

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

**Физический факультет
Кафедра физики полупроводников**



**Рабочая программа дисциплины
ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ОПТОЭЛЕКТРОНИКА**

направление подготовки: **03.04.02 Физика**

профиль (направленность) (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения

Очная

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная ра- бота, не включая пе- риод сессии	Самостоятельная подготовка к проме- жуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные за- нятия			Консультации	Зачет	Дифференциро- ванный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	72	16	16		38				2	
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них:										
- контактная работа 34 часа										
Компетенции ПК-1										

Руководитель программы
д.ф.-м.н.

И. Б. Логашенко

Новосибирск, 2026

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.	3
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.	4
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.	4
5. Перечень учебной литературы.	6
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.	6
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.....	7
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.	7
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.....	7
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.	8

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Цель учебного курса «Полупроводниковая оптоэлектроника» – дать студентам базовые знания по устройству, принципу работы, областям применения полупроводниковых оптоэлектронных приборов, а также о технологиях, используемых при их изготовлении.

Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
ПК-1 Способен использовать специализированные знания в области физики при решении поставленных задач в научно-исследовательской деятельности в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования. ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Знать принципы работы основных типов оптоэлектронных полупроводниковых приборов; основные уравнения для анализа работы оптоэлектронных полупроводниковых приборов, основы технологии изготовления оптоэлектронных полупроводниковых приборов. Уметь объяснять микроскопические механизмы явлений, лежащих в основе работы оптоэлектронных полупроводниковых приборов; отвечать на контрольные вопросы по курсу; решать задачи по полупроводниковой оптоэлектронике на уровне сложности задания, формулировать требования к конструкции и технологическим процессам изготовления оптоэлектронных полупроводниковых приборов.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Дисциплина «Полупроводниковая оптоэлектроника» реализуется в осеннем семестре для магистрантов, обучающихся по направлению подготовки 03.04.02 Физика. Курс является одной из профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой физики полупроводников физического факультета НГУ. Для успешного освоения курса «Полупроводниковая оптоэлектроника» магистранты должны обладать предварительными знаниями основ электродинамики, квантовой механики, статистической физики в объеме бакалавриата физического факультета НГУ. В свою очередь, учебный курс «Полупроводниковая оптоэлектроника» предоставляет магистрантам теоретические знания и практические навыки, необходимые для обучения в аспирантуре по специальностям "физика полупроводников" и "физика конденсированного состояния", а также для успешного использования полупроводниковых оптоэлектронных приборов в научно-исследовательской работе.

3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.

Трудоёмкость дисциплины составляет: 2 зачётные единицы, 72 часа.

Форма промежуточной аттестации: 3 семестр – дифференцированный зачет.

№		Вид деятельности	Семестр
			3
1		Лекции, ч	16
2		Практические занятия, ч	16
3		Лабораторные занятия, ч	-
4		Занятия в контактной форме, ч из них	34
5		аудиторных занятий, ч	32
6		в электронной форме, ч	-
7		консультаций, час.	-
8		промежуточная аттестация, ч	2
9		Самостоятельная работа, час.	38
10		Всего, ч	72

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

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетные единицы, 72 академических часа.

Программа и основное содержание лекций (16 часов)

Раздел 1. Введение (1 час).

Основные физические явления, лежащие в основе работы полупроводниковых оптоэлектронных приборов.

Раздел 2. Полупроводниковые источники некогерентного излучения (2 часа).

Принцип работы светодиода. Оптические и энергетические характеристики светодиодов. Технологии, используемые при изготовлении светодиодов. Фотометрические характеристики светодиодов. Основы колориметрии. Светодиоды видимого диапазона. Инфракрасные светодиоды. Белые светодиоды.

Раздел 3. Полупроводниковые лазеры (2 часа).

Физика работы полупроводникового лазера. Полосковые лазеры. Характеристики лазеров. Лазеры с распределенной обратной связью. Лазеры с вертикальным резонатором. Каскадные лазеры. Технологии, используемые при изготовлении полупроводниковых лазеров.

Раздел 4. Полупроводниковые фотоприемники (2 часа).

Классификация полупроводниковых фотоприемников. Параметры фотоприемников. Фоторезисторы. Фотодиоды.

p-i-n фотодиод. Лавинный фотодиод. Области применения полупроводниковых фотоприемников. Шумы фотоприёмников.

Раздел 5. Матричные фотоприемники (2 часа).

Приборы зарядового сдвига – принцип работы, диаграммы тактовых импульсов. КМОП-матрицы. Принципы и организация считывания видеосигнала многоэлементных фотоприемных устройств.

Раздел 6. Фотоприемные приборы ИК диапазона (2 часа).

Особенности детектирования инфракрасного излучения. Детекторы ближнего, среднего и дальнего ИК диапазонов. Технологии, используемые при изготовлении фотоприемных приборов ИК диапазона.

Раздел 7. Солнечные батареи (1 час).

Солнечное излучение и идеальная эффективность преобразования. Однокаскадные элементы на p-n переходах. Тонкопленочные элементы. Многокаскадные элементы на гетеропереходах.

Раздел 8. Полупроводниковые фотокатоды с отрицательным электронным средством (1 час).

Принцип работы полупроводникового фотокатода с отрицательным электронным средством. Фотоумножитель. Электронно-оптический преобразователь. Использование полупроводниковых фотокатодов в качестве источников холодных и спин-поляризованных электронов.

Раздел 9. Полупроводниковые приборы СВЧ и терагерцового диапазонов (2 часа).

Полупроводниковые приборы на основе междолинного перехода электронов (генератор Ганна). Туннельный диод. Источники и приёмники излучения терагерцового диапазона.

Раздел 10. Волоконно-оптические линии связи. (1 час).

Принцип построения. Модуляторы. Коммутационные элементы связи.

Программа практических занятий (16 часов)

Занятие 1. Положение уровня Ферми при различной концентрации носителей в полупроводнике. Определение состава InGaAs, согласованного по постоянной решетки с InP/ Построение энергетической зонной диаграммы p-InP/i-InGaAs/n-InP p-i-n фотодиода. **(1 час)**

Занятие 2. Вольт-амперная характеристика p-n перехода. Электрическая схема включения светодиода. Падение напряжения на работающем светодиоде. Угол полного внутреннего отражения для света, выходящего из полупроводниковой структуры. Связь светового потока и спектра мощности излучения. Связь между мощностью излучения фотодиода и силой света. **(2 часа)**

Занятие 3. Необходимое условие генерации вынужденного излучения. Ватт-амперная характеристика лазера. Моды резонатора в виде прямоугольного параллелепипеда. Толщины слоев распределенного Брэгговского отражателя. **(2 часа)**

Занятие 4. Ток фоторезистора при освещении, коэффициент усиления. Вольт-амперная характеристика фотодиода при освещении. Электрические схемы включения фотодиода, p-i-n фотодиода. Генерационный шум фотоприемника. **(2 часа)**

Занятие 5. Длины волн максимума спектра мощности излучения черного тела для разных температур. Разность температур, эквивалентная мощности шума. **(2 часа)**

Занятие 6. Фактор заполнения. Оптимальное сопротивление нагрузки. Предел Шокли-Квейссера. Увеличение эффективности солнечных батарей при увеличении интенсивности падающего излучения, концентраторы. **(1 час)**

Занятие 7. Интегральная чувствительность фотокатода. Нелинейность ампер-ваттной характеристики фотокатода. Фотокатод, как источник спин-поляризованных электронов. (1 часа)

Занятие 8. Материальная и межмодовая дисперсии волновода. Спектральное уплотнение каналов в волоконно-оптических линиях связи. Принцип работы модулятора Маха-Цандера и модулятора на эффекте Штарка. (1 часа)

Занятие 9. Решение задач по разделам курса. (4 часа)

Самостоятельная работа студентов (38 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям.	10
Решение задач для самостоятельного решения	28

5. Перечень учебной литературы.

1. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984 или др. Т.1, 456 с; т.2, 456 с. (2 экз.)
2. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника. М.: Высшая Школа, 2001. 573 с., ISBN 5-06-002703-1 (5 экз.)
3. Мосс Т., Баррел Г., Эллис Б. Полупроводниковая оптоэлектроника. М.: Мир, 1976. 431 с. (2 экз.)
4. Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах. М.: Мир, 1981.: Т.1: Основные принципы / пер. с англ. А.Е. Дракина. 299 с. : ил. (2 экз.), Т.2: Материалы. Рабочие характеристики / пер. с англ. Б.Н. Свердлова, 364 с. : ил. (2 экз.)
5. Росадо Л., Физическая электроника и микроэлектроника, М.: Высшая школа, 1991, 351 с., ISBN 5060008207 (4 экз.)
6. Квон З.Д., Попов Л.К. Электроны и дырки в тонких слоях полупроводников: учеб. пособие. Ч. 1. Новосибирск : НГУ, 2010, 122с., ISBN 978-5-94356-959-3 (6 экз.)
7. Розеншер Э., Винтер Б. Оптоэлектроника. М.: Техносфера, 2004, 592 с., ISBN 2-10-005453-8 (5 экз.)
8. Шамирзаев Т.С. Твердотельная электроника: история, современное состояние и перспективы.

6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.

Самостоятельная работа студентов поддерживается следующими учебными пособиями:

1. В.Л. Альперович. Оптические процессы в полупроводниках. Программа курса, вопросы к коллоквиуму, задание, рекомендованная литература. Интернет-ресурс: http://www.isp.nsc.ru/index.php?ACTION=part&id_part=4&sub_part=79&sub_sub_part=422
2. В.Л. Альперович. Дополнительные вопросы и комментарии к программе кандидатского экзамена по физике полупроводников. Методические указания, схема ответов по наиболее сложным разделам, контрольные вопросы, задачи, рекомендованная литература. Интернет-ресурс: http://www.isp.nsc.ru/index.php?ACTION=part&id_part=4&sub_part=81&sub_sub_part=84.

3. Д.Р. Исламов. Полупроводниковая электроника. Программа курса, вопросы к коллоквиуму, задание, рекомендованная литература. Интернет-ресурс: http://www.isp.nsc.ru/index.php?ACTION=part&id_part=4&sub_part=79&sub_sub_part=422

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

7.1 Современные профессиональные базы данных

1. New Semiconductor Materials. Characteristics and Properties. Электронный архив ФТИ им. А.Ф. Иоффе: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/>
2. Refractive index database: <https://refractiveindex.info/>

7.2. Информационные справочные системы

Не используются.

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

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.

Для реализации дисциплины используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Текущий контроль

Текущий контроль успеваемости осуществляется на практических занятиях преподавателем при решении студентом задач, рекомендованных для практических занятий и домашних заданий, обсуждаются идеи и способы решения. Одновременно с этим проводятся индивидуальные консультации обучающихся.

Промежуточная аттестация

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на дифференцированном зачёте. Он проводится в конце семестра по билетам в устной форме. Оценка знаний, умений, навыков и освоения компетенций обучающимися в рамках промежуточной аттестации проводится с учетом оценки за работу в семестре (РС) и ответов на дифференцированном зачете.

Оценка за РС учитывает активность студента на занятиях, оцениваемую преподавателем, посещение занятий, количество сданных задач из задания для самостоятельного решения. За РС выставляется оценка “неудовлетворительно” в случае сдачи менее 80% задач из задания.

Для получения на дифференцированном зачете оценки “удовлетворительно” или выше необходимо:

1. Сдать не менее 75% задач из задания.

2. Во время дифференцированного зачета показать не хуже удовлетворительного уровня знаний при ответах на вопросы билета.

Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ПК-1.

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-1 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области полупроводниковой оптоэлектроники в профессиональной деятельности.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

Критерии и шкалы оценивания индикаторов достижения результатов обучения отражены в Таблице 10.2.

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Знать принципы работы основных типов оптоэлектронных полупроводниковых приборов; основные уравнения для анализа работы оптоэлектронных полупроводниковых приборов, основы технологии изготовления оптоэлектронных полупроводниковых приборов.	Опрос в начале каждой лекции, дифференцированный зачет.

ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Уметь объяснять микроскопические механизмы явлений, лежащих в основе работы оптоэлектронных полупроводниковых приборов; отвечать на контрольные вопросы по курсу; решать задачи по полупроводниковой оптоэлектронике на уровне сложности задания, формулировать требования к конструкции и технологическим процессам изготовления оптоэлектронных полупроводниковых приборов.	Опрос в начале каждой лекции, дифференцированный зачет..
--	--	--

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Полупроводниковая оптоэлектроника».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Шкала оценивания
<u>Дифференцированный зачет:</u> – самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала, – точность и корректность применения терминов и понятий, – наличие исчерпывающих ответов на дополнительные вопросы. При изложении ответа на вопрос(ы) преподавателя обучающийся мог допустить не принципиальные неточности.	<i>Отлично</i>
<u>Дифференцированный зачет:</u> – самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала, – точность и корректность применения терминов и понятий при наличии незначительных ошибок, – наличие полных ответов на дополнительные вопросы с возможным присутствием ошибок.	<i>Хорошо</i>
<u>Дифференцированный зачет:</u> – самостоятельность и осмысленность в изложении материала, наличие ошибок в логике и аргументации, а также затруднений при формулировке собственных суждений, – корректность применения терминов и понятий, с множественными ошибками, – наличие неполных и/или содержащих существенные ошибки ответов на дополнительные вопросы.	<i>Удовлетворительно</i>

<u>Дифференцированный зачет:</u> – отсутствие осмысленности, структурированности, логичности и аргументированности в изложении материала, – грубые ошибки в применении терминов и понятий, – отсутствие ответов на дополнительные вопросы.	<i>Неудовлетворительно</i>
--	-----------------------------------

10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

Перечень задач для самостоятельного решения

1. Рассчитать долю мощности излучения светодиода плоской конфигурации, выходящую во внешнюю среду с $n_{\text{среда}} = 1$. Показатель преломления материала светодиода равен $n_{\text{сд}} = 3.6$. Эффектом самопоглощения люминесценции пренебречь.
2. Сила света светодиода с длиной волны излучения 590 нм равна 1370 мкД, угол свечения (двойной угол половинной яркости) равен 12.5°. Определить мощность излучения светодиода.
3. Лазер с плоским резонатором генерирует на двух соседних модах с $\lambda_1 = 850.1$ нм и $\lambda_2 = 850.3$ нм, показатель преломления в этой спектральной области равен $n = 3.63$. Определите длину резонатора.
4. Полупроводниковый лазер имеет длину волны излучения $\lambda = 850$ нм и внешний квантовый выход 20%. Предполагая, что выходная мощность составляет 10 мВт, оцените значение инжекционного тока.
5. Какова максимально возможная спектральная чувствительность фотодиода, включенного в режиме короткого замыкания, на длине волны 600 нм.
6. p-GaN(Cs,O) фотокатод с величиной эффективного отрицательного электронного сродства 1.6 эВ освещается излучением с длиной волны 320 нм. Определить энергию электронов, которые эмитируются в вакуум без потерь энергии. Ширина запрещенной зоны GaN равна 3.42 эВ, эффективные массы электронов и дырок считать равными $m_e = 0.22 \times m_0$, $m_h = 0.6 \times m_0$.
7. На охлаждаемую ПЗС-матрицу с размером ячейки 17.5×17.5 мкм падает поток излучения с плотностью мощности 9 нВт/см² и длиной волны 600 нм. После считывания кадра с экспозицией 2 сек среднеквадратичное отклонение величин в полученной матрице составило 25 квантов АЦП. Определите квантовую эффективность ПЗС-матрицы на этой длине волны. При расчете пренебречь шумами считывания, темновым сигналом, неравномерностью чувствительности элементов. Коэффициент преобразования схемы оцифровки равен 13 электронов/квант АЦП.

Вопросы на дифференцированный зачёт

1. Какими способами повышается эффективность светодиодов?
2. Каким образом изменяется цветовая температура в белых светодиодах, используемых для освещения?
3. Почему полупроводниковые лазерные диоды очень чувствительны к воздействию статического электричества?
4. Каковы условия генерации в полупроводниковом лазере?
5. Как работает лавинный фотодиод?
6. Чем определяется квантовая эффективность фотодиода?
7. Что такое блюминг в ПЗС-матрице?
8. Какие спектральные диапазоны используются для создания тепловизионных приемников? Почему?

9. Что такое детектирующая способность (нормированная обнаружительная способность) фотодетектора?
10. Чем определяется максимальная эффективность преобразования кремниевой солнечной батареи?
11. Как работает электронно-оптический преобразователь?
12. Объясните причину насыщения в зависимости величины фототока, эмитируемого полупроводниковым фотокатодом с отрицательным электронным средством, от интенсивности возбуждающего излучения.
13. Как формируется домен сильного поля в диоде Ганна?
14. Чем определяется длина волны излучения, используемого в волоконно-оптических линиях связи?

Пример билета на дифференцированный зачёт

1. Принцип работы светодиода. Светодиоды видимого диапазона.
2. Особенности детектирования инфракрасного излучения. Детекторы ближнего, среднего и дальнего ИК диапазонов. Технологии, используемые при изготовлении фотоприёмных приборов ИК диапазона.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.