

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»**

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДЕНО
решением ученого совета ННГУ
протокол от
«31» мая 2023 г. № 6

**Рабочая программа дисциплины
«Квантовая и оптическая электроника»**

Уровень высшего образования
бакалавриат

Направление подготовки
**02.03.02 «Фундаментальная информатика и информационные
технологии»**

Информационные системы и технологии
(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Квалификация
бакалавр

Форма обучения
очная

Нижний Новгород

2023

1. Место и цели дисциплины (модуля) в структуре ОПОП

Дисциплина «Квантовая и оптическая электроника» относится к обязательным дисциплинам вариативной части профессионального цикла основной образовательной программы по направлению 02.03.02 «Фундаментальная информатика и информационные технологии», преподается в 7 семестре.

Целями освоения дисциплины является: формирование у студента современного представления о фотонной структуре электромагнитного поля, об элементарных квантовых актах однофотонного и многофотонного взаимодействия поля с веществом и их конкретном проявлении при преобразовании, усилении и генерации когерентного электромагнитного излучения в квантовых генераторах оптического диапазонов длин волн и других устройствах современной оптоэлектроники.

Законы, модели и уравнения, рассмотренные в лекционном курсе, дополняются изучением современных лазерных генераторов в рамках практических занятий и общефизического лабораторного практикума.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Формируемые компетенции (Код компетенции, этап формирования)	Планируемые результаты обучения по дисциплине, характеризующие этапы формирования компетенций
ПК-1 Способность собирать, обрабатывать и интерпретировать данные современных научных исследований, необходимые для формирования подходов, решений и выводов по соответствующим научным и профессиональным проблемам Этап формирования базовый	<u>Знать</u> методики сбора, обработки и интерпретации данных современных научных исследований в области квантовой электроники и оптоэлектроники, необходимых для формирования научных выводов <u>Уметь</u> и обладать навыками сбора, обработки и интерпретации данных современных научных исследований в области квантовой электроники и оптоэлектроники и использования их для формирования научных выводов в профессиональной деятельности <u>Владеть</u> опытом сбора, обработки и интерпретации данных в области квантовой и оптической электроники, необходимых для формирования выводов по соответствующим направлениям научных исследований

3. Структура и содержание дисциплины «Квантовая и оптическая электроника»

Объем дисциплины составляет 3 зачетных единицы, всего 108 часов, из которых 65 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (32 часа занятия лекционного типа, 16 часов практические занятия, 16 часов – лабораторный практикум, 1 час – мероприятия промежуточного контроля), 43 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

Содержание дисциплины (модуля)

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Формируемые компетенции (Код компетенции, этап формирования)	Всего (часы)	В том числе				
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы				Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
1. Введение	4	2			2	2
2. Квантовая теория излучения и поглощения	13	4	4		8	5
3. Элементы квантовой кинетики и теории спектральных линий	11	4	2		6	5
4. Взаимодействие двухуровневой среды с резонансным электромагнитным полем	13	4	2	2	8	5
5. Квантовые усилители и генераторы, информационные системы на их основе	30	8	4	8	20	10
6. Методы управления лазерным излучением	16	4	2	4	10	6
7. Методы регистрации оптических сигналов	19	2	2	2	6	4
8. Современная элементная база оптоэлектроники	10	4			4	6
В т.ч. текущий контроль	1	1			1	
Промежуточная аттестация – зачет						

4. Образовательные технологии

В процессе изучения дисциплины используются следующие образовательные технологии: проблемный метод изложения материала и диалогичная форма проведения практических занятий. Лабораторный практикум предусматривают демонстрацию физических опытов, а также изучение лазерных и оптоэлектронных моделей с привлечением инструментальной приборной базы и информационных технологий.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает следующие виды:

- разбор лекционного материала,
- изучение дополнительных разделов дисциплины с использованием учебной литературы,
- выполнение домашних заданий по решению задач
- подготовка отчета по результатам выполнения лабораторной работы в лаборатории спецпрактикума

Текущий контроль усвоения материала проводится путем проведения тестовых контрольных заданий во время практических занятий и проверки выполнения домашних заданий.

Примеры тестовых контрольных заданий:

1. Сформулировать правила отбора для гармонического осциллятора.
2. Почему происходит уширение спектральных линий поглощения (излучения) вещества в сильных полях.
3. Почему в оптическом диапазоне длин волн для измерения ширины линии можно использовать явление флуоресценции, а в радиодиапазоне – только вынужденное излучение или поглощение среды.
4. Обосновать применимость теории возмущения в атоме водорода при возбуждении его электрическим полем на частоте ($\lambda=121$ нм) с плотностью мощности 10 Вт/см^2
5. Известно, что время жизни электрона в возбужденном состоянии τ . Получить выражение для спектральной формы линии.
6. Считая одно зеркало в резонаторе Фабри-Перо "глухим" ($R_1 = 1$), а другое полупрозрачным ($R_2 = R$), качественно изобразите зависимость мощности лазера от R . Существует ли оптимальная величина R ?
7. Отношение населенностей двух уровней для вещества, находящегося в состоянии равновесия при температуре 300°K , равно 10. Вычислить частоту излучения, соответствующую переходу между этими уровнями.
8. Типичное время жизни для разрешённого электродипольного перехода в видимом диапазоне ~ 10 нс. Оценить естественную ширину линии рентгеновского лазера, излучающего в диапазоне 10 нм.

Примерный список домашних заданий:

1. Для идеальной квантовой ямы (потенциальный двусторонний барьер с бесконечными стенками) указать незапрещенные в электродипольном взаимодействии переходы. Вычислить матричные элемент оператора электродипольного взаимодействия для перехода с 1 на 2 энергетические уровни.
2. Получить выражение коэффициента Эйнштейна для стимулированного излучения через матричный элемент оператора взаимодействия. Получить связь коэффициентов Эйнштейна для стимулированного и спонтанного излучения.
3. Для электрона в атоме водорода, находящегося в $3p$ возбуждённом состоянии указать переход при электродипольном взаимодействии с максимальным значением частоты. Найти матричный элемент оператора взаимодействия для этого перехода.
4. Вычислить частоту Раби осцилляций при точном резонансе для перехода с 1 на 2 энергетические уровни идеальной квантовой ямы. Ширина ямы 10 нм, плотность мощности поля 10 Вт/см^2
5. Для двухуровневой системы получить зависимость от времени вероятности нахождения электрона на уровнях от времени под действием внешнего переменного электрического поля на частоте $\omega=\omega_{12}+\delta\omega$, где ω_{12} – частота перехода, $\delta\omega$ – отстройка.
6. Рассчитать ширину линии для $2p-1s$ перехода в атоме водорода.

7. Для выбранного механизма получить выражение для неоднородно уширенного контура линии. Для выбранных условий оценить её ширину.
8. Найти ширину линии спонтанного излучения квантового гармонического осциллятора при переходе E_1-E_0 . Наблюдаема ли такая ситуация в эксперименте.
9. Что является доминирующим механизмом уширения линии в поглощающей ячейке SF_6 , облучаемого CO_2 -лазером ($\lambda = 10,6$ мкм, $U=50$ Вт), если каустика лазерного пучка в фокусе имеет диаметр 0,5 мм, $T=300^\circ K$, $p = 100$ тор, $\sigma_{\text{полг}} = 5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$
10. Определить естественную, доплеровскую и столкновительную ширину линии для перехода неона $3s_2 \rightarrow 2p_4$ ($\lambda=632,8$ нм) в He-Ne разряде при давлениях $p_{\text{He}} = 1$ тор, $p_{\text{Ne}} = 0,2$ тор и температуре смеси $T = 400^\circ K$. Остальные параметры: $\tau(3s_2) = 60$ нс, $\tau(2p_4) = 20$ нс, $\sigma_{\text{изл}} = 6 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$.
11. Определить линейный коэффициент усиления слабого сигнала в 2-х уровневой среде. Если концентрация инверсии $N_0 = 10^9 \text{ см}^{-3}$, вероятность спонтанного излучения 10^7 сек^{-1} . Линия имеет форму Лоренца с шириной, определяемой спонтанным излучением.
12. Для 2-х уровневой среды без диссипации ($T_1 = T_2 = \infty$) найдите выражение для поляризации при наложении на среду резонансного внешнего поля $E = E_0 \cdot \cos(w_{21}t)$.
13. Для двухуровневого парамагнетика со спином 1/2 найти матричный элемент перехода и доказать, что его вероятность равна 0 при $H \parallel H_0$.
14. На 2-х уровневой атомный газ воздействует поле $E(t) = E_0 \cdot \cos(w_{21}t)$, w_{21} - боровская частота атомного перехода. Для стационарного режима рассчитайте мощность спонтанного излучения (соударениями в газе пренебречь).
15. Для соседних продольных мод резонатора Фабри-Перо длиной 1м, заполненного активной средой с шириной лоренцовой линии излучения на рабочем переходе $\Delta w = 2 \cdot 10^{12}$ рад/сек (рубин), сделайте оценку относительной разницы коэффициентов (показателей) усиления.
16. Оценить минимальную мощность лампы-накачки (к.п.д. = 100 %), необходимую для создания инверсии в твердотельном лазере с концентрацией активных частиц $n = 10^{19} \text{ см}^{-3}$, объемом кристалла $V = 10 \text{ см}^3$. Частота середины полосы оптической накачки равна $\nu = 6 \cdot 10^{14}$ Гц, время жизни частиц на верхнем рабочем уровне $t_{\text{сп}} = 3 \cdot 10^{-3}$ сек.
17. Возбужденный уровень молекулы E_i связан с тремя нижними уровнями E_n радиационными переходами с вероятностями $A_{i3} = 5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$, $A_{i2} = 3 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ и $A_{i1} = 2 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$. Вычислить время жизни по отношению к спонтанному распаду для E_i и относительные населенности N_n/N_i для случая непрерывного возбуждения уровня E_i при условии, что $\tau_1 = 10^{-8} \text{ с}$, $\tau_2 = 5 \cdot 10^{-7} \text{ с}$, $\tau_3 = 5 \cdot 10^{-9} \text{ с}$. Какая требуется накачка из основного состояния E_0 , чтобы обеспечить инверсию населенностей на уровнях E_i и E_1 ?
18. Линия люминесценции иона Nd^{3+} в стекле для рабочего перехода Nd лазера имеет полуширину ~ 30 нм. Найти ширину верхнего лазерного уровня, если нижний дезактивируется со скоростью 10^8 с^{-1} .
19. Оценить квантовый и электронный КПД He-Ne лазера, если известно, что электронная температура в разрядной трубке ~ 5 эВ.
20. Используя классическое определение добротности резонатора (контура) $Q_s : |dW/dt|$ (мощность потерь) $= \omega_s / Q_s \cdot W$ (запасенная в резонаторе энергия) и концепцию плоских волн в резонаторе Фабри-Перо с коэффициентом отражения по мощности R_1 и R_2 , покажите, что добротность Q_s такого резонатора равна $Q_s = - 2L \cdot w_s / (c \cdot \ln R_1 R_2)$, где L - длина резонатора.
21. Рассчитать добротность Q_p и время жизни фотона τ_ϕ в резонаторе Фабри-Перо с плоскими зеркалами. Расстояние между зеркалами $L = 1$ м, коэффициенты отражения зеркал $R_1 = R_2 = 0,95$, рабочая длина волны $\lambda = 0,6$ мкм. Коэффициент поглощения среды, заполняющей резонатор, $\alpha = 0,01 \text{ см}^{-1}$. Дифракционными потерями пренебречь.
22. Газовый лазер работает на однородно-уширенном переходе, ширина линии 200 МГц. Вероятность спонтанного излучения на рабочем переходе ($\lambda = 1$ мкм) $A_{\text{сп}} = 10^7 \text{ с}^{-1}$.

Параметры резонатора Фабри-Перо: длина $L = 1$ м, полные потери 0,02. Определить пороговую концентрацию инверсии.

23. Рассчитать необходимую пороговую инверсию перехода газового лазера ($\lambda = 510$ нм), если вероятность перехода $A_{ik} = 5 \cdot 10^7$ с⁻¹. Однородная ширина линии $\Delta\nu^{\text{одн}} = 20$ МГц, длина резонатора $L = 20$ см, а потери в резонаторе при двойном проходе составляют 5%.
24. Лазерная среда имеет доплеровский профиль усиления с шириной $\Delta\nu = 2$ ГГц. Однородная ширина равна $\Delta\nu^{\text{одн}} = 50$ МГц, а вероятность перехода $A_{ik} = 10^8$ с⁻¹. Пусть частота одной из мод резонатора ($L = 30$ см) совпадает с центральной частотой профиля усиления. Какова пороговая инверсия для центральной моды и при какой инверсии генерация начнется на соседних модах, если потери в резонаторе составляют 10% ?
25. Частота моды пассивного плоскопараллельного Фабри-Перо резонатора ($L = 15$ см) сдвинута на $0,5 \cdot \Delta\nu_{\text{Doppl}}$ от центра гауссовской линии усиления газового лазера с $\lambda = 633$ нм. Оценить затягивание моды, если ширина резонанса резонатора $\Delta\nu_p = 20$ МГц, а $\Delta\nu_{\text{Doppl}} = 1$ ГГц.
26. Для соседних продольных мод резонатора Фабри-Перо длиной 1 м, заполненного активной средой с шириной лоренцевой линии излучения на рабочем переходе $\Delta\omega = 2 \cdot 10^{12}$ рад/сек (рубин), сделайте оценку относительной разницы коэффициентов (показателей) усиления.
27. Резонатор инжекционного полупроводникового лазера образован естественными гранями кристалла с коэффициентами отражения $R_1 = R_2 = 0,37$. Определите пороговый уровень усиления для резонаторов длиной $L = 400$ мкм и $L = 100$ мкм, если внутренние потери составляют $\alpha_{\text{внут}} = 5$ см⁻¹. Что произойдет, если на грани резонатора нанести отражающие покрытия с $R_1 = 0,98$ и $R_2 = 1$?
28. Мощность непрерывной генерации полоскового полупроводникового лазера равна 10 мВт, длина волны излучения $\lambda = 0,8$ мкм, ширина спектральной линии $\Delta\nu = 100$ МГц, размеры ближнего поля - $1 \text{ мкм} \times 10 \text{ мкм}$. До какой температуры надо нагреть абсолютно черное тело, чтобы его спектральная яркость в заданном диапазоне достигла яркости на зеркале лазера?
29. Определить оптимальный коэффициент пропускания зеркал резонатора лазера, позволяющий получить максимальную выходную мощность. Длина резонатора $L = 10$ см, коэффициент ненасыщенного усиления на проход $g_0 = 0,1$ см⁻¹, коэффициент потерь на проход $\alpha = 0,01$ см⁻¹. Дифракционными потерями пренебречь.

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине

включающий:

6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), характеризующих этапы их формирования, описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования

ПК-1. Способность собирать, обрабатывать и интерпретировать данные современных научных исследований, необходимые для формирования подходов, решений и выводов по соответствующим научным и профессиональным проблемам

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания (дескрипторы)						
	«плохо»	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«очень хорошо»	«отлично»	«превосходно»
<u>Знать</u> методики сбора, обработки и интерпретации данных современных научных исследований в области квантовой электроники и оптоэлектроники, необходимых для формирования научных выводов	Отсутствие знаний материала	Наличие грубых ошибок в основном материале	Знание основного материала с рядом негрубых ошибок	Знание основного материалом с рядом заметных погрешностей	Знание основного материала с незначительными погрешностями	Знание основного материала без ошибок и погрешностей	Знание основного и дополнительного материала без ошибок и погрешностей
<u>Уметь</u> и обладать навыками сбора, обработки и интерпретации данных современных научных исследований в области квантовой электроники и оптоэлектроники и использования их для формирования научных выводов в профессиональной деятельности	Полное отсутствие требуемых умений	Фрагментарные умения сбора, обработки и интерпретации данных современных научных исследований в области квантовой электроники и оптоэлектроники	Умение сбора, обработки и интерпретации данных современных научных исследований в области квантовой электроники и оптоэлектроники с рядом негрубых ошибок	Умение сбора, обработки и интерпретации данных современных научных исследований в области квантовой электроники и оптоэлектроники с рядом заметных погрешностей	Умение сбора, обработки и интерпретации данных современных научных исследований в области квантовой электроники и оптоэлектроники с незначительными погрешностями	Умение и обладание навыками сбора, обработки и интерпретации данных современных научных исследований в области квантовой электроники и оптоэлектроники и использования их для формирования научных выводов в профессиональной деятельности	Умение и обладание навыками сбора, обработки и интерпретации данных современных научных исследований в области квантовой электроники и оптоэлектроники и использования их для формирования научных выводов в профессиональной деятельности
<u>Владеть</u> опытом сбора, обработки и интерпретации данных в области квантовой и оптической электроники, необходимых для формирования выводов по соответствующим направлениям научных исследований	Полное отсутствие опыта сбора, обработки и интерпретации данных в области квантовой и оптической	Фрагментарные навыки владения опытом сбора, обработки и интерпретации данных в области квантовой и оптической электроники	Наличие минимальных навыков владения опытом сбора, обработки и интерпретации данных в области квантовой и оптической электроники и их использования в профессиональной деятельности	Посредственное владение навыками сбора, обработки и интерпретации данных в области квантовой и оптической электроники и их использования в профессиональной деятельности	Достаточное владение навыками сбора, обработки и интерпретации данных в области квантовой и оптической электроники и их использования в профессиональной деятельности	Хорошее владение навыками сбора, обработки и интерпретации данных в области квантовой и оптической электроники и их использования в профессиональной деятельности	Всестороннее владение навыками сбора, обработки и интерпретации данных в области квантовой и оптической электроники и их использования в профессиональной деятельности
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	0 – 20 %	21 – 50 %	51 – 70%	71-80%	81 – 90%	91 – 99%	100%

6.2. Описание шкал оценивания

Итоговый контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в виде зачета, на котором определяется:

- уровень усвоения студентами основного учебного материала по дисциплине;
- уровень понимания студентами изученного материала;
- способность студентов использовать полученные знания для решения конкретных задач.

Зачет проводится в устной форме и заключается в ответе студентом на теоретические вопросы курса (с предварительной подготовкой), решении задачи (с предварительной подготовкой) и последующем собеседовании в рамках тематики курса. Собеседование проводится в форме вопросов, на которые студент должен дать краткий ответ.

Результатом проверки усвоения студентом материала и правильности решения задачи является выставление студенту оценки «зачтено». При отсутствии соответствующего уровня знаний и навыков студент не аттестовывается с выставлением оценки «не зачтено»

6.3. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю), характеризующих этапы формирования компетенций

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются: индивидуальное собеседование, домашние задания, тестовые контрольные вопросы.

Для оценивания результатов обучения в виде умений используются: индивидуальное собеседование, практические контрольные задания и результаты выполнения студентом лабораторного практикума по данной дисциплине.

Для оценивания результатов обучения в виде владений используются: индивидуальное собеседование, комплексные практические задания.

6.4. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций и (или) для итогового контроля сформированности компетенции.

Контрольные вопросы для промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины

1. Сформулировать правила отбора для гармонического осциллятора.
2. Обосновать применимость теории возмущения в атоме водорода при возбуждении его электрическим полем на частоте ($\lambda=121$ нм) с плотностью мощности 10 Вт/см^2
3. Почему происходит уширение спектральных линий поглощения (излучения) вещества в сильных полях?
4. Почему в оптическом диапазоне длин волн для измерения ширины линии можно использовать явление флуоресценции, а в радиодиапазоне – только вынужденное излучение или поглощение среды?
5. Для выбранного механизма получить выражение для неоднородно уширенного контура линии. Для выбранных условий оценить её ширину.
6. Известно, что время жизни электрона в возбужденном состоянии τ . Получить выражение для спектральной формы линии.
7. Отношение населенностей двух уровней для вещества, находящегося в состоянии равновесия при температуре 300°K , равно 10. Вычислить частоту излучения, соответствующую переходу между этими уровнями.
8. Типичное время жизни для разрешённого электродипольного перехода в видимом диапазоне ~ 10 нс. Оценить естественную ширину линии рентгеновского лазера, излучающего в диапазоне 10 нм.

9. Механизмы однородного уширения. Вывести выражение для однородно уширенного контура линии. Дать оценку её ширины (в см^{-1}) для одного из радиационных переходов Ne.
10. Механизмы неоднородного уширения. Для выбранного механизма получить выражение для неоднородно уширенного контура линии. Для выбранных условий оценить её ширину (в см^{-1}).
11. Доплеровская ширина линии 500 МГц. Оценка времени жизни уровня 10^{-8} с. Предложить метод измерения ширины лоренцевского контура.
12. Обосновать принципиальные трудности создания УФ и рентгеновских активных сред.
13. Связь коэффициента ненасыщенного усиления с коэффициентами Эйнштейна. Сравнить зависимости коэффициента усиления от мощности накачки в случае однородного и неоднородного насыщения усиления.
14. Двух-, трёх- и четырёхуровневая схемы лазеров: возможности реализации, достоинства и недостатки. Оптимальная ширина уровней.
15. Nd:АИГ лазер: квантовая схема, преимущество матрицы, организация эффективной накачки.
16. Традиционное устройство Nd лазера известно. Почему бы не сделать лазер того же диапазона на парах неодима? На газообразном соединении Nd, например, с галогеном?
17. Почему в лазерах, работающих на молекулярных переходах, используют полированные металлические зеркала, а в лазерах, работающих на электронных переходах, – диэлектрические?
18. Показать, что абсолютная ширина линии открытого оптического резонатора с плоскими зеркалами не зависит от частоты. Оценить (в см^{-1}) интервал между продольными модами и ширину линии такого резонатора для $R=0,99$ и $L=1$ м.
19. Изобразить структуру мод (линии уровня интенсивности, поляризацию, профиль напряжённости поля) TEM_{00} и TEM_{11} открытого резонатора с круглыми зеркалами. Для какой из них следует ожидать больших дифракционных потерь?
20. Изобразить и обосновать спектральный контур насыщенного усиления в резонаторе газового лазера при возбуждении в нём одной моды с частотой, лежащей в стороне от центра линии вещества.
21. Оценить число продольных мод, генерируемых He-Ne лазером длиной ~ 1 м, считая, что температура разряда не слишком отличается от комнатной. Зависит ли ширина провала в насыщенном контуре усиления и ширина линии излучения лазера от длины резонатора?
22. Найти значение ненасыщенного коэффициента усиления для полупроводникового лазера с длиной активной области 100 мкм при использовании сколов по кристаллическим поверхностям в качестве зеркал.
23. Оценить ширину Лэмбовского провала для He-Ne лазера и сравнить полученное значение с доплеровской шириной линии.
24. Объяснить принцип действия и преимущества ДГС с раздельным ограничением. Типичные оптические параметры ДГС. Изобразить зонную диаграмму, привести вариант используемых материалов.
25. Обосновать необходимость многокомпонентных материалов для приготовления диодных структур. Преимущества и недостатки соединения AlGaAs как материала для лазерных диодов. Привести пример материалов для диодной структуры на «телекоммуникационный» диапазон $\sim 1,3$ мкм
26. Особенности гетероструктуры на основе InGaAsP/InP. Вид ватт-амперной характеристики, спектр лазера и светодиода на её основе.
27. Чем определяется ширина полосы лазерного диода как источника информации? Почему светодиоды уступают им по этому параметру? Указать оценки для обоих случаев.

28. Как и почему зависит от температуры рабочая частота лазерного диода? Почему с ростом температуры снижается эффективность генерации?
29. Чем определяется толщина активной области лазерного диода, выполненного на основе простейшей гомоструктуры?
30. Указать и обосновать преимущества лазерных диодов с распределённой обратной связью и распределённым брэгговским отражением по сравнению с диодами простейшей геометрии.
31. Сравнить эффективность управления сигналами от лазерного диода путём модуляции накачки, модуляции добротности и модуляции выходного пучка.
32. Оценить ширину линии излучения и интервал между продольными модами для типичного лазерного диода

Для оценки сформированности компетенции ПК-1 используются также контрольные задания, примеры которых приведены в пункте 5.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины «Квантовая и оптическая электроника»

а) основная литература:

1. Страховский Г.Н., Успенский А.В. *Основы квантовой электроники* - М.: «Высшая школа», 1979, 336с.
2. Карлов Н.В. *Лекции по квантовой электронике* - М.: «Наука», 1983, 320с.(4)
3. Ярив А. *Квантовая электроника* - М.: «Сов.радио», 1980, 460с. (24)

б) дополнительная литература:

1. Я.И.Ханин «Лекции по квантовой радиофизике» Н.Н., ИПФ РАН, 2005г.(1)
2. Ю.М.Сорокин , В.С.Ширяев «Оптические потери в световодах» Н.Н., ННГУ, 2000г. 186с.(1)
3. Пантелл Р., Путхофф Г. *Основы квантовой электроники* – М. «Мир», 1972г 254с. (4)
4. Электронная физико-математическая библиотека EqWorld
d<http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/physics/quantum.htm>)
5. Клышко Д.Н. *Фотоны и нелинейная оптика*. М.: Наука, 1980 Электронная физико-математическая библиотекаEqWorld
<http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/physics/optics.htm>

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Для обучения дисциплине имеются специальные помещения для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также учебно-исследовательская лаборатория спецпрактикума «Оптические квантовые генераторы на твердом теле». Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, а лаборатория спецпрактикума дополнительно оснащена современным оптико-электронным оборудованием и вычислительными средствами на базе комплекса ЭВМ.

Программа составлена в соответствии с требованиями ОС ННГУ с учетом рекомендаций и ОПОП ВПО по направлению 02.03.02 «Фундаментальная информатика и информационные технологии»

Автор _____доцент Маругин А.В.

Рецензент _____доцент Пархачев В.В.

Заведующий кафедрой _____ профессор Бельков С.А.

Программа одобрена на заседании методической комиссии радиофизического факультета от 25 мая 2023 № 04/23.