

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 президиума Ученого совета ННГУ

протокол № 1 от 16.01.2024 г.

Рабочая программа дисциплины

Спинтроника

Уровень высшего образования

Магистратура

Направление подготовки / специальность

11.04.04 - Электроника и нанoeлектроника

Направленность образовательной программы

Твердотельная электроника и нанoeлектроника

Форма обучения

очная

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.01 Спинтроника относится к части, формируемой участниками образовательных отношений образовательной программы.

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-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>ПК-4.1: Знает тенденции и перспективы развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники</p> <p>ПК-4.2: Способен рассчитывать предельно допустимые и предельные режимы работы изделий микро- и нанoeлектроники</p> <p>ПК-4.3: Имеет навыки обоснованного выбора теоретических и экспериментальных методов исследования изделий микро- и нанoeлектроники</p>	<p>ПК-4.1: Знать фундаментальные основы и перспективы развития спинтронки как нового раздела электроники и нанoeлектроники, в том числе физико-химические принципы и методы получения материалов спинтронки, спиновые эффекты в наноструктурах; принципы функционирования приборов спинтронки.</p> <p>ПК-4.2: Уметь рассчитать предельные параметры приборов спинтронки.</p> <p>ПК-4.3: Иметь навыки выбора методов исследования параметров материалов и приборов спинтронки.</p>	Отчет по лабораторным работам	Экзамен: Контрольные вопросы

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	4
Часов по учебному плану	144
в том числе	

аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	32
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	16
- КСР	2
самостоятельная работа	58
Промежуточная аттестация	36 Экзамен

3.2. Содержание дисциплины

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

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/лабораторные работы), часы	Всего	
	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0
Введение	4	2		2	2
Эффекты с участием спина	12	4		4	8
Магнетизм атомов	12	4		4	8
Магнитные характеристики материалов. Диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики	22	6	8	14	8
Разбавленные магнитные полупроводники. Магнетизм наночастиц	12	4		4	8
Аномальный и спиновый эффекты Холла	20	4	8	12	8
Оптическая ориентация и спиновая инжекция. Механизмы спиновой релаксации	12	4		4	8
Приборы спинтроники (спиновый клапан, спиновый транзистор, спиновый светодиод)	12	4		4	8
Аттестация	36				
КСР	2			2	
Итого	144	32	16	50	58

Содержание разделов и тем дисциплины

1. Введение. Цель и задачи курса. Основная и дополнительная литература. История развития спинтроники. Понятие спина электрона, гиромангнитное 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 $E_g = 0$. 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.

Практические занятия /лабораторные работы организуются, в том числе, в форме практической подготовки, которая предусматривает участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

На проведение практических занятий / лабораторных работ в форме практической подготовки отводится: очная форма обучения - 16 ч.

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

1. Кудрин Алексей Владимирович.

Аномальный эффект холла : практикум / А. В. Кудрин, Ю. А. Данилов ; ННГУ им. Н. И. Лобачевского, Физический факультет, Кафедра физики полупроводников и оптоэлектроники. - Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2017. - 16 с. - Текст : электронный.

Постоянная ссылка на документ: <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=823053&idb=0>

2. Данилов Юрий Александрович.

Основы спинтроники : учебное пособие / Ю. А. Данилов, Е. С. Демидов, А. А. Ежевский ; ННГУ им. Н. И. Лобачевского. - Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2009. - 173 с. - Текст : электронный.

Постоянная ссылка на документ: <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=849409&idb=0>

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

5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:

5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Отчет по лабораторным работам) для оценки сформированности компетенции ПК-4:

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.

Критерии оценивания (оценочное средство - Отчет по лабораторным работам)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Раскрыта тема задания
не зачтено	Тема задания не раскрыта

5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения 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. Ошибок нет.	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	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов

						задания в полном объеме	
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. 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 некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым и 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

Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-4

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.
1. Принцип работы спинового светоизлучающего диода. Приемы вывода излучения.
2. Магнитные разбавленные полупроводники. Фазовая диаграмма для выращивания GaMnAs. Магнитные и электрические свойства, типичные значения температуры Кюри для слоев GaMnAs, нанесенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии.
3. Основные механизмы спиновой релаксации. Механизм Эллиотта-Яфета в полупроводниках.
4. Механизм Дзяконова-Переля.
5. Механизм Бира-Аронова-Пикуса.
6. Определения – магнитная восприимчивость, относительная и абсолютная магнитная проницаемость. Связь между этими характеристиками. Магнитная индукция, единицы измерения. Классификация магнетиков.
7. Диамагнетизм орбитального движения электронов в атомах; классический вывод формулы для магнитной восприимчивости. Диамагнетизм Ландау в металлах.
8. Парамагнетизм в системе невзаимодействующих магнитных моментов. Вывод закона Кюри. Парамагнетизм Паули.
9. Обменное взаимодействие, обменный интеграл и случаи ферромагнетизма и антиферромагнетизма.
10. Примеры ферромагнетиков, антиферромагнетиков и ферримагнетиков. Закон Кюри-Вейсса.
11. Доменная структура и стенки Блоха. Энергия анизотропии. Коэрцитивное поле и гистерезис.
12. Аномальный эффект Холла в магнетиках. Определение характеристик материала из зависимости $R_H(B)$.
13. Магнетизм малых частиц. Зависимость коэрцитивного поля от размеров частиц. Однодоменные частицы
14. Суперпарамагнетизм. Температура блокировки.
15. 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 АЗВ5 (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?

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
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.
отлично	Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета в рамках изученных алгоритмов и подходов. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности.
очень хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает хороший уровень знания вопросов билета и отвечает с небольшими неточностями.
хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает средний уровень знания вопросов билета и отвечает на некоторые дополнительные вопросы преподавателя (в рамках билета).
удовлетворительно	Удовлетворительная подготовка. Студент показывает удовлетворительное знание вопросов билета и знание базовых понятий, отвечая с наводящими вопросами преподавателя.
неудовлетворительно	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.
плохо	Подготовка совершенно недостаточна. Последующая пересдача возможна

Оценка	Критерии оценивания
	только с комиссией.

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

1. Данилов Юрий Александрович. Основы спинтроники : учебное пособие / Ю. А. Данилов, Е. С. Демидов, А. А. Ежевский ; ННГУ им. Н. И. Лобачевского. - Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2009. - 173 с. - Текст : электронный., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=849409&idb=0>.
2. Ежевский Александр Александрович. Спин-зависимые явления в твердых телах : учебно-методическое пособие / А. А. Ежевский ; ННГУ им. Н. И. Лобачевского, Физический факультет, Кафедра физики полупроводников электроники и наноэлектроники. - Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2023. - 103 с. - Текст : электронный., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=877778&idb=0>.
3. Аплеснин С. С. Основы спинтроники / Аплеснин С. С. - 2-е изд. испр. - Санкт-Петербург : Лань, 2022. - 288 с. - Рекомендовано УМО по классическому университетскому образованию РФ в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 010700.68 — «Физика». - Книга из коллекции Лань - Физика. - ISBN 978-5-8114-1060-6., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=799675&idb=0>.

Дополнительная литература:

1. Ежевский Александр Александрович. Исследование спиновой релаксации носителей тока в полупроводниках : лабораторный практикум по курсу «Основы спинтроники» (описание к лабораторной работе) / А. А. Ежевский ; ННГУ им. Н. И. Лобачевского, Физический факультет, Кафедра физики полупроводников и оптоэлектроники. - Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2018. - 30 с. - Текст : электронный., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=795709&idb=0>.
2. Дорохин Михаил Владимирович. Гальваномагнитные и оптические методы исследования полупроводниковых наноструктур : учебно-методическое пособие / М. В. Дорохин, А. В. Кудрин ; ННГУ им. Н. И. Лобачевского. - Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2012. - 80 с. - Текст : электронный., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=851261&idb=0>.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

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: <https://pubs.aip.org/aip/jap>

5. Applied Physics Letters: <https://pubs.aip.org/aip/apl>
6. Physical Review B: <https://journals.aps.org/prb/>

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, специализированным оборудованием: Для выполнения лабораторных работ:

1. Электронный парамагнитный резонанс. Ферромагнитный резонанс;
 2. Аномальный эффект Холла в ферромагнитном полупроводнике (A3Mn)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 ОС ННГУ по направлению подготовки/специальности 11.04.04 - Электроника и нанoeлектроника.

Автор(ы): Кудрин Алексей Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент.

Рецензент(ы): Бурдов Владимир Анатольевич, доктор физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Павлов Дмитрий Алексеевич, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 09.01.2024, протокол № б/н.