

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

УТВЕРЖДАЮ:

Декан физического факультета
_____ Малышев А.И.

« 31 » _____ августа 2021 г.

Рабочая программа дисциплины

«Магнитные резонансы в твердых телах»

Уровень подготовки

аспирантура

Направление подготовки

03.06.01 ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ

Направленность образовательной программы

01.04.10 «Физика полупроводников»

Квалификация

Исследователь, преподаватель-
исследователь

Форма обучения
Очная

Нижний Новгород, 2021

1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Магнитные резонансы в твердых телах» относится к вариативной части ОПОП, является дисциплиной по выбору 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.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Формируемые компетенции (код компетенции, этап формирования)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций
ОПК-1. Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий	<i>З1 (ОПК-1) Знание основных проблем в физике магнитных резонансов в твердых телах, границы применимости и возможности использования методов, применяемых при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности</i> <i>У1 (ОПК-1) Умение выбирать методы и средства решения основных проблем в твердотельной электронике и наноэлектронике с использованием теоретических и практических знаний физики магнитных резонансов в твердых телах для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности;</i> <i>В1 (ОПК-1) Владение опытом применения методов применяемых при изучении магнитных резонансов в твердых телах и средств решения основных проблем в своей предметной области для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности.</i>
ПК-1. Способность к самостоятельному проведению научно-исследовательской работы, получению научных результатов, удовлетворяющих	<i>З1 (ПК-1) Знание основных методов и средств, применяемых при самостоятельном проведении научно-исследовательской работы, получении научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников», полученное при изучении магнитных резонансов в твердых телах</i>

установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников»	<p><i>У1 (ПК-1) Уметь выбирать методы и средства решения основных проблем в твердотельной электронике и наноэлектронике с использованием теоретических и практических знаний физики магнитных резонансов в твердых телах для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности;</i></p> <p><i>В1 (ПК-1) Владеть опытом применения методов и средств при самостоятельном проведении научно-исследовательской работы, получении научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников», полученным при изучении магнитных резонансов в твердых телах</i></p>
---	---

3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 2 зачетных единицы, всего 72 часа, из которых 37 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (36 часов занятия лекционного типа, включая 2 часа - мероприятия текущего контроля успеваемости, 1 час - мероприятия промежуточной аттестации), 35 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

Содержание 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 взаимодействий. Сверхтонкая структура спектра. Двойной электронно-ядерный резонанс.	12	6				6
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						

4. Образовательные технологии

Занятия по дисциплине проходят в виде лекций организованных, частично, в форме компьютерных презентаций и сопровождаются демонстрацией работ в различных научно-исследовательских лабораториях с использованием современного оборудования с привлечением высококвалифицированных специалистов. Самостоятельная работа включает в себя время на подготовку к практическим занятиям. Предусмотрено также коллективное участие обучающихся в качестве слушателей в школах проводимых в рамках двух традиционных конференций по нанoeлектронике и нанофотонике. Основные виды образовательных технологий: лекции и контроль самостоятельной работы.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Виды самостоятельной работы. Самостоятельная работа предусмотрена при освоении материала. Самостоятельная работа может проводиться как в домашних условиях, так и в читальном зале библиотеки, в компьютерных классах, в учебных кабинетах (лабораториях) с доступом к лабораторному оборудованию, приборам, базам данных, к Интернет-ресурсам. Текущий контроль успеваемости сводится к контролю самостоятельной работы (КСР) и осуществляется путём контрольных опросов по спискам вопросов.

Вопросы для контроля

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. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине
включающий:

6.1 Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), характеризующих этапы их формирования.

Описание показателей и критериев оценивания компетенций приведены в приложении 1.

6.2. Описание шкал оценивания

«Зачтено» – владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, наличие хотя бы фрагментарных знаний по каждому из основных вопросов, способность критически анализировать и сравнивать получаемые научные результаты.

«Незачтено» – отсутствие ответа хотя бы на один из основных вопросов, либо грубые ошибки в ответах, полное непонимание смысла проблем, не достаточно полное владение терминологией.

6.3. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю), характеризующих этапы формирования компетенций.

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие процедуры и технологии: - индивидуальное собеседование.

Для оценивания результатов обучения в виде умений и владений используются следующие процедуры и технологии: -

Простые задания применяются для оценки умений. Комплексные практические задания применяются для оценки навыков.

6.4. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций. *Индивидуальное собеседование с использованием вопросов для контроля применяется для оценивания результатов обучения в виде знаний.*

Простые задания применяются для оценки умений.

Пример: Сравнить классическую и квантовую интерпретацию магнитных резонансов в твердых телах.

Комплексные практические задания применяются для оценки владений.

Пример: Описать сверхтонкое взаимодействие с помощью спинового гамильтониана. Раскрыть природу Ферми-контактного взаимодействия.

6.5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания приведены в фонде оценочных средств.

7. 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.
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 3.8-300К.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.06.01 ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ (уровень подготовки кадров высшей квалификации).
квалификации).

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

Рецензент:

Заведующий кафедрой
электроники твёрдого тела
д.ф.-м.н. профессор

_____ Е.С. Демидов

Заведующий кафедрой
физики полупроводников и оптоэлектроники
д.ф.-м.н., профессор

_____ Д. А. Павлов

Программа рекомендована на заседании кафедры Физики полупроводников и оптоэлектроники от _____ года, протокол № _____

Программа одобрена на заседании методической комиссии физического факультета от _____ года, протокол № _____

ОПК-1 Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий

Планируемые результаты обучения* (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Критерии оценивания результатов обучения				
	1	2	3	4	5
Знание основных проблем в физике магнитных резонансов в твердых телах, границы применимости и возможности использования методов, применяемых при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности	Отсутствие знаний	Фрагментарное знание основных проблем в физике магнитных резонансов в твердых телах, границы применимости и возможности использования методов, применяемых при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности	В целом успешное знание основных проблем в физике магнитных резонансов в твердых телах, границы применимости и возможности использования методов, применяемых при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знание основных проблем в физике магнитных резонансов в твердых телах, границы применимости и возможности использования методов, применяемых при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности	Успешное и систематическое знание основных проблем в физике магнитных резонансов в твердых телах, границы применимости и возможности использования методов, применяемых при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности
Умение выбирать методы и средства решения основных проблем в твердотельной электронике и наноэлектронике с использованием теоретических и практических знаний физики магнитных резонансов в твердых телах для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности;	Отсутствие умений	Частично освоенное умение выбирать методы и средства решения основных проблем в твердотельной электронике и наноэлектронике с использованием теоретических и практических знаний физики магнитных резонансов в твердых телах для	В целом успешное, но не систематически осуществляемое умение выбирать методы и средства решения основных проблем в твердотельной электронике и наноэлектронике с использованием теоретических и практических знаний физики магнитных резонансов в твердых телах для самостоятельного осуществления	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение выбирать методы и средства решения основных проблем в твердотельной электронике и наноэлектронике с использованием теоретических и практических знаний физики магнитных резонансов в твердых телах для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности;	Сформированное умение выбирать методы и средства решения основных проблем в твердотельной электронике и наноэлектронике с использованием теоретических и практических знаний физики магнитных резонансов в твердых телах для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности;

		самостоятельно осуществления научно- исследовательской деятельности;	научно- исследовательско й деятельности;		
Владение опытом применения методов применяемых при изучении магнитных резонансов в твердых телах и средств решения основных проблем в своей предметной области для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности.	Отсутстви е навыков	Фрагментарное применение методов применяемых при изучении магнитных резонансов в твердых телах и средств решения основных проблем в своей предметной области для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности.	В целом успешное, но не систематическое применение методов применяемых при изучении магнитных резонансов в твердых телах и средств решения основных проблем в своей предметной области для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности.	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение методов применяемых при изучении магнитных резонансов в твердых телах и средств решения основных проблем в своей предметной области для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности.	Успешное и систематическое применение методов применяемых при изучении магнитных резонансов в твердых телах и средств решения основных проблем в своей предметной области для самостоятельного осуществления научно-исследовательской деятельности.

ПК-1 Способность к самостоятельному проведению научно-исследовательской работы, получению научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников»

Планируемые результаты обучения* (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Критерии оценивания результатов обучения				
	1	2	3	4	5
Знание основных методов и средств, применяемых при самостоятельном проведении научно-исследовательской работы, получении научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников», полученное при	Отсутств ие знаний	Фрагментарн ое знание основных методов и средств, применяемых при самостоятель ном проведении научно- исследовател ьской работы, получении научных результатов, удовлетворяю щих установленны м	В целом успешное знание основных методов и средств, применяемых при самостоятельн ом проведении научно- исследовательск ой работы, получении научных результатов, удовлетворяю щих установленным требованиям к	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания основных методов и средств, применяемых при самостоятельном проведении научно- исследовательско й работы, получении научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию	Успешное и систематическое знание основных методов и средств, применяемых при самостоятельно м проведении научно- исследовательск ой работы, получении научных результатов, удовлетворяющ их установленным требованиям к

изучении магнитных резонансов в твердых телах		требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников», полученное при изучении магнитных резонансов в твердых телах»	содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников», полученное при изучении магнитных резонансов в твердых телах	диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников», полученное при изучении магнитных резонансов в твердых телах	содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников», полученное при изучении магнитных резонансов в твердых телах
Умение выбирать методы и средства решения проблем при самостоятельном проведении научной исследовательской работы, получении научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников», применяемые в физике спин-зависимых явлений в твердых телах	Отсутствие умений	Частично освоенное умение выбирать методы и средства решения проблем при самостоятельном проведении научной исследовательской работы, получении научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников», применяемые в физике спин-зависимых явлений в	В целом успешное, но не систематическое умение осуществлять умение выбирать методы и средства решения проблем при самостоятельном проведении научной исследовательской работы, получении научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников», применяемые в физике спин-зависимых явлений в твердых телах	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение выбирать методы и средства решения проблем при самостоятельном проведении научной исследовательской работы, получении научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников», применяемые в физике спин-зависимых явлений в твердых телах	Сформированное умение выбирать методы и средства решения проблем при самостоятельном проведении научной исследовательской работы, получении научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников», применяемые в физике спин-зависимых явлений в твердых телах

		твердых телах			
Навыки применения методов и средств при самостоятельном проведении научно-исследовательской работы, получении научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников», полученным при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах	Отсутствие навыков	Фрагментарное владение опытом применения методов и средств при самостоятельном проведении научно-исследовательской работы, получении научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников», полученным при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах полупроводников»	В целом успешное, но не систематическое владение опытом применения методов и средств при самостоятельном проведении научно-исследовательской работы, получении научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников», полученным при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах полупроводников»	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владения опытом применения методов и средств при самостоятельном проведении научно-исследовательской работы, получении научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников», полученным при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах полупроводников»	Успешное и систематическое владение опытом применения методов и средств при самостоятельном проведении научно-исследовательской работы, получении научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности 01.04.10 «Физика полупроводников», полученным при изучении спин-зависимых явлений в твердых телах полупроводников»