

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы физики
и исследований им. Ландау
А.В. Рогачев**

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Спинтроника
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра фундаментальной и прикладной физики микро- и наноструктур
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: И.В. Бобкова, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры фундаментальной и прикладной физики микро- и наноструктур
10.04.2023

Аннотация

Курс знакомит студентов с одной из активно развивающихся областей современной физики конденсированного состояния – спинтроникой. Этот раздел физики конденсированного состояния включает в себя широкий круг фундаментальных эффектов, обусловленных наличием спина у различных частиц и возбуждений. В рамках данного курса рассматриваются эффекты гигантского и туннельного магнитосопротивления, строится теория электронного спинового разбаланса в металлах, полупроводниках и гибридных структурах, описываются методы инъекции электронного спина и его детектирования, разбираются базовые принципы функционирования спиновых транзисторов, подробно изучаются спиновые вращательные моменты различной физической природы и вызываемая ими магнитная динамика. Большое внимание уделяется изучению спин-орбитального взаимодействия и магнитоэлектрических эффектов, в основе которых лежит спин-орбитальное взаимодействие: спинового эффекта Холла, прямого и обратного магнитоэлектрических эффектов. Изучаются механизмы спиновой релаксации. Даются основы и разбираются некоторые актуальные вопросы спиновой калоритроники. Рассматриваются базовые вопросы и концепции магноники магнитных изоляторов, взаимная конверсия электронных и магнетонных спиновых токов, описывается общее современное состояние области магноники.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Познакомить студентов старших курсов с широким кругом фундаментальных спиновых эффектов и их приложениями.

Задачи дисциплины

Задачами учебной дисциплины являются: формирование у обучающихся специализированных знаний о природе эффектов магнитосопротивления, свойствах электронного и магнетонного спинового транспорта, природе магнитоэлектрических эффектов и их прикладном использовании, различных методах контроля намагниченности, спиновой калоритроники. Т.к. спинтроника является активно развивающейся областью физики конденсированного состояния, важнейшей задачей курса является знакомство студентов с современной литературой по данной тематике. Также в задачи курса входит обзор основных экспериментальных методик и теоретических подходов, используемых в спинтронике.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.1 Формулирует в рамках обозначенной проблемы, цель, задачи, актуальность, значимость (научную, практическую, методическую и иную в зависимости от типа проекта), ожидаемые результаты и возможные сферы их применения
	УК-2.2 Способен прогнозировать результат деятельности и планировать последовательность шагов для достижения данного результата. Формирует план-график реализации проекта в целом и план контроля его выполнения

	УК-2.4 Представляет публично результаты проекта (или отдельных его этапов) в форме отчетов, статей, выступлений на научно-практических конференциях, семинарах и т.п.
УК-3 Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной задачи	УК-3.2 Учитывает в своей социальной и профессиональной деятельности интересы, особенности поведения и мнения (включая критические) людей, с которыми работает/взаимодействует, в том числе посредством корректировки своих действий
	УК-3.3 Способен предвидеть результаты (последствия) как личных, так и коллективных действий
УК-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	УК-4.1 Способен вести обмен деловой информацией в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и не менее чем на одном иностранном языке
	УК-4.2 Владеет навыками, необходимыми для написания, письменного перевода и редактирования различных академических текстов (рефератов, эссе, обзоров, статей и т.д.)
	УК-4.3 Способен представлять результаты академической и профессиональной деятельности на различных научных мероприятиях, включая международные
	УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия
УК-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	УК-6.1 Умеет решать задачи собственного личностного и профессионального развития, определять и реализовывать приоритеты совершенствования собственной деятельности
	УК-6.2 Оценивает свою деятельность, соотносит цели, способы и средства выполнения деятельности с её результатами
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)

ограничения различных методов решения	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.1 Способен работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
	ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

Основные теоретические подходы к описанию магнитосопротивления, основные экспериментальные результаты, основные приложения эффекта магнитосопротивления; теорию инжекции и переноса спина в металлах и полупроводниках, методы детектирования спинового разбаланса, основные экспериментальные результаты, механизмы релаксации спина; методы описания магнитной динамики, теорию управления намагниченностью и движения магнитных дефектов магнитным полем и электрическим током, основные экспериментальные результаты по перевороту магнитного момента и движению магнитных дефектов в различных системах и приложения; природу, виды и основные свойства спин-орбитальной связи в твердых телах, основные магнитоэлектрические эффекты, вызванные спин-орбитальным взаимодействием; основы спиновой калоритроники, основные экспериментальные результаты и теоретические подходы, природу и приложения гигантского термоспинового эффекта в сверхпроводящих системах; обзор современного состояния области магноники, спектры спиновых волн в различных магнитных системах, основные экспериментальные результаты по магнотонному переносу спинового момента, механизмы конверсии магнотонного спинового сигнала в электронный.

уметь:

Применять диффузионную теорию для описания спинового разбаланса в металлах, полупроводниках и мезоскопических системах, пользоваться уравнением Ландау-Лифшица-Гильберта для описания магнитной динамики и рассчитывать с его помощью магнитную динамику и спектры возбуждений в различных магнитных системах, рассчитывать спектры квазичастиц в различных материалах со спин-орбитальным взаимодействием, рассчитывать величину магнитоэлектрических эффектов, описывать эффекты спиновой калоритроники в рамках подхода кинетического уравнения, решать задачи о взаимной конверсии электронного и магнетонного спиновых сигналов, исследовать взаимодействующие магнетонные моды в различных мезоскопических системах в рамках уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта.

владеть:

- навыками решения задач, основанных на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях;
- навыками освоения большого объема информации;
- навыками самостоятельной работы в лаборатории и Интернете;
- навыками теоретического анализа реальных задач, связанных со свойствами спиновых систем.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	GMR, TMR и родственные эффекты	2			5
2	Спиновая аккумуляция, инжектирование и детектирование электронного спина	4			10
3	Спиновые полевые транзисторы	2			5
4	Спиновые вращательные моменты и динамика намагниченности	6			15
5	Спин-орбитальное взаимодействие	4			10
6	Магнитоэлектрические эффекты	4			10
7	Спиновая релаксация	2			5
8	Спиновая калоритроника	2			5
9	Магнетоника	4			10
Итого часов		30			75
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

1. GMR, TMR и родственные эффекты

Спин-зависимый транспорт в ферромагнитных металлах. Экспериментальные результаты по GMR. Теоретические подходы к описанию GMR. TMR. BMR. Другие эффекты магнитосопротивления: нормальное магнитосопротивление, анизотропное магнитосопротивление. Приложения эффектов GMR и TMR.

2. Спиновая аккумуляция, инжектирование и детектирование электронного спина

Спиновый ток и спиновый разбаланс. Электрическая инжекция спина через интерфейс ферромагнетик/нормальный металл. Сопротивление F/N интерфейса. Нелокальное детектирование спинового разбаланса.

3. Спиновые полевые транзисторы

Принцип работы спинового полевого транзистора Datta-Das.

4. Спиновые вращательные моменты и динамика намагниченности

Эффективное внутреннее поле магнетика. Уравнение Ландау-Лифшица-Гильберта. Вращательные моменты, создаваемые электрическим током в ферромагнетике в рамках s-d модели. Динамика намагниченности в металлическом спиновом вентиле. Индуцированное магнитным полем движение доменных стенок. Индуцированное электрическим током движение доменных стенок.

5. Спин-орбитальное взаимодействие

Внутреннее спин-орбитальное взаимодействие в атоме. Спин-орбитальное взаимодействие в твердом теле. Спин-орбитальное взаимодействие типа Рашбы и типа Дрессельхауса. Спектры квазичастиц в материале со спин-орбитальным взаимодействием.

6. Магнитоэлектрические эффекты

Спиновый эффект Холла. Спин-гальванический эффект. Прямой магнитоэлектрический эффект. Прямой магнитоэлектрический эффект в 3D топологических изоляторах.

7. Спиновая релаксация

Механизм Эллиота-Яфета. Механизм Дьяконова-Переля. Механизм Бира-Аронова-Пикуса. Механизм спиновой релаксации за счет сверхтонкого взаимодействия с ядерными спинами.

8. Спиновая калоритроника

Спин-зависящий эффект Зеебека. Спиновый эффект Пельтье. Гигантский спин-зависящий эффект Зеебека в сверхпроводящих гетероструктурах. Термоиндуцированное движение магнитных дефектов в S/F гетероструктурах.

9. Магноники

Магنونные спектры и магنونный спиновый ток. Взаимная конверсия электронного и магنونного спиновых токов. Обзор современных результатов в области магноники.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Необходимое оборудование для лекций: компьютер и мультимедийное оборудование (проектор, звуковая система).

Необходимое программное обеспечение: офисный пакеты Adobe Acrobat, Microsoft Office или аналоги для рефератов и презентаций, пакеты прикладных программ Matlab и/или Python (при наличии технической возможности).

Обеспечение самостоятельной работы – доступ в Интернет, базы данных по научной периодике.

6.Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Nanomagnetism and spintronics, edited by Teruya Shinjo, Second Edition, Elsevier, 2014.
2. Y. Xu, D.D. Awschalom, and J. Nitta, Handbook of Spintronics, Springer (2016).
3. S. Bandyopadhyay, M. Cahay, "Introduction to Spintronics", Second Edition, CRC Press, 2016
4. I. Zutic, J. Fabian, and S. Das Sarma, "Spintronics: Fundamentals and applications", Rev. Mod. Phys. **76**, 323 (2004).
5. "Hand book of spin transport and magnetism", ed. by E.Y. Tsymbal and I. Zutic, CRC Press, 2012.
6. J. Shibata, G. Tatara and H. Kohno, "A brief review of field- and current-driven domain-wall motion", J. Phys. D: Appl. Phys. **44** 384004 (2011).
7. S. D. Ganichev, M. Trushin, J. Schliemann, "Spin polarization by current", in Handbook of Spin Transport and Magnetism, 2nd ed. edited by E.Y. Tsymbal and I. Zutic (Chapman and Hall, 2016)
8. G. E. W. Bauer, E. Saitoh and B. J. van Wees, Spin caloritronics, Nature Mat. **11**, 391 (2012).
9. A. V. Chumak, V. I. Vasyuchka, A. A. Serga and B. Hillebrands, Magnon spintronics, Nature Phys. **11**, 453 (2015).

Дополнительная литература

1. Baibich MN, Broto JM, Fert A, Nguyen Van Dau F, Petroff F, Etienne P, et al. Phys. Rev. Lett. **61**, 2472 (1988).
2. Jedema FJ, Heersche HB, Filip AT, Baselmans JJA, van Wees BJ. Nature **410**, 345 (2001); Nature **416**, 713 (2002).
3. N.L. Schryer and L.R. Walker, J. Appl. Phys. **45**, 5406 (1974).
4. A. Mougin, M. Cormier, J. P. Adam, P. J. Metaxas and J. Ferre, Europhys. Lett. **78**, 57007 (2007).
5. G. S. D. Beach, C. Nistor, C. Knutson, M. Tsoi, and J. L. Erskine, Nature Mat. **4**, 741 (2005).
6. J. Grollier, A. Chanthbouala, R. Matsumoto, A. Anane, V. Cros, F. Nguyen van Dau, and A. Fert, C. R. Physique **12**, 309 (2011).
7. J. E. Hirsch, "Spin Hall effect", Phys. Rev. Lett. **83**, 1834 (1999).
8. J. Sinova, D. Culcer, Q. Niu, N. A. Sinitsyn, T. Jungwirth and A. H. MacDonald, "Universal intrinsic Spin Hall Effect", Phys. Rev. Lett. **92**, 126603 (2004).
9. E. G. Mishchenko, A.V. Shytov, and B. I. Halperin, Phys. Rev. Lett. **93**, 226602 (2004).
10. C. H. Li, O. M. J. van't Erve, J. T. Robinson, Y. Liu, L. Li and B. T. Jonker, Nature Nanotech. **9**, 218 (2014).
11. K. Uchida, S. Takahashi, K. Harii, J. Ieda, W. Koshibae, K. Ando, S. Maekawa, and E. Saitoh "Observation of the spin Seebeck effect", Nature **455**, 778 (2008).
12. J. Flipse, F. K. Dejene, D. Wagenaar, G. E. W. Bauer, J. Ben Youssef and B. J. van Wees, "Observation of the Spin Peltier Effect for magnetic insulators", Phys. Rev. B. **113**, 027601 (2014).
13. A. Ozaeta, P. Virtanen, F.S. Bergeret, and T.T. Heikkila, Predicted Very Large Thermoelectric Effect in Ferromagnet-Superconductor Junctions in the Presence of a Spin-Splitting Magnetic Field, Phys. Rev. Lett. **112**, 057001 (2014).
14. S. Kolenda, M. J. Wolf, and D. Beckmann, Observation of Thermoelectric Currents in High-Field Superconductor-Ferromagnet Tunnel Junctions, Phys. Rev. Lett. **116**, 097001 (2016).
15. Y. Kajiwara, K. Harii, S. Takahashi, J. Ohe, K. Uchida, M. Mizuguchi, H. Umezawa, H. Kawai, K. Ando, K. Takanashi, S. Maekawa, and E. Saitoh, Transmission of electrical signals by spin-wave interconversion in a magnetic insulator, Nature **464**, 262 (2010).

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

<https://sites.google.com/view/spin-qmnd>

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

Стандартное оборудование для мультимедийных презентаций и проведения видеоконференций, компьютерное оборудование для поиска информации и численного моделирования.

Библиотечный фонд МФТИ.

Все основные материалы курса (конспект лекций, задачи для самостоятельного решения, список экзаменационных вопросов, видеозаписи отдельных лекций) выложены на сайте курса

<https://sites.google.com/view/spin-qmnd>

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий дисциплину, должен, с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра фундаментальной и прикладной физики микро- и наноструктур
курс:	1
квалификация:	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен	
Разработчик:	И.В. Бобкова, канд. физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.1 Формулирует в рамках обозначенной проблемы, цель, задачи, актуальность, значимость (научную, практическую, методическую и иную в зависимости от типа проекта), ожидаемые результаты и возможные сферы их применения
	УК-2.2 Способен прогнозировать результат деятельности и планировать последовательность шагов для достижения данного результата. Формирует план-график реализации проекта в целом и план контроля его выполнения
	УК-2.4 Представляет публично результаты проекта (или отдельных его этапов) в форме отчетов, статей, выступлений на научно-практических конференциях, семинарах и т.п.
УК-3 Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной задачи	УК-3.2 Учитывает в своей социальной и профессиональной деятельности интересы, особенности поведения и мнения (включая критические) людей, с которыми работает/взаимодействует, в том числе посредством корректировки своих действий
	УК-3.3 Способен предвидеть результаты (последствия) как личных, так и коллективных действий
УК-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	УК-4.1 Способен вести обмен деловой информацией в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и не менее чем на одном иностранном языке
	УК-4.2 Владеет навыками, необходимыми для написания, письменного перевода и редактирования различных академических текстов (рефератов, эссе, обзоров, статей и т.д.)
	УК-4.3 Способен представлять результаты академической и профессиональной деятельности на различных научных мероприятиях, включая международные
	УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия
УК-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	УК-6.1 Умеет решать задачи собственного личностного и профессионального развития, определять и реализовывать приоритеты совершенствования собственной деятельности
	УК-6.2 Оценивает свою деятельность, соотносит цели, способы и средства выполнения деятельности с её результатами

ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.1 Способен работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
	ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Спинтроника» обучающийся должен:

знать:

Основные теоретические подходы к описанию магнитосопротивления, основные экспериментальные результаты, основные приложения эффекта магнитосопротивления; теорию инжекции и переноса спина в металлах и полупроводниках, методы детектирования спинового разбаланса, основные экспериментальные результаты, механизмы релаксации спина; методы описания магнитной динамики, теорию управления намагниченностью и движения магнитных дефектов магнитным полем и электрическим током, основные экспериментальные результаты по перевероту магнитного момента и движению магнитных дефектов в различных системах и приложения; природу, виды и основные свойства спин-орбитальной связи в твердых телах, основные магнитоэлектрические эффекты, вызванные спин-орбитальным взаимодействием; основы спиновой калоритроники, основные экспериментальные результаты и теоретические подходы, природу и приложения гигантского термоспинового эффекта в сверхпроводящих системах; обзор современного состояния области магноники, спектры спиновых волн в различных магнитных системах, основные экспериментальные результаты по магнонному переносу спинового момента, механизмы конверсии магнонного спинового сигнала в электронный.

уметь:

Применять диффузионную теорию для описания спинового разбаланса в металлах, полупроводниках и мезоскопических системах, пользоваться уравнением Ландау-Лифшица-Гильберта для описания магнитной динамики и рассчитывать с его помощью магнитную динамику и спектры возбуждений в различных магнитных системах, рассчитывать спектры квазичастиц в различных материалах со спин-орбитальным взаимодействием, рассчитывать величину магнитоэлектрических эффектов, описывать эффекты спиновой калоритроники в рамках подхода кинетического уравнения, решать задачи о взаимной конверсии электронного и магнонного спиновых сигналов, исследовать взаимодействующие магнонные моды в различных мезоскопических системах в рамках уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта.

владеть:

- навыками решения задач, основанных на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях;
- навыками освоения большого объема информации;
- навыками самостоятельной работы в лаборатории и Интернете;
- навыками теоретического анализа реальных задач, связанных со свойствами спиновых систем.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлого занятия.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Полученные знания оцениваются по результатам решения задач, выданных студенту для самостоятельного решения и контрольных вопросов по содержанию курса. Примеры вопросов и задач см. ниже

Перечень контрольных вопросов

1. Что такое GMR. Основные экспериментальные результаты.
2. Основные механизмы спиновой релаксации
3. Физическая суть процесса нелокального спинового детектирования
4. Физические причины появления спин-орбитального взаимодействия Рашбы в твердых телах. Его влияние на электронные спектры.
5. Механизм движения доменной стенки магнитным полем. Качественное описание.
6. Уравнение Ландау-Лифшица-Гильберта.
7. Спин-орбитальное взаимодействие в твердом теле.
8. Спин-орбитальное взаимодействие типа Рашбы и типа Дрессельхауса.
9. Спектры квазичастиц в материале со спин-орбитальным взаимодействием.
10. Спиновый эффект Холла.

Примеры контрольных заданий

1. Вычислить эффективность спиновой инжекции в спиновом вентиле F/N/F в рамках диффузионной теории.
2. Вычислить спиновый разбаланс в спиновом вентиле F/N/F в рамках диффузионной теории.
3. Вычислить поле волкеровского предела, частоту прецессии намагниченности и среднюю скорость движения доменной стенки выше волкеровского предела для случая движения доменной стенки магнитным полем.
4. Рассчитать электронные спектры в 2D электронном газе в присутствии спин-орбитального взаимодействия типа Рашбы и Дрессельхауса.
5. Рассчитать величину электронной поляризации, возникающей в результате прямого магнитоэлектрического эффекта в поверхностных состояниях 3D топологического изолятора.

Пример экзаменационных билетов:

Билет 1

1. Основные механизмы спиновой релаксации
2. Вычислить поле волкеровского предела, частоту прецессии намагниченности и среднюю скорость движения доменной стенки выше волкеровского предела для случая движения доменной стенки магнитным полем.

Билет 2

1. Что такое GMR. Основные экспериментальные результаты.
2. Вычислить спиновый разбаланс в спиновом вентиле F/N/F в рамках диффузионной теории.

Билет 3

1. Физическая суть процесса нелокального спинового детектирования
2. Рассчитать величину электронной поляризации, возникающей в результате прямого магнитоэлектрического эффекта в поверхностных состояниях 3D топологического изолятора.

Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Экзамен проводится в форме устного опроса по контрольным вопросам. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.