


**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»

УТВЕРЖДАЮ

Декан факультета  В.А.Небольсин  
«29» июня 2019 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

дисциплины

«Квантовая электроника»

Направление подготовки 28.04.01 Нанотехнологии и микросистемная техника

Профиль


Квалификация выпускника магистр

Нормативный период обучения 2 года


Форма обучения очная

Год начала подготовки 2018


Автор программы

 /А.В. Ситников/

Заведующий кафедрой  
Физики твердого тела

 /Ю.Е. Калинин/

Руководитель ОПОП

 /А.В. Калгин/

Воронеж 2018

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

### 1.1. Цели дисциплины

Изучение студентами современного состояния и перспективных направлений развития полупроводниковой и функциональной микроэлектроники, ее элементной базы, методов проектирования и расчета основных структур интегральных микросхем и их практического использования.

### 1.2. Задачи освоения дисциплины

Дать представление о фундаментальных физических процессах, лежащих в основе оптической и квантовой электроники, рассмотреть принцип действия, особенности конструкций, требования к активным материалам и элементам, возможности и технические характеристики приборов и устройств оптической электроники, подготовить будущих специалистов к теоретически грамотному их применению и дальнейшему изучению специальной литературы по отдельным вопросам данной отрасли.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина «Квантовая электроника» относится к дисциплинам части, формируемой участниками образовательных отношений (дисциплина по выбору) блока Б1.

## 3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Процесс изучения дисциплины «Квантовая электроника» направлен на формирование следующих компетенций:

ПК-1 - Способен участвовать в разработке топологии интегральных схем, знаком с топологическими принципами построения интегральных схем.

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции
ПК-1	Знать основные законы и понятия электроники, квантовой и оптической электроники, принципы конструирования различных классов электронных и фотоэлектронных устройств.
	Уметь критически оценивать достоинства, недостатки и области возможного применения новых научных и технических разработок, реализованных в различных типах электронных приборов, лазеров, фотоизлучателей и фотоприемников, выполнять критический анализ результатов исследований в области электроники и квантовой электроники.
	Владеть критической оценкой достоинств, недостатков и областей возможного применения новых научных и технических разработок, реализованных в различных типах приборов электроники и фотоэлектроники, представлением о месте электроники, оптической и

	квантовой электроники в современной науке и технике, и областях применения соответствующих приборов.
--	--

#### 4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины «Квантовая электроника» составляет 4 з.е.

Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий  
**очная форма обучения**

Виды учебной работы	Всего часов	Семестры
		2
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	54	54
В том числе:		
Лекции	36	36
Практические занятия (ПЗ)	18	18
<b>Самостоятельная работа</b>	90	90
Виды промежуточной аттестации - зачет с оценкой	+	+
Общая трудоемкость:		
академические часы	144	144
зач.ед.	4	4

#### 5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

**5.1 Содержание разделов дисциплины и распределение трудоемкости по видам занятий**  
**очная форма обучения**

№ п/п	Наименование темы	Содержание раздела	Лекц	Прак зан.	СРС	Всего, час
1	Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом	Энергетическое состояние атомов и молекул. Энергетические состояния атомов и молекул. Квантовые числа. Вращательные и колебательные уровни. Мультиплетном расщеплении уровня. Энергетические уровни молекул. Уширение спектральных линий. Естественное уширение. Доплеровское уширение. Уширение вследствие столкновений. Уширение за счёт неоднородностей среды. Квантовые переходы. Матричный элемент. Дипольное приближение. Вероятность перехода. Правила отбора для электронных переходов. Спонтанное и вынужденное излучение. Коэффициенты Эйнштейна. Виды излучений и поглощений. Излучательные и безизлучательные переходы. Связь между коэффициентами Эйнштейна. Рассеяние света. Механизмы рассеяния. Рэлеевским рассеянием Комбинационным рассеянием Стоксово и антистоксово смещение.	6	2	14	22
2	Устройство и принцип действия лазеров.	Усиление и генерация электромагнитного излучения. Принцип работы усилителей и квантовых генераторов. Инверсия населенностей. Отрицательная температура. Закон Бугера-Ламберта. Положительная обратная связь. Характеристики лазерного излучения. Возбуждение активного вещества (накачка). Методы накачки. Условия инверсной населенности в полупроводниках. Уравнения кинетики	6	2	14	22

		<p>изменения населённости уровней в многоуровневых квантовых системах. Условия инверсии населённости. Методы накачки для полупроводниковых лазеров. Оптические резонаторы. Свойства плоского оптического резонатора. Добротность резонаторов. Эталон Фабри – Перо как частотный анализатор спектральных линий. Оптические резонаторы со сферическими зеркалами. Конфокальный резонатор. Гауссовы пучки. Потери в оптических резонаторах. Устойчивые и неустойчивые оптические резонаторы. Нестационарная генерация, модуль добротности и синхронизация мод. Модуляция добротности резонатора. Гигантские импульсы. Методы модуляции добротности. Синхронизация мод. Электрооптические модуляторы. Газовые лазеры. Акустооптические модуляторы. Голография.. Условия самовозбуждения и насыщение усиления. Пороговая энергия накачки по генерации. Насыщение усиления. Одномодовая и многомодовая генерация.</p>				
3	Энергетическая структура полупроводниковых кристаллов	<p>Энергетические состояния в полупроводниковых кристаллах. Зоны Бриллюэна. Прямозонные и непрямозонные полупроводники. Свойства полупроводников различного состава. Оптическое поглощение в кристаллах. Фундаментальное поглощение. Экситонные эффекты, влияющие на край поглощения при прямых и непрямых переходах. Решеточное поглощение. Примесное поглощение. Поглощение свободными носителями заряда. Оптические переходы в полупроводниках. Оптические переходы в прямозонных и непрямозонных полупроводниках. Люминесценция в полупроводниках. Механизмы излучательной рекомбинации. Квантовый выход и эффективность люминесценции. Связь спектров поглощения и люминесценции. Квантоворазмерные структуры. Квантовые ямы, нити и точки. Собственные значения энергии в квантовых ямах, нитях и точках. Структуры с двумерным электронным газом. Оптические и фотоэлектрические явления в квантоворазмерных структурах. Полупроводниковые гетеропереходы и инжекционная электролюминесценция. Электролюминесценция Гетеропереходы в полупроводниках. Эффект односторонней инжекции. Эффект сверх инжекции. Эффект широкозонного окна. Фотоэлектрический эффект в однородных кристаллах. Фоторезистивный эффект. Фотодиффузионный и фотомагнитный эффекты. Фотовольтаический эффект. Квантовые ямы, нити и точки и современные направления развития приборов на их основе.</p>	6	2	14	22
4	Полупроводниковые приборы квантовой и оптической электроники	<p>Светодиоды. Общая характеристика и особенность полупроводниковых лазеров и светодиодов. Светодиоды на основе полупроводников с прямой и непрямой структурой энергетических зон. Активные материалы. Характеристики СИД. Гетеросветодиоды. Электролюминесцентные экраны. Полупроводниковые лазеры. Требования к активным материалам. Лазер на гомопереходе. Инжекционные лазеры на двойной гетероструктуре, их характеристики. Полосковые гетеролазеры. Фотовольтаический эффект в полупроводниковых структурах. Фотодиоды. Принцип работы p-i-n-фотодиода. Лавинные умножители. Фототриоды. Современное развитие полупроводниковых лазеров, светодиодов и фотоприемников</p>	6	4	16	26

5	Биполярные интегральные микросхемы.	Разновидности биполярных интегральных транзисторов. Вертикальные и горизонтальные p-p и p-n-p транзисторы. Многоэмиттерные и многоколлекторные транзисторы, транзисторные структуры для схем с инжекционным питанием. транзисторы с диодом Шоттки. Составные транзисторы, комплементарные пары. Аналоговые схемы на биполярных транзисторах. Типовые схемы усилительных каскадов на биполярных транзисторах. Цифровые схемы. Простейшие логические операции. Логические элементы на диодах. Элементы РТЛ, ДТЛ, ТТЛ. Элементы ЭСЛ, логические элементы с инжекционным питанием. Основные характеристики и параметры логических элементов.	6	4	16	26
6	Структуры и схемы полупроводниковых интегральных микросхем на униполярных приборах.	Структура и топология интегрального транзистора с управляющим p-n переходом. Интегральные полевые транзисторы с барьером Шоттки. МОП-транзисторы. МОП-транзисторы с алюминиевым и поликремниевым затворами. Вертикальные транзисторы. Логические элементы на полевых транзисторах. Инвертор на n-канальных МДП транзисторах. Инвертор на КМДП транзисторах. Логические элементы «И-НЕ» и «ИЛИ-НЕ». Логические элементы динамического типа.	6	4	16	26
<b>Итого</b>			<b>36</b>	<b>18</b>	<b>90</b>	<b>144</b>

## 5.2 Перечень лабораторных работ

Не предусмотрено учебным планом

## 6. ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ) И КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

В соответствии с учебным планом освоение дисциплины не предусматривает выполнение курсового проекта (работы) или контрольной работы.

## 7. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

**7.1. Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания**

### 7.1.1 Этап текущего контроля

Результаты текущего контроля знаний и межсессионной аттестации оцениваются по следующей системе:

«аттестован»;

«не аттестован».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Аттестован	Не аттестован
ПК-1	Знать основные законы и понятия электроники, квантовой и оптической электроники, принципы конструирования	Активная работа на практических занятиях, отвечает на теоретические вопросы при защите курсового проекта	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах

	различных классов электронных и фотоэлектронных устройств.			
	Уметь критически оценивать достоинства, недостатки и области возможного применения новых научных и технических разработок, реализованных в различных типах электронных приборов, лазеров, фотоизлучателей и фотоприемников, выполнять критический анализ результатов исследований в области электроники и квантовой электроники.	Решение стандартных практических задач, написание курсового проекта, выполнение лабораторных работ	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	Владеть критической оценкой достоинств, недостатков и областей возможного применения новых научных и технических разработок, реализованных в различных типах приборов электроники и фотоэлектроники, представлением о месте электроники, оптической и квантовой электроники в современной науке и технике, и областях применения соответствующих приборов.	Решение прикладных задач в конкретной предметной области, выполнение плана работ по разработке курсового проекта, выполнение лабораторных работ	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах

### 7.1.2 Этап промежуточного контроля знаний

Результаты промежуточного контроля знаний оцениваются в 2 семестре для очной формы обучения по четырехбалльной системе:

«отлично»;

«хорошо»;

«удовлетворительно»;

«неудовлетворительно».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность	Критерии оценивания	Отлично	Хорошо	Удовл.	Неудовл.
-------------	---	---------------------	---------	--------	--------	----------

	компетенции					
ПК-1	Знать основные законы и понятия электроники, квантовой и оптической электроники, принципы конструирования различных классов электронных и фотоэлектронных устройств.	Тест	Выполнение теста на 90-100%	Выполнение теста на 80-90%	Выполнение теста на 70-80%	В тесте менее 70% правильных ответов
	Уметь критически оценивать достоинства, недостатки и области возможного применения новых научных и технических разработок, реализованных в различных типах электронных приборов, лазеров, фотоизлучателей и фотоприемников, выполнять критический анализ результатов исследований в области электроники и квантовой электроники.	Решение стандартных практических задач	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
	Владеть критической оценкой достоинств, недостатков и областей возможного применения новых научных и технических разработок, реализованных в различных типах приборов электроники и фотоэлектроники, представлением о месте электроники, оптической и квантовой	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены

электроники в современной науке и технике, и областях применения соответствующих приборов.					
--	--	--	--	--	--

## 7.2 Примерный перечень оценочных средств (типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности)

### 7.2.1 Примерный перечень заданий для подготовки к тестированию

1. Какие знаете способы описания электромагнитного излучения?

*Ответ: Световой луч, электромагнитная волна, фотонная.*

2. В каком случае квантовый переход называется оптическим и какому подчиняется правилу?

*Ответ: Переходы с испусканием или поглощением кванта света называются оптическими.*

$$W_{ba} = \frac{2\pi}{\hbar} |M_{ba}|^2 \delta(E_b - E_a) t$$

$$M_{ba} = V_{ba} + \sum_{n_1} \frac{V_{bn_1} V_{n_1a}}{E_a - E_{n_1}} + \sum_{n_1} \frac{V_{bn_2} V_{n_2n_1} V_{n_1a}}{(E_a - E_{n_1})(E_a - E_{n_2})} + \dots$$

3. Используя диаграммы записать выражение для матричного элемента перехода. (Ограничиться двумя первыми членами).

*Ответ:*

$$M_{ba} = V_{ba} + \sum_{n_1} \frac{V_{bn_1} V_{n_1a}}{E_a - E_{n_1}}$$

4. Какой уровень называется метастабильным и какое время жизни атомов в этом состоянии?

*Ответ:*

$$\delta t \approx \frac{\hbar}{\delta E}$$

5. Назовите и объясните характеристики спонтанного излучения.

*Ответ: Электромагнитное излучение обусловленное спонтанными переходами в коллективе атомов называются спонтанным излучением. Спонтанное излучение ненаправлено, некогерентно, неполяризовано и немонахроматично.*

$$dW_{mn}^{спонтна} = A_{mn} dt$$

6. Вынужденные квантовые переходы? Запишите выражения для вероятности вынужденного испускания и вынужденного поглощения.

Ответ: Вынужденные квантовые переходы системы из одного квантового состояния в другое под действием внешнего возмущения.

$$dW_{nm}^{\text{погл}} = B_{nm} \rho(\omega) dt,$$

$$dW_{mn}^{\text{инд}} = B_{mn} \rho(\omega) dt$$

7. Свойства фотона при вынужденном испускании?

Ответ: Имеет одинаковую частоту, фазу, направление распространения и поляризацию с фотоном который индуцировал процесс.

8. Запишите связь между коэффициентами Эйнштейна для индуцированных и спонтанных переходов. (Для вырожденных и невырожденных уровней).

Ответ:

$$g_m B_{mn} = g_n B_{nm}$$

$$A_{mn} = B_{mn} \frac{\hbar \omega^3}{\pi^2 c^3}$$

9. Объяснить «естественную ширину» спектральной линии.

Ответ: Причина принцип неопределенности

$$\Delta E = \hbar / \tau$$

$$g_L(\omega) = \frac{\Delta \omega}{2\pi} \frac{1}{(\omega_0 - \omega)^2 + (\Delta \omega / 2)^2},$$

$$\Delta \omega = A_{mn}$$

ширина линии

10. Спектр излучения при однородном уширении описывается гауссовской кривой?

Ответ: Да Нет

11. Какой кривой описывается спектр излучения при неоднородном уширении спектральных линий?

Ответ: Гауссовской

12. Уширение спектральной линии за счет столкновений - это

Ответ:

а) однородное уширение;

б) неоднородное уширение.

13. Дайте определение однородного и неоднородного уширения спектральных линий. Приведите примеры.

Ответ: Если линии отдельного атома и системы в целом уширяются

одинаково однородное уширение. (естественное уширение, уширение за счет релаксации и столкновений). Уширение называется не однородным если резонансная частота отдельных атомов не совпадает и распределяется в некоторой полосе частот приводя к уширению линии поглощения системы в целом. (доплеровское уширение и неоднородности среды).

14. Запишите условия для Релеевского рассеяния.

Ответ:

$$\hbar k \ll P_{\text{электр}} \hbar \omega = \hbar \omega', \quad \alpha_1 \neq \alpha_2, \quad k_1 \neq k_2, \\ \text{При } |k_1| = |k_2|$$

15. В каком диапазоне наблюдается эффект Комптона? Объясните это явление.

Ответ:

$$\hbar k \cong P_{\text{электр}} \hbar \omega - \hbar \omega' = \Delta E \\ \text{мало } \Delta E = f(\alpha) \quad \text{эффект упругого столкновения двух частиц.}$$

16. Интенсивность антистоксова рассеяния больше интенсивности стоксова .

Ответ: а) да

б) нет

17. Записать закон Бугера-Ламберта.

Ответ:

$$I_{\omega}(z) = I_{\omega}(0) \exp - k_{\omega} z, \quad k_{\omega} = \frac{\hbar \omega n B_{12}}{c} g(\omega) \left( N_1 - \frac{g_1}{g_2} N_2 \right)$$

18. Объяснить явление «просветления среды».

Ответ:

$$I_{\omega}(z) = I_{\omega}(0) \exp - k_{\omega} z \quad k_{\omega} = 0 \left( N_1 - \frac{g_1}{g_2} N_2 \right) = 0$$

19. Что такое инверсия населенностей? Записать условие инверсии для вырожденных и невырожденных уровней.

Ответ:

$$\frac{N_1}{g_1} < \frac{N_2}{g_2}, \quad N_1 < N_2$$

20. Какие три условия необходимы для квантового усиления?

*Ответ: 1 Наличие двух уровней энергии  $E_1$  и  $E_2$  разделенных расстоянием  $\hbar\omega$ , 2  $N_2 > N_1$  3 Усиление за счет излучения больше потерь  $\alpha > \beta$*

21. Для чего в квантовых генераторах используют «положительную обратную связь»?

*Ответ: Для превращения усилителя в генератор.*

22. Явление насыщения – это

*Ответ:*

***а) выравнивание населенностей уровней;***

***б) инверсия населенностей достигает своего максимального значения.***

23. Объяснить термин «накачка». Перечислите методы накачки.

*Ответ: Процесс возбуждения активной среды с целью получения инверсной заселенности называется накачкой. Оптическая, газоразрядная, сортировка частиц, инжекция неосновных носителей через p-n переход, возбуждение частиц с высокой энергии, химическая накачка, газодинамическая.*

24. Объяснить метод сортировки атомных и молекулярных пучков в пространстве.

*Ответ: Взаимодействие с электрическим и магнитным полем различен для возбужденных и не возбужденных атомов.*

25. Записать уравнения баланса для двухуровневой схемы.

*Ответ:*

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= (A_{21} + \rho_{12}B_{21})N_2 - \rho_{12}B_{12}N_1 = 0 \\ \frac{dN_2}{dt} &= \rho_{12}B_{12}N_1 - (A_{21} + \rho_{12}B_{21})N_2 = 0 \\ N_1 + N_2 &= 0 \end{aligned} \right\}$$

26. Квантовый генератор с оптической накачкой по двухуровневой схеме работать

*Ответ:*

***а) может;***

***б) не может.***

27. Почему пороговая плотность накачки по инверсии меньше пороговой плотности для генерации?

*Ответ: За счет потерь  $N_2 > N_1$*

28. В чем преимущество 4-уровневой схемы над 3-уровневой?

*Ответ: Инверсия достигается при меньших энергиях накачки.*

29. Запишите выражение для частоты собственной моды резонатора.

Ответ:

$$\frac{1}{\lambda_{mq}} = \sqrt{\left(\frac{m}{2L_1}\right)^2 + \left(\frac{n}{2L_2}\right)^2 + \left(\frac{q}{2L_3}\right)^2}$$

### 7.2.2 Примерный перечень заданий для решения стандартных задач

*Задача 1. Боровская модель атома водорода и энергетические уровни в атоме водорода. Опишите модель атома Бора? Почему электронные орбиты могут иметь лишь определенный радиус? Объясните, каким образом это приводит к появлению энергетических уровней в атоме, и укажите какую роль эти уровни играют в спектре поглощения водорода? Энергетический уровень орбиты наименьшего радиуса (т.е.  $n=1$ ) в атоме водорода составляет 13,6 эВ. С какой длиной волны излучения связан переход электрона с орбиты  $n=3$  на орбиту  $n=1$ ?*

*Задача 2. Процесс рекомбинации означает переход электронов с более высоких энергетических уровней зоны проводимости на более низкие энергетические уровни валентной зоны. Такие переходы сопровождаются выделением квантов света, т.е. фотонов. Это явление называемое излучательной рекомбинацией лежит в основе работы светодиодов. Какие полупроводники можно использовать чтобы получить излучение с длиной волны  $\lambda=0,38-0,78\mu\text{м}$ ?*

*Задача 3. Определить температуру, при которой в твердом  $n/p$  вероятность найти электрон с энергией 0,5 эВ над уровнем Ферми равна 2%?*

$$T = 1490\text{K}$$

*Задача 4. Дать краткое понятие запрещенной зоны и уровня Ферми применительно к беспримесному  $n/p$ . Ширина запрещенной зоны  $\sim 0,5$  эВ. Вычислить вероятность заполнения электроном уровня вблизи дна зоны проводимости при температурах  $T=0\text{K}$  и  $T=290\text{K}$ . Показать, будет ли увеличиваться эта вероятность при указанных выше температурах, если на  $n/p$  действует электромагнитное излучение а). с длиной волны 1,0  $\mu\text{м}$ , б). с длиной волны 2,0  $\mu\text{м}$ .*

*Задача 5. Рассмотреть электрон с нулевой потенциальной энергией в одномерной потенциальной яме в пределах  $x=0$  и  $x=a$ . Вне этих пределов потенциал равен бесконечности. Вывести выражение для уровней потенциальной энергии этого электрона.*

*Задача 6. Найдите значение волновой функции  $\Psi$ , описывающее состояние электрона в одномерном потенциальном ящике длиной  $L$ . Предполагается, что высота потенциальных барьеров на стенках ящика в точках  $x=0$  и  $x=a$  бесконечна. Показать, что энергия, которую может иметь электрон в таких системах квантуется. Получить выражение для энергии*

электрона в случае трехмерной модели потенциального ящика.

*Задача 7* Оценить минимальную мощность лампы-вспышки, необходимую для накачки твердотельного лазера. Число активных частиц в кристалле  $n=10^{19} \text{ см}^{-3}$ , объем кристалла  $10 \text{ см}^3$ . Время жизни частиц на верхнем рабочем уровне  $\tau_{\text{CH}}=3 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ . Середина полосы, в которую происходит основное поглощение излучения источника накачки,  $\nu=6 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ . Принять КПД лампы накачки 100%. Инверсная перенаселенность наступает, если на верхний рабочий уровень перейдет больше половины активных частиц.

*Задача 8.* Если кристалл рубина освещать светом с длиной волны 550 нм, можно ли получить излучение на длине волны 693,3 нм? Объяснить физический механизм, который обуславливает это явление.

*Задача 9.* Вычислить энергию фотонов:

- а).* в ультрафиолетовой области спектра ( $\lambda=330$  и  $250 \text{ нм}$ )
- б).* желтого света ( $\lambda=589 \text{ нм}$ )
- с).* красного света ( $\lambda=644 \text{ нм}$ ).

Свет падает на поверхность натрия, работа выхода фотоэлектронов которого равна  $2,11 \text{ эВ}$ . Найти максимальные скорости фотоэлектронов, если длины волн падающего света принимают заданные значения.

*Задача 10.* Рассчитать  $Q_p$  добротность и время жизни фотона  $\tau_p$  в резонаторе Фабри-Перо с плоскими зеркалами. Расстояние между зеркалами  $L=1 \text{ м}$ . В резонаторе возбуждается один основной тип колебаний  $\text{TEM}_{00q}$ , образованная двумя бегущими навстречу друг другу плоскими волнами ( $\lambda=0,6 \text{ мкм}$ ). Среда заполняющая резонатор, слабо поглощающая (коэффициент поглощения  $\beta=0,001 \text{ см}^{-1}$ ). (эти потери могут быть связаны с процессом рассеивания в среде, не резонансным поглощением и т.д.) Коэффициент отражения каждого из зеркал  $r=95\%$ . Диаметр зеркал много больше диаметра светового пучка, поэтому дифракционными потерями можно пренебречь.

*Задача 11.* Сложный объектив состоит из двух линз, одна из которых сделано из стекла с коэффициентом преломления  $n_1=1,52$ , второе с  $n_2=1,6$ . Линзы склеены канадским бальзамом, с  $n_3=1,54$ . Считая углы падения света на поверхности линз малыми, определить потери света в объективе из-за отражений. Сравнить эти потери со случаем, когда обе линзы разделены воздушной прослойкой.

### **7.2.3 Примерный перечень заданий для решения прикладных задач**

1. Объемный резонатор используют в диапазоне

Ответ:

*а)*  $10^9$ - $10^{11} \text{ Гц}$ ;

- б)  $10^{14}$ - $10^{15}$  Гц;  
 в)  $10^{17}$ - $10^{18}$  Гц.

2. Добротность объемного резонатора выше добротности оптического резонатора?

Ответ: *Да* **Нет**

32. Оптический резонатор – это

Ответ:  
**а) многомодовый резонатор;**  
 б) одномодовый резонатор.

3. Добротность оптического резонатора ниже добротности спектральной линии?

Ответ: *а) да* **б) нет**

4. Какие колебания оптического резонатора называются аксиальными и неаксиальными?

Ответ: *Колебания распространяющиеся по оптической оси резонатора называются оксиальными.*

5. Какие потери оптического резонатора называют полезными:

Ответ:  
 а) дифракционные потери;  
**б) потери на излучение;**  
 в) потери в активном веществе.

6. Преимущества и недостатки конфокального резонатора.

7. Записать условие устойчивости резонатора.

Ответ:

$$0 \leq \left( \frac{L}{R_1} - 1 \right) \left( \frac{L}{R_2} - 1 \right) \leq 1$$

8. Объяснить особенности кольцевого резонатора.

9. Записать условие самовозбуждения квантового генератора.

Ответ:

$$\hbar \omega B_{mn} g(\omega) \left( \frac{g_n}{g_m} N_m - N_n \right) \geq \frac{\omega}{Q}$$

10. Зарисуйте условие насыщения поглощения для неоднородно уширенной спектральной линии.

11. Для каких колебаний в оптическом резонаторе в первую очередь будет выполняться условие самовозбуждения?

*Ответ: Оксиальных*

12. В каком резонаторе будут потери на дифракцию меньше в плоском или в конфокальном при одинаковой величине числа Френеля?

*Ответ: Конфокальном*

13. Что такое режим регулярных пичков? Он возникает при одномодовом или при многомодовом режиме генерации?

*Ответ: При не стационарной работе генератора возникает регулярная убывающая по времени последовательность световых импульсов. Возникает в случае одномодовой работе генератора.*

14. За счет чего реализуется импульсный режим работы генератора (гигантские импульсы)?

*Ответ: Модуляция добротности.*

#### **7.2.4 Примерный перечень вопросов для подготовки к зачету**

Не предусмотрено учебным планом

#### **7.2.5 Примерный перечень заданий для решения прикладных задач**

Вопросы к зачету с оценкой

1. Способы описания электромагнитного излучения. Объяснить понятия «плоской монохроматической волны», «поляризованной волны».
2. Энергетические состояния атомов и молекул.
3. Квантовые переходы. Матричный элемент перехода.
4. Спонтанное и вынужденное излучение. Коэффициенты Эйнштейна.
5. Объяснить физический смысл коэффициентов Эйнштейна. Связь между коэффициентами Эйнштейна.
6. Энергетический спектр. Явления приводящие к уширению спектральных линий. Однородное и неоднородное уширение.
7. Рассеяние света и двухфотонное поглощение.
8. Принцип работы квантовых усилителей и генераторов
9. Закон Бугера-Ламберта. Принцип работы квантовых усилителей и генераторов
10. Методы возбуждения активного вещества.
11. Кинетика заполнения энергетических состояний. Двухуровневые схемы.
12. Трех- и четырехуровневые схемы.
13. Объемные и открытые резонаторы. Одномодовый и многомодовый резонатор. Добротность и потери в резонаторах.
14. Конфокальный резонатор и резонаторы с произвольными сферическими зеркалами. Диаграмма условия устойчивости оптических резонаторов.
15. Кольцевой резонатор и резонатор с брегговским зеркалом
16. Условие самовозбуждения и насыщение усиление.

17. Нестационарная генерация, модуляция добротности и синхронизация мод.
18. Энергетические состояния в полупроводниковых кристаллах.  
Прямозонные и непрямозонные полупроводники
19. Оптические переходы в полупроводниках
20. Оптическое поглощение в кристаллах полупроводников.
21. Люминесценция. Условия инверсии и усиления в полупроводниках
22. Связь между оптическим поглощением и люминесценцией.
23. Механизмы излучательной рекомбинации в полупроводниках.
24. Эффективность люминесценции и без излучательная рекомбинация.
25. Фотоэлектрические эффекты. Фоторезистивный эффект.
26. Квантоворазмерные структуры: квантовые ямы, нити и точки.
27. Полупроводниковые лазеры. Общая характеристика и особенности.
28. Инжекционные ДГС-лазеры
29. Фотовольтаические эффекты в неоднородных структурах.  
p-i-n и лавинные фотодиоды.

#### **7.2.6. Методика выставления оценки при проведении промежуточной аттестации**

Промежуточная аттестация осуществляется по нескольким критериям:

1. Тестирование по темам курса тест-задания.
  1. Оценка «Неудовлетворительно» ставится в случае, если студент ответил правильно на 40% вопросов и меньше.
  2. Оценка «Удовлетворительно» ставится в случае, если студент ответил правильно на 40-60% вопросов.
  3. Оценка «Хорошо» ставится в случае, если студент ответил правильно на 60-80% вопросов.
  4. Оценка «Отлично» ставится, если студент ответил правильно на 80% вопросов и более.
2. Ответы на семинарских занятиях по теме курса.
3. Зачет с оценкой.

#### **7.2.7 Паспорт оценочных материалов**

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции	Наименование оценочного средства
1	Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом	ПК-1	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, защита реферата, требования к курсовому проекту....
2	Устройство и принцип действия лазеров.	ПК-1	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, защита реферата, требования к курсовому

			проекту...
3	Энергетическая структура полупроводниковых кристаллов	ПК-1	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, защита реферата, требования к курсовому проекту....
4	Полупроводниковые приборы квантовой и оптической электроники	ПК-1	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, защита реферата, требования к курсовому проекту....
5	Биполярные интегральные микросхемы.	ПК-1	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, защита реферата, требования к курсовому проекту....
6	Структуры и схемы полупроводниковых интегральных микросхем на униполярных приборах.	ПК-1	Тест, контрольная работа, защита лабораторных работ, защита реферата, требования к курсовому проекту....

### **7.3. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Тестирование осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных тест-заданий на бумажном носителе. Время тестирования 30 мин. Затем осуществляется проверка теста экзаменатором и выставляется оценка согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение стандартных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение прикладных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

## **8 УЧЕБНО МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ)**

### **8.1 Перечень учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины**

1. Пихтин А.Н. *Оптическая и квантовая электроника.* – М.: изд-во Высшая школа, 2001.-573с.
2. Звелто О. *Принципы лазеров.* М.: «Мир», 1984.-400с.
3. Носов Ю.Р. *Оптоэлектроника.* – М.: «Советское радио», 1989.-360с..
4. Страховский Г.М., Успенский А.В. *Основы квантовой электроники.* – М.:

- «Высшая школа», 1979.-303с..
5. Тарасов Л.В. Введение в квантовую оптику. – М.: «Высшая школа», 1987.-304с..
  6. Калитеевский Н.И. Волновая оптика. – М.: изд-во Наука, 1971.-376с..
  7. Рябов С.Г., Торопкин Г.Р., Усольцев И.Ф. Приборы квантовой электроники. – М.: «Радио и связь», 1985.-280с.

**8.2 Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень лицензионного программного обеспечения, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем:**  
 Microsoft Word, Microsoft Excel, Internet Explorer

## **9 МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА**

1. Учебные аудитории: 226/1, 221/1
2. Дисплейный класс, оснащенный компьютерными программами и проекторами.
3. Натурные лекционные демонстрации: демонстрации изделий электроники и микроэлектроники: дискретных приборов, интегральных микросхем; образцов полупроводниковых материалов, подложек микросхем, фотошаблонов и др.

## **10. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

По дисциплине «Квантовая электроника» читаются лекции, проводятся практические занятия.

Основой изучения дисциплины являются лекции, на которых излагаются наиболее существенные и трудные вопросы, а также вопросы, не нашедшие отражения в учебной литературе.

Практические занятия направлены на приобретение практических навыков расчета конструкции и параметров работы электронных и оптоэлектронных устройств. Занятия проводятся путем решения конкретных задач в аудитории.

Вид учебных занятий	Деятельность студента
Лекция	Написание конспекта лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; пометать важные мысли, выделять ключевые слова, термины. Проверка терминов, понятий с помощью энциклопедий, словарей, справочников с выписыванием толкований в тетрадь. Обозначение вопросов, терминов, материала, которые вызывают трудности, поиск ответов в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно не удастся разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на лекции или на

	практическом занятии.
Практическое занятие	Конспектирование рекомендуемых источников. Работа с конспектом лекций, подготовка ответов к контрольным вопросам, просмотр рекомендуемой литературы. Прослушивание аудио- и видеозаписей по заданной теме, выполнение расчетно-графических заданий, решение задач по алгоритму.
Самостоятельная работа	Самостоятельная работа студентов способствует глубокому усвоению учебного материала и развитию навыков самообразования. Самостоятельная работа предполагает следующие составляющие: - работа с текстами: учебниками, справочниками, дополнительной литературой, а также проработка конспектов лекций; - выполнение домашних заданий и расчетов; - работа над темами для самостоятельного изучения; - участие в работе студенческих научных конференций, олимпиад; - подготовка к промежуточной аттестации.
Подготовка к промежуточной аттестации	Готовиться к промежуточной аттестации следует систематически, в течение всего семестра. Интенсивная подготовка должна начаться не позднее, чем за месяц-полтора до промежуточной аттестации. Данные перед зачетом с оценкой три дня эффективнее всего использовать для повторения и систематизации материала.