988
- [2] Ярив А. Практикум по квантовой электронике. М.: Советское радио, 1980.
- [3] Звелто О. Принципы лазеров. М.: Мир, 1990.
- [4] Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. М.: Наука, 2004.
- [5] Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника. М.: Высшая школа, 2001.

## Список тем для самостоятельной работы

1. Коэффициенты Эйнштейна.
2. Ширина линии излучения.
3. Усиление в активных средах.
4. Квантово-механический подход для описания двухуровневой системы.
5. Характеристики лазерных усилителей.
6. Генерация лазерного излучения.
7. Открытые резонаторы в квантовой электронике.
8. Гауссовы пучки. Устойчивые и неустойчивые резонаторы.
9. Синхронизация мод. Модуляция добротности.

## Тема 1. Коэффициенты Эйнштейна.

### Основные вопросы темы

1. Основные понятия и положения квантовой электроники.
2. История развития квантовой электроники.
3. Виды излучательных переходов.
4. Свойства вынужденных переходов.
5. Коэффициенты Эйнштейна, их связь.

### Рекомендации по изучению темы

Вопрос 1: [1]\*, стр. 11-12; [5], стр.5-12.

Вопрос 2: [1], стр. 122-129; [4], стр.301-304.

Вопрос 3: [1], стр. 12-14; [2], §8.3.

Вопрос 4: [3], стр. 10-13; [4], стр.216-221.

Вопрос 5: [1], стр. 14-18; [2], §8.5; [3], §2.4.3.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение квантовой электроники.
2. Перечислите основные области оптического диапазона спектра (с указанием частот).
3. В каких областях длин волн работают мазеры и лазеры?
4. Каковы 3 фундаментальных положения квантовой электроники?
5. Объясните схему излучательных переходов в 2-хуровневой системе.
6. Что такое неравновесное состояние системы?
7. Дайте определение накачки, каковы способы её осуществления?
8. Каковы свойства вынужденных переходов?
9. Что описывает формула Больцмана?
10. Запишите и объясните формулу Планка для равновесного излучения абсолютно черного тела.

### **Тесты для самопроверки. Выберите один правильный ответ.**

1. Видимый участок оптического диапазона включает длины волн:  
А) от 2 до 50 мкм  
Б) от 10 нм до 350 нм  
В) от 0,38 до 0,78 мкм
2. Фотометрическая величина, сила света, измеряется в  
А) канделах  
Б) люменах

---

\* Т.е. книга [1] Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике. М.: Наука, 1988, стр. 11-12

- В) люксах
3. Какое из словосочетаний не тождественно термину «вынужденный переход»:
- А) «индуцированный переход»  
 Б) «стимулированный переход»  
 В) «редуцированный переход»
4. Спектральная плотность энергии имеет размерность в системе СГС:
- А) эрг·с/(см<sup>3</sup>)  
 Б) Дж/с  
 В) эрг·Гц
5. Вероятность спонтанного излучения растет пропорционально
- А)  $\nu^3$  ( $\nu$  – частота)  
 Б)  $1/\nu^2$   
 В)  $\nu^{3/2}$

## Тема 2. Ширина линии излучения.

### Основные вопросы темы

1. Естественная ширина линии
2. Время жизни частиц и время расфазировки.
3. Однородное уширение. Лоренцева форма линии (форм-фактор).
4. Неоднородное уширение. Гауссова форма линии.

### Рекомендации по изучению темы

Вопрос 1: [1], стр. 17-20; [4], стр.48,53; [5], стр.59.

Вопрос 2: книга [1], стр. 20 и далее.

Вопрос 3: [1], стр. 12-14; [2], стр.30,116,119,199; [5], стр.55-59.

Вопрос 4: [1], стр.24; [2], стр.30,117,119,190.

### Контрольные вопросы

1. Что такое соотношение неопределенностей энергия – время?
2. Дайте определения терминам «естественное время жизни», «ширина спектра спонтанного излучения».
3. Как описывается лоренцева форма линии?
4. Запишите вероятность индуцированных переходов при монохроматическом излучении.
5. Что такое однородное и неоднородное уширения.
6. Как выглядит гауссова форма линии при доплеровском уширении.

### Тесты для самопроверки. Выберите один правильный ответ.

1. Естественная ширина линии определяется:

- А) коэффициентом Эйнштейна  $B_{12}$
  - Б) вероятностью спонтанного перехода  $A_{21}$
  - В) коэффициентом Эйнштейна  $B_{21}$
2. Синонимом термина «поперечное время релаксации» является:
    - А) «время расфазировки»
    - Б) «энергетическое время релаксации»
    - В) «пролетное время»
  3. Контур линии спонтанного излучения имеет:
    - А) форму Гаусса
    - Б) форму Лоренца
    - В) форму Фойгта
  4. Однородное уширение линии – это:
    - А) уширение, обусловленное конечностью времени жизни состояний, связанных рассматриваемым переходом
    - Б) уширение, определяемое разностью времен жизни и времени пролета частицы
    - В) уширение, происходящее из-за неоднородности внешнего намагничивающего поля в пределах исследуемого образца
  5. Классическим примером неоднородного уширения является
    - А) доплеровское уширение
    - Б) лоренцевское уширение
    - В) уширение Фойгта.

### **Тема 3. Усиление в активных средах.**

#### Основные вопросы темы

1. Поглощение и усиление. Активная среда.
2. Сечение поглощения. Эффект насыщения.
3. Плотность потока энергии насыщающего излучения.
4. Импульсный режим, энергия насыщения.

#### Рекомендации по изучению темы

Вопрос 1: [1], лекция 3; [5], §2.4.3.

Вопрос 2: [4], стр.65,158; [5], стр.79.

Вопрос 3: [1], лекция 3; [5], §2.4.

Вопрос 4: [1], лекция 3; [4], стр.216-221.

#### **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение системы квантовых частиц с инверсией.
2. Запишите связь между коэффициентом поглощения и коэффициентом Эйнштейна  $B_{12}$ .
3. Что такое сечение поглощения?
4. В чем суть эффекта насыщения?
5. Как записываются скоростные (кинетические) уравнения?

6. Что такое непрерывный режим работы генератора?
7. Как определяется эффективная характеристика насыщения?
8. Перечислите свойства насыщения.
9. Что такое импульсный режим генерации?
10. Как определяется разность населенностей для непрерывного и импульсного режимов?

**Тесты для самопроверки. Выберите один правильный ответ.**

1. Инверсией населенностей называется состояние системы квантовых частиц, в котором:
  - А) верхний уровень имеет большую населенность, нежели нижний
  - Б) уровни имеют одинаковую населенность
  - В) число частиц на верхнем уровне меньше, чем на нижнем
2. Системы с инверсией населенностей являются системами
  - А) с усилением
  - Б) с поглощением
  - В) с инжекцией
3. Эффект насыщения наступает в случае, когда
  - А) коэффициент поглощения падает
  - Б) коэффициент поглощения растет
  - В) доля энергии, поглощаемой системой, увеличивается
4. Непрерывный режим – это режим генерации, который
  - А) продолжается в течение времени, заметно большего времени релаксации
  - Б) имеет продолжительность, не превышающую время релаксации
  - В) имеет продолжительность, сопоставимую со временем релаксации
5. В импульсном режиме условие полного насыщения предполагает, что плотность энергии импульса  $F_{\text{имп}}$ 
  - А) гораздо больше насыщающей плотности энергии  $F_s$
  - Б) равна насыщающей плотности энергии
  - В) намного меньше насыщающей плотности энергии

**Тема 4. Квантово-механический подход для описания двухуровневой системы.**

Основные вопросы темы

1. Коэффициенты Эйнштейна и матричный элемент оператора дипольного перехода.
2. Энергия взаимодействия «волна – частица».
3. Частота Раби.

Рекомендации по изучению темы

Вопрос 1: [1], лекция 4; [4], §6.4.1.

Вопрос 2: [3], стр. 654-658; [4], стр.289.

Вопрос 3: книга [1], лекция 4.

**Контрольные вопросы**

1. Что такое  $\Psi$ -функция, каков её смысл?
2. Запишите гамильтониан системы «частица-волна» в общем виде.
3. Объясните свойство ортонормированности для волновых функции  $\varphi_n$ .
4. Запишите уравнение Шредингера для системы «частица-волна» при наличии взаимодействия.
5. Что такое электрический дипольный момент?
6. Дайте определение матричного элемента оператора дипольного момента перехода.
7. Как выражается коэффициент Эйнштейна  $B_{12}$  через дипольный матричный элемент  $\langle d \rangle$ ?
8. Дайте определение частоты Раби.
9. Какова связь осцилляций населенности верхнего уровня с частотой Раби?

**Тесты для самопроверки. Выберите один правильный ответ.**

1. Ортонормированность волновых функций означает:
  - А) взаимную независимость стационарных энергетических состояний
  - Б) зависимость стационарных состояний друг от друга
  - В) взаимодействие уровней
2. Электрический дипольный момент
  - А) не зависит от заряда каждого полюса
  - Б) определяется временем взаимодействия полюсов
  - В) зависит от расстояния между зарядами
3. Коэффициента Эйнштейна  $B_{12}$  зависит:
  - А) только от матричного элемента оператора дипольного взаимодействия
  - Б) от массы частиц газа в резонаторе
  - В) от внутренней энергии системы
4. Частота Раби имеет смысл:
  - А) собственной частоты колебательной системы
  - Б) частоты соударений частиц в системе
  - В) частоты осцилляций частицы между верхним и нижним уровнем
5. Рассмотрение взаимодействия в системе «квантовая частица - классическое поле излучения» подразумевает разбиение энергии системы на несколько частей:
  - А) внутренняя энергия частицы + энергия поля излучения
  - Б) кинетическая энергия частицы + потенциальная энергия поля излучения взаимодействия между ними
  - В) внутренняя энергия частицы + энергия поля излучения + энергия взаимодействия между ними

## **Тема 5. Характеристики лазерных усилителей.**

### Основные вопросы темы

1. Усиление и генерация. Полоса пропускания усилителя бегущей волны.



2. Шум квантового усилителя бегущей волны, его максимальная выходная мощность.
3. Особенности импульсного режима (максимальная выходная энергия, изменение формы импульса при нелинейном усилении).

Рекомендации по изучению темы

Вопрос 1: [1], лекция 5; [2], глава 9; [5], глава 2.

Вопрос 2: [2], стр. 221-248; [5], стр.89-90.

Вопрос 3: [1], лекция 5; [5], стр.158.

**Контрольные вопросы**

1. Дайте определение усилению в среде, генерации.
2. Что такое положительная (отрицательная) обратная связь?
3. Опишите работу резонатора с активной средой и двумя торцевыми зеркалами.
4. Что такое люминесценция и сверхлюминесценция?
5. В чём заключаются условия самовозбуждения резонатора?
6. Чем определяется полоса пропускания усилителя бегущей волны?
7. Запишите соотношение для ширины полосы пропускания.
8. Что такое шумы квантового усилителя?
9. Как найти максимальную выходную энергию (мощность) в импульсном режиме?
10. Как изменяется форма импульса при нелинейном усилении?

**Тесты для самопроверки. Выберите один правильный ответ.**

1. Самовозбуждение в резонаторе возникает при условии, что мощность индуцированного излучения  
А) превышает мощность всех потерь внутри резонатора, но не превышает потери на внешнее излучение  
Б) превышает мощность всех потерь внутри резонатора и потерь на полезное излучение во внешнее пространство  
В) не превышает мощность всех потерь внутри резонатора и потерь на полезное излучение во внешнее пространство
2. Генератором называется самовозбудившийся усилитель  
А) без обратной связи  
Б) с обратной связью  
В) на основе резонатора без обратной связи
3. В режиме бегущей волны коэффициент усиления по мощности всего усилителя не зависит от:  
А) коэффициента нерезонансных потерь  
Б) длины резонатора  
В) скорости света
4. Любой когерентный усилитель обладает принципиально неустранимыми входными шумами с мощностью в единичном спектральном интервале, зависящей

- А) только от длины волны излучения
  - Б) массы частиц
  - В) средней тепловой скорости частиц
5. Выберите правильное утверждение. «Форма мощного импульса по мере его усиления в инверсной среде
- А) не искажается»
  - Б) передняя часть импульса усиливается больше, чем задняя часть импульса»
  - В) задняя часть импульса усиливается больше, чем передняя часть импульса»

## **Тема 6. Генерация лазерного излучения.**

### Основные вопросы темы

1. Виды резонаторов, понятие добротности.
2. Регенерация резонатора при усилении.
3. Частота генерации.
4. Максимальная выходная интенсивность генератора для непрерывного и импульсного режимов работы.

### Рекомендации по изучению темы

Вопрос 1: [1], лекция 6; [2], глава 9; [3], §4.3.

Вопрос 2: [1], лекция 6; [4], стр.224-225.

Вопрос 3: книга [1].

Вопрос 4: [3], лекция 6; [5], §2.4.

### **Контрольные вопросы**

1. В радиодиапазоне обычно используются объемные резонаторы, почему?
2. Как устроен открытый резонатор?
3. Запишите формулу для добротности резонатора в общем виде.
4. Что такое интерферометр Фабри – Перо и какова его добротность?
5. Как найти коэффициент усиления для усилителя, помещенного в резонатор Фабри – Перо?
6. Каков смысл энергетического условия самовозбуждения усилителя?
7. Запишите условие резонанса (связь длины резонатора и длины генерируемой волны).
8. Проанализируйте соотношение (6.25) конспекта для частоты генерации.
9. Как определяется максимальная выходная мощность для непрерывного режима работы генератора?
10. Запишите формулу для энергии генерации импульсных лазеров и поясните её.

**Тесты для самопроверки. Выберите один правильный ответ.**

1. Открытый резонатор в квантовой электронике аналогичен:  
А) интерферометру Майкельсона  
Б) интерферометру Фабри – Перо  
В) интерферометру Жамена
2. Если резонатор регенерируется, то  
А) его добротность возрастает  
Б) его добротность падает  
В) он превращается в усилитель
3. Режим бегущей волны в оптическом усилителе, помещенном в резонатор Фабри – Перо, осуществляется, если:  
А) коэффициент отражения становится равным 0  
Б) коэффициент отражения становится равным 1  
В) коэффициент пропускания становится равным 0
4. Условия самовозбуждения генератора предполагают, что выполняются условия  
А) баланса амплитуд и фаз  
Б) баланса частот и фаз  
В) баланса фаз
5. Фазовая характеристика резонатора для одной колебательной моды полностью эквивалентна характеристике  
А) одиночного RLC-контура  
Б) двух RLC-контуров  
В) одиночного LC-контура

## **Тема 7. Открытые резонаторы в квантовой электронике.**

### Основные вопросы темы

1. Резонаторы в электронике. Моды. Падение добротности и сгущение резонансов замкнутых объемов.
2. Открытые резонаторы и прореживание спектра.
3. Время жизни моды пассивного резонатора.
4. Метод Фокса и Ли. Интегральное уравнение открытого резонатора.

### Рекомендации по изучению темы

Вопрос 1: [1], лекция 7; [2], стр.85-86.

Вопрос 2: [1], лекция 7; [2], глава 7; [5], §2.3.

Вопрос 3: [1], лекция 7; [2], стр.96.

Вопрос 4: [1], лекция 7; [4], стр.189,193; [3], §4.4.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение моде резонатора.
2. Как определяется добротность резонатора в виде замкнутой металлической полости?

3. Почему с увеличением частоты или объема резонансные кривые колебаний замкнутой полости перекрываются?
4. Почему уменьшается количество собственных колебаний открытого резонатора по сравнению с резонатором закрытого типа?
5. Что такое время жизни фотона в моде?
6. Перечислите виды потерь в открытом резонаторе, какова роль дифракционных потерь?
7. Как оценить дифракционные потери энергии за один проход?
8. В чем суть метода Фокса и Ли?
9. Как выглядит интегральное уравнение открытого резонатора.
10. Перечислите выводы анализа Фокса и Ли открытых резонаторов.

**Тесты для самопроверки. Выберите один правильный ответ.**

1. С уменьшением размеров полых металлических объемных резонаторов (пропорционально длине волны) их добротность:  
А) резко растет  
Б) остается неизменной  
В) падает
2. При нормальном скин-эффекте глубина проникновения поля в металл  
А) обратно пропорциональна корню квадратному из частоты  
Б) обратно пропорциональна корню квадратному из длины волны  
В) прямо пропорциональна корню кубическому из частоты
3. Резонаторная металлическая полость больших по сравнению с длиной волны размеров непригодна в оптике из-за:  
А) высокой плотности собственных колебаний  
Б) стимулированных переходов, происходящих в металле  
В) низкой плотности собственных колебаний
4. Причиной прореживания спектра мод открытого резонатора является:  
А) большие размеры полости  
Б) отсутствие боковых стенок у полости  
В) малые потери в среде
5. В случае идеальных зеркал и идеальной межзеркальной среды дифракционные потери на краях зеркал  
А) исчезают  
Б) принципиально неустранимы  
В) легко подавляются

**Тема 8. Гауссовы пучки. Устойчивые и неустойчивые резонаторы.**

Основные вопросы темы

1. Гауссовы пучки. Конфокальный резонатор.
2. Устойчивость резонаторов.
3. Неустойчивость резонаторов. Модовый состав лазерного излучения.

Рекомендации по изучению темы

Вопрос 1: [1], лекция 8; [2], глава 6; [3], стр.179-181.

Вопрос 2: [1], лекция 9; [2], глава 7.

Вопрос 3: [1], лекция 10; [2], §7.5.

**Контрольные вопросы**

1. Объясните устройство конфокального резонатора.
2. Как строится теория конфокального резонатора?
3. Каково распределение полей мод в конфокальном резонаторе?
4. Что называется радиусом перетяжки (или радиусом шейки) каустики?
5. Как определяется радиус кривизны сферического волнового фронта в резонаторе?
6. Что такое угловая расходимость гауссова пучка?
7. Какой резонатор называется устойчивым и неустойчивым?
8. Запишите и объясните условия устойчивости линзового световода.
9. Что такое полуконфокальный резонатор?
10. Перечислите основные достоинства неустойчивых резонаторов.
11. Что такое селекция мод в резонаторе?

**Тесты для самопроверки. Выберите один правильный ответ.**

1. Резонатор называется конфокальным, если:  
А) он образован двумя сферическими отражателями, фокусы которых совпадают  
Б) он образован двумя плоскими отражателями  
В) он образован двумя зеркалами в виде конуса
2. Поперечное распределение поля мод конфокального резонатора описывается:  
А) функцией Бесселя  
Б) полиномами Эрмита  
В) функцией Якоби
3. Кривизна сферического волнового фронта зависит от:  
А) радиуса перетяжки  
Б) времени жизни фотона в резонаторе  
В) частоты генерации
4. Диафрагмирование пучка – это:  
А) ограничение его поперечного сечения  
Б) изменение его частоты при распространении  
В) изменение модового состава пучка
5. Условие устойчивости для световода определяется непосредственно

- А) вероятностью спонтанного излучения
- Б) вероятностью спонтанного излучения
- В) фокусными расстояниями соседних линз  $F_1$  и  $F_2$

## **Тема 9. Синхронизация мод. Модуляция добротности.**

### Основные вопросы темы

1. Генерация в нескольких продольных модах, нерегулярность спектра излучения.
2. Затягивание мод. Синхронизация мод. Длительность и период следования импульсов.
3. Затягивание частоты. Провал Лэмба.

### Рекомендации по изучению темы

Вопрос 1: [1], лекция 11; [2], глава 11.

Вопрос 2: [1], лекция 11; [2], глава 11; [4], стр.230-236.

Вопрос 3: [1], лекция 11; [3], стр.346; [4], стр.47.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение синхронизации мод.
2. Что такое частота межмодовых биений?
3. Объясните схему развития синхронизации мод при амплитудной модуляции.
4. Как происходит генерация излучения в нескольких продольных модах.
5. Почему имеет место нерегулярность спектра генерации?
6. Что такое активная синхронизация?
7. Что такое пассивная синхронизация?
8. Дайте определение накачки самосинхронизации.
9. Как осуществляется модуляция добротности?
10. Что такое провал Лэмба и для чего используется это явление?

### **Тесты для самопроверки. Выберите один правильный ответ.**

1. Синхронизация мод – это:
  - А) связывание фаз мод с сопоставимыми амплитудами
  - Б) связывание амплитуд моды
  - В) то же, что фазовая модуляция
2. Многомодовость резонатора при широкой линии усиления приводит к возникновению

- A) обратной связи
  - Б) нескольких частот генерации, соответствующих независимым генераторам
  - В) условия устойчивости
3. Спектр продольных мод открытого резонатора близок к:
- A) эквидистантному
  - Б) экспоненциальному
  - В) параболическому
4. Условием жесткой синхронизации является:
- A) сохранение постоянства разности фаз между синхронизованными колебаниями
  - Б) сохранение постоянства амплитуд синхронизованных колебаний
  - В) изменение разности фаз между синхронизованными колебаниями
5. Активная синхронизация – это синхронизация мод с использованием
- A) внешней модуляции параметров резонатора
  - Б) внутренней модуляции параметров резонатора
  - В) частотной модуляции