

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

УТВЕРЖДЕНО
решением ученого совета ННГУ
протокол от "27" апреля 2022 г. №6

Рабочая программа дисциплины
«Спинзависимые явления в твердых телах»

Уровень высшего образования
Подготовка научных и научно-педагогических кадров

Научные специальности

1.1.2. Дифференциальные уравнения и математическая физика, 1.1.4. Теория вероятностей и математическая статистика, 1.1.5. Математическая логика, алгебра, теория чисел и дискретная математика, 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела, 1.2.1. Искусственный интеллект и машинное обучение, 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, 1.3.11. Физика полупроводников, 1.3.19. Лазерная физика, 1.3.4. Радиофизика, 1.3.7. Акустика, 1.3.8. Физика конденсированного состояния, 1.4.1. Неорганическая химия, 1.4.2. Аналитическая химия, 1.4.3. Органическая химия, 1.4.4. Физическая химия, 1.4.7. Высокомолекулярные соединения, 1.4.8. Химия элементоорганических соединений, 1.5.11. Микробиология, 1.5.15. Экология, 1.5.2. Биофизика, 1.5.21. Физиология и биохимия растений, 1.5.5. Физиология человека и животных, 2.2.2. Электронная компонентная база микро и наноэлектроники, квантовых устройств, 3.2.7. Аллергология и иммунология, 5.1.1. Теоретико-исторические правовые науки, 5.1.2. Публично-правовые (государственно-правовые) науки, 5.1.3. Частно-правовые (цивилистические) науки, 5.1.4. Уголовно-правовые науки, 5.1.5. Международно-правовые науки, 5.12.1. Междисциплинарные исследования когнитивных процессов, 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика, 5.2.4. Финансы, 5.2.6. Менеджмент, 5.3.7. Возрастная психология, 5.4.2. Экономическая социология, 5.4.4. Социальная структура, социальные институты и процессы, 5.4.6. Социология культуры, 5.4.7. Социология управления, 5.5.2. Политические институты, процессы, технологии, 5.5.4. Международные отношения, глобальные и региональные исследования, 5.6.1. Отечественная история, 5.6.2. Всеобщая история, 5.6.7. История международных отношений и внешней политики, 5.7.1. Онтология и теория познания, 5.8.2. Теория и методика обучения и воспитания, 5.8.7. Методология и технология профессионального образования, 5.9.2. Литературы народов мира, 5.9.5. Русский язык. Языки народов России, 5.9.6. Языки народов зарубежных стран (с указанием конкретного языка или группы языков), 5.9.9. Медиакоммуникации и журналистика

Нижний Новгород
2022 год

1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Спинзависимые явления в твердых телах» относится является факультативной дисциплиной и изучается на 2 году обучения в 4 семестре.

Целями освоения дисциплины являются:

формирование у аспирантов представления о физике спин-зависимых явлений в твердых телах, полупроводниках и наноструктурах и применении этих явлений в исследованиях полупроводников и полупроводниковых наноструктур. Учебными задачами курса являются, во-первых, приобретение знаний теории спин-зависимых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах, необходимых для ее практического применения, во-вторых, приобретение аспирантами практических навыков при изучении методов регистрации спин-зависимых явлений с использованием спинового резонанса и электрически детектируемого магнитного резонанса (ЭДМР), эффекта Фарадея, сквид-ячейки и спинового эффекта Холла для исследования свойств твердых тел.

3. Структура и содержание дисциплины.

Объем дисциплины (модуля) составляет всего - 36 часа, из которых 36 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа).

Таблица 2

Структура дисциплины

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины, форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего (часы)	В том числе				Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них				
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
Очное						
Тема 1 Введение. Угловой момент и спин элементарной частицы	6	2				4
Тема 2 Взаимодействие спина с внешними полями	6	2				4
Тема 3 Сверхтонкая структура уровней парамагнитной частицы	10	6				4
Тема 4 Спин-спиновые взаимодействия	9	4				5
Тема 5 Спин-решеточные взаимодействия	12	6				6
Тема 6 Спиновая релаксация носителей тока.	10	6				4
Тема 7 Спин-зависимые явления в	8	4				4

полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах						
Тема 8 Методы исследования спин-зависимых явлений	10	6				4
ВСЕГО	71	36				35
В т.ч. текущий контроль	2					
Промежуточная аттестация - зачет						

Таблица 3

Содержание дисциплины

4. Формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа подразумевает использование рекомендованных Интернет-ресурсов, т.е. изучение основной и дополнительной литературы по курсу.

Перечень рекомендованной литературы и Интернет-ресурсов приведен в 7-м разделе данной программы. Контроль самостоятельной работы обучающихся, при условии 100% посещаемости, происходит в форме коллективного обсуждения тематики разделов дисциплины во время лекций, а промежуточная аттестация (зачет) предполагает проведение экспресс анализа уровня освоения компетенций в форме коллоквиума, тестовые вопросы которого выведены из текста данной рабочей программы в приложение фонда оценочных средств (ФОС). Там же подробно описана и процедура оценивания результатов.

Помимо вышеперечисленных форм контроля и промежуточной аттестации имеется также перечень контрольных вопросов, применяемых в форме устного зачета.

5. Фонд оценочных средств для аттестации по дисциплине

5.1. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине.

При выполнении всех работ учитываются следующие **основные критерии**:

- уровень теоретических знаний (подразумевается не только формальное воспроизведение информации, но и понимание предмета, которое подтверждается правильными ответами на дополнительные, уточняющие вопросы, заданные членами комиссии);
- умение использовать теоретические знания при анализе конкретных проблем, ситуаций;
- качество изложения материала, то есть обоснованность, четкость, логичность ответа, а также его полнота (то есть содержательность, не исключающая сжатости);
- способность устанавливать внутри- и межпредметные связи,
- оригинальность мышления, знакомство с дополнительной литературой и другие факторы.

Описание шкалы оценивания на промежуточной аттестации в форме зачета

Оценка	Уровень подготовленности, характеризуемый оценкой
<i>Зачтено</i>	владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, умение самостоятельно обозначить проблемные ситуации в организации научных исследований, способность критически анализировать и сравнивать существующие подходы и методы к оценке результативности научной деятельности, свободное владение источниками, умение четко и ясно излагать результаты собственной работы, следовать нормам, принятым в научных дискуссиях.
<i>Не зачтено</i>	непонимание смысла ключевых проблем, недостаточное владение науковедческой терминологией, неумение самостоятельно обозначить проблемные ситуации, неспособность анализировать и сравнивать существующие концепции, подходы и методы, неумение ясно излагать результаты собственной работы, следовать нормам, принятым в научных дискуссиях.

5.2. Примеры типовых контрольных заданий или иных материалов, используемых для оценивания результатов обучения по дисциплине

Электронный и ядерный магнитные дипольные моменты. Прецессия спина в магнитном поле. Классическое рассмотрение динамики спинов.

Уравнения Блоха. Анализ решений уравнений Блоха.

Квантовомеханическое описание динамики спинов. Вероятность квантового перехода с переворотом спина. Формула Раби. Сравнение с классическим случаем.

Спиновый гамильтониан. Нахождение собственных значений и собственных векторов спинового гамильтониана в матричном представлении.

Тонкая структура энергетического спектра. Природа анизотропии спиновых состояний. Спин-орбитальное взаимодействие. Расщепление в нулевом поле.

Сверхтонкая структура энергетического спектра. Природа изотропного сверхтонкого взаимодействия. Влияние ковалентности на константы сверхтонкого взаимодействия.

Спиновый гамильтониан с учетом сверхтонкого взаимодействия. Энергетическая диаграмма и сверхтонкая структура спектра для случая $S=1/2$, $I=3/2$.

Суперсверхтонкое взаимодействие и его влияние на спектр.

Спин-решеточная релаксация локализованных спинов. Спин-фононные взаимодействия. Механизм Валера, Ван-Флека, Орбаха, Блюма-Орбаха.

Спин-спиновые взаимодействия. Спиновая релаксация с участием спин-спиновых взаимодействий.

Спиновая релаксация носителей тока. Механизмы спиновой релаксации носителей тока Эллиотта-Яфета, Дьяконова-Переля, Бира-Аронова-Пикуса, механизм, связанный с неоднородностью g-фактора, механизм, обусловленный сверхтонким взаимодействием, релаксация, вызванная анизотропным обменным взаимодействием.

Спин-зависимые явления в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах. Природа спин-зависимых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах: Спин-зависимый транспорт, рекомбинация и рассеяние носителей тока. Спиновый эффект Холла. Природа спин-зависимых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах: Спин-зависимый транспорт, рекомбинация и рассеяние носителей тока.

Рассеяния на магнитных примесях. Эффект Кондо на магнитных примесях и резонанс Абрикосова- Сула.

Спин-орбитальное взаимодействие. Спиновая релаксация .Спин-зависимое рассеяние. Спиновый эффект Холла: механизмы бокового прыжка и косоого рассеяния.

Явление спиновой «накачки» (пампинга) и его применение для исследования инверсного спинового эффекта Холла

Транспорт в низкоразмерных системах: эффекты размерного квантования. Двумерный электронный газ. Полупроводниковые квантовые ямы. Квантовые проволоки.

Квантовые точки. Спин-орбитальное взаимодействие в низкоразмерных системах.

Эффект Кондо в проводимости через квантовую точку.

Методы исследования спин-зависимых явлений. Методы регистрации спин-зависимых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах. Спиновый эффект Холла и инверсный спиновый эффект Холла. Спиновый резонанс и электрически детектируемый магнитный резонанс (ЭДМР). Эффект фарадея. Сквид. Методы измерения скоростей спиновой релаксации.

Квантовые компьютеры на спиновых эффектах. Спиновые кубиты, модель Кейна.

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.

Основная литература.

1. Абрагам А., Блيني Б. Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов. М.: Мир, 1972, Т.1, 2.
2. Ферромагнитный резонанс. Явление резонансного поглощения высокочастотного магнитного поля в ферромагнитных веществах. /Под ред. Чл. Корр. АН СССР С. В. Вонсовского./ М.: ФМ, 1961.
3. Киттель Ч. Введение в физику твёрдого тела. М.: Наука, 1978.

Дополнительная литература.

1. Альтшуллер С. А., Козырев Б. М. ЭПР соединений элементов промежуточных групп. М.: Наука, 1972.
2. Пул Ч. Техника ЭПР-спектроскопии. М.: Мир, 1970
3. Страховский Г. М., Успенский А.В. Основы квантовой электроники. М.: ВШ, 1973, 312 с.
4. Кринчик Г. С. Физика магнитных явлений. М.: изд. МГУ, 1976, 367с.
5. Ашкрофт, Н. Физика твёрдого тела / Н. Ашкрофт, Н. Мермин. – М.: Мир, 1979. – Т.1,2.

Рекомендуемая литература

1. Igor Zutic, Jaroslav Fabian, S. Das Sarma. Spintronics: Fundamentals and applications. *Reviews of Modern Physics*, V.76, 2004
2. Torrey, H.C., 1956, Bloch equations with diffusion terms, *Phys. Rev.* **104**, 563–565.
3. Elliott R.J., 1954, Theory of the effect of spin-orbit coupling on magnetic resonance in some semiconductors, *Phys. Rev.* **96**, 266–279.
4. Yafet, Y., 1963, in *Solid State Physics, Vol. 14*, edited by F. Seitz and D. Turnbull (Academic, New York), p. 2.
5. D'yakonov, M.I., and V.I. Perel', 1971e, Spin relaxation of conduction electrons in noncentrosymmetric semiconductors, *Fiz. Tverd. Tela* **13**, 3581–3585 [*Sov. Phys. Solid State* **13**, 3023–3026 (1971)].

6. Bir, G. L., A. G. Aronov, and G. E. Pikus, 1975, Spin relaxation of electrons due to scattering by holes, Zh. Eksp. Teor. Fiz. **69**, 1382–1397 [Sov. Phys. JETP **42**, 705–712 (1976)].
7. D.D. Awschalom, D. Loss, N. Samarth (Eds.) Semiconductor spintronics and quantum computation (Springer, 2002).
8. Spin dependent transport in magnetic nanostructures. Ed. By S. Maekawa, T. Shinjo (Taylor and Francis, 2002).
9. Yongbing Xu, David D. Awschalom, Junsaku Nitta. Editors Handbook of Spintronics. Springer Science+Business Media Dordrecht 2016

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

помещения для проведения занятий: лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для хранения и профилактического обслуживания оборудования и помещения для самостоятельной работы обучающихся, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ

Программные средства записи и обработки спектров спектрометра электронного парамагнитного резонанса BRUKER-EMXplus–10/12 Electron-Spin Resonance Spectrometer System: Bruker WinEPR Acquisition, и Bruker WinEPR Processing.

Спектрометр электронного парамагнитного резонанса BRUKER-EMXplus–10/12 Electron-Spin Resonance Spectrometer System с гелиевым криостатом, со стабилизацией температуры в диапазоне 3.8-300К.

Рабочая программа учебной дисциплины составлена в соответствии с учебным планом, Положением о подготовке научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Постановление Правительства РФ от 30.11.2021 № 2122), Федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) (Приказ Минобрнауки РФ от 20.10.2021 № 951).

Автор д.ф.-м.н., профессор _____ А.А. Ежевский

Рецензент:
д.ф.-м.н. профессор _____ Е.С. Демидов

Заведующий кафедрой
физики полупроводников, электроники и наноэлектроники
д.ф.-м.н. профессор _____ Д. А. Павлов

Программа одобрена на заседании методической комиссии физического факультета от _____ 2022 года, протокол № б/н

