

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

Кафедра физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники

УТВЕРЖДЕНО
решением ученого совета ННГУ протокол
№ 13 от «30» ноября 2022 г.

Рабочая программа дисциплины

Магнитные резонансы в твердых телах

Уровень высшего образования
магистратура

Направление подготовки: 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника
Направленности (профили): твердотельная электроника и нанoeлектроника

Форма обучения
очная

Нижний Новгород, 2023 г.

1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Магнитные резонансы в твердых телах» относится к дисциплинам по выбору студента формируемой участниками образовательных отношений части основной образовательной программы по направлению 11.04.04 "Электроника и микроэлектроника". Для усвоения данного курса необходимо изучить некоторые модули (дисциплины) в рамках образовательной программы бакалавра по направлению Физика: модуль «Математика» базовой части цикла математических и естественно-научных дисциплин, модуль «Теоретическая физика» базовой части профессионального цикла. Данный курс предлагает более высокий уровень подготовки по сравнению с освоенным ранее курсом «Физика конденсированного состояния» в рамках образовательной программы бакалавра по направлению Физика и «Физика полупроводников»

Цель изучения дисциплины - формирование у студентов 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 студентами практических навыков в работе со спектрометром ЭПР и в исследовании дефектов в полупроводниках.

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

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

Планируемые результаты обучения по дисциплине

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	
ПК-4. Готовность формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и микроэлектроники, а	ПК-4.1. Знает тенденции и перспективы развития электроники и микроэлектроники, а также смежных областей науки и техники ПК-4.2. Способен	<u>Знать:</u> <i>Теории транспорта в металлах и полупроводниках. Классическое рассмотрение поведения спина. Взаимодействие спина с внешними полями. Природу тонкой структуры энергетического спектра.</i>	Вопросы по темам/разделам дисциплины. Комплект задач и заданий к

также смежных областей науки и техники, и способность обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач	рассчитывать предельно допустимые и предельные режимы работы изделий микро- и наноэлектроники ПК-4.3 Имеет навыки обоснованного выбора теоретических и экспериментальных методов исследования и средства решения сформулированных задач	<i>Природа спин-зависимых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах: Методы исследования спин-зависимых явлений. <u>Уметь</u> объяснить суть физических явлений, рассматриваемых в курсе, связь между явлениями, представить математическое описание явлений. <u>Владеть</u> навыками применения основных методов магнитно-резонансной спектроскопии к анализу и количественной оценке свойств твёрдых тел, связанных с наличием магнитных моментов по параметрам спектров.</i>	семинарским занятиям.
---	--	--	-----------------------

Достижения современной физики твердого тела, полупроводников, физики дефектов в кристаллах невозможно представить без результатов, достигнутых методами магнитного резонанса, в частности электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Благодаря своим уникальным возможностям метод ЭПР широко применяется в современных исследованиях. Поэтому понимание принципов теории и представления о технической реализации метода необходимы будущим специалистам в различных областях физики твердого тела. При изучении курса студенты должны достичь определенного уровня понимания теории ЭПР, необходимого для ее практического применения, приобрести практические навыки в работе со спектрометром ЭПР и в исследовании дефектов в твердых телах и, в частности, полупроводниках.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

Знать:

Природу электронных и ядерных магнитных моментов. Явление прецессии спина в магнитном поле. Классическое рассмотрение магнитного резонанса.

Уравнения Блоха. Анализ решений уравнений Блоха для случая медленного прохождения через резонанс.

Квантовомеханическое описание явления магнитного резонанса. Вероятность квантового перехода с переворотом спина. Формулу Раби.

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

Природу тонкой структуры спектра. Природу анизотропии спектров ЭПР. Спин-орбитальное взаимодействие. Расщепление в нулевом поле.

Природу сверхтонкой структуры спектров ЭПР. Природу изотропного сверхтонкого взаимодействия. Влияние ковалентности на константы сверхтонкого взаимодействия. Спиновый гамильтониан с учетом сверхтонкого взаимодействия. Энергетическую диаграмму и сверхтонкую структуру спектра для конкретных случаев. Суперсверхтонкое взаимодействие и его влияние на спектр ЭПР. Двойной электронно-ядерный резонанс.

Явление спин-решеточной релаксации. Спин-фононные взаимодействия. Механизм Валера. Механизмы Ван-Флека, Орбаха, Блюма-Орбаха.

Спин-спиновые взаимодействия и их влияние на спектр ЭПР. Механизм обменного сужения линий ЭПР.

Уметь объяснить суть физических явлений, рассматриваемых в курсе, связь между явлениями, представить математическое описание явлений.

Владеть навыками применения основных методов магнитно-резонансной спектроскопии к анализу и количественной оценке свойств твёрдых тел, связанных с наличием магнитных моментов по параметрам спектров.

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

Общая трудоемкость	4 ЗЕТ
Часов по учебному плану	144
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	16
- занятия семинарского типа	16
самостоятельная работа	74 (работа в семестре) 36 (на подготовку к экзамену)
Промежуточная аттестация	3 семестр – экзамен

3.2. Содержание дисциплины

Наименование раздела дисциплины	Всего , часов	В том числе				Самостоя тельная работа студента, часов
		Контактная работа, часов				
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
Введение в методы магнитного резонанса. История открытия. Виды магнитных резонансов. Области применения.	14	2		2	4	12
Явление магнитного резонанса.	15	2		2	4	13

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. Методы решения уравнения Шредингера со спиновым гамильтонианом. Тонкая структура спектров. Природа анизотропии спектров. Учет спин-орбитального взаимодействия.	15	2		4	6	13
Сверхтонкая структура спектра. Природа сверхтонких и суперсверхтонких взаимодействий. Сверхтонкая структура спектра. Двойной электронно-ядерный резонанс.	15	4		4	8	13
Спин-решеточные взаимодействия. Процессы спин-решеточной релаксации.	15	2		2	4	13
Спин-спиновые взаимодействия. Процессы спин-спиновой релаксации.	15	2		2	4	11
Особенности спектроскопии ферромагнитного резонанса.		2			2	
Промежуточная аттестация - экзамен 2 часа						
Самостоятельная подготовка к экзамену – 36 часов						

Содержание разделов дисциплины

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.

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 наноэлектронике и нанопотонике.

Основные виды образовательных технологий: лекции, лабораторный практикум и контроль самостоятельной работы.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Виды самостоятельной работы. Самостоятельная работа предусмотрена при освоении материала разделов 4, 5, 7 и 8. Она связана с теоретической подготовкой к допуску, обработкой экспериментальных результатов, расчетам параметров и написанием отчетов по лабораторным работам. 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, приведённым в описаниях лабораторных работ, а также путём проверки протоколов измерений и отчётов по выполненным работам.

Перечень лабораторных работ:

№п/п	№ раздела дисциплины	Наименование лабораторных работ
	Сверхтонкая структура спектра. Природа сверхтонких и суперсверхтонких взаимодействий.	Исследование сверхтонкой структуры спектра ЭПР.

Контрольные (экзаменационные) вопросы для проведения промежуточной аттестации (экзамена) по итогам освоения дисциплины Магнитные резонансы в твердых телах.

Самостоятельная работа включает в себя теоретическую подготовку к занятиям по материалам лекций и рекомендованной литературе, приведенной в конце данной программы, подготовку к практическим занятиям в форме собеседования и консультаций по вопросам, составленным по разделам дисциплины и подготовку к экзамену.

Оценочные средства для контроля текущей успеваемости включают в себя устный опрос в форме собеседования и консультаций по вопросам, составленным по разделам дисциплины на практических (лабораторных) занятиях. Для прохождения итоговой аттестации проводится экзамен в 10-м семестре, включающий в себя теоретические вопросы по всему курсу, и темам практических (лабораторных) занятиях.

Для контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины используются приведенные ниже вопросы, включенные в экзаменационные билеты.

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине

6.1 Перечень компетенций выпускников образовательной программы, в формировании которых участвует дисциплина, с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений) приведён выше (раздел 2). Ниже приведена таблица образовательных дескрипторов (отличительных признаков уровней освоения компетенций).

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	Шкала оценивания сформированности компетенций						
	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	Не зачтено		зачтено				
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок.	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки.	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме, но	Продemonстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельным и несущественным	Продemonстрированы все основные умения,. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном

			полном объеме.	объеме, но некоторые с недочетами.	некоторые с недочетами.	недочетами, выполнены все задания в полном объеме.	объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки.	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

Перечень компетенций выпускников образовательной программы, в формировании которых участвует дисциплина, с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений) приведён выше (раздел 2). Ниже приведена таблица образовательных дескрипторов (отличительных признаков уровней освоения компетенций).

Уровень освоения компетенции	Отличительные признаки
Начальный	<p>заложены основы знаний основных задач, направлений, тенденций и перспектив развития методов магнитного резонанса</p> <p>способность сформулировать методологическое обоснование научного исследования и технической разработки в этой области;</p> <p>корректно объясняет проблемы в современном развитии методов магнитного резонанса в твердых телах;</p>
Продвинутый	<p>изучен передовой отечественный и зарубежный научный опыт и достижения в области методов магнитного резонанса в твердых телах</p> <p>излагает методологические основы и принципы современных методов магнитного резонанса в твердых телах;</p> <p>умеет оценивать научную значимость и перспективы прикладного использования результатов исследований в области магнитных резонансов в твердых телах;</p> <p>владеет навыками анализа и идентификации новых проблем и областей исследования;</p>
Высокий	<p>имеется подробное представление о тенденциях и перспективах развития методов магнитного резонанса в твердых телах, а также смежных областей науки и техники;</p> <p>умение предлагать новые направления в области научных исследований и разработок, новые методологические подходы к</p>

	<p>решению задач в области магнитных резонансов в твердых телах;</p> <p>владение современной научной терминологией, основными и новейшими теоретическими и экспериментальными подходами в передовых методах магнитных резонансов в твердых телах</p>
--	--

6.2. Описание шкал оценивания

При выставлении экзаменационной оценки, т.е. в ходе промежуточной аттестации, применяется семибалльная шкала, которая по окончании обучения (в дипломе магистра) трансформируется в пятибалльную. Обе шкалы привязаны к 100-балльной системе, в которой баллы набираются в ходе текущего контроля при сдаче допусков и отчетов по лабораторным работам и непосредственно на экзамене.

За полностью выполненную лабораторную работу начисляется максимум 40 баллов.

По итогам освоения дисциплины сдается экзамен. Экзаменационный билет содержит два вопроса. За ответ на каждый из вопросов начисляется максимум 30 баллов. Итого с учётом успешного выполнения лабораторных работ можно набрать максимум 100 баллов.

Критерии выставления оценки при сдаче экзамена

Баллы	Семибалльная шкала	Описание семибалльной шкалы	Пятибалльная шкала
90-100	5,5 Превосходно	Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета и дополнительные вопросы (задания), выходящие за рамки изученного объема курса и изученных алгоритмов и подходов, проявляя инициативу и творческое мышление.	5 отлично
80-89	5 отлично	Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета в рамках изученных алгоритмов и подходов. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности.	
75-79	4,5 очень хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает хороший уровень знания вопросов билета и отвечает с небольшими неточностями.	4 хорошо
70-74	4 хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает средний уровень знания вопросов билета и отвечает на некоторые дополнительные вопросы преподавателя (в рамках билета).	
60-69	3 удовлетворительно	Удовлетворительная подготовка. Студент показывает удовлетворительное знание вопросов билета и знание базовых понятий отвечая с наводящими вопросами преподавателя.	3 удовлетворительно

40-59	2 неудовлетворительно	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.	2 неудовлетворительно
<40	1 плохо	Подготовка совершенно недостаточна. Последующая пересдача возможна только с комиссией.	1 плохо

Образец экзаменационного билета:

Билет № 1	
1)	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.
2)	Спин-решеточная релаксация. Спин-фононные взаимодействия. Процессы спин-решеточной релаксации. Механизмы Валлера, Ван-Флека, Орбаха, Блюма-Орбаха. Эффекты узкого фононного горла.

6.3. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания

Оценочные средства для контроля текущей успеваемости включают в себя контрольные вопросы, содержащиеся в учебно-методических пособиях по лабораторным работам. Эти вопросы используются при допуске к выполнению экспериментальной части работ. По итогам проверки отчётов о выполнении работ заполняется контрольный лист, в котором преподаватели, проводившие лабораторные занятия выставляют отметку о выполнении.

Вопросы для итогового контроля сформированности компетенции ПК-4

1. История открытия магнитного резонанса. Виды магнитных резонансов. Области применения.
2. Электронный и ядерный магнитные дипольные моменты. Прецессия спина в магнитном поле. Классическое рассмотрение магнитного резонанса.
3. Уравнения Блоха. Анализ решений уравнений Блоха для случая медленного прохождения через резонанс.
4. Квантовомеханическое описание явления магнитного резонанса. Вероятность квантового перехода с переворотом спина. Формула Раби. Сравнение с классическим случаем.
5. Спиновый гамильтониан. Нахождение собственных значений и собственных векторов спинового гамильтониана в матричном представлении.
6. Тонкая структура спектра. Природа анизотропии спектров ЭПР. Спин-орбитальное взаимодействие. Расщепление в нулевом поле.
7. Сверхтонкая структура спектра ЭПР. Природа изотропного сверхтонкого взаимодействия. Влияние ковалентности на константы сверхтонкого взаимодействия.
8. Спиновый гамильтониан с учетом сверхтонкого взаимодействия. Энергетическая диаграмма и сверхтонкая структура спектра для случая $S=1/2$, $I=3/2$.
9. Суперсверхтонкое взаимодействие и его влияние на спектр ЭПР. Двойной электронно-ядерный резонанс.
10. Спин-решеточная релаксация. Спин-фононные взаимодействия. Механизм Валера.
11. Спин-решеточная релаксация. Механизмы Ван-Флека, Орбаха, Блюма-Орбаха.
12. Спин-спиновые взаимодействия и их влияние на спектр ЭПР. Механизм

обменного сужения линий ЭПР.

13. Особенности спектроскопии ферромагнитного резонанса. Описание спинового упорядочения в ферромагнетиках на основе гейзенберговского обменного гамильтониана.

14. Спиновые волны в ферромагнетике. Суть и особенности ферромагнитного резонанса. Влияние кристаллической магнитной анизотропии на резонансную частоту.

15. Антиферромагнитный резонанс

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Основная литература.

1. Абрагам А., Блинн 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.

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

Программа составлена в соответствии с требованиями установленного ННГУ образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 11.04.04 – «Электроника и наноэлектроника».

Автор:

Профессор кафедры физики полупроводников, электроники и наноэлектроники
д.ф.-м.н., профессор А.А. Ежевский

Рецензент:

Заведующий кафедрой теоретической физики, д.ф.-м.н., В.А. Бурдов

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

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии физического факультета
ННГУ, протокол б/н от «17» ноября 2022 г.

Председатель Учебно-методической комиссии физического факультета ННГУ
А.А. Перов