

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Б1.В.17 СПИНТРОНИКА

Направление подготовки (специальность) 03.05.02 Фундаментальная и прикладная физика

Профиль подготовки (специализация)

Форма обучения очная

Год набора 2024

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Программу составили
доцент, к.ф.-м.н. А.С.Тарасов

1 Цели и задачи изучения дисциплины

1.1 Цель преподавания дисциплины:

Формирование у студентов понимания природы явлений, связанных со спин-зависимым электронным транспортом в различных классах магнитных и гибридных наноструктур, навыков самостоятельного исследования теоретических проблем спин-зависимых явлений, анализа экспериментальных данных, способность решения вопросов, связанных с созданием принципиально новых электронных устройств, построенных на возможности манипулировать спиновыми степенями свободы.

1.2 Задачи изучения дисциплины:

Формирование представлений об особенностях проявления спин-зависимого электронного транспорта и связанных с ним явлений в низкоммерных магнитных и гибридных структурах

изучение теоретических подходов и моделей, описывающих физику явлений при протекании спин-поляризованного тока в наноструктурах;

освоение основных понятий и методов теоретического описания актуальных проблем теории спинового транспорта в наноструктурах;

развитие умения использовать современные экспериментальные методики для исследования явлений спин-зависимого электронного транспорта;

1.3 Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы высшего образования:

Код и наименование индикатора достижения компетенции	Запланированные результаты обучения по дисциплине
ПК-1 Способен применять знания в области фундаментальной и прикладной физики в научно-исследовательских и прикладных работах	
ПК-1.1 Планирует, организывает и проводит научные и прикладные исследования, используя знания в области фундаментальной и прикладной физики	знать об особенностях проявления спин-зависимого электронного транспорта и связанных с ним явлений в низкоразмерных магнитных и гибридных структурах владеть навыками самостоятельного исследования теоретических проблем спин-зависимых явлений
ПК-1.2 Анализирует отечественные и зарубежные достижения в области фундаментальной и прикладной физики для осуществления выбора форм и методов научно-исследовательской деятельности в соответствии с профилем научного исследования	знать отечественные и зарубежные достижения в области спинтроники уметь анализировать достижения в области спинтроники

Дисциплина реализуется без применения ЭО и ДОТ

2 Объем дисциплины (модуля)

Вид учебной работы	Всего, зачетных единиц (акад.час)	Семестр
		11
Общая трудоемкость дисциплины	2 (72)	2 (72)
Контактная работа с преподавателем:	1 (36)	1 (36)
занятия лекционного типа	1 (36)	1 (36)
Самостоятельная работа обучающихся	1 (36)	1 (36)
Вид промежуточной аттестации (Зачет)		Зачёт

3 Содержание дисциплины (модуля)

№ п/п	Вид работ	Темы занятия	Объем часов	Семестр /курс	Часы в эл. формате
Раздел 1. Спектр электронных состояний и транспортные свойства наноструктур					
1.	Лек	Квантовый характер электронных процессов в наноструктурах. Принцип размерного квантования. Электронные состояния в низкоразмерных структурах. Простейшие квантовые модели. Прямоугольная яма. Треугольная яма. Двойная квантовая яма. Двумерный канал. Плотность электронных состояний в низкоразмерных структурах. Особенности квантования энергетического спектра электронов в гетеропереходах.	6	11	
2.	Ср	Самостоятельная работа	10	11	
Раздел 2. Спин-вентильные структуры; эффект гигантского магнитосопротивления					
1.	Лек	Спиновая поляризация электронов в ферромагнитном металле. Поляризованный по спину ток. Феноменологическое описание и микроскопический механизм эффекта ГМС. Модель свободных электронов. Проводимость ферромагнитного металла (модель «двух токов»). Модель «двух токов» для эффекта ГМС. Роль магнитного состояния, управление магнитным состоянием многослойных магнитных структур. Межслоевое обменное взаимодействие в многослойных магнитных структурах. Экспериментальные факты. Обзор моделей межслоевого обмена. Феноменологический подход при описании магнитного взаимодействия через немагнитную прослойку. Модель спин-зависимого отражения для обменного взаимодействия через немагнитный металл (модель «квантовой ямы»), общий случай. Приближение свободных электронов. Обменное взаимодействие через полупроводниковую прослойку. Диэлектрическая прослойка. Способы управления межслоевым обменным взаимодействием: спиновая инжекция, оптическое излучение.	6	11	
2.	Ср	Самостоятельная работа	10	11	
Раздел 3. Магнитные туннельные структуры.					
1.	Лек	Классические туннельные переходы с немагнитными электродами. Туннельный ток. Спин-поляризованный туннельный ток в структуре ферромагнетик/диэлектрик/сверхпроводник Спин-поляризованный электронный транспорт в туннельных структурах с ферромагнитными электродами. Туннельное магнитосопротивление. Теоретические модели спин-зависимого туннелирования в магнитных туннельных структурах. Модель Жульера. Модель Слончевского (Slonczewski).	4	11	
2.	Лек	Зависимость туннельного магнитосопротивления от магнитного поля. Зависимость туннельного магнитосопротивления от напряжения смещения. Зависимость туннельного магнитосопротивления от температуры. Роль интерфейса в туннельных структурах.	2	11	
3.	Лек	Эффект спиновой фильтрации в туннельных структурах с ферромагнитным потенциальным барьером. Туннельный переход с обменным смещением. Структуры с двумя потенциальными барьерами. Ферроэлектрический туннельный барьер. Гибридный магнитный туннельный барьер с ферромагнитным барьером. Кооперативные системы магнитных туннельных контактов. Спин-зависимый электронный транспорт в туннельных структурах в условиях внешних воздействий. Влияние СВЧ излучения. Влияние оптического излучения	4	11	
4.	Ср	Самостоятельная работа	6	11	
Раздел 4. Спин-зависимый транспорт в гибридных структурах.					

1.	Лек	Гибридные структуры. Спиновая инжекция. Проблема «рассогласование проводимостей». Спиновая аккумуляция. Спиновый ток в полупроводниках. Спиновая релаксация. Спиновый эффект Холла. Обратный спиновый эффект Холла. Спиновый эффект Зеебека. Структуры с «органикой» для спинтроники.	6	11	
2.	Ср	Самостоятельная работа	5	11	
Раздел 5. Спиновый транспорт и спиновая динамика в магнитных наноструктурах					
1.	Лек	Эффект переноса спина. Механизм управления намагниченностью наноразмерных магнетиков поляризованным током. Взаимосвязь поляризованного тока и спиновой динамики. Обобщенное уравнение движения намагниченности (с учетом спин-поляризованного тока). Генерация СВЧ излучения. Диодный эффект, детектирования СВЧ излучения. Нелинейные свойства в СВЧ диапазоне.	4	11	
2.	Лек	Взаимосвязь спиновой динамики и спинового тока в структурах ферромагнитный диэлектрик/металл. Доменные стенки в нанопроволоках, их динамика	4	11	
3.	Ср	Самостоятельная работа	5	11	
4.	Зачёт	Зачет		11	

4 Учебно-методическое обеспечение дисциплины

4.1 Печатные и электронные издания:

1. Драгунов В. П., Неизвестный И. Г., Гридчин В. А. Основы нанoeлектроники: учеб. пособие для студентов вузов. - Москва: Физматкнига, 2006. - 494 с..

2. Волков Н. В., Попков С. И. Магнетизм твердых тел; диа- и парамагнетизм; магнитный порядок (физика магнитных явлений) [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие [для студентов программ 011200.68.02 «Физика конденсированного состояния вещества»; 011200.68.06 «Физика магнитных явлений»]. - Красноярск: СФУ, 2012. - – Режим доступа: <http://lib3.sfu-kras.ru/ft/lib2/elib/b22/i-885602.pdf>.

3. Ищенко А. А., Гиричев Г. В., Тарасов Ю. И. Дифракция электронов: структура и динамика свободных молекул и конденсированного состояния вещества: монография. - Москва: Физматлит, 2012. - 616 с..

4. Стародуб В. А., Стародуб Т. Н., Кажева О. Н., Брегадзе В. И. Материалы современной электроники и спинтроники: [монография]. - Москва: Физматлит, 2018. - 423 с..

5. Павлов П. В., Хохлов А. Ф. Физика твердого тела [Электронный ресурс]: учебник для вузов по направлению "Физика" и специальностям "Физика и технология материалов и компонентов электронной техники", "Микроэлектроника и полупроводниковые приборы". - Москва: Высшая школа, 2000. - 494 с. – Режим доступа: <http://lib3.sfu-kras.ru/ft/lib2/elib/b22/0046414.pdf>.

6. Демиховский В.Я., Вугальтер Г.А. Физика квантовых низкоразмерных структур: научное издание. - Москва: Логос, 2000. - 248 с..

7. Дырдин В. В., Польшгалов Ю. И., Мальшин А. А. Физика твердого тела: учебное пособие. - Кемерово: КузГТУ, 2012. - 108 с..

8. Александров К. С., Зиненко В. И., Сорокин Б. П., Турчин П. П., Сорокин П. Б., Бурков С. И., Глушков Д. А., Четвергов Н. А., Софронова С. Н., Токарев Н. А. Теоретическая физика твердого тела [Электронный ресурс]: электрон. учеб.-метод. комплекс дисциплины. - Красноярск: СФУ, 2007. - on-line – Режим доступа: http://lib3.sfu-kras.ru/ft/lib2/ELIB_DC/UMKD/i-656895.zip.

9. Овчинников С. Г., Орлов Ю. С. Квантовая теория магнетизма [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие для самостоятельной работы [для студентов напр. 010700.62 «Физика», спец. 010701.65 «Физика», 010704.65 «Физика конденсированного состояния вещества»]. - Красноярск: СФУ, 2012. - – Режим доступа: <http://lib3.sfu-kras.ru/ft/lib2/elib/b22/i-165552.pdf>.

4.2 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение, в том числе отечественного производства (программное обеспечение, на которое университет имеет лицензию, а также свободно распространяемое программное обеспечение):

1. Microsoft Office Professional Plus 2010 Russian. Офисный пакет Microsoft Office.

2. Microsoft Windows Professional 10 Russian. Операционная система Windows.

3. Adobe Acrobat Reader DC . Программное обеспечение для просмотра и печати файлов PDF.

4.3 Интернет-ресурсы, включая профессиональные базы данных и информационные справочные системы:

1. Поисковая машина электронных книг. <http://www.poiskknig.ru>

2. Файловый архив студентов <https://studfile.net/>

3. Электронно-библиотечная система СФУ <http://bik.sfu-kras.ru/>

4. Успехи физических наук <https://ufn.ru/>

5. Научная электронная библиотека <https://elibrary.ru/defaultx.asp?>

5 Фонд оценочных средств

Фонд оценочных средств является приложением к рабочей программе дисциплины (модуля), хранится на кафедре, обеспечивающей преподавание данной дисциплины (модуля).

6 Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

учебная аудитория для проведения лекционных, семинарских и практических занятий: Специализированная мебель, демонстрационное оборудование, АРМ преподавателя, подключение к сети «Интернет» и индивидуальный неограниченный доступ в ЭИОС университета

помещение для самостоятельной работы обучающихся: специализированная мебель, демонстрационное оборудование, АРМ преподавателя, АРМ обучающихся, подключение к сети «Интернет» и индивидуальный неограниченный доступ в ЭИОС университета

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

По дисциплине (модулю)/ практике Б1.В.17 Спинтроника

Направление подготовки/специальность

03.05.02 Фундаментальная и прикладная физика

Образовательная программа

03.05.02.30 Фундаментальная и прикладная физика

1 Перечень компетенций с указанием индикаторов их достижения, соотнесенных с результатами обучения по дисциплине (модулю), практики и оценочными средствами

Семестр ¹	Код и содержание индикатора компетенции	Результаты обучения ²	Оценочные средства ³
ПК-1: Способен применять знания в области фундаментальной и прикладной физики в научно-исследовательских и прикладных работах			
В	ПК-1.1: Планирует, организывает и проводит научные и прикладные исследования, используя знания в области фундаментальной и прикладной физики	знать об особенностях проявления спин-зависимого электронного транспорта и связанных с ним явлений в низкоммерных магнитных и гибридных структурах	Реферат Контрольные вопросы к зачету
		владеть навыками самостоятельного исследования теоретических проблем спин-зависимых явлений	Реферат Контрольные вопросы к зачету
В	ПК-1.2: Анализирует отечественные и зарубежные достижения в области фундаментальной и прикладной физики для осуществления выбора форм и методов научно-исследовательской деятельности в соответствии с профилем научного исследования	знать отечественные и зарубежные достижения в области спинтроники	Реферат Контрольные вопросы к зачету
		уметь анализировать достижения в области спинтроники	Реферат Контрольные вопросы к зачету

¹ Семестры указываются по порядку, для каждого индикатора

² Указываются результаты обучения по дисциплине (модулю), практике, соотнесенные с индикатором достижения компетенции.

³ Указываются оценочные средства для каждого индикатора.

2. Типовые оценочные средства или иные материалы, с описанием шкал оценивания и методическими материалами, определяющими процедуру проведения и оценивания достижения результатов обучения

Темы рефератов:

1. Эффекты Холла: нормальный, аномальный, квантовый, спиновый.
2. Эффекты положительного и отрицательного магнитосопротивления. Анизотропное магнитосопротивление. Квантовые поправки к проводимости.
3. Магнитные явления в твердых телах. Ферромагнитные тонкие пленки и наночастицы.
4. Плотность электронных состояний, материалы и структуры для спинтроники.
5. История развития устройств ГМС и ТМС.
6. СВЧ устройства спинтроники: генерация, детектирование и харвестинг СВЧ излучения.
7. Нанотехнологии и наноструктуры в устройствах записи, обработки и передачи информации.

Методические рекомендации по подготовке реферата:

Написание реферата — это важный процесс, который помогает усвоить материал, развить аналитические и исследовательские навыки. Ниже приведены методические рекомендации, которые могут помочь в этом:

1. Выбор темы

- Актуальность: Выбирайте тему, которая интересует вас и имеет смысл в контексте учебного курса или современности.
- Специфика: Уточняйте и конкретизируйте тему, чтобы не охватывать слишком широкий пласт информации.

2. Сбор информации

- Источники: Используйте разнообразные источники: книги, научные статьи, интернет-ресурсы, учебники.
- Критический подход: Оценивайте достоверность и актуальность информации, обращая внимание на авторитетность источников.

3. Структура реферата

- Титульный лист: Указывайте название работы, ФИО, учебное заведение, дисциплину и дату.
- Содержание: Составьте оглавление, чтобы читатель мог легко ориентироваться в работе.
- Введение: Ознакомьте с темой, обоснуйте ее актуальность и поставьте цели и задачи.
- Основная часть: Разделите на логические главы и подразделы. Освещайте ключевые аспекты темы, приводите примеры и аргументы.
- Заключение: Подведите итоги работы, сделайте выводы и предложения по дальнейшему изучению темы.

- Список использованных источников: Перечислите все источники, на которые вы опирались при написании реферата, в соответствующем формате.

4. Стиль и язык

- Ясность и точность: Используйте простой и понятный язык, избегайте избыточной терминологии без объяснения.

- Логичность: Структурируйте мысли так, чтобы они следовали одна из другой, создавая логическую цепочку.

5. Оформление

- Реферат должен быть оформлен в соответствии с требованиями Стандарта университета «Общие требования к построению, изложению и оформлению документов учебной деятельности» [Электронный ресурс] / Красноярск: СФУ, 2021, СТУ 7.5-07-2021, <http://www.sfu-kras.ru/node/8127>

6. Проверка и редактирование

- Корректурa: Проверьте работу на наличие грамматических, орфографических и стилистических ошибок.

- Чтение вслух: Прочитайте текст вслух — это поможет выявить неясности и трудные для восприятия места.

7. Временные рамки

- Планирование: Определите срок написания реферата и распределите задания по времени: поиск информации, написание черновика, исправление и оформление.

Следуя этим рекомендациям, вы сможете написать качественный и структурированный реферат, который продемонстрирует ваши знания и лучшие исследовательские навыки.

Реферат можно сдать по мере готовности в течение семестра. Без сдачи реферата студент не допускается к зачету.

Критерии оценки реферата:

«Зачтено» за реферат выставляется обучающемуся, если:

1. Содержание реферата в целом соответствует теме задания.

2. Продемонстрировано владение понятийно-терминологическим аппаратом дисциплины, отсутствуют ошибки в употреблении терминов. Показано умелое использование категорий и терминов дисциплины. Продемонстрировано умение аргументированно излагать собственную точку зрения. Изложение отчасти сопровождается адекватными иллюстрациями (примерами) из практики.

3. Реферат в достаточной степени структурирован и выстроен в заданной логике без нарушений общего смысла. Части ответа логически взаимосвязаны. Отражена логическая структура проблемы (задания): постановка проблемы – аргументация – выводы. Объем ответа незначительно превышает заданные рамки при сохранении смысла.

4. Достаточная степень самостоятельности, оригинальность

в представлении материала.

«**Не зачтено**» выставляется обучающемуся, если:

1. Содержание реферата не соответствует теме задания или соответствует ему в очень малой степени. Продемонстрировано крайне низкое (отрывочное) знание фактического материала, много фактических ошибок – практически все факты (данные) либо искажены, либо неверны.
2. Продемонстрировано крайне слабое владение понятийно-терминологическим аппаратом дисциплины (неуместность употребления, неверные аббревиатуры, искаженное толкование и т.д.), присутствуют многочисленные ошибки в употреблении терминов.
3. Реферат представляет собой сплошной текст без структурирования, нарушена заданная логика. Части реферата не взаимосвязаны логически.

Контрольные вопросы к зачету:

1. Принцип размерного квантования.
2. Плотность электронных состояний, двумерный электронный газ.
3. Плотность электронных состояний, одномерная система.
4. Электронный энергетический спектр в прямоугольной квантовой яме.
5. Электронный энергетический спектр в треугольной квантовой яме.
6. Энергетический спектр электронов в гетеропереходах.
7. Поляризация электронов проводимости.
8. Модель «двух токов» для эффекта ГМС.
9. Межслоевое обменное взаимодействие в многослойных магнитных структурах.
10. Модель «квантовой ямы» для обменного взаимодействия через немагнитный металл.
11. Туннельный ток, формула Симмонса.
12. Туннельное магнитосопротивление. Модель Жульера.
13. Модель Слончевского для туннельного магнитосопротивления.
14. Зависимость туннельного магнитосопротивления от напряжения смещения.
15. Зависимость туннельного магнитосопротивления от температуры.
16. Спиновая фильтрация в туннельных структурах с ферромагнитным потенциальным барьером.
17. Ферроэлектрический туннельный барьер.
18. Кооперативные системы магнитных туннельных контактов.
19. Туннельный барьер в условиях СВЧ излучения.
20. Влияние оптического излучения на транспорт через туннельный барьер.

21. Гибридные структуры.
22. Спиновая инжекция.
23. Проблема «рассогласование проводимостей».
24. Спиновая аккумуляция.
25. Спиновая релаксация.
26. Спиновый эффект Холла.
27. Обратный спиновый эффект Холла.
28. Спиновый эффект Зеебека.
29. Эффект переноса спина.
30. Механизм управления намагниченностью наноразмерных магнетиков поляризованным током.
31. Обобщенное уравнение движения намагниченности.
32. Генерация СВЧ излучения при протекании спин-поляризованного тока через магнитную структуру.
33. Диодный эффект, детектирование СВЧ излучения.
34. Взаимосвязь спиновой динамики и спинового тока в структурах ферромагнитный диэлектрик/металл.
35. Динамика доменных стенок в нанопроволоках.

Методические рекомендации к зачету:

Форма проведения зачета - устный опрос по билетам. В билет включаются два теоретических вопроса из разных разделов программы.

Критерии оценивания знаний студентов на зачете

Шкала оценивания	
незачет	зачет
Студент обнаруживает существенные пробелы в знаниях основного учебного материала по дисциплине. Уровень знаний ниже минимальных требований.	Студент демонстрирует систематический характер знаний по дисциплине. При изложении материала допущено несколько несущественных погрешностей. Студент испытывает незначительные трудности в ответах на дополнительные вопросы.

Разработчик



А.С. Тарасов