

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

Кафедра физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники

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

Рабочая программа дисциплины

Спин-зависимые явления в твердых телах

Уровень высшего образования
Магистратура

Направление подготовки: 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника
Направленности (профили): твердотельная электроника и нанoeлектроника

Квалификация (степень)
магистр

Форма обучения
очная

Нижний Новгород, 2023 г.

1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Спин-зависимые явления в твердых телах» относится к вариативной части (дисциплины по выбору студента) основной образовательной программы по направлению 11.04.04 "Электроника и нанoeлектроника", формируемой участниками образовательных отношений. Для усвоения данного курса необходимо изучить некоторые модули (дисциплины) в рамках образовательной программы бакалавра по направлению Физика: модуль «Математика» базовой части цикла математических и естественно-научных дисциплин, модуль «Теоретическая физика» базовой части профессионального цикла. Данный курс предлагает более высокий уровень подготовки по сравнению с освоенными ранее курсами «Физика конденсированного состояния» и «Физика полупроводников» в рамках образовательной программы бакалавра по направлению Физика и «Физика полупроводников».

Цель изучения дисциплины - формирование у студентов представления о физике спин-зависимых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах и применении этих явлений в исследованиях полупроводников и полупроводниковых наноструктур. Учебными задачами курса являются, во-первых, приобретение знаний теории спин-зависимых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах, необходимых для ее практического применения, во-вторых, приобретение студентами практических навыков при изучении методов регистрации спин-зависимых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах с использованием спинового резонанса и электрически детектируемого магнитного резонанса (ЭДМР), эффекта Фарадея, скивд-ячейки и спинового эффекта Холла для исследования свойств полупроводников и полупроводниковых наноструктур.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

Планируемые результаты обучения по дисциплине

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	ПК-4.1. Знает тенденции и перспективы развития электроники и	<u>Знать:</u> <i>Теории транспорта в металлах и полупроводниках.</i>	Вопросы по темам/разделам дисциплины.

соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники, и способность обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач	нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники ПК-4.2. Способен рассчитывать предельно допустимые и предельные режимы работы изделий микро- и нанoeлектроники ПК-4.3 Имеет навыки обоснованного выбора теоретических и экспериментальных методов исследования и средства решения сформулированных задач	<i>Классическое рассмотрение поведения спина. Взаимодействие спина с внешними полями. Природу тонкой структуры энергетического спектра. Природа спин-зависимых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах: Методы исследования спин-зависимых явлений. <u>Уметь</u> объяснить суть физических явлений, рассматриваемых в курсе, связь между явлениями, представить математическое описание явлений. <u>Владеть</u> навыками применения основных методов магнитно-резонансной спектроскопии к анализу и количественной оценке свойств твёрдых тел, связанных с наличием магнитных моментов по параметрам спектров.</i>	Вопросы по темам/разделам дисциплины. Комплект заданий для выполнения расчетно-графической (лабораторной) работы
--	--	---	---

Достижения современной физики полупроводников невозможно представить без понимания процессов спиновой динамики, необходимого при проектировании приборов, работающих на спиновых эффектах. Поэтому изучение физики спин-зависимых явлений, спиновой динамики, спиновых релаксационных процессов, транспорта, влияния на них различных факторов – внешних полей, химической природы доноров, изотопических эффектов является актуальной проблемой. Кроме того, понимание принципов теории и представления о технической реализации методов исследования процессов спиновой динамики необходимы будущим специалистам в различных областях физики полупроводников. При изучении курса студенты должны достичь определенного уровня понимания теории спиновой динамики в полупроводниках и спин-зависимых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах, необходимого для ее практического применения, приобрести практические навыки, необходимые при изучении методов регистрации спин-зависимых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах с использованием спинового резонанса

и электрически детектируемого магнитного резонанса (ЭДМР), эффекта Фарадея, скивд-ячейки и спинового эффекта Холла.

Развитие спинтроники относится к перспективным направлениям развития научно-технического комплекса страны. Большое внимание здесь уделяется проблемам управления спиновыми состояниями, спиновой релаксации и фазовой когерентности в спиновых системах. Приборы в спинтронике могут быть построены либо на локализованных спинах (квантовые компьютеры), либо с использованием транспорта носителей спина (спиновые фильтры, и т.д.). Актуальными проблемами для спинтроники являются, сохранение спинового состояния системы в течение заданного времени и возможность управления спиновыми состояниями. Понимание процессов спиновой динамики, в том числе и в изотопнообогащенных материалах, необходимо при проектировании приборов, работающих на спиновых эффектах. Поэтому изучение физики спиновых релаксационных процессов, спиновой динамики, транспорта, влияния на них различных факторов – внешних полей, химической природы доноров, изотопических эффектов является актуальной проблемой. Научная значимость таких исследований заключается в получении новых знаний о динамике спинов электронов с различной степенью локализации в полупроводниках и гетерослоях, разработке методов получения таких полупроводниковых монокристаллических эпитаксиальных слоев, а также объемных монокристаллов. Практическая значимость исследований заключается в применении полученных результатов, во-первых, при разработке приборов, работающих на спиновых эффектах и, во-вторых, в применении полученных знаний в образовательном процессе.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

Знать:

Теории транспорта в металлах и полупроводниках. Классическая теория Друде -Лоренца. Кинетическое уравнение Больцмана. Магнетосопротивление металлов и полупроводников. Эффект Холла.

Теории спинового транспорта в металлах и полупроводниках. Зарядовые и спиновые токи. Спиновый эффект Холла.

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

Природу электронных и ядерных магнитных моментов. Явление прецессии спина в магнитном поле. Классическое рассмотрение динамики спина в магнитном поле. 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 спинов в постоянном и переменном магнитных полях. Явление магнитного резонанса. Вероятность квантового перехода с переворотом спина. Формула Раби.

Взаимодействие спина с внешними полями.

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

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

Природу тонкой структуры энергетического спектра. Природу анизотропии спиновых состояний. Спин-орбитальное взаимодействие. Расщепление в нулевом поле.

Природа сверхтонких и суперсверхтонких взаимодействий.

Спин-решеточные взаимодействия. Процессы спин-решеточной релаксации локализованных спинов. Механизм Валлера. Механизмы Ван-Флека, Орбаха, Блюма-Орбаха. Спин-спиновые взаимодействия. Процессы спин-спиновой релаксации.

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.

Природу спин-зависимых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах:

Спин-зависимый транспорт, рекомбинация и рассеяние носителей тока.

Теории транспорта в металлах и полупроводниках. Классическая теория Друде -Лоренца.

Больцмана кинетическое уравнение. Магнитосопротивление металлов и полупроводников.

Эффект Холла.

Теории транспорта в металлах и полупроводниках (продолжение). Зарядовые и спиновые токи.

Спиновый эффект Холла.

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. Уравнение Ландау-Лифшица-Гильберта.

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. Спиновый эффект Холла. Методы измерения скоростей спиновой релаксации.

Уметь

объяснить суть физических явлений, рассматриваемых в курсе, связь между явлениями, представить математическое описание явлений.

Владеть

навыками применения основных методов магнитно-резонансной спектроскопии к анализу и количественной оценке свойств твёрдых тел, связанных с наличием магнитных моментов по параметрам спектров.

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

Общая трудоемкость	3 ЗЕТ
Часов по учебному плану	108
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	

Содержание разделов 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.

4. Образовательные технологии

Занятия по дисциплине проходят в виде лекций организованных, частично, в форме компьютерных презентаций и сопровождаются демонстрацией работ в различных научно-исследовательских лабораториях с использованием современного оборудования с привлечением высококвалифицированных специалистов. Самостоятельная работа включает в себя время на подготовку к практическим занятиям. Предусмотрено также коллективное участие обучающихся в качестве слушателей в школах, проводимых в рамках двух традиционных конференций по наноэлектронике и нанопотонике.

Основные виды образовательных технологий: лекции и контроль самостоятельной работы.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Виды самостоятельной работы. Самостоятельная работа предусмотрена при освоении материала разделов 4, 5, 7 и 8. Она связана с теоретической подготовкой к допуску и написанием отчётов по лабораторным работам. Самостоятельная работа может проводиться как в домашних условиях, так и в читальном зале библиотеки, в компьютерных классах, в учебных кабинетах (лабораториях) с доступом к лабораторному оборудованию, приборам, базам данных, к Интернет-ресурсам. Текущий контроль успеваемости сводится к контролю самостоятельной работы (КСР) и осуществляется путём контрольных опросов по спискам вопросов, приведённым в описаниях лабораторных работ, а также путём проверки протоколов измерений и отчётов по выполненным работам.

Контрольные (экзаменационные) вопросы для проведения промежуточной аттестации (экзамена) по итогам освоения дисциплины:

Самостоятельная работа включает в себя теоретическую подготовку к занятиям по материалам лекций и рекомендованной литературе, приведенной в конце данной программы, подготовку к практическим занятиям в форме собеседования и консультаций по вопросам, составленным по разделам дисциплины и подготовку к экзамену.

Оценочные средства для контроля текущей успеваемости включают в себя устный опрос в форме собеседования и консультаций по вопросам, составленным по разделам дисциплины на практических занятиях. Для прохождения итоговой аттестации проводится экзамен в 10-м семестре, включающий в себя теоретические вопросы по всему курсу, и темам практических занятиях.

Для контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины «Спин-зависимые явления в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах» используются приведенные ниже вопросы, включенные в экзаменационные билеты.

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине

6.1 Перечень компетенций выпускников образовательной программы, в формировании которых участвует дисциплина, с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений) приведён

выше (раздел 2). Ниже приведена таблица образовательных дескрипторов (отличительных признаков уровней освоения компетенций).

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 несущественных 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 отдельным и несущественным недочетом , 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	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки.	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

	обучающего от ответа	Имели место грубые ошибки.	некоторыми недочетами	и недочетами		и недочетов.	
--	----------------------	----------------------------	-----------------------	--------------	--	--------------	--

Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), характеризующих этапы их формирования

Перечень компетенций выпускников образовательной программы, в формировании которых участвует дисциплина с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений) приведён выше (раздел 2). Ниже приведена таблица образовательных дескрипторов (отличительных признаков уровней освоения компетенций).

Уровень освоения компетенции	Отличительные признаки
Начальный	<p>заложены основы знаний основных задач, направлений, тенденций и перспектив развития электроники и наноэлектроники, основанных на спин-зависимых явлениях</p> <p>способность сформулировать методологическое обоснование научного исследования и технической разработки в этой области;</p> <p>корректно объясняет проблемы в современном развитии спиновой электроники;</p>
Продвинутый	<p>изучен передовой отечественный и зарубежный научный опыт, и достижения в области спиновой электроники</p> <p>излагает методологические основы и принципы современной технологии производства изделий;</p> <p>умеет оценивать научную значимость и перспективы прикладного использования результатов исследований в области спиновой электроники, микро и наноэлектроники;</p> <p>владеет навыками анализа и идентификации новых проблем и областей исследования;</p>
Высокий	<p>имеется подробное представление о тенденциях и перспективах развития спиновой электроники микро и наноэлектроники, а также смежных областей науки и техники;</p> <p>умение предлагать новые направления в области научных исследований и разработок, новые методологические подходы к решению задач в области спиновой электроники и наноэлектроники;</p> <p>владение современной научной терминологией, основными и новейшими теоретическими и экспериментальными подходами в</p>

	передовых направлениях спиновой электроники, микро - и наноэлектроники...
--	---

Описание шкал оценивания

При выставлении экзаменационной оценки, т.е. в ходе промежуточной аттестации, применяется семибальная шкала, которая по окончании обучения (в дипломе магистра) трансформируется в пятибальную. Обе шкалы привязаны к 100-бальной системе, в которой баллы набираются в ходе текущего контроля при сдаче допусков и отчетов по лабораторным работам и непосредственно на экзамене.

По итогам освоения дисциплины сдается экзамен. Экзаменационный билет содержит два вопроса. За ответ на каждый из вопросов начисляется максимум 30 баллов. Итого с учётом успешного выполнения лабораторных работ можно набрать максимум 100 баллов.

Критерии выставления оценки при сдаче экзамена

Баллы	Семибальная шкала	Описание семибальной шкалы	Пятибальная шкала
90-100	5,5 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.	5 отлично
80-89	5 отлично	Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета в рамках изученных алгоритмов и подходов. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности.	
75-79	4,5 очень хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает хороший уровень знания вопросов билета и отвечает с небольшими неточностями.	4 хорошо
70-74	4 хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает средний уровень знания вопросов билета и отвечает на некоторые дополнительные вопросы преподавателя (в рамках билета).	
60-69	3 удовлетворительно	Удовлетворительная подготовка. Студент показывает удовлетворительное знание вопросов билета и знание базовых понятий отвечая с наводящими вопросами преподавателя.	3 удовлетворительно

40-59	2 неудовлетворительно	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.	2 неудовлетворительно
<40	1 плохо	Подготовка совершенно недостаточна. Последующая передача возможна только с комиссией.	1 плохо

Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине, характеризующих этапы формирования компетенций

По итогам освоения дисциплины сдается экзамен. Экзаменационный билет содержит два вопроса. За ответ на каждый из вопросов начисляется максимум 30 баллов. Итого с учётом успешного выполнения лабораторных работ можно набрать максимум 100 баллов.

Критерии выставления оценки при сдаче экзамена

Баллы	оценка	Описание шкалы оценивания
95-100	5 отлично	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.
90-94		
85-89		
80-84	4 хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает хороший уровень знания вопросов билета и отвечает на некоторые дополнительные вопросы преподавателя (в рамках билета).
75-79		
70-74		
67-69	3 удовлетворительно	Удовлетворительная подготовка. Студент показывает удовлетворительное знание вопросов билета и знание базовых понятий, но не отвечает на дополнительные вопросы преподавателя (в рамках билета).
64-66		
60-63		
40-59	2 неудовлетворительно	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.
< 40	1 плохо	Уровень знаний ниже порогового или полное отсутствие знаний. Для принятия окончательного решения необходимо назначить комиссию по переэкзаменовке.

Образец экзаменационного билета:

<p style="text-align: center;">Билет № 1</p> <p>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. 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.</p>

Методические материалы, определяющие процедуры оценивания.

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. По итогам проверки отчётов о выполнении работ заполняется контрольный лист, в котором преподаватели, проводившие лабораторные занятия выставляют отметку о выполнении. Лабораторный практикум по курсу считается пройденным если в контрольном листе набрано 5 отметок о выполнении лабораторных работ.

Вопросы для итогового контроля 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.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Основная литература:

1. Абрагам А., Блини Б. Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов. М.: Мир, 1972, Т.1, 2.
2. Ферромагнитный резонанс. Явление резонансного поглощения высокочастотного магнитного поля в ферромагнитных веществах. /Под ред. чл. корр. АН СССР С. В. Вонсовского./ М.: ФМ, 1961.
3. Киттель Ч. Введение в физику твёрдого тела. М: Наука, 1978.
4. Демидов Е.С. Ежевский А.А., Карзанов В.В. Магнитные резонансы в твердых телах Учебно-методические материалы по программе повышения квалификации «Новые материалы электроники и оптоэлектроники для информационно-телекоммуникационных систем». Нижний Новгород, 2007, 127 с. <http://www.unn.ru/pages/issues/aids200761.pdf>
5. Данилов Ю.А., Демидов Е.С., Ежевский А.А. Основы спинтроники. Учебное пособие. Нижний Новгород, 2009, 173 с. http://pwww.unn.ru/books/met_files/spintronik.pdf

Дополнительная литература:

1. Альтшуллер С. А., Козырев Б. М. ЭПР соединений элементов промежуточных групп. М.: Наука, 1972.
2. Пул Ч. Техника ЭПР-спектроскопии. М.: Мир, 1970
3. Страховский Г. М., Успенский А.В. Основы квантовой электроники. М.: ВШ, 1973, 312 с.
4. Кринчик Г. С. Физика магнитных явлений. М: изд. МГУ, 1976, 367с.
5. Ашкрофт, Н. Физика твёрдого тела / Н. Ашкрофт, Н. Мермин. - М.: Мир, 1979. - Т.1,2.

Рекомендуемая литература:

1. Igor Zutic, Jaroslav Fabian, S. Das Sarma. Spintronics: Fundamentals and applications. Reviews of Modern Physics, V.76, 2004
2. Torrey, H.C., 1956, Bloch equations with diffusion terms, Phys. Rev. **104**, 563–565.
3. Elliott R.J., 1954, Theory of the effect of spin-orbit coupling on magnetic resonance in some semiconductors, Phys. Rev. **96**, 266–279.
4. Yafet, Y., 1963, in *Solid State Physics, Vol. 14*, edited by F. Seitz and D. Turnbull (Academic, New York), p. 2.
5. D'yakonov, M.I., and V.I. Perel', 1971e, Spin relaxation of conduction electrons in noncentrosymmetric semiconductors, Fiz. Tverd. Tela **13**, 3581–3585 [Sov. Phys. Solid State **13**, 3023–3026 (1971)].
6. Bir, G. L., A. G. Aronov, and G. E. Pikus, 1975, Spin relaxation of electrons due to scattering by holes, Zh. Eksp. Teor. Fiz. **69**, 1382–1397 [Sov. Phys. JETP **42**, 705–712 (1976)].

7. D.D. Awschalom, D. Loss, N. Samarth (Eds.) Semiconductor spintronics and quantum computation (Springer, 2002).
8. Spin dependent transport in magnetic nanostructures. Ed. by S. Maekawa, T. Shinjo (Taylor and Francis, 2002).
9. Yongbing Xu, David D. Awschalom, Junsaku Nitta. Editors Handbook of Spintronics. Springer Science+Business Media Dordrecht 2016

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины «Спин-зависимые явления в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах»

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.

Спектрометр электронного парамагнитного резонанса BRUKER-EMXplus–10/12 Electron-Spin Resonance Spectrometer System с гелиевым криостатом, со стабилизацией температуры в диапазоне 3.8-300K.

Программа составлена в соответствии с требованиями установленного ННГУ образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 11.04.04 – «Электроника и наноэлектроника».

Автор:

Профессор кафедры физики полупроводников, электроники и наноэлектроники
д.ф.-м.н., профессор А.А. Ежевский

Рецензент:

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

Заведующий кафедрой физики полупроводников и оптоэлектроники
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
А.А. Перов