

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы
электроники, фотоники и
молекулярной физики**

В.В. Иванов

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Основы квантовой теории излучения
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра квантовой электроники
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 15 час.

семинары: 45 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: М.В. Зверков, канд. техн. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры квантовой электроники 29.05.2020

Аннотация

Курс "Основы квантовой теории излучения" предусматривает ознакомление слушателей с основами полупроводниковых лазеров и подготовка к изучению других специализированных курсов по квантовой электронике.

Задачи курса:

- приобретение слушателями теоретических знаний и навыков в области задач построения полупроводниковых лазеров для устройств обработки и передачи информации, для технологических применений;
- подготовка слушателей к изучению смежных дисциплин квантовой электроники.

По результатам освоения курса студент должен:

Знать:

- алгоритм построения зонных энергетических диаграмм гетеропереходов;
- условие порогового тока генерации инжекционного лазера;
- результаты расчёта мод плоского диэлектрического волновода;
- виды резонаторов полосковых инжекционных лазеров. Методы селекции основного типа колебаний инжекционного лазера;
- уравнения, связывающие количества электронов и фотонов в резонаторе (скоростные уравнения);
- тепловые явления и критерий непрерывной генерации лазера.

Уметь:

- рассчитывать ширину запрещённой зоны полупроводникового твёрдого раствора в системе A^3B^5 ;
- оценивать длину волны генерации в лазере с двухсторонней гетероструктурой с учётом квантово-размерных эффектов;
- определять параметры усиления материала активной области по экспериментальным данным измерения мощностных и спектральных характеристик;
- оценивать изменение порогового тока и эффективности излучения в зависимости от коэффициента отражения зеркал резонатора;
- рассчитывать спектральное расстояние мод Фабри-Перо составного оптического резонатора.

Владеть:

- необходимой литературой для решения задач о расчете зонной энергетической диаграммы гетероструктур;
- навыками выбора конструкции инжекционного лазера в зависимости от режима работы, параметров излучения и области применения;
- основными методами измерения мощностных и спектральных характеристик.

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Материалы для полупроводниковых лазеров.
2. Накачка полупроводниковых лазеров.
3. Процессы усиления и генерации в полупроводниковых лазерах.
4. Устройство резонатора полупроводникового лазера.
5. Конструкции полупроводниковых лазеров.
6. Применение полупроводниковых лазеров.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- ознакомление слушателей с основами полупроводниковых лазеров и подготовка к изучению других специализированных курсов по квантовой электронике.

Задачи дисциплины

- приобретение слушателями теоретических знаний и навыков в области задач построения полупроводниковых лазеров для устройств обработки и передачи информации, для технологических применений;
- подготовка слушателей к изучению смежных дисциплин квантовой электроники.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- алгоритм построения зонных энергетических диаграмм гетеропереходов;
- условие порогового тока генерации инжекционного лазера;
- результаты расчёта мод плоского диэлектрического волновода;
- виды резонаторов полосковых инжекционных лазеров. Методы селекции основного типа колебаний инжекционного лазера;
- уравнения, связывающие количества электронов и фотонов в резонаторе (скоростные уравнения);
- тепловые явления и критерий непрерывной генерации лазера.

уметь:

- рассчитывать ширину запрещённой зоны полупроводникового твёрдого раствора в системе A^3B^5 ;
- оценивать длину волны генерации в лазере с двухсторонней гетероструктурой с учётом квантово-размерных эффектов;
- определять параметры усиления материала активной области по экспериментальным данным измерения мощностных и спектральных характеристик;
- оценивать изменение порогового тока и эффективности излучения в зависимости от коэффициента отражения зеркал резонатора;
- рассчитывать спектральное расстояние мод Фабри-Перо составного оптического резонатора.

владеть:

- необходимой литературой для решения задач о расчете зонной энергетической диаграммы гетероструктур;
- навыками выбора конструкции инжекционного лазера в зависимости от режима работы, параметров излучения и области применения;
- основными методами изменения мощностных и спектральных характеристик.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.
--	---

№	Тема (раздел) дисциплины	Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Материалы для полупроводниковых лазеров.	3	9		10
2	Накачка полупроводниковых лазеров.	2	6		5
3	Процессы усиления и генерации в полупроводниковых лазерах.	2	6		5
4	Устройство резонатора полупроводникового лазера.	3	9		10
5	Конструкции полупроводниковых лазеров.	2	6		5
6	Применение полупроводниковых лазеров.	3	9		10
Итого часов		15	45		45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 2 (Весенний)

1. Материалы для полупроводниковых лазеров.

1.1. Полупроводниковые лазеры как уникальные приборы современной техники. Основные понятия р-n-переход, гетероструктура, диэлектрический волновод. История развития инжекционных лазеров.

1.2. Активная среда полупроводниковых лазеров. Лазерные уровни и ширина запрещённой зоны. Статистика электронов и дырок в полупроводниках. Зона Бриллюэна и точки экстремумов. Зонная диаграмма прямозонных и непрямозонных материалов.

1.3. Функция плотности состояний в квантово-размерной структуре. Квантовые точки. Суперрешётки. Зонная диаграмма в механически напряжённых гетероструктурах.

1.4. Полупроводниковые материалы для инжекционных лазеров. Спектральный диапазон генерации. Арсенид галлия. Материалы и твёрдые растворы в системе AlB₅. Система AlAs/GaAs. Четверные соединения GaInPAs. Соединения AlInGaP для лазеров видимого диапазона. Ультрафиолетовые лазеры в системе AlGaIn/GaN.

1.5. Методы выращивания гетероструктур: молекулярно-пучковая эпитаксия, рост из газовой фазы с использованием металлоорганических соединений. Жидкофазная эпитаксия. Вопросы легирования.

2. Накачка полупроводниковых лазеров.

2.1. Накачка полупроводниковых лазеров. Оптическая и электронная накачка. Инжекция через р-n-переход. Время жизни неосновных носителей. Квазиуровень Ферми.

2.2. Зонные энергетические диаграммы гетеропереходов. Разрывы зон на гетерогранице. Изотипные гетеропереходы. Двухсторонняя гетероструктура при прямом электрическом смещении. Уравнения переноса носителей.

3. Процессы усиления и генерации в полупроводниковых лазерах.

3.1. Процессы усиления и генерации в полупроводниках. Необходимое условие генерации. Зависимость порогового тока от параметров активного слоя и оптического резонатора.

3.2. Ватт-амперная характеристика. Экспериментальное определение параметров усиления в лазере. Экспериментальное определение спектральной зависимости усиления.

4. Устройство резонатора полупроводникового лазера.

4.1. Устройство резонатора. Волноводная модель плоского диэлектрического волновода. Дисперсионное уравнение для ТЕ-волн. Эффективный показатель преломления и его зависимость от толщины волновода. Проникновение волны за стенку волновода, фактор оптического ограничения и расходимость излучения. Условие одномодового режима.

4.2. Зависимость показателя преломления от ширины запрещённой зоны для AlGaAs. Типы гетероволноводов: ОГС, ДГС, РО-ДГС. Полосковый волновод. Волноводный механизм за счёт усиления в области протекания тока. Межаполосковый волновод.

4.3. Спектральная структура излучения полупроводниковых лазеров. Особенности получения одночастотного режима генерации. Спектр лазера с квантово-размерной активной областью. Стабилизация частоты по газовой ячейке.

4.4. Динамика излучения и скоростные уравнения. Фактор спонтанного излучения.

4.5. Составной резонатор с дополнительным селективным элементом (дифракционной решёткой). Лазер с распределённой обратной связью. Лазер с вертикальным резонатором и поверхностным выводом излучения (VCSEL). Распределённое брэгговское зеркало на волоконном световоде.

4.6. Синхронизация излучения нескольких лазеров. Оптический полупроводниковый усилитель.

5. Конструкции полупроводниковых лазеров.

5.1. Режимы работы и конструкции полупроводниковых лазеров. Методы измерения мощностных и спектральных характеристик.

5.2. Тепловые проблемы и непрерывный режим генерации. Катастрофическая и медленная деградация.

5.3. Линейки и решётки лазеров с повышенной мощностью излучения.

6. Применение полупроводниковых лазеров.

6.1. Диодная накачка твердотельных лазеров. Лазеры для ВОЛС и устройств информатики. Влияние внешней оптической связи на генерацию лазера. Применение в спектроскопии.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Необходимое оборудование для лекций и практических занятий: аудитория, компьютер и мультимедийное оборудование (проектор).

Обеспечение самостоятельной работы: доступ в сеть Интернет, доступ к рекомендованной литературе.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Принципы лазеров [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / О. Звелто ; пер. с англ. Д. Н. Козлова [и др.] ; под науч. ред. Т. А. Шмаонова ; рус. пер. перераб. и доп. при участии автора книги . — 4-е изд. — СПб. : Лань, 2008 .— 720 с.
2. В.А.Гуртов, Твердотельная электроника, М., «Техносфера», 2008.
3. А.Н.Пихтин, Оптическая и квантовая электроника, М., «Высшая школа», 2001, гл. 9.
4. П.Г.Елисеев, Полупроводниковые лазеры – от гомопереходов до квантовых точек, «Квантовая электроника», 2002, т. 32, № 12, с. 1085-1098.

Дополнительная литература

1. Физика полупроводников [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. Л. Бонч-Бруевич, С. Г. Калашников .— М. : Наука, 1990 .— 688 с.
2. Полупроводниковые инжекционные лазеры. Динамика, модуляция, спектры; под. ред. У.Тсанга, М., «Радио и связь», 1990.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

1. <http://www.ru.wikipedia.org>
2. <http://www.qwuantum-electron.ru>
3. <http://www.exp.window.edu.ru>

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

на лекционных и семинарских занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, прослушавший курс занятий, должен овладеть общим понятийным аппаратом и научиться применять теоретические знания на практике.

Успешное освоение курса требует:

- 1) посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом; ведение конспектов занятий;
- 2) важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультацией к преподавателю.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра квантовой электроники
курс:	1
квалификация:	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен	
Разработчик:	М.В. Зверков, канд. техн. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Основы квантовой теории излучения» обучающийся должен:

знать:

- алгоритм построения зонных энергетических диаграмм гетеропереходов;
- условие порогового тока генерации инжекционного лазера;
- результаты расчёта мод плоского диэлектрического волновода;
- виды резонаторов полосковых инжекционных лазеров. Методы селекции основного типа колебаний инжекционного лазера;
- уравнения, связывающие количества электронов и фотонов в резонаторе (скоростные уравнения);
- тепловые явления и критерий непрерывной генерации лазера.

уметь:

- рассчитывать ширину запрещённой зоны полупроводникового твёрдого раствора в системе A^3B^5 ;
- оценивать длину волны генерации в лазере с двухсторонней гетероструктурой с учётом квантово-размерных эффектов;
- определять параметры усиления материала активной области по экспериментальным данным измерения мощностных и спектральных характеристик;
- оценивать изменение порогового тока и эффективности излучения в зависимости от коэффициента отражения зеркал резонатора;
- рассчитывать спектральное расстояние мод Фабри-Перо составного оптического резонатора.

владеть:

- необходимой литературой для решения задач о расчете зонной энергетической диаграммы гетероструктур;
- навыками выбора конструкции инжекционного лазера в зависимости от режима работы, параметров излучения и области применения;
- основными методами изменения мощностных и спектральных характеристик.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

Для проведения текущего контроля успеваемости предусмотрен краткий опрос по темам предыдущего занятия

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Вопросы к экзамену.

1. Электропроводность полупроводников.

2. Распределение Ферми-Дирака.
3. Волновая функция электрона в периодическом поле.
4. Зона Бриллюэна для кубической гранецентрированной решётки
5. Функция плотности состояний электронов в кристалле и квантовой яме.
6. Ширина запрещённой зоны для системы AlGaAs.
7. Понятие гомо- и гетероструктуры.
8. Условие изоморфного роста.
9. Энергетические уровни доноров и акцепторов.
10. Объёмный заряд в p-n переходе.
11. Квазиуровень Ферми.
12. Зонные энергетические диаграммы гетеропереходов.
13. Пороговое условие генерации инжекционного лазера.
14. Дифференциальная эффективность излучения и коэффициент полезного действия лазерного диода.
15. Модель плоского диэлектрического волновода.
16. Фактор оптического ограничения в волноводе.
17. Зависимость показателя преломления от состава для системы AlGaAs.
18. Типы гетероволноводов: ОГС, ДГС, РО-ДГС.
19. Конструкции полосковых волноводов.
20. Расстояние между продольными модами в резонаторе Фабри-Перо.
21. Формула дифракционной решётки.
22. Распределённая обратная связь.
23. Лазер с вертикальным резонатором и поверхностным выводом излучения (VCSEL).
24. Скоростные уравнения для электронов и фотонов.
25. Кремниевый фотодиод для измерения мощности излучения.
26. Тепловое сопротивление сборки лазерного диода.
27. Условие непрерывного режима генерации.
28. Механизм катастрофической оптической деградации активной области лазерного диода.
29. Линейки и решётки лазеров с повышенной мощностью излучения.
30. Длины волн лазеров для ВОЛС.
31. Ширина линии и длина когерентности излучения.

Примеры экзаменационных билетов:

Пример 1.

1. Кремниевый фотодиод для измерения мощности излучения.
2. Тепловое сопротивление сборки лазерного диода.

Пример 2.

1. Понятие гомо- и гетероструктуры.
2. Условие изоморфного роста.

Критерии оценивания

10 баллов — (ПРЕВОСХОДНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы, а также по основным вопросам, выходящим за ее пределы;
- точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;
- безупречное владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- выраженная способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации;
- полное и глубокое усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку, использовать научные достижения других дисциплин;

- творческая самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, активное участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

9 баллов — (ОТЛИЧНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации в рамках учебной программы, полное усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, творческое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

8 баллов — (ПОЧТИ ОТЛИЧНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем поставленным вопросам в объеме учебной программы;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины (методами комплексного анализа, техникой информационных технологий), умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач; способность самостоятельно решать сложные проблемы в рамках учебной программы;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку с позиций государственной идеологии (по дисциплинам социально-гуманитарного цикла);
- активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, систематическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

7 баллов — (ОЧЕНЬ ХОРОШО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), лингвистически и логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

6 баллов — (ХОРОШО):

- достаточно полные и систематизированные знания в объеме учебной программы;
- использование необходимой научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач; способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку; активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, периодическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

5 баллов — (ПОЧТИ ХОРОШО):

- достаточные знания в объеме учебной программы;

- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

4 балла — (УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО), ЗАЧТЕНО:

- достаточный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, стилистическое и логическое изложение ответа на вопросы, умение делать выводы без существенных ошибок;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении стандартных (типовых) задач;
- умение под руководством преподавателя решать стандартные (типовые) задачи;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им оценку;
- работа под руководством преподавателя на практических, лабораторных занятиях, допустимый уровень культуры исполнения заданий.

3 балла — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО), НЕЗАЧТЕНО:

- недостаточно полный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- знание части основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, изложение ответа на вопросы с существенными лингвистическими и логическими ошибками;
- слабое владение инструментарием учебной дисциплины, некомпетентность в решении стандартных (типовых) задач;
- неумение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях изучаемой дисциплины;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

2 балла — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО):

- фрагментарные знания в рамках образовательного стандарта;
- знания отдельных литературных источников, рекомендованных учебной программой дисциплины;
- неумение использовать научную терминологию дисциплины, наличие в ответе грубых стилистических и логических ошибок;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

1 балл — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО):

- отсутствие знаний и компетенций в рамках образовательного стандарта или отказ от ответа.

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

При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету не должен превышать двух академических часов в устной и (или) письменной форме.