

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 № 13 от 30.11.2022 г.

Рабочая программа дисциплины

Спинтроника

Уровень высшего образования
Магистратура

Направление подготовки / специальность
03.04.02 - Физика

Направленность образовательной программы
магистерская программа «Физика конденсированного состояния»

Форма обучения
очная

г. Нижний Новгород

2023 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Спинтроника» относится к вариативной части Б1.В блока Б1 «Дисциплины (модули)», является элективной дисциплиной, преподается на первом году обучения, в первом семестре.

Целями освоения дисциплины «Спинтроника» являются:

1. изучение основных эффектов, происходящих в твердых телах с участием спина электрона;
2. обучение методам измерения и анализа гальваномагнитных параметров и результатов измерения парамагнитного резонанса материалов спинтроники;
3. изучение перспективных приборов спиновой электроники.

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-3. Способен свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной и проектной деятельности	<i>ПК-3.1. Знание основных законов физики ПК-3.2. Умение решать научно-инновационные задачи в своей инновационной и проектной деятельности ПК-3.3. Навыки применения результатов научных исследований в инновационной и проектной деятельности и зарубежного опыта</i>	(ПК-3) Знать фундаментальные основы физических явлений и процессов, лежащих в основе работы полупроводниковых приборов, схем и устройств электроники и нанoeлектроники; (ПК-3) Уметь применять представления о физических явлениях и процессах, лежащих в основе работы полупроводниковых приборов, схем и устройств электроники и нанoeлектроники для решения научно-инновационных задач; (ПК-3) Владеть опытом использования современных методов расчёта и моделирования физических процессов, происходящих в полупроводниковых элементах и устройствах электроники и нанoeлектроники.	Индивидуальные собеседования	Индивидуальные практические задания, экзамен

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	5
Часов по учебному плану	180
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	66
- занятия лекционного типа	32
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	32
- КСР	2
самостоятельная работа	144
Промежуточная аттестация	54
	экзамен

3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе				Самостоятельная работа в течение семестра, часы
		контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) в течение семестра, часы, из них				
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
1. Введение.	15	4	4	–	8	7
2. Эффекты с участием спина.	15	4	4	–	8	7
3. Магнетизм атомов.	15	4	4	–	8	7
4. Магнитные характеристики материалов. Диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики.	15	4	4	–	8	7
5. Разбавленные магнитные полупроводники. Магнетизм наночастиц.	16	4	4	–	8	8
6. Аномальный и спиновые эффекты Холла.	16	4	4	–	8	8
7. Оптическая ориентация и спиновая инжекция. Механизмы спиновой релаксации.	16	4	4	–	8	8
8. Приборы спинтроники (спиновый клапан, спиновый транзистор, спиновый светодиод).	16	4	4	–	8	8
В т.ч. текущий контроль	2	2				–
Промежуточная аттестация – экзамен						

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа студентов предусматривает выполнение домашних заданий, решение задач, изучение рекомендованной литературы, использование электронных ресурсов международных научных поисковых систем и подготовку к зачету.

Оценочные средства для контроля текущей успеваемости включают в себя устный опрос на занятиях в процессе лекций, активность в обсуждении качественных вопросов, решение задач на практических занятиях.

5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

5.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Экзамен	
Превосходно	Превосходная подготовка с очень незначительными погрешностями. Исчерпывающее и логически строгое изложение всех разделов дисциплины. Владение материалом позволяет быстро справиться с видоизмененным заданием. Успешное решение любых типов практических заданий.
Отлично	Подготовка, уровень которой существенно выше среднего с некоторыми ошибками. Твердое знание всех разделов дисциплины. Допускаются неточности, нарушения в последовательности изложения материала. Владение необходимыми приемами и способами решения практических заданий.
Очень хорошо	Хорошая подготовка с рядом заметных недочетов. Твердое знание основных разделов дисциплины. Владение необходимыми приемами и способами решения основных типов практических заданий.
Хорошо	В целом, хорошая подготовка, но со значительными ошибками. Твердое знание основных разделов дисциплины. Владение необходимыми приемами и способами решения практических заданий.
Удовлетворительно	Подготовка, удовлетворяющая минимальным требованиям. Знания основного содержания разделов дисциплины, допускаются грубые неточности, неправильные формулировки, нарушения в последовательности изложения материала. Имеющихся знаний достаточно для освоения дисциплин последующих курсов. Допускаются значительные ошибки при выполнении практических заданий.
Неудовлетворительно	Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания. Незнание значительной части основного содержания разделов дисциплины. Имеющихся знаний недостаточно для освоения дисциплин последующих курсов.
Плохо	Подготовка совершенно недостаточная. Отсутствуют знания большей части основного содержания разделов дисциплины. Имеющихся знаний совершенно недостаточно для освоения дисциплин последующих курсов.

6.2. Процедуры и критерии оценивания результатов обучения по дисциплине

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие процедуры и технологии:

– индивидуальное собеседование (промежуточная аттестация).

Для оценивания результатов обучения в виде умений и владений используются следующие процедуры и технологии: практические контрольные задания. Типы практических контрольных заданий:

– выполнение практических заданий (текущий контроль, промежуточная аттестация).

Критерии ответа студента на экзамене

Оценка «отлично» – Ответ полный и правильный, на основании изученной теории; материал изложен в определенной логической последовательности, грамотный научный язык; ответ самостоятельный и полностью выполнены индивидуальные практические задания.

Оценка «хорошо» – Ответ полный и правильный, на основании изученной теории; материал изложен в определенной логической последовательности при этом допущены две–три несущественные ошибки, исправленные по требованию преподавателя и правильно; полностью выполнены индивидуальные практические задания.

Оценка «удовлетворительно» – Ответ полный, но при этом допущена существенная ошибка или неполный, несвязный ответ и выполнены индивидуальные практические задания.

Оценка «неудовлетворительно» – Ответ обнаруживает непонимание студентом основного содержания учебного материала или допущены существенные ошибки, которые не могут быть исправлены при наводящих вопросах преподавателя, не выполнены индивидуальные практические задания

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

6.3.1 Примеры практических заданий для практических занятий, самостоятельной работы обучающихся, проведения текущего контроля и промежуточной аттестации:

1. Оптическая ориентация. Правила отбора при излучении и поглощении света атомом. Описание состояний электрона в зонах GaAs (зона проводимости, зоны легких и тяжелых дырок, спин-отщепленная зона). Правила отбора при межзонных переходах в GaAs вблизи $=0$. Расчет относительных интенсивностей межзонных переходов при поглощении циркулярно-поляризованного света.
2. Спиновая поляризация возбужденных электронов. Спиновая поляризация в стационарном состоянии; случаи полупроводников p- и n-типа. Эффект Ханле. Экспериментальные данные для GaSb и GaAs. Спиновая инжекция. Качественное рассмотрение спиновой инжекции из ферромагнитного (Ф) в нормальный (Н) металл. Эксперимент Джонсона-Силсби со структурой Ф-Н-Ф, эффект Ханле в этой структуре. Зонная диаграмма структуры Ф-Н-Ф.
3. Феноменологическое описание инжекции спина в системе Ф-Н. Стандартная (диффузионная) модель спиновой инжекции в системе Ф-Н. Формулы Ван Сола для спиновой поляризации тока на границе Ф-Н. Проблема рассогласования проводимостей. Спиновая инжекция в системе металл/полупроводник. Механизмы спиновой релаксации. Спиновая релаксация и спиновая дефазировка.
4. Основные механизмы спиновой релаксации. Механизм Эллиотта-Яфета. Механизм Дьяконова-Переля. Механизм Бира-Аронова-Пикуса. Механизм, связанный со сверхтонким

взаимодействием. Зависимости времени спиновой релаксации от температуры для указанных механизмов.

6.3.2. Вопросы для итогового контроля сформированности компетенции:

1. Определение спинтроники. Принцип работы спинового клапана.
2. Спин электрона, магнитомеханическое отношение. Опыт Штерна и Герлаха. Магнетон Бора и ядерный магнетон.
3. Энергия магнитного момента в магнитном поле, энергия диполь-дипольного (спин-спинового) взаимодействия. Классическое объяснение эффекта Зеемана.
4. Магнетизм одноэлектронного атома.
5. Строение электронных оболочек атомов переходных элементов (главное, орбитальное, магнитное квантовые числа и спин, электронная конфигурация).
6. Описание зоны проводимости и валентных подзон GaAs, соответствующие им значения проекции полного момента. Спин-отщепленная зона.
7. Правила отбора при излучении и поглощении света атомом. Описание состояний электрона в зонах GaAs (зона проводимости, зоны легких и тяжелых дырок, спин-отщепленная зона). Правила отбора при межзонных переходах в GaAs вблизи $\vec{k}=0$. Матричные элементы дипольного момента. Расчет относительных интенсивностей межзонных переходов при поглощении циркулярно-поляризованного света. Спиновая поляризация возбужденных электронов.
8. Циркулярно-поляризованная фотолюминесценция (ЦП ФЛ) как способ регистрации спиновой поляризации электронов в полупроводниках. Степень циркулярной поляризации ФЛ, ее зависимость от энергии квантов возбуждающего ЦП света.
9. Спиновая поляризация в стационарном состоянии при поглощении циркулярно-поляризованного света.
10. Качественное рассмотрение спиновой инжекции из ферромагнитного (Ф) в нормальный (Н) металл. Зонная диаграмма структуры Ф-Н-Ф.
11. Феноменологическое описание инжекции спина в системе Ф-Н. Проблема рассогласования проводимостей.
12. Концепция спинового полевого транзистора Датты-Дэса. Принцип контроля затвором в спиновом транзисторе; фазовый сдвиг для длины канала L . Трудности в реализации спинового транзистора и пути их преодоления.
13. Принцип работы спинового светоизлучающего диода. Приемы вывода излучения.
14. Магнитные разбавленные полупроводники. Фазовая диаграмма для выращивания GaMnAs. Магнитные свойства, типичные значения температуры Кюри для слоев GaMnAs, нанесенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии.
15. Основные механизмы спиновой релаксации. Механизм Эллиотта-Яфета в полупроводниках.
16. Механизм Дьяконова-Переля.
17. Механизм Бира-Аронова-Пикуса.
18. Определения – магнитная восприимчивость, относительная и абсолютная магнитная проницаемость. Связь между этими характеристиками. Магнитная индукция, единицы измерения. Классификация магнетиков.
19. Диамагнетизм орбитального движения электронов в атомах; классический вывод формулы для магнитной восприимчивости. Диамагнетизм Ландау в металлах.

20. Парамагнетизм спинов электронов. Вывод закона Кюри для невзаимодействующих электронов. Парамагнетизм Паули.
21. Обменное взаимодействие, обменный интеграл и случаи ферромагнетизма и антиферромагнетизма.
22. Примеры ферромагнетиков, антиферромагнетиков и ферримагнетиков. Приближение молекулярного поля Вейсса, закон Кюри-Вейсса.
23. Доменная структура и стенки Блоха. Энергия анизотропии. Коэрцитивное поле и гистерезис.
24. Аномальный эффект Холла в магнетиках. Определение характеристик материала из зависимости $R_H(B)$.
25. Магнетизм малых частиц. Зависимость коэрцитивного поля от размеров частиц. Однодоменные частицы
26. Суперпарамагнетизм. Температура блокировки.
27. Современные устройства на основе спинового клапана. Принцип функционирования MRAM.

6.4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания

Положение «О проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в ННГУ», утвержденное приказом ректора ННГУ от 13.02.2014 №55-ОД.

Положение о фонде оценочных средств, утвержденное приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 №247-ОД.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Материально-техническое обеспечение дисциплины обусловлено наличием учебных аудиторий для проведения занятий, оборудованных специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории. Ресурс мела и маркеров для доски в учебных аудиториях регулярно возобновляется.

Учебные аудитории могут быть при необходимости оснащены демонстрационным оборудованием для сопровождения учебных занятий презентациями.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся (на базе Фундаментальной библиотеки ННГУ) оснащены компьютерной техникой с подключением к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ.

Программа составлена в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 Физика.

Автор(ы):

доцент кафедры физики полупроводников и оптоэлектроники физического факультета, к. ф.-м. н., с.н.с. Ю.А. Данилов.

Рецензенты(ы):

зав. кафедрой физики полупроводников и оптоэлектроники физического факультета, д. ф.-м. н., профессор Д.А. Павлов.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 17.11.2022, протокол № б/н.