

**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**  
**«Магнитные резонансы 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 нанoeлектроники, 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 «Магнитные резонансы в твердых телах» является факультативной дисциплиной и изучается на 3 году обучения в 5 семестре.

#### Целями освоения дисциплины являются:

формирование у аспирантов представления о физических принципах магнитного резонанса и возможностях магнитно-резонансных методов в исследованиях твердого тела. Основное внимание уделяется электронному парамагнитному резонансу (ЭПР) и его применению для изучения дефектов в полупроводниках. Учебными задачами курса являются, во-первых, приобретение знаний теории ЭПР, необходимых для ее практического применения, во-вторых, приобретение аспирантами практических навыков в работе со спектрометром ЭПР и в исследовании дефектов и примесей в полупроводниках.

### 3. Структура и содержание дисциплины.

Объем дисциплины (модуля) 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	
Тема 1 Введение в методы магнитного резонанса. История открытия. Виды магнитных резонансов. Области применения.	6	2				4
Тема 2 Явление магнитного резонанса. Электронный и ядерный магнитные моменты. Прецессия спина в магнитном поле. Классическое рассмотрение магнитного резонанса, парамагнитный резонанс. Уравнения Блоха. Квантовомеханическое описание явления магнитного резонанса.	6	2				4
Тема 3 Спиновый гамильтониан. Методы решения уравнения Шредингера со спиновым гамильтонианом.	10	6				4
Тема 4 Тонкая структура спектров. Природа анизотропии спектров. Учет спин-орбитального взаимодействия.	9	4				5
Тема 5 Сверхтонкая структура спектра. Природа сверхтонких и суперсверхтонких	12	6				6

взаимодействий. Сверхтонкая структура спектра. Двойной электронно-ядерный резонанс.						
Тема 6 Спин-решеточные взаимодействия. Процессы спин-решеточной релаксации.	10	6				4
Тема 7 Спин-спиновые взаимодействия. Процессы спин-спиновой релаксации.	8	4				4
Тема 8 Особенности спектроскопии ферромагнитного резонанса.	10	6				4
ВСЕГО	71	36				35
В т.ч.текущий контроль	2					
Промежуточная аттестация – зачет. 1 час						

**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**

<b>Оценка</b>	<b>Уровень подготовленности, характеризуемый оценкой</b>
<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**

Введение в методы магнитного резонанса. *История открытия. Виды магнитных резонансов. Области применения.*

Явление магнитного резонанса. *Электронный и ядерный магнитные моменты. Прецессия спина в магнитном поле. Классическое рассмотрение магнитного резонанса, парамагнитный резонанс. Уравнения Блоха. Квантовомеханическое описание явления магнитного резонанса.*

Спиновый гамильтониан. *Тонкая структура спектров. Природа анизотропии спектров. Начальное расщепление и тонкая структура.*

Сверхтонкая структура спектра. *Природа сверхтонких и суперсверхтонких взаимодействий. Сверхтонкая структура спектра. Двойной электронно-ядерный резонанс.*

Спин-решеточная релаксация. *Спин-фононные взаимодействия. Процессы спин-решеточной релаксации. Механизмы Валлера, Ван-Флека, Орбаха, Блюма-Орбаха. Эффекты узкого фононного горла.*

Спин-спиновая релаксация. *Спин-спиновые взаимодействия и их влияние на спектр ЭПР. Процессы спин-спиновой релаксации. Механизм обменного сужения линий ЭПР.*

Особенности спектроскопии ферромагнитного резонанса. *Описание спинового упорядочения в ферромагнетиках на основе гейзенберговского обменного гамильтониана. Спиновые волны в ферромагнетике. Суть и особенности ферромагнитного резонанса. Влияние кристаллической магнитной анизотропии на резонансную частоту. ФМР в ферримагнетиках или ферримагнитный резонанс. Антиферромагнитный резонанс*

## **6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.**

### *Основная литература*

1. Абрагам А., Блини 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.
4. Демидов Е.С. Ежевский А.А., Карзанов В.В. Магнитные резонансы в твердых телах Учебно-методические материалы по программе повышения квалификации «Новые материалы электроники и оптоэлектроники для информационно-телекоммуникационных систем». Нижний Новгород, 2007, 127 с. <http://www.unn.ru/pages/issues/aids200761.pdf>.

### *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.

## **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 3.8-300K.

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 3.8-300K.

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 нанoeлектроники  
д.ф.-м.н. профессор \_\_\_\_\_ Д. А. Павлов

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