

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Физический факультет

---

УТВЕРЖДЕНО

решением Ученого совета ННГУ

протокол № 6 от 31.05.2023 г.

**Рабочая программа дисциплины**

Практикум по физике полупроводников

---

Уровень высшего образования

Бакалавриат

---

Направление подготовки / специальность

11.03.04 - Электроника и микроэлектроника

---

Направленность образовательной программы

Радиофотоника и оптоэлектроника

---

Форма обучения

очная

---

г. Нижний Новгород

2021 год начала подготовки

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.О.16 Практикум по физике полупроводников относится к обязательной части образовательной программы.

## 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	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ОПК-1: Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности	ОПК-1.1: Знает фундаментальные законы природы и основные физические и математические законы ОПК-1.2: Умеет применять физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера ОПК-1.3: Владеет навыками использования знаний физики и математики при решении практических задач	ОПК-1.1: Знать: основы зонной теории твердых тел; классификацию и особенности реальной зонной структуры элементарных полупроводников и полупроводниковых соединений, параметры их зонной структуры, определяющие возможность и эффективность использования для конкретных практических приложений; типы и роль примесей в полупроводниках, методы описания мелких и глубоких примесных состояний, методы расчета положения уровня Ферми в полупроводнике, особенности температурной зависимости концентрации носителей заряда, основные эффекты, проявляющиеся при высоком уровне легирования, природу и свойства поверхностных состояний; статистику равновесных и неравновесных электронов и дырок в полупроводниках; теорию явлений переноса заряда; оптические, электрические, гальваномагнитные, термоэлектрические свойства полупроводников. ОПК-1.2: Уметь: объяснять сущность физических явлений и процессов в полупроводниках и простейших полупроводниковых структурах; производить анализ и делать	Допуск к лабораторной работе	Зачёт: Отчет по лабораторным работам

		<p>количественные оценки параметров физических процессов;</p> <p>экспериментально определять основные параметры полупроводника – ширину запрещенной зоны, концентрацию, подвижность, время жизни, коэффициент диффузии носителей заряда;</p> <p>изучать оригинальные научные работы и обзоры в области физики полупроводников.</p> <p>ОПК-1.3: Владеть:</p> <p>навыками применения полученных знаний для решения конкретных задач, возникающих как в научно-исследовательской работе, так и в производственно-технологическом процессе.</p>		
<p>ПК-5: Готовность анализировать и систематизировать результаты исследований, представлять материалы в виде научных отчетов, публикаций, презентаций</p>	<p>ПК-5.1: Знание методов анализа и систематизации результатов исследований, способов представления материалов в виде научных отчетов, публикаций, презентаций</p> <p>ПК-5.2: Умение представлять материалы в виде научных отчетов, публикаций, презентаций</p> <p>ПК-5.3: Опыт анализа и систематизации результатов исследований, представления материалов в виде научных отчетов, публикаций, презентаций</p>	<p>ПК-5.1: Знать методы исследований параметров полупроводников, методы анализа и систематизации результатов исследований, способы представления материалов в виде отчетов.</p> <p>ПК-5.2: Уметь обрабатывать результаты исследований параметров полупроводниковых материалов, объяснять сущность наблюдаемых физических явлений и процессов в полупроводниках и простейших полупроводниковых структурах;</p> <p>представлять материалы исследований в виде отчетов.</p> <p>ПК-5.3: Владеть опытом анализа и систематизации результатов исследований в области физики полупроводников, представления полученных результатов в виде отчетов.</p>	<p>Допуск к лабораторной работе</p>	<p>Зачёт: Отчет по лабораторным работам</p>

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	<b>очная</b>
<b>Общая трудоемкость, з.е.</b>	<b>2</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>72</b>
в том числе	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
<b>- занятия лекционного типа</b>	<b>0</b>

- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	<b>64</b>
- КСР	<b>1</b>
самостоятельная работа	<b>7</b>
Промежуточная аттестация	<b>0</b> <b>зачёт</b>

### 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 (практические занятия/лабораторные работы), часы	Всего	
	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о
1. Эффект Холла в полупроводниках (Ge, Si, GaAs).	16		14	14	2
2. Определение параметров полупроводника из температурной зависимости удельного сопротивления и эффекта Холла.	13		12	12	1
3. Исследование собственного оптического поглощения в полупроводниках (Si, GaAs)	16		14	14	2
4. Исследование спектральной зависимости фоточувствительности полупроводниковых фотоприемников (Si-фотодиод, CdS-фоторезистор).	13		12	12	1
5. Исследование вольтамперных и вольтфарадных характеристик р-п-перехода.	13		12	12	1
Аттестация	0				
КСР	1			1	
Итого	72	0	64	65	7

### 4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Павлов Д.А., Планкина С.М., Кудрин А.В. «Эффект Холла (практикум)» Печатн.

Н.Новгород, изд-во ННГУ. 2013. 23 стр./ 19 стр.

Павлов Д.А., Планкина С.М., Кудрин А.В. «Эффект Холла (практикум)» Комп. издание. Фонд компьютерных изданий ННГУ <http://www.unn.ru/books/resources.html> Регистрационный номер 576.13.05, 2013 23 стр./ 19 стр.

Планкина С.М., Кудрин А.В. «Определение параметров полупроводника из температурной зависимости удельного сопротивления и эффекта Холла». Н.Новгород: Печ. Издание Н. Новгород, изд-во ННГУ, 2016 16 с./12

Планкина С.М., Кудрин А.В. «Определение параметров полупроводника из температурной зависимости удельного сопротивления и эффекта Холла». Н.Новгород: Комп. Издание Фонд компьютерных изданий ННГУ <http://www.unn.ru/rus/books/table.html> Регистрационный номер 780.14.05, 2014 16 с./12

Павлов Д.А., Планкина С.М. «Вольтамперные и вольтфарадные характеристики р-п перехода».

Практикум Н.Новгород: Печ. Изд. Н.Новгород, изд-во ННГУ, 2019. 14 с.

Шилова М.В. «Исследование собственного поглощения в полупроводниках» Физика твердого тела: Лабораторный практикум в 2 томах под редакцией проф. А.Ф. Хохлова. Том 2. Физические основы твердых тел. Н.Новгород, изд-во ННГУ, 2000. с. 246.

Шилова М.В., Попов Ю.С. «Исследование спектральной зависимости фоточувствительности полупроводников» Физика твердого тела: Лабораторный практикум в 2 томах под редакцией проф. А.Ф. Хохлова. Том 2. Физические основы твердых тел. Н.Новгород, изд-во ННГУ, 2000. с. 279.

## **5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)**

### **5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:**

#### **5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Допуск к лабораторной работе) для оценки сформированности компетенции ОПК-1**

1. Уравнение Шредингера для электронов в кристалле. Адиабатическое, валентное и одноэлектронное приближение. Циклические граничные условия Борна-Кармана.
2. Свойства волновой функции электрона в кристалле. Теорема Блоха.
3. Свойства волнового вектора электрона в кристалле. Квазиимпульс.
4. Энергетический спектр электрона в кристалле. Зонная структура. Зоны Бриллюэна.
5. Влияние дефектов на энергетический спектр электрона в кристалле. Поверхностные состояния (уровни Тамма).
6. Эффективная масса электрона в кристалле.
7. Температурная зависимость электронной проводимости металлах.
8. Температурная зависимость проводимости в собственном полупроводнике.
9. Общая характеристика гальваномагнитных явлений. Механизм возникновения эффекта Холла. Эффект Холла в полупроводнике с одним сортом носителей. Как определить знак основных носителей из измерений эффекта Холла?
10. Какими физическими величинами определяется ЭДС Холла? Объясните зависимость ЭДС Холла от величины индукции магнитного поля.
11. Каким образом механизмы рассеяния влияют на величину постоянной Холла? В каком случае холловская и дрейфовая подвижности равны?
12. Эффект Холла в полупроводнике с двумя сортами носителей. Выведите формулу для постоянной Холла в случае биполярной проводимости.
13. Нарисуйте и объясните зависимость постоянной Холла от температуры. При каких условиях наблюдается разрыв на зависимости  $\lg RH(T)$ ?

#### **5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Допуск к лабораторной работе) для оценки сформированности компетенции ПК-5**

1. Какую информацию о полупроводнике можно получить из совместных измерений электропроводности и эффекта Холла?
2. Какую информацию можно получить при исследовании эффекта Холла в классически сильных магнитных полях?
3. Методика измерений эффекта Холла на образце прямоугольной формы.
4. ЭДС побочных эффектов, их учет при измерении холловского напряжения.
5. Методика измерений эффекта Холла на плоском образце произвольной формы (метод Ван-дер-Пау).
6. В каких координатах следует строить температурную зависимость концентрации свободных носителей для определения ширины запрещенной зоны полупроводника?

7. Каким образом можно определить тип межзонных переходов в полупроводнике (прямозонный или непрямозонный полупроводник)?
8. Какие требования предъявляются к качеству обработки поверхности полупроводника при исследовании оптическими методами.

### Критерии оценивания (оценочное средство - Допуск к лабораторной работе)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Отвечает на вопросы, приведенные в методических пособиях, верно или с небольшими ошибками
не зачтено	Отсутствие знаний теоретического материала, либо уровень знаний ниже минимальных требований, грубые ошибки в ответах на вопросы. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа.

### 5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

#### Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения 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 ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	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	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами и, выполнен	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов

				с недочетами		ы все задания в полном объеме	
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

### Шкала оценивания 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».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «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».
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

## 5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации

### 5.3.1 Типовые задания, выносимые на промежуточную аттестацию:

## Оценочное средство - Отчет по лабораторным работам

### Зачёт

#### Критерии оценивания (Отчет по лабораторным работам - Зачёт)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Удовлетворительный уровень знаний, умений и навыков, своевременное написание и сдача отчетов по лабораторным работам.
не зачтено	Неудовлетворительный уровень знаний, умений и навыков, выполнены не все лабораторные работы, нет полного комплекта отчетов.

#### Типовые задания (Отчет по лабораторным работам - Зачёт) для оценки

**сформированности компетенции ПК-5** (Готовность анализировать и систематизировать результаты исследований, представлять материалы в виде научных отчетов, публикаций, презентаций)

1. Измерить сопротивление и ЭДС Холла на образце произвольной формы методом Ван-дер-Пау при нескольких значениях тока.
2. Проверить пропорциональность эдс Холла току через образец. Построить график.
3. Рассчитать параметры  $\rho$ ,  $R_H$ ,  $\mu$ , и  $n$  при нескольких значениях тока  $I$ . Сделать вывод о типе носителей заряда.
4. Сделать вывод о характере магнитного поля (сильное или слабое).

#### Типовые задания (Отчет по лабораторным работам - Зачёт) для оценки

**сформированности компетенции ОПК-1** (Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности)

1. Запишите уравнение Шредингера в самом общем виде (временное и стационарное).
2. Запишите выражение для энергетического спектра состояний электрона в атоме водорода.
3. Запишите выражение для волновой функции Блоха.
4. Запишите уравнение Шредингера для электрона в кристалле в одноэлектронном приближении.

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

Основная литература:

1. Шалимова Клавдия Васильевна. Физика полупроводников: учебник. - Изд. 4-е, стер. - СПб. ; М. ; Краснодар : Лань, 2010. - 400 с.: ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-0922-8: 703.56., 39 экз.
2. Бонч-Бруевич Виктор Леопольдович. Физика полупроводников: [учеб. пособие для физ. специальностей вузов]. - М.: Наука, 1977. - 672 с.: ил. - 72.00., 67 экз.
3. Киреев Петр Семенович. Физика полупроводников: [учеб. пособие для втузов]. - Изд. 2-е, доп. - М.: Высшая школа, 1975. - 584 с. - 1.37., 22 экз.
4. Павлов Павел Васильевич. Физика твердого тела: [учеб. пособие для вузов по специальности "Физика"]. - М.: Высшая школа, 1985. - 384 с.: ил. - 1.10., 34 экз.



## Дополнительная литература:

1. Ю Питер. Основы физики полупроводников = Fundamentals of Semiconductors / пер. с англ. И. И. Решиной; под ред. Б. П. Захарчени. - М.: Физматлит, 2002. - 560 с. - ISBN 5-9221-0268-0: 56.00., 3 экз.
2. Зеегер К. Физика полупроводников: пер. с англ. Р. Бразиса [и др.] / под ред. Ю. К. Пожелы. - М.: Мир, 1977. - 615 с.: ил. - 2.90., 14 экз.

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

<http://www.lib.unn.ru/> - Фундаментальная библиотека ННГУ  
<https://e.lanbook.com/> - Электронно-библиотечная система изд. «Лань»  
<http://spen.phys.unn.ru/library.asp> - Электронная библиотека ФзФ ННГУ  
<http://www.studmed.ru> - Учебно-методическая литература для студентов  
<http://www.ph4s.ru> - Образовательный проект А.Н. Варгина

## 7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, компьютерами, специализированным оборудованием: При выполнении лабораторных работ используется лаборатория физики полупроводников кафедры физики полупроводников, электроники и наноэлектроники оснащенная источниками питания, генераторами, вольтметрами, осциллографами, системой холловских измерений Nanometrics HL5500PC с криостатом и буферным усилителем, комплектом оптических монохроматоров и спектрофотометров.

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 ОС ННГУ по направлению 11.03.04 - Электроника и наноэлектроника.

Автор(ы): Планкина Светлана Михайловна, кандидат физико-математических наук, доцент.

Заведующий кафедрой: Павлов Дмитрий Алексеевич, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 20.05.2023, протокол № б/н.