

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

Спинтроника

Уровень высшего образования
Магистратура

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

Форма обучения: очная

Нижний Новгород, 2023 год

1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Спинтроника» относится к обязательным дисциплинам формируемой участниками образовательных отношений части основной образовательной программы по направлению подготовки магистров 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника».

Для усвоения данного курса необходимо изучить в рамках образовательной программы бакалавра модули (дисциплины): курс «Квантовая механика» модуля «Теоретическая физика», курсы «Атомная физика», «Физика конденсированного состояния», «Физика полупроводников» и «Физика низкоразмерных систем» профессионального цикла.

Освоение данной дисциплины обязательно и предполагается в 1-ом семестре магистратуры, поскольку оно необходимо как предшествующее для дисциплины профессионального цикла «Основы проектирования электронной компонентной базы», а также дисциплин по выбору «Спинзависимые явления в твердых телах», «Магнитные резонансы в твердых телах», «Избранные главы физики твердого тела», а также для выполнения магистерской диссертации.

«Спинтроника» - естественнонаучная дисциплина, представляющая собой раздел физики твердого тела, находящийся на стыке физики магнетизма, оптоэлектроники и полупроводниковой микроэлектроники, в котором углубленно изучаются физические явления в твердых телах с учетом спина электронов, особенности использования спиновой степени свободы в электронных устройствах, что важно для понимания процессов, проходящих в современных полупроводниковых низкоразмерных системах.

Цель изучения дисциплины состоит в том, чтобы дать студентам магистратуры основные понятия и представления о спинтронике, новом быстроразвивающемся направлении науки и техники. 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.

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

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующей компетенции:
- ПК-4. Готовность формулировать цели и задачи научных исследований в 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

| 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 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 | <p><i>ПК-4.1. Знает тенденции и перспективы развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники</i></p> <p><i>ПК-4.2. Умеет рассчитывать предельно допустимые и предельные режимы работы изделий микро- и нанoeлектроники</i></p> <p><i>ПК-4.3 Умеет обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы исследования изделий микро- и нанoeлектроники</i></p> | Студент должен: знать фундаментальные основы и перспективы развития спинтроники как нового раздела электроники и нанoeлектроники, в том числе физико-химические принципы и методы получения материалов спинтроники, спиновые эффекты в наноструктурах; принципы функционирования приборов спинтроники; уметь рассчитать предельные параметры приборов спинтроники; иметь навыки выбора методов исследования параметров материалов и приборов спинтроники. | <p>Вопросы по темам/разделам дисциплины.</p> <p>Комплект задач и заданий к лабораторному практикуму.</p> <p>Фонд тестовых заданий</p> |

В результате освоения дисциплины студент должен **знать**:

- особенности эффектов в полупроводниковых и металл-полупроводниковых гетероструктурах, проходящих с участием спина электрона (спин-спиновое и спин-орбитальное взаимодействие, аномальный эффект Холла, спиновый эффект Холла, оптическая спиновая ориентация, спиновая инжекция, спиновая релаксация);
- основные свойства и методы получения материалов спинтроники (тонких пленок ферромагнитных металлов, разбавленных магнитных полупроводников и гетероструктур на их основе);
- принципы функционирования и характеристики приборов спинтроники (спиновый клапан, спиновый полевой транзистор, спиновый светоизлучающий прибор).

Студент должен **уметь**:

- анализировать результаты измерения эффекта Холла (аномального эффекта Холла) для получения информации об электронной и магнитной подсистемах разбавленного магнитного полупроводника;

- анализировать результаты измерения электронного парамагнитного (ферромагнитного) резонанса.

Студент должен *овладеть навыками* применения полученных знаний для решения конкретных задач, возникающих как в научно-исследовательской работе, так и в производственно-технологическом процессе.

3. Структура и содержание дисциплины «Спинтроника»

3.1. Трудоемкость дисциплины

| | |
|---|---------------------|
| Общая трудоемкость | 4 ЗЕТ |
| Часов по учебному плану | 144 |
| в том числе | |
| аудиторные занятия (контактная работа): | 50 |
| - занятия лекционного типа | 32 |
| -лабораторные работы | 16 |
| КСР | 2 |
| самостоятельная работа | 58 |
| контроль | 36 |
| Промежуточная аттестация | 1 семестр – экзамен |

3.2. Содержание дисциплины

Структура дисциплины

| Наименование разделов и тем дисциплины, форма промежуточной аттестации | Всего (часы) | в том числе | | | | | Самостоятельная работа обучающегося, часы |
|--|--------------|---|---------------------------|----------------------------|--------------|-------|---|
| | | контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы | | | | | |
| | | Занятия лекционного типа | Занятия семинарского типа | Занятия лабораторного типа | Консультации | Всего | |
| 1. Введение | 10 | 2 | | | | 2 | 8 |
| 2. Эффекты с участием спина | 12 | 4 | | | | 4 | 8 |
| 3. Магнетизм атомов | 12 | 4 | | | | 4 | 8 |
| 4. Магнитные характеристики материалов. Диамаг- | 30 | 6 | | 8 | | 14 | 16 |

| | | | | | | | |
|---|-----|----|--|----|--|----|----|
| нетики, парамагнетики, ферромагнетики | | | | | | | |
| 5. Разбавленные магнитные полупроводники. Магнетизм наночастиц | 12 | 4 | | | | 4 | 8 |
| 6. Аномальный и спиновый эффекты Холла | 28 | 4 | | 8 | | 12 | 16 |
| 7. Оптическая ориентация и спиновая инжекция. Механизмы спиновой релаксации | 14 | 4 | | | | 4 | 10 |
| 8. Приборы спинтроники (спиновый клапан, спиновый транзистор, спиновый светодиод) | 24 | 4 | | | | 4 | 20 |
| мероприятия промежуточного контроля | 2 | | | | | 2 | |
| Промежуточная аттестация Экзамен | | | | | | | |
| Итого | 144 | 32 | | 16 | | 50 | 94 |

Содержание разделов дисциплины

1. Введение. Цель и задачи курса. Основная и дополнительная литература. История развития спинтроники. Понятие спина электрона, гиромагнитное отношение. Опыт Штерна и Герлаха. Магнетон Бора и ядерный магнетон.

2. Эффекты с участием спина электрона. Энергия магнитного диполя во внешнем магнитном поле. Взаимодействие между спинами; сравнение энергии спин-спинового взаимодействия с тепловой энергией при температуре T . Ларморовская частота, прецессия магнитного момента в магнитном поле, эффект Зеемана. Спин-орбитальное взаимодействие.

3. Магнетизм атомов. Спиновый и орбитальный магнетизм атома водорода. Магнетизм многоэлектронных атомов. Электроны в атомах переходных элементов.

4. Магнитные характеристики материалов. Диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики. Определения – магнитная восприимчивость, относительная и абсолютная магнитная проницаемость. Диамагнетизм орбитального движения электронов в атомах. Диамагнетизм Ландау в металлах. Вывод закона Кюри для невзаимодействующих магнитных моментов. Парамагнетизм спинов электронов (парамагнетизм Паули).

Зонная структура переходных металлов: сравнение для меди и никеля. Гейзенберговский обменный гамильтониан, обменный интеграл и случаи ферромагнетизма и антиферро-

магнетизма. Приближение молекулярного поля Вейсса, закон Кюри-Вейсса. Доменная структура и стенки Блоха. Энергия анизотропии. Коэрцитивное поле и гистерезис.

5. Разбавленные магнитные 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.

6. Аномальный и спиновый эффекты Холла. Внешний и внутренний спиновый эффект Холла. Изменение направлений спина во внешних магнитном и электрическом полях.. 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.

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. Эффект Ханле. Экспериментальные данные для GaSb и GaAs. Спиновая инжекция. Качественное рассмотрение спиновой инжекции из ферромагнитного (Ф) в нормальный (Н) металл. Зонная диаграмма структуры Ф-Н-Ф. 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. 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.

8. 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. 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 светоизлучающего диода. Схемы светоизлучающих 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.

4. Образовательные технологии

Основные виды образовательных технологий: лекции, лабораторный практикум и контроль самостоятельной работы.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Виды самостоятельной работы. Самостоятельная работа предусмотрена при освоении материала разделов 2, 4-8. 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 осуществляется путём контрольных опросов по спискам вопросов, приведённым в описаниях лабораторных работ, а также путём проверки протоколов измерений и отчётов по выполненным работам.

Перечень лабораторных работ:

- Электронный парамагнитный резонанс. Ферромагнитный резонанс;
- Аномальный эффект Холла в ферромагнитном полупроводнике (A^3Mn)B⁵.

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

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 $k = 0$. 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 и электрические 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 в системе невзаимодействующих магнитных моментов. Вывод закона Кюри. Парамагнетизм Паули.
21. Обменное взаимодействие, обменный интеграл и случаи ферромагнетизма и антиферромагнетизма.
22. Примеры ферромагнетиков, антиферромагнетиков и ферримагнетиков. 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.

Дополнительные экзаменационные вопросы:

1. Понятие спин-орбитального взаимодействия. Полуклассическое объяснение.
2. В чем состоит эффект Рашбы?
3. В чем заключается аномалия магнитомеханического отношения для спина электрона?
4. Дайте определение температуры Кюри.
5. Основные механизмы обменного взаимодействия в твердых телах.
6. Как обменный интеграл зависит от расстояния между атомами в переходных металлах?

7. Принцип действия механизма РККИ: в каких материалах работает, как обменное взаимодействие РККИ зависит от концентрации свободных носителей?
8. В чем заключается эффект гигантского магнетосопротивления?
9. Какую роль играют атомы марганца в полупроводниках A_3B_5 (GaAs)?
10. Какие методы формирования ферромагнитных полупроводников вы знаете?
11. Сравните энергию спин-спинового взаимодействия с тепловой энергией.
12. Сформулируйте правило Хунда и примените его для атома Fe.
13. Как подсчитать спин атома Mn?
14. Как направлен спиновый магнитный момент электрона по отношению к спину?
15. Спин фотона. Имеет ли фотон спиновый магнитный момент?
16. Как на практике получить циркулярно-поляризованное излучение?
17. Каков знак спиновой поляризации электронов при оптической ориентации?
18. Чем отличается оптическая ориентация в массивном полупроводнике и в напряженной квантовой яме?

6. **Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине, включающий:**

6.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

| 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 ошибки. | Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок | Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых 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 | При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые | Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания но не в пол- | Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены | Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме, но неко- | Продемонстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущественным | Продемонстрированы все основные умения, Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном |

| | | | | | | | |
|---------------|--|---|---|--|--|--|---|
| | от ответа | ошибки. | ном объеме. | все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами. | торые с недочетами. | недочетами, выполнены все задания в полном объеме. | объеме без недочетов |
| <u>Навыки</u> | Отсутствие владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа | При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки. | Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами | Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами | Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. | Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов. | Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач |

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 | <ul style="list-style-type: none"> - воспроизводит термины и основные понятия спинтроники; - объясняет суть спиновых эффектов; - способен сопоставлять возможности приборов спинтроники и традиционной микроэлектроники. |
| Базовый | <ul style="list-style-type: none"> - выявляет взаимосвязь между атомным строением и магнитными свойствами материалов; - применяет законы и теоретические модели для объяснения спиновых эффектов; - знает фундаментальные основы процессов получения и функционирования материалов спинтроники; - знает предельные возможности приборов спиновой электроники. |
| Высокий | <ul style="list-style-type: none"> - знает современные технологические методы формирования приборов спинтроники и современные методы контроля и диагностики свойств спиновых структур; |

| | |
|--|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> - формулирует выводы из результатов измерений; - оценивает соответствие теории и эксперимента; - оценивает научную и прикладную значимость спинтроники как раздела электроники и нанoeлектроники. |
|--|---|

По итогам освоения дисциплины сдается экзамен. При выставлении экзаменационной оценки, т.е. в ходе промежуточной аттестации, применяется семибалльная шкала, которая по окончании обучения (в дипломе магистра) трансформируется в пятибалльную.

Экзаменационный билет содержит два вопроса.

Критерии выставления оценки при сдаче экзамена

| Семи- балльная шкала | Описание семибалльной шкалы | Пяти- балльная шкала |
|------------------------------------|--|------------------------------------|
| 5,5 Превос- ходно | 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 |
| 5 отлично | Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета в рамках изученных алгоритмов и подходов. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности. | |
| 4,5 очень хо- рошо | Хорошая подготовка. Студент показывает хороший уровень знания вопросов билета и отвечает с небольшими неточностями. | 4 хорошо |
| 4 хорошо | Хорошая подготовка. Студент показывает средний уровень знания вопросов билета и отвечает на некоторые дополнительные вопросы преподавателя (в рамках билета). | |
| 3 удовле- твори- тельно | Удовлетворительная подготовка. Студент показывает удовлетворительное знание вопросов билета и знание базовых понятий, отвечая с наводящими вопросами преподавателя. | 3 удовле- твори- тельно |
| 2 неудовле- твори- тельно | Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания. | 2 неудовле- твори- тельно |
| 1 плохо | Подготовка совершенно недостаточна. Последующая пересдача возможна только с комиссией. | 1 плохо |

6.2. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине, характеризующие этапы формирования компетенций

Для оценивания результатов обучения в виде **знаний, умений и владений** используются следующие процедуры и технологии:

- для оценивания результатов обучения в виде **знаний** используются фронтальный опрос на лабораторных работах;
- для оценивания результатов обучения в виде **умений** используются простые задания для выполнения лабораторных работ, включающих несколько вопросов в виде краткой формулировки действий (комплекса действий) для проведения необходимых технологических операций и измерений, которые следует выполнить, или описание результата, который можно считать достоверным.
- для оценивания результатов обучения в виде **владений** используются комплексные задания лабораторных работ, требующие поэтапного решения в типичной ситуации и развернутого ответа.
- для проведения **итогового контроля** сформированности компетенции используются оформление и защита отчетов по лабораторным работам.

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 2 отметки о выполнении лабораторных работ.

6.3. Типовые контрольные задания для оценки сформированности компетенции ПК-4 Типовые вопросы для фронтальных опросов:

- 1) Что такое спин элементарной частицы? По какому параметру частицы делятся на фермионы и бозоны? Функции распределения для фермионов и бозонов.
- 2) Что такое магнитомеханическое отношения? Его величина для орбитального движения электрона и для спина.
- 3) В чем заключается опыт Штерна-Герлаха и каковы его результаты?
- 4) В чем заключается эффект Фарадея, что называется углом Фарадея и постоянной Верде?
- 5) В чем заключается эффект Зеемана?
- 6) Как можно объяснить появление спинового эффекта Холла?
- 7) Как сказывается учет спин-орбитального взаимодействия на структуре атомных уровней?
- 8) В чем состоит правило Хунда и как с его помощью можно рассчитать спин, например, 3d-оболочки ионов переходных элементов группы железа?
- 9) Что такое магнитная восприимчивость и как все тела делятся на группы, исходя из ее знака и величины?
- 10) Сравните по величине парамагнетизм атомной системы и парамагнетизм свободных электронов в металле.

- 11) В каком соотношении находятся диамагнетизм (Ландау) и парамагнетизм (Паули) свободных электронов?
- 12) Нарисуйте схематически зонную структуру ферромагнитного металла, например, Fe или Ni.
- 13) Какова роль доменных стенок в формировании петли гистерезиса ферромагнетика?
- 14) Как можно изготовить ферромагнитный полупроводник, например, GaAs:Mn?
- 15) Какие полупроводниковые свойства сохраняются в GaAs:Mn? Какова роль атомов марганца в свойствах этого материала?
- 16) Каковы преимущества инжектора из ферромагнитного полупроводника перед инжектором из ферромагнитного металла?
- 17) В чем заключается принцип оптической ориентации в полупроводниках? Что и чем ориентируется?
- 18) Как можно зарегистрировать спин-ориентированные носители тока в полупроводниках?
- 19) В чем заключается принцип функционирования спинового клапана? Типичная структура спинового клапана. Какова роль антиферромагнитного слоя в этой структуре?
- 20) Что такое эффект гигантского магнетосопротивления? В каких системах он наблюдается?
- 21) Каков принцип работы спинового полевого транзистора? По каким причинам его приборная реализация затруднена?

Типовые задания лабораторного практикума:

- 1) Измерить сопротивление образца ферромагнитного полупроводника по методике Ван-дер-Пау. Рассчитать значения удельного и слоевого сопротивления.
- 2) Выполнить измерения напряжений Холла при развертке магнитного поля в пределах, определяемых используемой установкой. Произвести выделение линейной части зависимости.
- 3) По линейной части зависимости напряжения Холла от напряженности магнитного поля рассчитать холловские параметры слоя: подвижность и концентрацию основных носителей тока. В случае наличия нелинейной составляющей гистерезисного типа определить коэрцитивное поле.
- 4) Для серии образцов кремния, легированных донорными примесями, исследовать температурные зависимости ширины линии ЭПР электронов проводимости в интервале температур 90 – 300 К.
- 5) Используя связь ширины линии ЭПР со скоростью спиновой релаксации построить зависимости скорости спиновой релаксации от температуры, концентрации донорной примеси и порядкового номера химического элемента примеси.
- 6) Из характера зависимостей определить различные вклады в спиновую релаксацию исследованных образцов. На основе анализа полученных экспериментальных данных и известных теоретических моделей механизмов спиновой релаксации установить согласие экспериментально определенных вкладов с теоретическими моделями. Определить, какие из рассмотренных в теоретическом введении механизмов следует учитывать в экспериментально исследованных случаях.

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины «Спинтроника»

а) основная литература:

- 1) Борисенко В.Е., Данилюк А.Л., Мигас Д.Б. "Спинтроника". М.: Лаборатория знаний, **2017**. 229 с. Имеется в фундаментальной библиотеке ННГУ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=735228&idb=0>
- 2) Данилов Ю.А., Демидов Е.С., Ежевский А.А. "Основы спинтроники" Фонд образовательных электронных ресурсов ННГУ, рег.№221.09.05 http://www.unn.ru/books/met_files/spintronik.pdf - доступ с компьютеров ННГУ.

б) дополнительная литература:

- 1) С.В. Вонсовский «Магнетизм». «Наука», М., **1971**, 1032 с.
- 2) Э.Л. Нагаев «Физика магнитных полупроводников». «Наука», М., 1979, 431 с.
- 3) «Оптическая ориентация» под ред. Б.П. Захарчени, Ф. Майера. «Наука», Л., 1989, 408 с.
- 4) Б.П. Захарченя, В.Л. Коренев. Интегрируя магнетизм в полупроводниковую электронику – УФН, 2005, т.175, в.6, с.629-635. <http://www.ufn.ru/> -доступ с компьютеров ННГУ
- 5) А. Ферг. Происхождение, развитие и перспективы спинтроники – УФН, 2008, т.178, в.12, с.1336-1348. <http://www.ufn.ru/> -доступ с компьютеров ННГУ.
- 6) П.А. Грюнберг. От спиновых волн к гигантскому магнетосопротивлению и далее – УФН, 2008, т.178, в.12, с.1349-1358.

в) программное обеспечение и 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. Journal of Applied Physics: <http://jap.aip.org/>
5. Journal of Physics D: Applied Physics: <http://iopscience.iop.org/0022-3727>

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения: специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории.

Для выполнения лабораторных работ:

1. Электронный парамагнитный резонанс. Ферромагнитный резонанс;
2. Аномальный эффект Холла в ферромагнитном полупроводнике (A^3Mn)B⁵

используется современное оборудование, которое постоянно применяется для проведения НИР на физическом факультете и в НИФТИ ННГУ, включая:

- Установку исследования эффекта Холла и измерения магнетосопротивления на базе криостата замкнутого цикла Janis, позволяющую проводить измерения как на постоянном, так и на переменном сигнале в диапазоне температур 10 – 300 К;

- Спектрометр спинового резонанса Bruker EMX Plus, позволяющий получать спектры ЭПР (ферромагнитного резонанса) в X-диапазоне (10 ГГц) СВЧ излучения в интервале магнитного поля 0 – 14 000 Э.

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 установленного ННГУ образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 11.04.04 – «Электроника и наноэлектроника».

Автор:

доцент кафедры физики полупроводников, электроники и наноэлектроники,
к.ф.-м.н. Ю.А. Данилов

Рецензент:

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

Заведующий кафедрой физики полупроводников, электроники и наноэлектроники,
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