

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 президиума Ученого совета ННГУ

протокол № 1 от 16.01.2024 г.

Рабочая программа дисциплины

Статистика электронов в полупроводниках с глубокими многозарядными
центрами

Уровень высшего образования
Магистратура

Направление подготовки / специальность
11.04.04 - Электроника и нанoeлектроника

Направленность образовательной программы
Твердотельная электроника и нанoeлектроника

Форма обучения
очная

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.ДВ.02.02 Статистика электронов в полупроводниках с глубокими многозарядными центрами относится к части, формируемой участниками образовательных отношений 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
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	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	Сообщение на семинарских занятиях	Экзамен: Контрольные вопросы

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	3
Часов по учебному плану	108
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	16

- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	16
- КСР	2
самостоятельная работа	38
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 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. 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 концентрации электронов или дырок в полупроводнике для различных видов центров	8	2	2	4	4
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
Аттестация	36				
КСР	2				2
Итого	108	16	16	34	38

Содержание разделов и тем дисциплины

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

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины.

Учебно-методическое обеспечение дисциплины «Нанопизика и наноэлектроника» обусловлено наличием необходимого количества учебников в библиотеке и на сайте ННГУ в электронном виде.

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 - Сообщение на семинарских занятиях) для оценки сформированности компетенции ПК-4:

Вопросы	Код формиру й компете и
1. Каков критерий глубоких уровней электронов на дефектах? Приведите примеры многозарядных глубоких центров.	ПК-
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 Людвиг-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 одиночным многозарядным глубоким центром.	
9. Запишите распределение электронов на многозарядном глубоком центре.	
10. К каким особенностям в температурной зависимости концентрации в компенсированном глубокими 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?	

Критерии оценивания (оценочное средство - Сообщение на семинарских занятиях)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна

Оценка	Критерии оценивания
	компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо». Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо».

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	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 несущественными 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 базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели	Имеется минимальный набор навыков для решения	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартны	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартны	Продemonстрированы навыки при решении нестандарт	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартны

	вследствие отказа обучающегося от ответа	место грубые ошибки	стандартны х задач с некоторым и недочетами	х задач с некоторым и недочетами	х задач без ошибок и недочетов	ных задач без ошибок и недочетов	х 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 с указанием критериев их оценивания:

5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) 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

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
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»
неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».

Оценка	Критерии оценивания
плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

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

Основная литература:

1. Киреев Петр Семенович. Физика полупроводников : [учеб. пособие для втузов]. - Изд. 2-е, доп. - М. : Высшая школа, 1975. - 584 с. - 1.37., 22 экз.
2. Бонч-Бруевич Виктор Леопольдович. Физика полупроводников : учеб. пособие для физ. специальностей вузов. - М. : Наука, 1990. - 685 с. : ил. - ISBN 5-02-014032-5 : 2.00., 7 экз.

Дополнительная литература:

1. Блекмор Дж. Статистика электронов в полупроводниках / пер. с англ. под ред. Л. Л. Коренблита. - М. : Мир, 1964. - 198 с. : с черт. - 1.73., 5 экз.
2. Кубо Р. Статистическая механика : современный курс с задачами и решениями : пер. с англ. / сост. при участии Х. Ичимура [и др.] ; под ред. Д. Н. Зубарева. - М. : Мир, 1967. - 452 с. : ил. - 1.90., 11 экз.
3. Омеляновский Эразм Михайлович. Примеси переходных металлов в полупроводниках. - М. : Металлургия, 1983. - 192 с. : ил. - 2.30., 2 экз.
4. Милнс А. Г. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках / пер. с англ. Г. С. Пекаря ; под ред. М. К. Шейнкмана. - М. : Мир, 1977. - 562 с. : ил. - 4.06., 2 экз.
5. 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.
6. Ансельм Андрей Иванович. Введение в теорию полупроводников = Introduction to the Semi-conducting Theory : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по физ. и техн. направлениям и специальностям. - Изд. 3-е, стер. - СПб. : Лань, 2008. - 624 с. : ил. - (Классическая учебная литература по физике / ред. совет: Ж. И. Алферов (пред.) [и др.]) (Учебники для вузов. Специальная литература) (Лучшие классические учебники). - ISBN 978-5-8114-0762-0 : 419.50., 25 экз.

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

Интернет-ресурс справочной и математической литературы со свободным доступом
www.eqworld.ipmnet.ru

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: 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.

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 подготовки/специальности 11.04.04 - Электроника и наноэлектроника.

Автор(ы): Демидов Евгений Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор.

Рецензент(ы): Бурдов Владимир Анатольевич, доктор физико-математических наук.

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

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 09.01.2024, протокол № б/н.