

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 № 4 от 26.04.2024 г.

Рабочая программа дисциплины

Спинзависимые явления в твердых телах

Уровень высшего образования
Магистратура

Направление подготовки / специальность
28.04.01 - Нанотехнологии и микросистемная техника

Направленность образовательной программы
Квантовые и нейроморфные технологии

Форма обучения
очная

г. Нижний Новгород

2025 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.05.03 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-1: Способен обоснованно выбирать и применять теоретические и экспериментальные методы научных и научно-технических исследований в области нанотехнологии, нанoeлектроники и квантовых технологий	<p>ПК-1.1: Знаком с теоретическими и экспериментальными методами научных и научно-технических исследований в области нанотехнологии, нанoeлектроники и квантовых технологий</p> <p>ПК-1.2: Анализирует и выбирает теоретические и экспериментальные методы научных и научно-технических исследований в области нанотехнологии, нанoeлектроники и квантовых технологий</p> <p>ПК-1.3: Применяет теоретические и экспериментальные методы научных и научно-технических исследований в области нанотехнологии, нанoeлектроники и квантовых технологий</p>	<p>ПК-1.1: Знать теорию электронного транспорта в металлах и полупроводниках.</p> <p>Уметь объяснить суть физических явлений, рассматриваемых в курсе.</p> <p>Владеть навыками применения основных методов исследования спин-зависимых явлений.</p> <p>ПК-1.2: Знать классический и квантовый подход к поведению спина; взаимодействие спина с внешними полями; природу тонкой структуры энергетического спектра.</p> <p>Уметь обосновывать связь между явлениями, рассматриваемыми в курсе.</p> <p>Владеть навыками применения магнитно-резонансных методов для анализа свойств твёрдых тел, связанных с наличием магнитных моментов.</p> <p>ПК-1.3: Знать природу спин-</p>	<p>Допуск к лабораторной работе</p> <p>Отчет по лабораторным работам</p>	<p>Экзамен:</p> <p>Контрольные вопросы</p>

		<p>зависимых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах; методы исследования спин-зависимых явлений.</p> <p>Уметь представить математическое описание явлений для обоснованного выбора теоретических и экспериментальных методов исследования.</p> <p>Владеть навыками применения магнитно-резонансных методов для количественной оценки свойств твёрдых тел, связанных с наличием магнитных моментов.</p>		
--	--	--	--	--

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			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические	Всего	

			занятия/лабораторные работы), часы		
	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0
Введение. Угловой момент и спин элементарной частицы	6	1	1	2	4
Взаимодействие спина с внешними полями.	7	1	1	2	5
Сверхтонкая структура уровней парамагнитной частицы	8	2	2	4	4
Спин-спиновые взаимодействия.	9	2	2	4	5
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 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). 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/Download/MObject/10835>

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-1:

Типовые вопросы для допуска к **лабораторной работе** «Исследование спиновой релаксации носителей тока в полупроводниках»

1. Объяснить происхождение магнитных моментов у атомов и рассмотреть различные вклады в парамагнетизм металлов и полупроводников.
2. g -фактор, его определение. Значения g -факторов для свободного и зонных электронов и дырок.
3. Рассмотреть спин-орбитальное взаимодействие в свободных атомах.

Критерии оценивания (оценочное средство - Допуск к лабораторной работе)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Обучающийся отвечает полностью на вопросы допуска к лабораторной работе.
не зачтено	Обучающийся 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-1:

Лабораторная работа «Исследование спиновой релаксации носителей тока в полупроводниках»

Задания:

1. Для серии образцов кремния, легированных донорными примесями исследовать температурные зависимости ширины линии ЭПР электронов проводимости в интервале температур 90-300К.
2. Используя связь ширины линии ЭПР со скоростью спиновой релаксации построить зависимости скорости спиновой релаксации от температуры.
3. Из характера зависимостей определить различные вклады в спиновую релаксацию исследованных образцов.
4. На основе анализа полученных экспериментальных данных и известных теоретических моделей механизмов спиновой релаксации установить согласие экспериментально определенных вкладов с теоретическими моделями.
5. Определить, какие из рассмотренных в теоретическом введении механизмов следует учитывать в экспериментально исследованных случаях.

По результатам выполнения лабораторной работы обучающийся обязан написать отчет. Отчет должен включать следующие обязательные элементы: содержание, цель работы, теоретическая часть, методика эксперимента, экспериментальную часть, включающую описание и обсуждение результатов, заключение и/или выводы, список использованных источников. Отчет не должен содержать неправомерных заимствований.

Объем отчета – 15-30 стр. формата А4 (шрифт Times New Roman 12 пт, межстрочный интервал – полуторный, интервал между абзацами – отсутствует, поля – верхнее 2 см, нижнее 2 см, левое 3 см, правое 1,5 см).

Критерии оценивания (оценочное средство - Отчет по лабораторным работам)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Выполнены все задания лабораторной работы. Отчеты оформлены правильно, полно и аккуратно. Представлены все необходимые рисунки, схемы и графики. Оформление

Оценка	Критерии оценивания
	графиков полностью соответствует общепринятым требованиям. Могут присутствовать незначительные недочёты, которые студент после замечания преподавателя способен исправить самостоятельно.
не зачтено	Не выполнены отчеты по лабораторным работам, одно или более заданий лабораторных работ. Отчеты выполнены с ошибками, не все рисунки и схемы представлены. Оформление графиков не соответствует общепринятым требованиям. Требования к оформлению отчетов не соблюдены.

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 и 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	При решении стандартных	Имеется минимальн	Продemonстрированы	Продemonстрированы	Продemonстрированы	Продemonстрированы

	навыков. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	задач не продемонстриро ваны базовые навыки. Имели место грубые ошибки	ый набор навыков для решения стандартны х задач с некоторым и недочетами	базовые навыки при решении стандартны х задач с некоторым и недочетами	базовые навыки при решении стандартны х задач без ошибок и недочетов	навыки при решении нестандарт ных задач без ошибок и недочетов	творческий подход к решению нестандартны 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».
	удовлетворитель но	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	неудовлетворите льно	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-1

1. Классификация явлений, связанных с наличием спина и орбитального момента. История спин-зависимых явлений. Области применения.
2. Угловой момент и спин элементарной частицы. Электронный и ядерный магнитные дипольные моменты. Прецессия спина в магнитном поле.
3. Классическое рассмотрение динамики спинов. Уравнения Блоха и Блоха-Торри (Bloch-Torrey).
4. Уравнения Блоха. Анализ решений уравнений Блоха.

5. Квантовомеханическое описание динамики спинов. Вероятность квантового перехода с переворотом спина. Формула Раби. Сравнение с классическим случаем.
6. Взаимодействие спина с внешними полями. Характер взаимодействия спина с магнитными, электрическими и упругими полями. Описание спиновых взаимодействий с помощью спинового гамильтониана.
5. Спинорный гамильтониан. Нахождение собственных значений и собственных векторов спинового гамильтониана в матричном представлении.
6. Тонкая структура энергетического спектра. Природа анизотропии спинорных состояний. Спин-орбитальное взаимодействие. Расщепление в нулевом поле.

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Отличная подготовка. Обучающийся 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. Обучающийся отвечает полностью на вопросы билета в рамках изученных алгоритмов и подходов. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности.
очень хорошо	Хорошая подготовка. Обучающийся показывает хороший уровень знания вопросов билета и отвечает с небольшими неточностями.
хорошо	Хорошая подготовка. Обучающийся показывает средний уровень знания вопросов билета и отвечает на некоторые дополнительные вопросы преподавателя (в рамках билета).
удовлетворительно	Удовлетворительная подготовка. Обучающийся показывает удовлетворительное знание вопросов билета и знание базовых понятий отвечая с наводящими вопросами преподавателя.
неудовлетворительно	Обучающийся 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. Аплеснин С. С. Основы спинтроники / Аплеснин С. С. - 2-е изд. испр. - Санкт-Петербург : Лань, 2022. - 288 с. - Рекомендовано УМО по классическому университетскому образованию РФ в

качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 010700.68 — «Физика». - Книга из коллекции Лань - Физика. - ISBN 978-5-8114-1060-6., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=799675&idb=0>.

2. Магнитные и электрические свойства сильнокоррелированных магнитных полупроводников с четырехспиновым взаимодействием и с орбитальным упорядочением / Аплеснин С.С. - Москва : Физматлит, 2013., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=646968&idb=0>.

Дополнительная литература:

1. Борухович А. С. Полупроводник и ферромагнетик монооксид европия в спинтронике / Борухович А. С., Трошин А. В. - Санкт-Петербург : Лань, 2022. - 288 с. - Книга из коллекции Лань - Физика. - ISBN 978-5-8114-2479-5., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=799461&idb=0>.

2. Ежевский Александр Александрович. Исследование спиновой релаксации носителей тока в полупроводниках : лабораторный практикум по курсу «Основы спинтроники» (описание к лабораторной работе) / А. А. Ежевский ; ННГУ им. Н. И. Лобачевского, Физический факультет, Кафедра физики полупроводников и оптоэлектроники. - Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2018. - 30 с. - Текст : электронный., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=795709&idb=0>.

3. Кудрин Алексей Владимирович. Аномальный эффект холла : практикум / А. В. Кудрин, Ю. А. Данилов ; ННГУ им. Н. И. Лобачевского, Физический факультет, Кафедра физики полупроводников и оптоэлектроники. - Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2017. - 16 с. - Текст : электронный., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=823053&idb=0>.

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

1) Программные средства записи и обработки спектров электронного парамагнитного резонанса: Bruker WinEPR Acquisition и Bruker WinEPR Processing;

2) ОС Windows и пакет Office;

3) интернет-ресурс справочной и математической литературы со свободным доступом www.eqworld.ipmnet.ru;

4) интернет-ресурсы Фундаментальной библиотеки ННГУ <http://www.lib.unn.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: лабораторным оборудованием ННГУ.

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 по направлению подготовки/специальности 28.04.01 - Нанотехнологии и микросистемная техника.

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 15.04.2024, протокол № б/н.