

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
« ____ » _____ 202_ г. № ____

Рабочая программа дисциплины

Спинтроника

(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования

магистратура

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки / специальность

03.04.02 Физика

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Направленность образовательной программы

магистерская программа "Квантовые и нейроморфные технологии"

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Квалификация (степень)

магистр

(бакалавр / магистр / специалист)

Форма обучения

Очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Год начала обучения

2023

(для обучающихся какого года поступления разработана Рабочая программа)

Нижегород

1. Место и цели 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:

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

2. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины «Спинтроника» составляет 3 зачетных единицы всего 108 часов, из которых 34 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (2 часа – мероприятия промежуточной аттестации; 16 часов занятия лекционного типа, 16 часов занятия семинарского типа (практические занятия), в том числе 2 часа – мероприятия текущего контроля успеваемости), 74 часа составляет самостоятельная работа обучающегося (38 часов самостоятельная работа в течение семестра, 36 часов самостоятельная работа при подготовке к промежуточной аттестации).

Содержание дисциплины «Спинтроника»

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 спиновый 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						

3. Образовательные технологии

- 1) Чтение лекций;
- 2) сопровождение лекций написанием и выводом формул, построением графиков, изображением рисунков на доске;
- 3) сопровождение лекций презентациями;
- 4) методика «вопросы и ответы»;
- 5) выполнение практического задания у доски;
- 6) индивидуальная работа над практическим заданием;
- 7) работа в парах над практическим заданием;
- 8) работа в малых группах над практическим заданием;
- 9) методика «мозговой штурм».

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся предполагает изучение конспектов лекций, выделенных разделов основной литературы, а также дополнительной литературы, выполнение практических заданий, отвечающих изучаемым разделам дисциплины, подготовку к промежуточной аттестации.

Перечень основной и дополнительной литературы для самостоятельного изучения приведен в п. 7 настоящей Рабочей программы дисциплины.

Контрольные вопросы для промежуточной аттестации, примеры практических заданий приведены в п. 6.3 настоящей Рабочей программы дисциплины.

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

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине
ПК-2 Способен самостоятельно анализировать, не предвзято оценивать и ориентироваться в передовых теоретических концепциях и достижениях современной физики	(ПК-2) Знать фундаментальные основы физических явлений и процессов, лежащих в основе работы полупроводниковых приборов, схем и устройств электроники и нанoeлектроники. (ПК-2) 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-2) Владеть опытом использования современных методов расчёта и моделирования физических процессов, происходящих в полупроводниковых элементах и устройствах электроники и нанoeлектроники.

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине

6.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Промежуточной аттестацией для дисциплины «Спинтроника» является экзамен.

По итогам экзамена выставляется оценка по семибалльной шкале: оценки «Плохо» и «Неудовлетворительно» означают отсутствие аттестации,

оценки «Удовлетворительно», «Хорошо», «Очень хорошо», «Отлично» и «Превосходно» выставляются при успешном прохождении аттестации.

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).

Контрольные вопросы для индивидуального собеседования представлены в п. 6.3 настоящей Рабочей программы дисциплины.

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

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

Примеры практических заданий для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации представлены в п. 6.3 настоящей Рабочей программы дисциплины.

Критериями оценивания являются полнота знаний, наличие умений и владений (навыков), перечисленных в п. 5 настоящей Рабочей программы дисциплины.

«Плохо» – обучающийся не продемонстрировал никаких знаний об основных теоретических разделах курса, не показал никаких умений и навыков выполнения практических заданий;

«Неудовлетворительно» – обучающийся не продемонстрировал представления об основных теоретических разделах курса, не показал минимально допустимый уровень умений и навыков выполнения практических заданий;

«Удовлетворительно» – обучающийся продемонстрировал изложение формулировок основных теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения практических заданий базового уровня сложности;

«Хорошо» – обучающийся продемонстрировал связное изложение основных теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения стандартных практических заданий;

«Очень хорошо» – обучающийся продемонстрировал связное изложение практически всех теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения стандартных практических заданий;

«Отлично» – обучающийся продемонстрировал связное изложение всех теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения практических заданий повышенного уровня сложности;

«Превосходно» – обучающийся продемонстрировал уровень знаний в объеме, превышающем стандартную программу подготовки, и продемонстрировал творческий подход к выполнению практических заданий повышенного уровня сложности.

6.3. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций

6.3.1. При проведении промежуточной аттестации обучающимся предлагаются следующие контрольные вопросы, охватывающие программу дисциплины «Спинтроника»:

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.

6.3.2. 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 $\vec{k}=0$. 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 Соны 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.

6.3.3. Пример экзаменационного билета при проведении промежуточной аттестации по дисциплине:

Билет № XX
<p>Теоретический вопрос. Парамагнетизм спинов электронов. Вывод закона Кюри для невзаимодействующих электронов. Парамагнетизм Паули.</p> <p>Практическое задание. Рассчитать спин атома Mn.</p>

6.4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания

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

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

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

- 1) Аплеснин С.С. Основы спинтроники. СПб: Лань, 2010. 288 с. ЭБС «Лань»: <https://e.lanbook.com/book/551>.
- 2) Данилов Ю.А., Демидов Е.С., Ежевский А.А. Основы спинтроники. Фонд образовательных электронных ресурсов ННГУ, рег.№221.09.05. Свободный доступ: http://www.unn.ru/books/met_files/spintronik.pdf.

б) дополнительная литература:

- 1) Оптическая ориентация – под ред. Захарчени Б.П. и Майера Ф. – Ленинград: Наука, Ленинградское отделение, 1989. – 408 с. Фонд Фундаментальной библиотеки ННГУ, 2 экз. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=75194>.

- 2) Б.П. Захарченя, В.Л. Коренев. Интегрируя магнетизм в полупроводниковую электронику – УФН, 2005, т. 175, вып. 6, с. 629–635.

В свободном доступе на сайте <http://www.ufn.ru/>.

- 3) А. Ферт. Происхождение, развитие и перспективы спинтроники – УФН, 2008, т. 178, в. 12, с. 1336–1348.

В свободном доступе на сайте <http://www.ufn.ru/>.

- 4) П.А. Грюнберг. От спиновых волн к гигантскому магнетосопротивлению и далее – УФН, 2008, т. 178, вып. 12, с. 1349–1358.

В свободном доступе на сайте <http://www.ufn.ru/>.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

Интернет-ресурсы Фундаментальной библиотеки ННГУ

<http://www.lib.unn.ru/>.

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

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.

_____ / Данилов Ю.А. /

Рецензент(ы):

Зав. кафедрой физики полупроводников
и оптоэлектроники
физического факультета,
д. ф.-м. н., профессор

_____ / Павлов Д.А. /

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии
физического факультета ННГУ от « » _____ 202_ года,
протокол № б/н.

Председатель
Учебно-методической комиссии
физического факультета ННГУ

_____ / Перов А.А. /