

**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)**

<b>по дисциплине:</b>	Полупроводниковые лазеры
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра квантовой электроники
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

1 (осенний) - Экзамен

2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 45 час.

семинары: 15 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Подготовка к экзамену: 60 час.

Всего часов: 180, всего зач. ед.: 4

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

Программа обсуждена на заседании кафедры квантовой электроники 29.05.2020

## Аннотация

Курс "Полупроводниковые лазеры" 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, технологических применений.

По результатам освоения курса студент должен:

Знать:

Алгоритм построения зонных энергетических диаграмм гетеропереходов.

Результаты расчёта мод плоского диэлектрического волновода.

Виды резонаторов полосковых инжекционных лазеров.

Методы селекции основного типа колебаний инжекционного лазера.

Условие порогового тока генерации инжекционного лазера.

Уравнения, связывающие количество электронов и фотонов в резонаторе (скоростные уравнения).

Тепловые явления и критерий непрерывной генерации лазера.

Уметь:

Рассчитывать ширину запрещённой зоны полупроводникового твёрдого раствора в системе АЗВ5. Определять параметры усиления материала активной области по экспериментальным данным измерения мощностных и спектральных характеристик.

Оценивать длину волны генерации в лазере с двухсторонней гетероструктурой с учётом квантово-разменных эффектов.

Оценивать изменение порогового тока и эффективности излучения в зависимости от коэффициента зеркал резонатора.

Рассчитывать спектральное расстояние мод Фабри-Перо составного оптического резонатора.

Владеть:

Навыками выбора конструкции инжекционного лазера в зависимости от режима работы, параметров излучения и области применения.

Основными методами измерения мощностных и спектральных характеристик.

Умением пользоваться необходимой литературой для решения задач о расчёте зонной энергетической диаграммы гетероструктур.

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Предмет и содержание дисциплины
2. Материалы для полупроводниковых лазеров
3. Свойства гетероструктур
4. Процессы усиления и генерации в полупроводниковых лазерах
5. Устройство резонатора полупроводникового лазера
6. Методы селекции мод инжекционного лазера
7. Конструкции полупроводниковых лазеров
8. Применение полупроводниковых лазеров
9. Накачка 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, технологических применений.

## 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;
- результаты расчёта мод плоского диэлектрического волновода;
- виды резонаторов полосковых инжекционных лазеров;
- методы селекции основного типа колебаний инжекционного лазера;
- условие порогового тока генерации инжекционного лазера;
- уравнения, связывающие количество электронов и фотонов в резонаторе (скоростные уравнения). Тепловые явления и критерий непрерывной генерации лазера.

уметь:

- рассчитывать ширину запрещённой зоны полупроводникового твёрдого раствора в системе АЗВ5. Определять параметры усиления материала активной области по экспериментальным данным измерения мощностных и спектральных характеристик;
- оценивать длину волны генерации в лазере с двухсторонней гетероструктурой с учётом квантово-разменных эффектов;
- оценивать изменение порогового тока и эффективности излучения в зависимости от коэффициента зеркал резонатора;
- рассчитывать спектральное расстояние мод Фабри-Перо составного оптического резонатора.

владеть:

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

## 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

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост.

		лекции	семинары	лаборат. работы	работа
1	Введение	6			2
2	Материалы	8			2
3	Свойства гетероструктур в устройствах фотоники	8			2
4	Усиление генерации	8			24
5	Устройство резонатора	3	3		2
6	Селекция мод	3	3		2
7	Конструкции	3	3		2
8	Применение	3	3		2
9	Накачка полупроводниковых лазеров	3	3		22
Итого часов		45	15		60
Подготовка к экзамену		60 час.			
Общая трудоёмкость		180 час., 4 зач.ед.			

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

##### Семестр: 1 (Осенний)

###### 1. Введение

Предмет и содержание дисциплины.

###### 2. Материалы

Материалы для полупроводниковых лазеров.

###### 3. Свойства гетероструктур в устройствах фотоники

Свойства гетероструктур.

###### 4. Усиление генерации

Процессы усиления и генерации в полупроводниковых лазерах.

##### Семестр: 2 (Весенний)

###### 5. Устройство резонатора

Устройство резонатора полупроводникового лазера.

###### 6. Селекция мод

Методы селекции мод в резонаторах.

###### 7. Конструкции

Конструкции полупроводниковых лазеров. Типы, основы проектирования.

###### 8. Применение

Применение полупроводниковых лазеров.

## 9. Накачка полупроводниковых лазеров

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

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

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

Учебная аудитория, оснащенная мультимедиа проектором, экраном и микрофоном.

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

1. В.А.Гуртов, Твердотельная электроника, М., "Техносфера", 2008.
2. А.Н.Пихтин, Оптическая и квантовая электроника, М., "Высшая школа", 2001, гл. 9.
3. П.Г.Елисеев, Полупроводниковые лазеры - от гомопереходов до квантовых точек, "Квантовая электроника", 2002, т. 32, № 12, с. 1085-1098.

### Дополнительная литература

1. 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.elibrary.ru>
2. <http://www.quantum-electron.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 лекций и семинаров, должен овладеть общим понятийным аппаратом и научиться применять теоретические знания на практике.

Успешное освоение курса требует:

- 1) посещения всех лекций и семинаров, предусмотренных учебным планом; ведение конспектов занятий; активное участие в обсуждении лекций и семинаров,
- 2) важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультацией к преподавателю на лекции или к докладчику на семинаре.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра квантовой электроники
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Экзамен
- 2 (весенний) - Экзамен

**Разработчик:** М.В. Зверков, канд. техн. наук, доцент

## 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 «Полупроводниковые лазеры» обучающийся должен:

### знать:

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

### уметь:

- рассчитывать ширину запрещённой зоны полупроводникового твёрдого раствора в системе АЗВ5. Определять параметры усиления материала активной области по экспериментальным данным измерения мощностных и спектральных характеристик;
- оценивать длину волны генерации в лазере с двухсторонней гетероструктурой с учётом квантово-разменных эффектов;
- оценивать изменение порогового тока и эффективности излучения в зависимости от коэффициента зеркал резонатора;
- рассчитывать спектральное расстояние мод Фабри-Перо составного оптического резонатора.

### владеть:

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

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

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

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

Вопросы для подготовки 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 в системе 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 веримкальным резонатором и поверхностным выводом излучения.
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. Длина волны лазеров для ВОЛС.
31. Ширина линии генерации и длина когерентности излучения инжекционного лазера.

Примеры экзаменационных билетов.

Пример 1.

1. Лазер с веримкальным резонатором и поверхностным выводом излучения.
2. Скоростные уравнения для электронов и фотонов.

Пример 2.

1. Волновая функция электрона в периодическом поле.
2. Механизм катастрофической оптической деградации активной области лазерного диода.

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 до 60 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету не должен превышать двух астрономических часов в устной и (или) письменной форме.