

Институт физики микроструктур РАН —  
филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики Российской академии наук»

УТВЕРЖДАЮ  
Врио директора ИФМ РАН  
\_\_\_\_\_  
З.Ф.Красильник  
"11" апреля 2016 г.

### **Рабочая программа дисциплины**

Физические основы полупроводниковых лазеров

#### **Направление подготовки**

*11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи»*

#### **Направленность (профиль) программы**

*05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах»*

#### **Квалификация (степень) выпускника**

*исследователь - преподаватель, исследователь*

#### **Форма обучения**

*очная*

Нижний Новгород

2016

## 1. Место и цели дисциплины в структуре ООП аспирантуры

Дисциплина «Физические основы полупроводниковых лазеров» является дисциплиной по выбору программы 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Для успешного усвоения курса аспиранту необходимо знание физики и математики, ряда разделов теоретической физики (квантовая механика, электродинамика, статистическая физика), физики твердого тела, твердотельной электроники. Данный курс является базой для выполнения аспирантами исследований в области твердотельных полупроводниковых лазерных наноструктур.

Дисциплина изучается на 1 курсе (2 семестр).

### Целями освоения дисциплины являются:

- формирование у студентов современных представлений о физических принципах и подходах лежащих в основе различных полупроводниковых источников стимулированного излучения, ознакомление с их характеристиками, существующими на сегодняшний день проблемами и тенденциями
- формирование у аспирантов компетенций программы 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах», в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи».

## 2. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы по направлению 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи»

В результате освоения дисциплины обучающийся должен овладеть следующими компетенциями результатами обучения по дисциплине:

Код компетенции	Результаты освоения ООП Содержание компетенций	Перечень результатов планируемых обучения по дисциплине
УК-1	способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях	<b>ЗНАТЬ:</b> методы критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе междисциплинарных областях. <b>УМЕТЬ:</b> проводить анализ литературных данных в рамках поставленной исследовательской (практической, образовательной) задачи, выявлять основные вопросы и проблемы, существующие в современной науке; при решении исследовательских и практических задач генерировать новые идеи, поддающиеся операционализации исходя из

		<p>наличных ресурсов и ограничений.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ:</b></p> <p>навыками критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях.</p>
<b>ОПК-1</b>	<p>владение методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности</p>	<p><b>ЗНАТЬ:</b></p> <p>теоретические основы организации научно-исследовательской деятельности;</p> <p>методы сбора информации для решения поставленных исследовательских задач;</p> <p>методы анализа данных, необходимых для проведения конкретного исследования.</p> <p><b>УМЕТЬ:</b></p> <p>выбирать и применять в профессиональной деятельности экспериментальные и расчетно-теоретические методы исследования</p> <p>планировать, организовывать и проводить научно-исследовательские и производственно-технические исследования с применением современной аппаратуры, оборудования и компьютерных технологий;</p> <p>самостоятельно выполнять теоретические, экспериментальные и вычислительные физические исследования при решении научно-исследовательских и производственных задач с использованием современной аппаратуры и вычислительных средств.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ:</b></p> <p>навыками поиска (в том числе с использованием информационных систем и баз данных) и критического анализа информации по тематике проводимых исследований;</p> <p>навыками планирования научного исследования, анализа</p>

		<p>получаемых результатов и формулировки выводов;</p> <p>навыками работы на современной аппаратуре и оборудовании для выполнения физических исследований;</p> <p>способностью самостоятельно с применением современных компьютерных технологий;</p> <p>анализировать, обобщать и систематизировать результаты физических работ.</p>
<b>ПК-1</b>	<p>способность самостоятельно проводить научные исследования в области твердотельной электроники и применять полученные результаты для решения практических задач</p>	<p><b>ЗНАТЬ:</b></p> <p>основные законы, теоретические модели и современные методы исследований и математического моделирования в области твердотельной электроники.</p> <p><b>УМЕТЬ:</b></p> <p>использовать полученные знания для анализа результатов научных исследований и решения практических задач в области твердотельной электроники.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ:</b></p> <p>разработкой методов научного исследования для получения новых фундаментальных знаний в области твердотельной электроники и способами применения этих знаний для создания прикладных технологий и решения практических задач.</p>
<b>ПК-2</b>	<p>способность к системному анализу современных проблем физики и комплекса новейших знаний и достижений физики в своей научно-исследовательской деятельности</p>	<p><b>ЗНАТЬ:</b></p> <p>Базовые законы современной физики и их взаимосвязь, тенденции развития физики в обозримой перспективе, основные проблемы, стоящие перед современной физикой, а также предлагаемые средства их решения.</p> <p><b>УМЕТЬ:</b></p> <p>понимать суть явлений и процессов, изучаемых физикой.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ:</b></p> <p>основами методологии и практическими навыками научного познания при изучении различных уровней организации материи, пространства и времени.</p>

<b>ПК-3</b>	<p>способность использовать современные методы обработки экспериментальных данных и/или методы численного моделирования сложных физических процессов в области твердотельной электроники.</p>	<p><b>ЗНАТЬ:</b> основные методы обработки данных, полученных экспериментально или методами численного моделирования.</p> <p><b>УМЕТЬ:</b> выделять и систематизировать необходимые научные данные; критически оценивать их достоверность.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ:</b> навыками сбора, обработки, анализа и систематизации научных данных; навыками статистического анализа экспериментальных данных; навыками аналитических и численных аппроксимаций функций.</p>
-------------	---	--

**3. Объем дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам занятий) и на самостоятельную работу обучающихся**

Общая трудоемкость (объем) дисциплины составляет 3 зачетных единиц (ЗЕ), 108 часов.

**3.1. Объем дисциплины по видам учебных занятий (в часах)**

Вид учебной работы	Всего часов
Общая трудоемкость дисциплины	108
Контактная работа обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) (всего)	36
Аудиторная работа (всего):	36
в том числе:	
Лекции	18
Практические занятия	18
Самостоятельная работа обучающихся (всего)	72
<b>Вид итогового контроля</b>	<b>Зачет</b>

**3.2. Разделы дисциплины и трудоемкость по видам учебных занятий (в академических часах)**

№	Раздел дисциплины	Всего	Контактная работа		Самостоятельная работа
			Лекционные занятия	Практические занятия	
1	Введение. Вопросы теории взаимодействия света и вещества	18	3	3	12
2	Состояния электронов и их числа заполнения	18	3	3	12
3	Оптика межзонных переходов	18	3	3	12

4	Лазеры на межзонных переходах	18	3	3	12
5	Упрощенная теория полупроводникового лазера	18	3	3	12
6	Лазеры на внутризонных переходах	18	3	3	12
	<b>Дисциплина в целом</b>	<b>108</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>72</b>

### 3.3 Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам)

№	Наименование раздела дисциплины	Содержание
1	Введение. Вопросы теории взаимодействия света и вещества	Методы теории возмущений, золотое правило Ферми, частота Раби, спонтанное и вынужденное излучение электромагнитных волн, излучение абсолютно черного тела, термодинамические соотношения Эйнштейна. Описание взаимодействия света и вещества в рамках классического подхода, формализм диэлектрической проницаемости. Полуклассический метод описания такого взаимодействия. Квантовая теория излучения и взаимодействия света и вещества.
2	Состояния электронов и их числа заполнения.	Волновая функция Блоха. Свободные и связанные состояния. Плотность электронных состояний. Статистика заполнения электронных состояний и функция распределения. Равновесное, неравновесное и инвертированное распределение электронов по их состояниям. Квазиуровень Ферми Роль процессов накачки и релаксации в формировании населенности состояний.
3	Оптика межзонных переходов	Межзонные/внутризонные оптические переходы. Матричные элементы межзонных оптических переходов в полупроводниках. Плотность состояний оптических переходов. Коэффициенты усиления и поглощения.
4	Лазеры на межзонных переходах	Полупроводниковые лазеры при оптической накачке. Лазеры при накачке электронным пучком. Инжекционные лазеры на p-n гомопереходе. Лазеры на двойном гетеропереходе. Характеристики и условия работы лазеров на основе различных полупроводников.
5	Упрощенная теория полупроводникового лазера	Скоростные уравнения для плотности электронов и числа фотонов в моде. Условие генерации. Критическая скорость и пороговый ток накачки. Эффективность генерации и дифференциальный коэффициент полезного действия.
6	Лазеры на внутризонных переходах	Лазеры на переходах горячих дырок в германии, принцип действия и характеристики излучения. Квантово-каскадные лазеры на переходах между подзонами размерного квантования квантовых ям в 2D структурах, принцип действия и характеристики излучения.

Текущий контроль успеваемости осуществляется в рамках занятий практического и семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций. Итоговый контроль осуществляется на зачете, в ходе которого оцениваются уровень теоретических знаний и навыки решения практических задач.

#### **4. Образовательные технологии**

При изучении дисциплины используются современные образовательные технологии. Предусматривается использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий (разбор конкретных ситуаций, тренинги по решению практических задач) в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся.

Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) по дисциплине проходит в форме лекций и практических занятий, а также в виде коллективных и индивидуальных консультаций. На занятиях лекционного типа используются мультимедийные средства поддержки образовательного процесса, часть занятий проводятся в виде лекций с проблемным изложением материала. На занятиях практического типа разбираются решения задач различной степени сложности, проводятся обсуждения рассматриваемых проблем в свете последних научных достижений в данной области. Аспиранты работают как индивидуально, так и коллективно.

Самостоятельная работа включает в себя выполнение домашних заданий, подготовку семинаров, а также теоретическую подготовку к занятиям по материалам лекций и рекомендованной литературе, приведенной в конце данной программы. Кроме того, аспиранты имеют возможность принимать участие в семинарах с представителями российских и зарубежных научных организаций, мастер-классах экспертов и специалистов в области современных задач физики полупроводниковых лазеров.

#### **5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся**

В курсе запланировано на самостоятельную работу аспирантов 72 часа (67 % общего объема). Самостоятельная работа аспирантов является одним из видов учебных занятий, выполняется по заданию преподавателя индивидуально и без его непосредственного участия. Самостоятельная работа аспиранта – неотъемлемая часть подготовки высококвалифицированного специалиста в соответствующей области. Ее цель – систематизация и закрепление полученных знаний и умений, углубление и расширение знаний, приобретение навыков самостоятельной работы с литературой, формирование способностей и навыков к непрерывному самообразованию и профессиональному совершенствованию.

Самостоятельная работа аспиранта подразумевает проработку лекционного и дополнительного материала, решение домашних задач с последующей проверкой навыков решения задач. Проработка лекционного материала осуществляется еженедельно после проведения аудиторных занятий в рамках часов, отведенных аспирантам на самостоятельную работу. Кроме того, работа с лекционным и дополнительным материалом (рекомендованной литературой, приведенной в конце данной программы) проводится при подготовке к зачету по дисциплине. Выполнение домашних работ осуществляется еженедельно или раз в две недели в соответствии с графиком изучения соответствующего лекционного материала и проведения практических занятий по соответствующей тематике.

#### **6. Фонд оценочных средств по дисциплине**

##### **6.1 Типовые контрольные задания или иные материалы**

1. Метод возмущений первого порядка в теории электронных переходов.
2. Вывод и рамки применимости золотого правила Ферми.
3. Спонтанное и вынужденное излучение света.
4. Излучение абсолютно черного тела.
5. Термодинамические соотношения Эйнштейна.
6. Полуклассический подход в теории взаимодействия света и вещества. Оператор взаимодействия в дипольном приближении.
7. Соотношение между коэффициентом оптического поглощения и темпом индуцированных светом переходов.
8. Классический подход в теории взаимодействия света и вещества. Материальные соотношения и понятия о высокочастотной диэлектрической проницаемости и проводимости.
9. Соотношение между коэффициентом поглощения света и компонентами диэлектрической проницаемости среды.
10. Поглощение света свободными электронами в приближении тождественных частиц. Формула Друде-Лоренца
11. Формулировка кинетического уравнения Больцмана и его приближенных методов решения в приложении к вопросам взаимодействия света с газом заряженных частиц.
12. Квантовый подход в теории взаимодействия света и вещества. Электромагнитное поле как совокупность гармонических операторов, понятие фотона.
13. Спонтанное излучение света двухуровневой системой в квантовой теории поля.
14. Индуцированные светом переходы в первом порядке квантовой теории взаимодействия света и вещества и коэффициент поглощения/усиления света.
15. Оптика межзонных переходов в полупроводниках. Матричные элементы и поглощение на межзонных и внутризонных оптических переходах.
16. Плотность населенности электронных состояний в полупроводнике.
17. Вывод выражения для коэффициента поглощения/усиления света на межзонных переходах в полупроводнике.
18. Безызлучательные переходы и методы формирования инверсной населенности электронных состояний (на простых примерах).
19. Принцип формирования инверсной населенности электронных состояний и стимулированное излучения на межзонных переходах в полупроводниках, понятие квазиуровня Ферми.
20. Полупроводниковые лазеры с оптической накачкой.
21. Полупроводниковые лазеры с возбуждением электронным пучком.
22. Полупроводниковые лазеры с инжекционной накачкой на простом р-п переходе.
23. Особенности и преимущества полупроводникового инжекционного лазера на двойном гетеропереходе
24. Упрощенная теория полупроводниковых лазеров, пороговый ток, коэффициент усиления, эффективность излучения и т.д.
25. Полупроводниковые лазеры на межзонных переходах валентной зоны германия в скрещенных электрическом и магнитном полях.
26. Стимулированное излучение тяжелых дырок германия при их баллистическом разогреве в электрическом поле (НЕМАГ).
27. Квантово-каскадные лазеры на межподзонных переходах квантовых ям.

## **6.2. Описание шкал оценивания**

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

- уровень усвоения основного учебного материала по дисциплине;
- уровень понимания изученного материала;

- способности использовать полученные знания для решения конкретных задач.

Зачет проводится в устной форме. Устная часть заключается в ответе аспирантом на теоретические вопросы курса (с предварительной подготовкой) и последующем собеседовании в рамках тематики курса. Собеседование проводится в форме вопросов, на которые аспирант должен дать краткий ответ. Практическая часть предусматривает решение двух задач по различным разделам курса.

Зачет ставится при уровне знаний на оценку «удовлетворительно» и выше.

Оценка	Уровень подготовки
Отлично	<p>Высокий уровень подготовки с незначительными ошибками. Аспирант дает полный и развернутый ответ на все теоретические вопросы билета; точно отвечает на дополнительные вопросы; приводит почти полные, аргументированные решения всех сформулированных в билете задач с незначительными недочетами. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, демонстрирующих знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий на 90% и выше</p>
Хорошо	<p>В целом хорошая подготовка с заметными ошибками или недочетами. Аспирант дает полный ответ на все теоретические вопросы билета с небольшими неточностями, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит почти полные решения всех сформулированных в билете задач с некоторыми недочетами; или исчерпывающее решение приведено только для одной из двух задач билета, а вторая задача решена со значительными погрешностями. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, достаточной четкостью в выражении мыслей и не всегда полной обоснованностью выводов, демонстрирующих, в целом, знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение основными методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 70 до 80%.</p>
Удовлетворительно	<p>Минимально достаточный уровень подготовки. Аспирант показывает минимальный уровень теоретических знаний, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит неполные, слабо аргументированные решения всех сформулированных в билете задач. Изложение решений и полученные ответы не отличаются стройной логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, что говорит о не достаточно полном понимании общефизических и профессиональных дисциплин, умении применять на практике лишь некоторые приобретенные навыки, владении не всеми изученными методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 50 до</p>

	70%.
Неудовлетворительн о	Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Аспирант дает ошибочные ответы, как на теоретические вопросы билета, так и на наводящие и дополнительные вопросы экзаменатора; приводит решения сформулированных в билете задач с грубыми недочетами, что говорит о недостатке знаний по общефизическим и профессиональным дисциплинам, отсутствии умения применять на практике приобретенные навыки, не владение методиками решения задач. Выполнение контрольных экзаменационных заданий до 50%.

## 7. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины

### а) основная литература:

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., курс "Теоретическая физика", Том III. «Квантовая механика». М.: Наука. 2002.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., курс "Теоретическая физика", Том V. «Статистическая физика. Часть 1». М.: Наука. 1976.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., курс "Теоретическая физика", Том VIII. «Электродинамика сплошных сред». М.: Наука. 1982.
4. Файн В.М., Ханин Я.И., «Квантовая радиофизика». тт. 1-2, М., Сов. Радио, 1965.
5. Ханин Я.И., «Основы динамики лазеров». М.: Физматлит, 1999.
6. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г., «Физика полупроводников». М.: Наука 1977.

### б) дополнительная литература:

1. Карлов Н.В., «Лекции по квантовой электронике». М. Наука, 1988.
2. Ярив А., «Квантовая электроника и нелинейная оптика». М.: Советское радио, 1973.
3. Бертен Ф., «Основы квантовой электроники». М.: Мир, 1971.
4. Ансельм А.И., «Введение в теорию полупроводников». М.: Наука 1978.
5. Ю П., Кардона М., «Основы физики полупроводников». М. Физматлит 2002. Успехи физических наук (<https://ufn.ru/ru/>)
6. Зеегер К., «Физика полупроводников», М.: Мир 1977.
7. Слепцов А.И., Алексеев А.А., «Исследование свойств полупроводникового лазера и изучение возможностей его использования в лабораторных и демонстрационных опытах по физике». Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова Выпуск № 4 / том 5 / 2008. <http://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-svoystv-poluprovodnikovogo-lazera-i-izuchenie-vozmozhnostey-ego-ispolzovaniya-v-laboratornyh-i-demonstratsionnyh-opytah#ixzz3aCJAdp1N>
8. Успехи физических наук (<https://ufn.ru/ru/>).
9. Reviews of Modern Physics (RMP) (<https://journals.aps.org/rmp/>)
10. Physical Review B (PRB) (<https://journals.aps.org/prb/>)
11. Semiconductor Science and Technology (<http://iopscience.iop.org/journal/0268-1242>)
12. Физика и техника полупроводников (<http://journals.ioffe.ru/journals/2>)

### в) факультативная литература

1. В.М. Файн, Я.И. Ханин, «Квантовая радиофизика». М.: Сов. Радио, 1965, т. 1,2.
2. В.Б. Берестецкий, А.И. Ахиезер, «Квантовая электродинамика». М.: Наука, 1981
3. Ю.В. Голубенко, А.В. Богданов, Ю.В. Иванов, Р.С. Третьяков. «Волоконные технологические лазеры» [Электронный ресурс] /Учеб. пособие/ М.: Издательство МГТУ

им. Н. Э. Баумана, 2010. - [http://www.studentlibrary.ru/book/bauman\\_0153.html](http://www.studentlibrary.ru/book/bauman_0153.html)

4. В. Л. Гинсбург, А. А. Рухадзе, «Волны в магнитоактивной плазме». М.: Наука, 1975.

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

Использование программного обеспечения:

1. Microsoft Office Word.
2. Microsoft Office Excel.
3. Microsoft Office Power Point.
4. Free Origin Viewer.

## **9. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

Для проведения лекций и практических занятий требуется типовое оборудование лекционной аудитории.

Для подготовки самостоятельных контрольных работ и для их графического представления (если это необходимо), а также для расширения коммуникационных возможностей аспиранты имеют возможность работать за компьютером с соответствующим лицензионным программным обеспечением и выходом в Интернет.

### **Составитель:**

Шастин В.Н., проф., д.ф.-м.н., в.н.с., зав.лабораторией физики полупроводниковых лазеров на горячих носителях заряда, (отдела физики полупроводников) ИФМ РАН.

### **Рецензент:**

Алешкин В.Я., д.ф.-м.н., проф., г.н.с. отдела физики полупроводников ИФМ РАН