

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

УТВЕРЖДЕНО
решением ученого совета ННГУ
протокол от" "_____ 2024 г. №

Рабочая программа дисциплины
«Современные проблемы
Спинтроники»

Уровень высшего образования
Подготовка научных и научно-педагогических кадров

Программа аспирантуры
1.3.11. Физика полупроводников

Научная специальность
03.06.01 ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ

Форма обучения
Очная

Нижний Новгород
2024 год

1. Место и цель дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Современные проблемы спинтроники» относится к числу *элективных* дисциплин образовательного компонента программы аспирантуры и изучается на 2 году обучения в 3 семестре.

Цель дисциплины «Спинтроника» состоит в том, чтобы дать аспирантам основные понятия и представления о спинтронике, новом быстроразвивающемся направлении науки и техники, находящемся на стыке микроэлектроники, оптоэлектроники и магнетизма. В приборах спинтроники для достижения более высоких, чем в традиционных приборах электроники, характеристик процесса обработки информации используется, кроме заряда носителей тока, также спиновая степень свободы электрона.

Планируемые результаты обучения по дисциплине

Выпускник, освоивший программу, должен

Знать:

- методологию теоретических и экспериментальных исследований в области спинтроники.
- культуру научного исследования, в том числе с использованием новейших информационно-коммуникационных технологий
- как провести физический эксперимент в области спинтроники.

Уметь:

- разбираться в теоретических и экспериментальных исследованиях в области спинтроники.
- разбираться в научных исследованиях, в том числе с использованием новейших информационно-коммуникационных технологий
- осуществить обработку и анализ его результатов с использованием современных методов документирования экспериментальных данных.

Владеть:

- методологией теоретических и экспериментальных исследований в области спинтроники.
- культурой научного исследования, в том числе с использованием новейших информационно-коммуникационных технологий.
- современными методами обработки экспериментальных данных (в том числе – больших массивов экспериментальных данных) и/или современными методами численного моделирования сложных физических процессов.

3. Структура и содержание дисциплины.

Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е., всего - 72 часа, из которых 36 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа – 36 часов, семинарского типа), 36 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

Таблица 2

Структура дисциплины

Наименование раздела дисциплины	Всего, часов	В том числе					
		Контактная работа, часов					Самостоятельная работа обучающегося, часов
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Консультации	Всего	
Понятие спина электрона	4	2				2	2
Эффекты с участием спина	8	4				4	4
Магнетизм атомов	8	4				4	4

Магнитные характеристики материалов. Диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики	8	4				4	4
Разбавленные магнитные полупроводники. Магнетизм наночастиц	8	4				4	4
Аномальный и спиновый эффекты Холла	8	4				4	4
Оптическая ориентация	2	1				1	1
Спиновая инжекция	2	1				1	1
Механизмы спиновой релаксации	8	4				4	4
Спиновый клапан	8	4				4	4
Приборы спинтроники (спиновые транзистор, светодиод)	8	4				4	4
Промежуточная аттестация:	Зачет						
Итого	72	36				36	36

Таблица 3

Содержание дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела	Форма проведения занятия	Форма текущего контроля*
1.	Понятие спина электрона	История развития спинтроники. Спин электрона, гироманнитное отношение. Опыт Штерна и Герлаха. Магнетон Бора и ядерный магнетон.	Лекции	зачёт
2.	Эффекты с участием спина	Энергия магнитного диполя во внешнем магнитном поле. Взаимодействие между спинами; сравнение энергии спин-спинового взаимодействия с тепловой энергией при температуре Т. Ларморовская частота, прецессия магнитного момента в магнитном поле, эффект Зеемана. Спин-орбитальное взаимодействие.	Лекции	зачёт
3.	Магнетизм атомов	Спиновый и орбитальный магнетизм атома водорода. Магнетизм многоэлектронных атомов. Электроны в атомах переходных элементов.	Лекции	зачёт
4.	Магнитные характеристики материалов. Диамагнетик и, парамагнетик и, ферромагнетик и	Определения – магнитная восприимчивость, относительная и абсолютная магнитная проницаемость. Диамагнетизм орбитального движения электронов в атомах. Диамагнетизм Ландау в металлах. Парамагнетизм спинов электронов. Вывод закона Кюри для невзаимодействующих электронов. Парамагнетизм Паули. Зонная структура переходных металлов: сравнение для меди и никеля. Гейзенберговский обменный гамильтониан, обменный интеграл и	Лекции	зачёт

		случаи ферромагнетизма и антиферромагнетизма. Приближение молекулярного поля Вейсса, закон Кюри-Вейсса. Доменная структура и стенки Блоха. Энергия анизотропии. Коэрцитивная сила и гистерезис.		
5.	Разбавленные магнитные полупроводники. Магнетизм наночастиц	Магнитные разбавленные полупроводники. Фазовая диаграмма для выращивания GaMnAs. Магнитные свойства, типичные значения температуры Кюри для слоев GaMnAs, нанесенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Магнетизм малых частиц. Зависимость коэрцитивного поля от размеров частиц. Суперпарамагнетизм.	Лекции	зачёт
6.	Аномальный и спиновый эффекты Холла	Внешний и внутренний спиновый эффект Холла. Изменение направлений спина во внешних магнитном и электрическом полях. Расчет спинового тока в спиновом эффекте Холла. Экспериментальные наблюдения спинового эффекта Холла. Аномальный эффект Холла в ферромагнетиках. Анализ результатов измерения эффекта Холла (аномального эффекта Холла) для получения информации об электронной и магнитной подсистемах разбавленного магнитного полупроводника.	Лекции	зачёт
7.	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 $\vec{k}=0$. Расчет относительных интенсивностей межзонных переходов при поглощении циркулярно-поляризованного света. Спиновая поляризация возбужденных электронов. Спиновая поляризация в стационарном состоянии; случаи полупроводников p- и n-типа. Эффект Ханле. Экспериментальные данные для GaSb и GaAs.	Лекции	зачёт
8.	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. Феноменологическое описание инжекции спина в системе Ф-Н. Стандартная (диффузионная) модель спиновой	Лекции	зачёт

		инъекции в системе Ф-Н. Формулы Ван Сола для спиновой поляризации тока на границе Ф-Н. Проблема рассогласования проводимостей. Спиновая инъекция в системе металл/полупроводник.		
9.	Механизмы спиновой релаксации	Спиновая релаксация и спиновая дефазировка. 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.	Лекции	зачёт
10.	Спиновый клапан	Эффект гигантского магнетосопротивления в трехслойной структуре Ф-Н-Ф. Технология изготовления спинового клапана. Четырехслойные структуры, роль антиферромагнитного слоя. Эффекты туннельного магнетосопротивления. Системы памяти с произвольным доступом на основе спиновых клапанов.	Лекции	зачёт
11.	Приборы спинтроники (спиновые транзистор, светодиод)	Концепция спинового полевого транзистора Датты-Дэса. Время жизни спина в проводящем канале. Принцип контроля затвором в спиновом транзисторе. Трудности в реализации спинового транзистора и пути их преодоления. Принцип работы спинового свето-излучающего диода. Схемы свето-излучающих диодов с эмиттером в виде ферромагнитного полупроводника n-типа и p-типа. Приемы вывода излучения. Зависимость поляризационных характеристик диодов при варьировании температуры измерений, толщины спейсера, способа приложения магнитного поля. Зенеровский туннельный диод.	Лекции	зачёт

4. Формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся

Во время самостоятельной работы аспиранты изучают методологию теоретических и экспериментальных исследований в области спинтроники, культуру научного исследования, в том числе с использованием новейших информационно-коммуникационных технологий, изучают как подготовить и провести физический эксперимент в области физики твердотельных материалов и физики наноструктур, осуществить обработку и анализ его результатов.

5. Фонд оценочных средств для аттестации по дисциплине

5.1. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине.

При выполнении всех работ учитываются следующие **основные критерии**:

- уровень теоретических знаний (подразумевается не только формальное воспроизведение информации, но и понимание предмета, которое подтверждается правильными ответами на дополнительные, уточняющие вопросы, заданные членами комиссии);
- умение использовать теоретические знания при анализе конкретных проблем, ситуаций;
- качество изложения материала, то есть обоснованность, четкость, логичность ответа, а также его полнота (то есть содержательность, не исключающая сжатости);
- способность устанавливать внутри- и межпредметные связи,
- оригинальность мышления, знакомство с дополнительной литературой и другие факторы.

Описание шкалы оценивания на промежуточной аттестации в форме зачета

Оценка	Уровень подготовленности, характеризуемый оценкой
<i>Зачтено</i>	владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, умение самостоятельно обозначить проблемные ситуации в организации научных исследований, способность критически анализировать и сравнивать существующие подходы и методы к оценке результативности научной деятельности, свободное владение источниками, умение четко и ясно излагать результаты собственной работы, следовать нормам, принятым в научных дискуссиях.
<i>Не зачтено</i>	непонимание смысла ключевых проблем, недостаточное владение науковедческой терминологией, неумение самостоятельно обозначить проблемные ситуации, неспособность анализировать и сравнивать существующие концепции, подходы и методы, неумение ясно излагать результаты собственной работы, следовать нормам, принятым в научных дискуссиях.

5.2. Примеры типовых контрольных заданий или иных материалов, используемых для оценивания результатов обучения по дисциплине

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; случаи полупроводников p -и n -типа.
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 Датта-Даса. 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 Дзяконова-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. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.

а) основная литература:

- 1) Аплеснин С.С. Основы спинтроники. С-Пб: Лань, 2010. 288 с.
- 2) Кравченко А.Ф. Магнитная электроника. Новосибирск: Изд-во СОРАН, 2002. 400с.

б) дополнительная литература:

- 1) С.В. Вонсовский «Магнетизм». «Наука», М., 1971, 1032 с.
- 2) Г.С. Кринчик «Физика магнитных явлений». Изд-во Моск.ун-та, 1985, 336 с.
- 3) Э.Л. Нагаев «Физика магнитных полупроводников». «Наука», М., 1979, 431 с.
- 4) «Оптическая ориентация» под ред. Б.П. Захарчени, Ф. Майера. «Наука», Л., 1989, 408 с.

- 5) В.Я. Демиховский «Низкоразмерные структуры спинтроники». Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2007, 126 с.
- 6) Б.П. Захарченя, В.Л. Коренев. Интегрируя магнетизм в полупроводниковую электронику – УФН, 2005, т.175, в.6, с.629-635.
- 7) А. Ферт. Происхождение, развитие и перспективы спинтроники – УФН, 2008, т.178, в.12, с.1336-1348.
- 8) П.А. Грюнберг. От спиновых волн к гигантскому магнетосопротивлению и далее – УФН, 2008, т.178, в.12, с.1349-1358.

в) Интернет-ресурсы

Для углубленного изучения вопросов спинтроники рекомендуется чтение обзорных и оригинальных статей в журналах, имеющих в открытом доступе для ННГУ:

1. Физика и техника полупроводников: <http://journals.ioffe.ru/ftp/>
2. Физика твердого тела: <http://journals.ioffe.ru/ftt/>
3. Успехи физических наук: <http://www.ufn.ru/>
4. Physical Review B: <http://prb.aps.org/>
5. Journal of Applied Physics: <http://jap.aip.org/>
6. Journal of Physics D: Applied Physics: <http://iopscience.iop.org/0022-3727>

Книга Аплеснина С.С. (Основы спинтроники. С-Пб: Лань, 2010. 288 с.) имеется в режиме чтения в доступе с компьютеров сети ННГУ по адресу <http://e.lanbook.com/>.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины

- помещения для проведения занятий: лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для хранения и профилактического обслуживания оборудования и помещения для самостоятельной работы обучающихся, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ;
 - материально-техническое обеспечение, необходимое для реализации дисциплины, включая лабораторное оборудование;
 - лицензионное программное обеспечение: *Windows, Microsoft Office*;
 - обучающиеся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья обеспечиваются электронными и (или) печатными образовательными ресурсами в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья.
- ресурсам.

Рабочая программа учебной дисциплины составлена в соответствии с учебным планом, Положением о подготовке научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Постановление Правительства РФ от 30.11.2021 № 2122), Федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Приказ Минобрнауки РФ от 20.10.2021 № 951).

Автор (ы) к.ф.-м.н., с.н.с. _____ Ю. А. Данилов

Рецензент (ы) _____

Заведующий кафедрой д.ф.-м.н., профессор _____ Д. А. Павлов

Программа одобрена на заседании методической комиссии физического факультета от
_____ 2022 года, протокол № б/н