

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Высшая школа общей и прикладной физики

Программа утверждена решением президиума
Ученого совета ННГУ
протокол от «14» декабря 2021г. № 4.

Рабочая программа дисциплины

Физика полупроводников

Уровень высшего образования
Бакалавриат

Направление подготовки / специальность
03.03.02 - Физика

Направленность образовательной программы
Фундаментальная физика

Форма обучения
очная

Нижний Новгород

2022 год

1. Место дисциплины в структуре ООП

Дисциплина Б1.В.13 «Физика полупроводников» относится к части ООП направления подготовки 03.03.02 Физика, формируемой участниками образовательных отношений.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	
<i>ПК-1: Способен выполнять научную работу в избранной области экспериментальных и (или) теоретических исследований с помощью современной приборной базы, сложного физического оборудования и информационных техн</i>	<i>Демонстрация способности выполнять научную работу в избранной области экспериментальных и (или) теоретических исследований с помощью современной приборной базы, сложного физического оборудования и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта</i>	<i>Знать основные понятия, используемые в современной научной литературе для описания физических свойств полупроводников, современные подходы и уравнения, использующиеся в физике полупроводников; основные физические свойства полупроводников. Уметь использовать методы физики полупроводников. (основные уравнения и способы их решения) для описания экспериментальных результатов. Владеть методами решения основных уравнений, используемых в физике полупроводников</i>	<i>Собеседование и задачи (практические задания)</i>
<i>ПК-2: Способен применять в научно-исследовательской деятельности профессиональные знания и умения, полученные при освоении профильных дисциплин</i>	<i>Демонстрация способности применять в научно-исследовательской деятельности профессиональные знания и умения, полученные при освоении профильных дисциплин</i>	<i>Обладать профессиональными знаниями и умениями, необходимыми для научно-исследовательской деятельности. Уметь применять полученные знания по физике полупроводников при реализации научно-исследовательских, научно-инновационных и практических проектов. Владеть навыками экспериментальной работы в</i>	<i>Собеседование и задачи (практические задания)</i>

		области физики полупроводников.	
ПК-3: Способен ставить и решать научно-инновационные задачи, применять результаты научных исследований в инновационной и проектной деятельности	Демонстрация способности ставить и решать научно-инновационные задачи, применять результаты научных исследований в инновационной и проектной деятельности	Знать кристаллическую и зонную структуру широко используемых полупроводников Ge, Si, GaAs; методы нахождения концентрации свободных носителей заряда, механизмы рассеяния электронов в полупроводниках и методы их описания, методы вычисления электропроводности и коэффициентов поглощения света, устройство и принципы работы основных элементов полупроводниковой электроники (p-n -переход, контакт, металл-полупроводник, биполярный и полевой транзистор, полупроводниковый лазер), основные свойства полупроводниковых низкоразмерных структур. Уметь пользоваться методами физики полупроводников для описания электрических и оптических свойств полупроводников и приборов на их основе. Владеть навыками решения задач, основанных на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях.	Собеседование и задачи (практические задания)

3. Структура и содержание дисциплины

3.1. Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость	5
Часов по учебному плану	180
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	24

- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	24/24
- КСР	2
самостоятельная работа	70
Промежуточная аттестация	36 экзамен

3.2. Содержание дисциплины

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

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе				
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них				Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
	очная	очная	очная	очная	очная	очная
Тема 1. Электронный спектр вблизи экстремумов зон. Приближение эффективной массы	10	2	2	2	6	4
Тема 2. Зонная структура Ge, Si, GaAs. Спектры электронов и дырок.	10	2	2	2	6	4
Тема 3. Движение электронов твердого тела в слабых внешних полях.	10	2	2	2	6	4
Тема 4. Мелкие примеси в полупроводниках.	10	2	2	2	6	4
Тема 5. Статистика электронов и дырок в полупроводниках	10	2	2	2	6	4
Тема 6. Рассеяние носителей тока в полупроводниках	10	2	2	2	6	4
Тема 7. Линейные процессы переноса в полупроводниках	10	2	2	2	6	4
Тема 8. Неравновесные носители в полупроводниках	12	2	2	2	6	6
Тема 9. Оптические свойства полупроводников	12	2	2	2	6	6
Тема 10. Контактные явления	12	2	2	2	6	6

Тема 11. Барьер Шоттки и омический контакт	9	1	1	1	3	6
Тема 12. p-n переход	9	1	1	1	3	6
Тема 13. Биполярный и полевой транзисторы	9	1	1	1	3	6
Тема 14. Полупроводники в сильных электрических полях	9	1	1	1	3	6
Аттестация	36					
КСР	2				2	
Итого	180	24	24	24	74	70

Практические занятия (семинарские занятия /лабораторные работы) организуются, в том числе в форме практической подготовки, которая предусматривает участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

Практическая подготовка предусматривает:

Разбор решения задач различной степени сложности, проведение обсуждения рассматриваемых проблем в свете последних научных достижений в соответствующей области знаний. Студенты работают как индивидуально, так и коллективно.

На проведение практических занятий (семинарских занятий /лабораторных работ) в форме практической подготовки отводится 6 ч.

Практическая подготовка направлена на формирование и развитие:

- практических навыков в соответствии с профилем ОП:

Применение знаний и умений при решении научно-исследовательских задач профессиональной деятельности

- компетенций:

ПК-1: Способен выполнять научную работу в избранной области экспериментальных и (или) теоретических исследований с помощью современной приборной базы, сложного физического оборудования и информационных технологий;
ПК-2: Способен применять в научно-исследовательской деятельности профессиональные знания и умения, полученные при освоении профильных дисциплин;
ПК-3: Способен ставить и решать научно-инновационные задачи, применять результаты научных исследований в инновационной и проектной деятельности

Текущий контроль успеваемости реализуется в рамках: занятий семинарского типа, занятий лабораторного типа, групповых консультаций, индивидуальных консультаций.

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Контрольные вопросы и задания для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведены в п. 5.2.

5. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине (модулю), включающий:

5.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	Шкала оценивания сформированности компетенций						
	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено		зачтено				
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибки.	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько незначительных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений . Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки.	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания но не в полном объеме.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными незначительными недочетами, выполнены все задания в полном объеме.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие владения материалом . Невозможность	При решении стандартных задач не продемонстрированы	Имеется минимальный набор навыков для	Продemonстрированы базовые навыки при решении	Продemonстрированы базовые навыки при решении	Продemonстрированы навыки при решении	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартн

	оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	базовые навыки. Имели место грубые ошибки.	решения стандартных задач с некоторыми недочетами	стандартных задач с некоторыми недочетами	стандартных задач без ошибок и недочетов.	нестандартных задач без ошибок и недочетов.	ых задач
--	--	---	---	---	---	---	----------

Шкала оценки при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
Зачтено	Превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне, выше предусмотренного программой
	Отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично»
	Очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо»
	Хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «хорошо»
	Удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	Неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо»
	Плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.2. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения

(согласно оценочным средствам табл.2)

5.2.1 Контрольные вопросы

Вопрос	Код формируемой компетенции
1) Кристаллическая и зонная структура Ge, Si, GaAs.	ПК-1, ПК-2, ПК-3
2) Определение концентрации электронов и дырок в полупроводниках при заданном химическом потенциале. Нахождение химического потенциала при заданном уровне легирования.	ПК-1, ПК-2, ПК-3

3) Мелкие акцепторы и доноры в полупроводниках.	ПК-1, ПК-2, ПК-3
4) Основные механизмы рассеяния носителей тока в полупроводниках.	ПК-1, ПК-2, ПК-3
5) Линейные процессы переноса в полупроводниках. Диффузионно-дрейфовое приближение. Соотношение Эйнштейна.	ПК-1, ПК-2, ПК-3
6) Неравновесные носители в полупроводниках	ПК-1, ПК-2, ПК-3
7) Механизмы поглощения света в полупроводниках	ПК-1, ПК-2, ПК-3
8) Контактная разность потенциалов. Работа выхода.	ПК-1, ПК-2, ПК-3
9) Барьер Шоттки	ПК-1, ПК-2, ПК-3
10) Омический контакт. Токи, ограниченные объемным зарядом.	ПК-1, ПК-2, ПК-3
11) p-n переход	ПК-1, ПК-2, ПК-3
12) туннельный диод. Вероятность межзонного туннелирования	ПК-1, ПК-2, ПК-3
13) конструкция и принципы работы биполярного и полевого транзистора	ПК-1, ПК-2, ПК-3
14) Эффект Ганна	ПК-1, ПК-2, ПК-3
15) Примесный пробой. Лавинный пробой p-n перехода	ПК-1, ПК-2, ПК-3

5.2.2 Теоретические вопросы для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:

Типовые задания для оценки сформированности компетенции ПК-1, ПК-2, ПК-3:

Задача 1.1. Показать, что в случае, когда через экстремум зоны проходит ось вращения выше второго порядка, поверхность постоянной энергии является эллипсоидом вращения.

Задача 1.2. Используя условие слабой туннельной прозрачности барьеров (приближение сильной связи) найти спектр электронов в сверхрешетке.

Задача 1.3. Найти выражение для плотности состояний в валентной зоне германия вблизи потолка валентной зоны.

Задача 2.1. Найти зависимость плотности электрического тока от величины внешнего электрического поля в сверхрешетке с законом дисперсии $E(k) = -A \cos(k/a)$. Для интеграла столкновений использовать тау-приближение.

Задача 2.2. Используя статистику Больцмана найти точное выражение для удельной емкости контакта Шоттки.

Задача 3.1. Найти положение уровня Ферми и концентрацию электронов и дырок в собственном полупроводнике в германии. Полагать что ширина запрещенной зоны равна $E_g = (0.785 \text{ эВ} - a \cdot T)$.

Задача 3.2. Определить величину сдвига Бурштейна-Мосса в полупроводнике с $m_n = 0.07 m_0$, $m_h = 0.5 m_0$, $n = 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Температуру принять равной нулю.

5.2.3 Перечень лабораторных работ, выполняемых при освоении дисциплины¹:

1. Измерение параметров полупроводников методом Холла.
2. Электрические свойства p-n переходов.
3. Горячие носители заряда в полупроводниках.
4. Вольт-амперные характеристики диодов Шоттки.

¹ Лабораторные работы выполняются студентами в соответствии с графиком выполнения работ, разрабатываемым преподавателем.

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

а) основная литература:

- 1) Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников : Учебное пособие. М.: Наука, 1977. -672 с. -70 экз.
- 2) Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников .2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1978. - 615 с. -21 экз.
- 3) Г.Е.Пикус Основы теории полупроводниковых приборов. М. Наука 1965. -448 с. -32 экз.
- 4) В.Я.Алешкин курс лекций «Современная физика полупроводников» (Деканат ВШОПФ) -30 экз.

б) дополнительная литература:

- 1) Пожела Ю.К. Плазма и токовые неустойчивости в полупроводниках. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1977. -367 с. -6 экз.
- 2) Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела т.1. М.: Мир 1979. -399 с. -7 экз.
- 3) Зи С. Физика полупроводниковых приборов т.1 - М.: Мир, 1984. -455 с. -16 экз.
- 4) Смит Р.А. Полупроводники М.Мир 1982. -560 с. -21 экз.
- 5) Э.Конуэлл. Кинетические свойства полупроводников в сильных электрических полях. М.: Мир, 1970. -384 с. -6 экз.
- 6) А.Милнс, Д.Фойгхт. Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник. М.: Мир, 1975. -432 с. -6 экз.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины)

- 1) Федеральный портал “Российское образование”

[http://www.edu.ru/modules.php?op=modload&name=Web_Links&file=index&l_op=viewlink&cid=2578&fids\[\]=2675](http://www.edu.ru/modules.php?op=modload&name=Web_Links&file=index&l_op=viewlink&cid=2578&fids[]=2675)

- 2)Кафедра “Физика наноструктур и наноэлектроника” ННГУ им Н.И.Лобачевского

В.Я.Алешкин курс лекций «Современная физика полупроводников»

http://www.pnn.unn.ru/UserFiles/lectures/Aleshkin_lectures.pdf

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения: 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 студенты имеют возможность работать в компьютерных классах с соответствующим лицензионным программным обеспечением и выходом в Интернет.

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

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО/ОС ННГУ по направлению 03.03.02 - Физика.

Автор(ы): В.Я.Алешкин, В.И.Гавриленко

Заведующий кафедрой:

Программа одобрена на заседании методической комиссии
ВШОПФ от 30.06.2021, протокол № 3.