

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
Физические основы ядерной медицины**

Уровень высшего образования
Бакалавриат

Направление подготовки / специальность
03.03.02 - Физика

Направленность образовательной программы
Медицинская физика

Форма обучения
очная

г. Нижний Новгород

2023 год начала подготовки

1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Физические основы ядерной медицины» относится к дисциплинам по выбору студента формируемой участниками образовательных отношений части основной образовательной программы по направлению 03.03.02 «Физика»

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 и индикаторами достижения компетенций)

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	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ПК-1 Способен использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин	Демонстрация способности использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин	Знать: Теории транспорта в металлах и полупроводниках. Классическое рассмотрение поведения спина. Взаимодействие спина с внешними полями. Природу тонкой структуры энергетического спектра. Природа спин-зависимых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах: Методы исследования спин-зависимых явлений. Уметь объяснить суть физических явлений, рассматриваемых в курсе, связь между явлениями, представить математическое описание явлений. Владеть навыками применения основных методов магнитно-резонансной спектроскопии анализу и количественной оценке свойств твёрдых тел, связанных с наличием магнитных моментов по параметрам спектров.	Вопросы по темам/разделам дисциплины. Комплект задач и заданий к семинарским занятиям.	Экзамен: Контрольные вопросы Задания

2. Структура и содержание дисциплины

2.1 Трудоемкость дисциплины

Общая трудоемкость	4 ЗЕТ
Часов по учебному плану	144
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	32
- занятия семинарского типа	32
самостоятельная работа	42
Промежуточная аттестация	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.

3. 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 нанофотонике.

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

4. 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 отчетов 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.

5. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине

5.1 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	Шкала оценивания сформированности компетенций						
	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно

(индикатора достижения компетенций)	Не зачтено		зачтено				
	Отсутствие теоретическо го материала.	Уровень знаний ниже минимальны х требований. Имели место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибки.	Уровень знаний в объеме, соответствую щем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствую щем программе подготовки. Допущено несколько несуществен ных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответству ющем программе подготовки , без ошибок.	Уровень знаний в объеме, превышающе м программу подготовки.
<u>Знания</u>	Отсутствие теоретическо го материала. Невозможнос ть оценить полноту знаний вследствие отказа обучающего я от ответа	Уровень знаний ниже минимальны х требований. Имели место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибки.	Уровень знаний в объеме, соответствую щем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствую щем программе подготовки. Допущено несколько несуществен ных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответству ющем программе подготовки , без ошибок.	Уровень знаний в объеме, превышающе м программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальны х умений . Невозможнос ть оценить наличие умений вследствие отказа обучающего я от ответа	При решении стандартных задач не продемонстр ированы основные умения. Имели место грубые ошибки.	Продемонстр ированы основные умения. Решены типичные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания но не в	Продемонстр ированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном	Продемонстр ированы все основные умения. Решены все основные задачи . Выполнены все задания, в полном объеме, но	Продемонс трированы все основные умения, реш ены все основные задачи с отдельным и несуществе нным	Продемонстр ированы 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. Невозможнос ть оценить наличие навыков вследствие отказа обучающего я от ответа	При решении стандартных задач не продемонстр ированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки.	Имеется минимальны й набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	Продемонстр ированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продемонстр ированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.	Продемонс трированы навыки при решении нестандарт ных задач без ошибок и недочетов.	Продемонстр ирован творческий подход к решению нестандартн ых 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 опросы билета и дополнительные вопросы (задания), выходящие за рамки изученного объема курса и изученных алгоритмов и подходов, проявляя инициативу творческое мышление.	5 отлично
80-89	5 отлично	Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на опросы билета в рамках изученных алгоритмов и подходов. При ответе на дополнительные вопросы опускаются 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 довлестворительно	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 сдача возможна только с комиссией.	1 плохо

Образец экзаменационного билета:

<p style="text-align: center;">Билет № 1</p> <p>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.</p> <p>2) Спин-решеточная релаксация. Спин-фононные взаимодействия. Процессы спин-решеточной релаксации. Механизмы Валлера, Ван-Флека, Орбаха, Блюма-Орбаха. Эффекты узкого фононного горла.</p>
--

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-1

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. Спинные 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., 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 твердого 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/200761.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 нанoeлектроника».

Автор:

Профессор кафедры физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники
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