

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

Спинзависимые явления в твердых телах

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.02.03 Спинзависимые явления в твердых телах 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 теорию транспорта в металлах и полупроводниках. Классический и квантовый подход к поведению спина. Взаимодействие спина с внешними полями. Природу тонкой структуры энергетического спектра. Природу спин-зависимых явлений в полупроводниках и полупроводниковых аноструктурах: Методы исследования спин-зависимых явлений. ПК-4.2: Владеет навыками применения основных методов исследования спин-зависимых явлений, в том числе магнитно-резонансными для анализа и количественной оценки свойств твёрдых тел, связанных с наличием магнитных моментов. ПК-4.3: Умеет объяснить суть физических явлений, рассматриваемых в курсе, связь между явлениями, представить математическое описание явлений для обоснованного выбора теоретических и	Допуск к лабораторной работе Отчет по лабораторным работам	Экзамен: Контрольные вопросы

		экспериментальных методов исследования.		
--	--	---	--	--

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/ лабора- торные работы), часы	Всего	
	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о
Введение. Угловой момент и спин элементарной частицы	6	1	1	2	4
Взаимодействие спина с внешними полями.	6	1	1	2	4
Сверхтонкая структура уровней парамагнитной частицы	8	2	2	4	4
Спин-спиновые взаимодействия.	10	2	2	4	6
Спин-решеточные взаимодействия.	8	2	2	4	4
Спиновая релаксация носителей тока.	8	2	2	4	4
Спин-зависимые явления в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах.	8	2	2	4	4
Методы исследования спин-зависимых явлений.	8	2	2	4	4
Квантовые компьютеры: полупроводниковая концепция на основе спиновых квантовых битов	8	2	2	4	4
Аттестация	36				

КСР	2			2	
Итого	108	16	16	34	38

Содержание разделов и тем дисциплины

Введение. Классификация явлений, связанных с наличием спина и орбитального момента. История спин-зависимых явлений. Области применения.

Угловой момент и спин элементарной частицы. Электронный и ядерный магнитные моменты. Прецессия спина в магнитном поле. Классическое рассмотрение поведения спина. Уравнения Блоха и Блоха-Торри (Bloch-Torrey). Квантовомеханическое описание динамики спина в магнитном поле. Явление магнитного резонанса.

Взаимодействие спина с внешними полями.

Характер взаимодействия спина с магнитными, электрическими и упругими полями. Описание спиновых взаимодействий с помощью спинового гамильтониана.

Сверхтонкая структура уровней парамагнитной частицы. Природа сверхтонких и суперсверхтонких взаимодействий.

Спин-спиновые взаимодействия.

Диполь-дипольные и обменные взаимодействия. Процессы спин-спиновой релаксации.

Спин-решеточные взаимодействия.

Взаимодействие спина с тепловым электромагнитным излучением твердого тела и фононами. Процессы спин-решеточной релаксации. Механизмы Валлера, Ван-Флека, Орбаха, Блюма-Орбаха. Эффекты узкого фононного горла.

Спиновая релаксация носителей тока. Механизмы спиновой релаксации носителей тока Эллиота-Яфета, Дьяконова-Переля, Бира-Аронова-Пикуса, механизм, связанный с неоднородностью g-фактора, механизм, обусловленный сверхтонким взаимодействием, релаксация, вызванная анизотропным обменным взаимодействием.

Спин-зависимые явления в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах. Природа спин-зависимых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах: Спин-зависимый транспорт, рекомбинация и рассеяние носителей тока.

Рассеяния на магнитных примесях. Эффект Кондо на магнитных примесях и резонанс Абрикосова-Сула.

Спин-орбитальное взаимодействие. Спиновая релаксация. Спин-зависимое рассеяние. Спиновый эффект Холла: механизмы бокового прыжка и косоугольного рассеяния.

Явление спиновой «накачки» (пампинга) и его применение для исследования инверсного спинового эффекта Холла.

Транспорт в низкоразмерных системах: эффекты размерного квантования. Двумерный электронный газ. Полупроводниковые квантовые ямы. Квантовые проволоки.

Квантовые точки. Спин-орбитальное взаимодействие в низкоразмерных системах.

Эффект Кондо в проводимости через квантовую точку.

Методы исследования спин-зависимых явлений. Методы регистрации спин-зависимых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах. Спиновый эффект Холла и инверсный спиновый эффект Холла. Спиновый резонанс и электрически детектируемый магнитный резонанс

(ЭДМР). Эффекты Керра и Фарадея. Сквид. Методы измерения скоростей спиновой релаксации. Квантовые компьютеры: полупроводниковая концепция на основе спиновых квантовых битов.

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.

Спин-зависимые явления в твердых телах : учебно-методическое пособие / А. А. Ежевский ; ННГУ им. Н. И. Лобачевского, Физический факультет, Кафедра физики полупроводников электроники и нанoeлектроники. - Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2023. - 103 с. <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=877778&idb=0>

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 ПК-4:

-
1. Объяснить происхождение магнитных моментов у атомов и рассмотреть различные вклады в парамагнетизм и ферромагнетизм, их природу.
 2. Объяснить смысл уравнений Ландау-Лифшица и Гильберта и их решение.
 3. Условия возникновения ФМР .
 4. Природа взаимодействий в ферромагнетиках.
 5. Что такое магнитная анизотропия и как она влияет на спектры ФМР?

Критерии оценивания (оценочное средство - Допуск к лабораторной работе)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Оценочные средства для контроля текущей успеваемости включают в себя контрольные вопросы, содержащиеся в учебно-методических пособиях по лабораторным работам. Эти вопросы используются при допуске к выполнению экспериментальной части работ.
не зачтено	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.

5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Отчет по лабораторным работам) для оценки сформированности компетенции ПК-4:

1. Определить намагниченность насыщения и параметр затухания Гильберта.
2. Построить зависимость угла QM от QH в интервале $(-p, +p)$.

Критерии оценивания (оценочное средство - Отчет по лабораторным работам)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	По итогам проверки отчётов о выполнении работ заполняется контрольный лист, в котором преподаватели, проводившие лабораторные занятия выставляют отметку о выполнении.
не зачтено	Содержание отчета не удовлетворяет требованиям. Студент показывает неудовлетворительные знания. Необходимы дополнительная подготовка и исправления в отчете.

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	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельным и несуществ	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов

			не в полном объеме	в полном объеме, но некоторые с недочетами	некоторые с недочетами	енными недочетам и, выполнены 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 с указанием критериев их оценивания:

5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-4

Электронный и ядерный магнитные дипольные моменты. Прецессия спина в магнитном поле. Классическое рассмотрение динамики спинов.
Уравнения Блоха. Анализ решений уравнений Блоха.

Квантовомеханическое описание динамики спинов. Вероятность квантового перехода с переворотом спина. Формула Раби. Сравнение с классическим случаем.

Спиновый гамильтониан. Нахождение собственных значений и собственных векторов спинового гамильтониана в матричном представлении.

Тонкая структура энергетического спектра. Природа анизотропии спиновых состояний. Спин-орбитальное взаимодействие. Расщепление в нулевом поле.

Сверхтонкая структура энергетического спектра. Природа изотропного сверхтонкого взаимодействия. Влияние ковалентности на константы сверхтонкого взаимодействия.

Спиновый гамильтониан с учетом сверхтонкого взаимодействия. Энергетическая диаграмма и сверхтонкая структура спектра для случая $S=1/2$, $I=3/2$.

Суперсверхтонкое взаимодействие и его влияние на спектр.

Спин-решеточная релаксация локализованных спинов. Спин-фононные взаимодействия.

Механизм Валера, Ван-Флека, Орбаха, Блюма-Орбаха.

Спин-спиновые взаимодействия. Спиновая релаксация с участием спин-спиновых взаимодействий.

Спиновая релаксация носителей тока. Механизмы спиновой релаксации носителей тока Эллиотта-Яфета, Дьяконова-Переля, Бира-Аронова-Пикуса, механизм, связанный с неоднородностью g -фактора, механизм, обусловленный сверхтонким взаимодействием, релаксация, вызванная анизотропным обменным взаимодействием.

Спин-зависимые явления в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах. Природа спин-зависимых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах: Спин-зависимый транспорт, рекомбинация и рассеяние носителей тока. Спиновый эффект Холла.

Природа спин-зависимых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах: Спин-зависимый транспорт, рекомбинация и рассеяние носителей тока.

Рассеяния на магнитных примесях. Эффект Кондо на магнитных примесях и резонанс Абрикосова- Сула.

Спин-орбитальное взаимодействие. Спиновая релаксация. Спин-зависимое рассеяние.

Спиновый эффект Холла: механизмы бокового прыжка и косого рассеяния.

Явление спиновой «накачки» (пампинга) и его применение для исследования инверсного спинового эффекта Холла

Транспорт в низкоразмерных системах: эффекты размерного квантования. Двумерный электронный газ. Полупроводниковые квантовые ямы. Квантовые проволоки.

Квантовые точки. Спин-орбитальное взаимодействие в низкоразмерных системах.

Эффект Кондо в проводимости через квантовую точку.

Методы исследования спин-зависимых явлений. Методы регистрации спин-зависимых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах. Спиновый эффект Холла и инверсный спиновый эффект Холла. Спиновый резонанс и электрически детектируемый магнитный резонанс (ЭДМР). Эффект фарадея. Сквид. Методы измерения скоростей спиновой релаксации.

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета и дополнительные вопросы (задания), выходящие за рамки изученного объема курса и изученных алгоритмов и подходов, проявляя инициативу и творческое мышление.
отлично	Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета в рамках изученных алгоритмов и подходов. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности.
очень хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает хороший уровень знания вопросов билета и отвечает с небольшими неточностями.
хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает средний уровень знания вопросов билета и отвечает на некоторые дополнительные вопросы преподавателя (в рамках билета).
удовлетворительно	Удовлетворительная подготовка. Студент показывает удовлетворительное знание вопросов билета и знание базовых понятий отвечая с наводящими вопросами преподавателя.
неудовлетворительно	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.
плохо	Подготовка совершенно недостаточна. Последующая пересдача возможна только с комиссией.

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

Основная литература:

1. Ландау Лев Давидович. Теоретическая физика : [учеб. пособие для физ. специальностей ун-тов] : в 10 т. Т. 3. Квантовая механика. Нерелятивистская теория / при участии Л. П. Питаевского. - Изд. 4-е, испр. - М. : Наука, 1989. - 767 с. : ил. - ISBN 5-02-014421-5 (в пер.) : 1.90., 174 экз.
2. Альтшулер Семен Александрович. Электронный парамагнитный резонанс соединений элементов промежуточных групп. - Изд. 2-е, перераб. - М. : Наука, 1972. - 672 с. : ил. - 3.00., 3 экз.
3. Пул Чарлз. Техника эпр-спектроскопии : пер. с англ. / под ред. Л. Л. Декабруна. - М. : Мир, 1970. - 557 с. : ил. - 3.31., 1 экз.

Дополнительная литература:

1. Сликтер Ч. П. Основы теории магнитного резонанса / пер. Н. Н. Корста [и др.] ; под ред. Г. В. Скроцкого. - 2-е изд., пересмотр., доп. и испр. - М. : Мир, 1981. - 448 с. : ил. - 4.10., 2 экз.

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

Программные средства записи и обработки спектров спектрометра электронного парамагнитного резонанса BRUKER-EMXplus–10/12 Electron-Spin Resonance Spectrometer System: Bruker WinEPR Acquisition, и Bruker WinEPR Processing.

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: оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран)

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): Ежевский Александр Александрович, 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.