

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Физический факультет

---

Кафедра физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники

УТВЕРЖДЕНО  
решением ученого совета ННГУ  
протокол № 13 от «30» ноября 2022 г.

**Рабочая программа дисциплины  
«Статистика электронов в полупроводниках  
с многозарядными глубокими центрами»**

Уровень высшего образования  
**Магистратура**

Направление подготовки  
**11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника»**

Направленность (профиль)  
**Твердотельная электроника и нанoeлектроника**

Форма обучения  
**Очная**

Нижний Новгород, 2023

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.ДВ.02.02 «Статистика электронов в полупроводниках с многозарядными глубокими центрами» относится к формируемой участниками образовательных отношений части ООП направления подготовки 11.04.04 Электроника и наноэлектроника, по профилю «Твердотельная электроника и наноэлектроника».

## 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	
ПК-4. Готовность формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и наноэлектроники, а также смежных областей науки и техники, и способность обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач	ПК-4.1. Знает тенденции и перспективы развития электроники и наноэлектроники, а также смежных областей науки и техники ПК-4.2. Способен рассчитывать предельно допустимые и предельные режимы работы изделий микро- и наноэлектроники ПК-4.3 Имеет навыки обоснованного выбора теоретических и экспериментальных методов исследования изделий микро- и наноэлектроники	Знать эффективные алгоритмы решения сформулированных задач с использованием современных языков программирования в статистике электронов в полупроводниках с многозарядными глубокими центрами. Уметь применять общий подход равновесной статистики на основе большого канонического распределения, экспрессного качественного анализа поведения уровня Ферми в кристалле с многозарядными центрами, особенностей проявления амфотерных центров, центров с отрицательной корреляционной энергией. Владеть современными языками программирования и их программной реализацией в статистике электронов в полупроводниках с многозарядными глубокими центрами.	Вопросы по темам/разделам дисциплины.  Комплект задач и заданий к семинарским занятиям.

### 3. Структура и содержание дисциплины "Статистика электронов в полупроводниках с многозарядными глубокими центрами"

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная форма обучения
Общая трудоемкость	3 ЗЕТ
Часов по учебному плану	108
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	16
- занятия семинарского типа	16
самостоятельная работа	38 (работа в семестре) 36 (на подготовку к экзамену)
Промежуточная аттестация	2 семестр – экзамен

#### 3.2. Содержание дисциплины

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля),  форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	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	Консультации	Всего	
1. Введение. Соотношение между энергетическими диаграммами для глубоких центров.	4	1	1	-	-	2	2
2. Микроскопические подходы к количественному описанию глубоких центров.	8	2	2	-	-	4	4
3. Подходы в описании примесных центров переходных металлов	8	2	2	-	-	4	4
4. Статистика электронов в полупроводнике с одноуровневыми донорами и акцепторами.	8	2	2	-	-	4	4
5. Графический метод решения уравнения электронейтральности	12	2	2	-	-	4	8
6. Большое каноническое распределение. Вывод общих соотношений для функции распределения.	8	2	2	-	-	4	4
7. Характерные зависимости	8	2	2	-	-	4	4

концентрации электронов или дырок в полупроводнике для различных видов центров							
8. Холловская спектроскопия уровней глубоких центров	6	1	1	-	-	2	4
9. ЭПР спектроскопия глубоких центров	4	1	1	-	-	2	2
10. Природа гигантских эффективных кратностей вырождения	4	1	1	-	-	2	2
<b>Промежуточная аттестация:</b> Экзамен 2 часа							
<b>Итого</b>	108	16	16	0		32	38

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: решение прикладной задачи кейса - по профилю профессиональной деятельности и направленности образовательной программы.

На проведение практических занятий (семинарских занятий /лабораторных работ) в форме практической подготовки отводится 16 часов.

Практическая подготовка направлена на формирование и развитие:

- практических навыков в соответствии с профилем ОП: выбор методик и средств решения задачи, использование физических эффектов при разработке новых методов исследований, компьютерное моделирование исследуемых физических процессов
- компетенций - ПК-4. Готовность формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и наноэлектроники, а также смежных областей науки и техники, и способность обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач.

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

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

Самостоятельная работа студентов предусматривает выполнение домашних заданий, решение задач, изучение рекомендованной литературы и подготовка к экзамену.

Оценочные средства для контроля текущей успеваемости включают в себя устный опрос на занятиях в процессе решения выше приведенных задач, активность в обсуждении качественных вопросов и задач на практических занятиях и лекциях.

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

Для обеспечения самостоятельной работы обучающихся используется электронный курс конспектов лекций «Статистика электронов в полупроводниках с многозарядными глубокими центрами», созданный в системе электронного обучения ННГУ - <https://e-learning.unn.ru/>.

## 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 ошибок.	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 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 некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

### Шкала оценки при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
	<b>превосходно</b>	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
<b>зачтено</b>	<b>отлично</b>	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»
	<b>очень хорошо</b>	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»
	<b>хорошо</b>	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»
	<b>удовлетворительно</b>	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»
<b>не зачтено</b>	<b>неудовлетворительно</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо»
	<b>плохо</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

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

### 5.2.1 Контрольные вопросы

Вопросы	Код компетенции формируемой
1. Каков критерий глубоких уровней электронов на дефектах? Приведите примеры многозарядных глубоких центров.	ПК-4
2. Что такое амфотерные центры с отрицательной корреляционной энергией?	
3. Какова природа возбуждённых состояний центров с локальными электронными уровнями?	
4. К каким глубоким центрам не применимо приближение эффективной массы?	
5. Сформируйте основные положения модели Людвига-Вудбери.	
6. Изобразите температурную зависимость концентрации электронов в компенсированном мелкими акцепторами полупроводнике с глубокими донорами.	
7. Объясните суть графического метода решения уравнения электронейтральности.	
8. Определите большую статистическую сумму для кристалла с	

одиноким многозарядным глубоким центром.	
9. Запишите распределение электронов на многозарядном глубоком центре.	
10. К каким особенностям в температурной зависимости концентрации в компенсированном глубоких примесями полупроводнике приводит наличие возбуждённых состояний или температурное смещение уровней глубокого центра?	
11. К каким характерным особенностям в температурной зависимости концентрации электронов или дырок приводит наличие центров с отрицательной корреляционной энергией?	
12. В чём суть холловской спектроскопии глубоких центров?	
13. Как в ЭПР- спектроскопии проявляются возбуждённые состояния парамагнитных центров?	
14. Какова природа гигантского статистического веса возбуждённых состояний некоторых примесных центров?	

### 5.2.2. Типовые тестовые задания для оценки сформированности компетенции ПК-4

1. Определение многозарядных глубоких центров. Распространённость, вредные и полезные свойства. Примесные центры переходных элементов.
2. Соотношение между одночастичной и многочастичной энергетическими диаграммами для глубоких центров. Нормальные многозарядные центры. Амфотерные центры.
3. Соотношение между одночастичной и многочастичной энергетическими диаграммами для глубоких центров. Центры с отрицательной корреляционной энергией. Возбуждённые состояния.
4. Микроскопические подходы к количественному описанию глубоких центров. Приближение эффективной массы.
5. Приближение эффективной массы. Водородоподобная и гелиеподобная модели. Другие подходы.
6. Подходы в описании примесных центров переходных металлов. Модель Людвиг - Вудбери. Теория кристаллического поля.
7. Статистика электронов в полупроводнике с одноуровневыми донорами и акцепторами. Различные варианты компенсации
8. Графический метод решения уравнения электронейтральности. Применение к различным случаям компенсированного полупроводника.
9. Большое каноническое распределение. Применение к многозарядным центрам в полупроводниках.
10. Вывод общих соотношений для функции распределения электронов или дырок на многозарядных центрах.
11. Роль возбуждённых состояний центров.
12. Роль температурного смещения уровней центров.
13. Характерные зависимости концентрации электронов или дырок в полупроводнике для различных видов центров. Амфотерные центры. Центры с отрицательной корреляционной энергией.
14. Характерные зависимости концентрации электронов или дырок в полупроводнике для различных видов центров. Центры с отрицательной корреляционной энергией.
15. Особенности статистики амфотерных центров с отрицательной корреляционной энергией.

16. Статистика с учётом изменения фононного спектра кристалла
17. Холловская спектроскопия уровней глубоких центров
18. ЭПР спектроскопия глубоких центров

## **6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **а) основная литература:**

1. Киреев П.С. / Физика полупроводников // - М.: ВШ, 1975. -**26**  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=397920&DB=1>
2. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. / Физика полупроводников // - М.: Наука, 1977. -**14**  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=397905&DB=1>

### **б) дополнительная литература:**

1. Блекмор Дж. / Статистика электронов в полупроводниках // - М.: Мир, 1964. -**2**  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=74021&DB=1>
2. Кубо Р. / Статистическая механика // - М.: Мир, 1967. -**1**  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=240644&DB=1>
3. Стоунхэм А.М. / Теория дефектов в твёрдых телах // - М.: Мир, 1978, т. 1. -**5**  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=82957&DB=1>
4. Харрисон У. / Теория твёрдого тела // - М.: Мир, 1972. -**7**  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=82960&DB=1>
5. Омеляновский Э.М., Фистуль В.И. / Примеси переходных металлов в полупроводниках // - М.: Металлургия, 1983. -**2**  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=76103&DB=1>
6. Милнс А. / Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках // - М.: Мир, 1977. -**3**  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=310604&DB=1>
7. Шалимова К.В. Физика полупроводников. М.: Энергия, 1976. -**14**
8. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. М.: Наука, 1978.
9. Демидов Е.С. ФТТ, 1985, Т. 27, В. 6, С. 1896-1898. <http://journals.ioffe.ru/articles/39341>
10. Демидов Е.С. ФТТ, 1988, Т. 30, В. 6, С. 1836-1838.  
<http://journals.ioffe.ru/issues/1121>
11. Демидов Е.С. Письма в ЖЭТФ, 2001, Т. 71, В. 9, С. 513-517.  
<http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/38745>

Демидов Е.С. ФТТ, 1992, Т. 34, В. 1, С. 37-48. <http://journals.ioffe.ru/articles/22156>

### **в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:**

1. Интернет-ресурс справочной и математической литературы со свободным доступом  
[www.eqworld.ipmnet.ru](http://www.eqworld.ipmnet.ru)

## **7. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения: специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории.

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 установленного ННГУ образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 11.04.04 – «Электроника и наноэлектроника».



Автор:

проф. кафедры физики полупроводников, электроники и наноэлектроники  
д.ф.-м.н., Демидов Е.С.

Рецензент:

заведующий кафедрой теоретической физики, д.ф.-м.н. В.А. Бурдов

Заведующий кафедрой физики полупроводников, электроники и наноэлектроники  
д.ф.-м.н. профессор Д. А. Павлов

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии физического факультета  
ННГУ, протокол б/н от «17» ноября 2022 г.

Председатель Учебно-методической комиссии физического факультета ННГУ  
к.ф.-м.н. Перов А.А.