

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное учреждение  
высшего профессионального образования  
"Казанский (Приволжский) федеральный университет"  
Институт физики



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной деятельности КФУ

Проф. Тагирский Д.А.

\_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

*подписано электронно-цифровой подписью*

**Программа дисциплины**  
Основы магнитного резонанса Б1.В.ДВ.10

Направление подготовки: 03.03.03 - Радиофизика

Профиль подготовки: Физика магнитных явлений

Квалификация выпускника: бакалавр

Форма обучения: очное

Язык обучения: русский

**Автор(ы):**

Мамин Г.В.

**Рецензент(ы):**

Орлинский С.Б.

**СОГЛАСОВАНО:**

Заведующий(ая) кафедрой: Тагиров М. С.

Протокол заседания кафедры No \_\_\_\_\_ от "\_\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 201\_\_ г

Учебно-методическая комиссия Института физики:

Протокол заседания УМК No \_\_\_\_\_ от "\_\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 201\_\_ г

Регистрационный No 675018

Казань  
2018

## Содержание

1. Цели освоения дисциплины
2. Место дисциплины в структуре основной образовательной программы
3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины /модуля
4. Структура и содержание дисциплины/ модуля
5. Образовательные технологии, включая интерактивные формы обучения
6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов
7. Литература
8. Интернет-ресурсы
9. Материально-техническое обеспечение дисциплины/модуля согласно утвержденному учебному плану

Программу дисциплины разработал(а)(и) доцент, к.н. Мамин Г.В. Кафедра квантовой электроники и радиоспектроскопии Отделение радиофизики и информационных систем , George.Mamin@kpfu.ru

### 1. Цели освоения дисциплины

Основными целями освоения дисциплины 'Основы магнитного резонанса' являются ознакомление с физическими основами явлений, лежащих в основе таких экспериментальных методов исследования, как спектроскопия электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), ядерного магнитного резонанса (ЯМР), двойных резонансов и соответствующих импульсных методик. Подробно рассматриваются взаимодействия, определяющие энергетические спектры объектов исследования и проявления этих эффектов в сигналах магнитного резонанса. Важной частью курса является знакомство с техническими реализациями спектрометров магнитного резонанса, факторы, влияющие на чувствительность различных методов и пути дальнейшего развития рассматриваемых методов исследования.

### 2. Место дисциплины в структуре основной образовательной программы высшего профессионального образования

Данная учебная дисциплина включена в раздел " Б1.В.ДВ.10 Дисциплины (модули)" основной образовательной программы 03.03.03 Радиофизика и относится к дисциплинам по выбору. Осваивается на 4 курсе, 8 семестр.

Дисциплина профессионального цикла является дисциплиной по выбору, адресованной в первую очередь для студентов профиля 'Физика магнитных явлений' и направленной на формирование представлений о современных методах исследований вещества, основанных на явлениях магнитного резонанса. Для освоения материала необходимы знания дисциплин: электричество и магнетизм, квантовая механика, физика твердого тела, математический анализ, дифференциальные и интегральные уравнения, векторный и тензорный анализ, механика. Изучение дисциплины позволит расширить кругозор студентов на спектроскопические методы, комплементарные традиционно используемым в области квантовой электроники. Освоение дисциплины будет способствовать формированию специалиста с конкурентоспособными умениями и навыками, успешной профессиональной деятельности, позволит эффективно участвовать в научно-исследовательской работе, понимать результаты статей и монографий в соответствующих областях знаний.

### 3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины /модуля

В результате освоения дисциплины формируются следующие компетенции:

Шифр компетенции	Расшифровка приобретаемой компетенции
ОПК-1 (профессиональные компетенции)	способностью использовать в профессиональной деятельности базовые естественнонаучные знания, включая знания о предмете и объектах изучения, методах исследования, современных концепциях, достижениях и ограничениях естественных наук (прежде всего химии, биологии, экологии, наук о земле и человеке) - большую роль в курсе "Основы магнитного резонанса" играет самостоятельное изучение отдельных областей магнитного резонанса, дающее студентам навыки профессионального развития и саморазвития.

Шифр компетенции	Расшифровка приобретаемой компетенции
ОПК-2 (профессиональные компетенции)	способностью использовать в профессиональной деятельности базовые знания фундаментальных разделов математики, создавать математические модели типовых профессиональных задач и интерпретировать полученные результаты с учетом границ применимости моделей - курс "Основы магнитного резонанса " содержит многочисленные примеры применения теоретических знаний в областях квантовой механики и матанализа для получения параметров реальных физических, химических и биологических систем.
ПК-1 (профессиональные компетенции)	способностью использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин -курс "Основы магнитного резонанса " содержит многочисленные примеры применения теоретических знаний в областях квантовой механики и матанализа для получения параметров реальных физических, химических и биологических систем.
ПК-2 (профессиональные компетенции)	способностью проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта - курс "Основы магнитного резонанса " предусматривает практические занятия на самом современном лабораторном оборудовании

В результате освоения дисциплины студент:

1. должен знать:

теоретические основы явления магнитного резонанса, включая его классическую и квантовую интерпретацию, эффекты, обуславливающие форму линии магнитного резонанса, механизмы релаксации

2. должен уметь:

понимать, излагать и критически анализировать общефизическую информацию, необходимую для постановки и решения задач; пользоваться теоретическими основами, основными понятиями и закономерностями в области спектроскопии магнитного резонанса; осознавать достоинства и недостатки конкретных реализаций спектрометров магнитного резонанса;

3. должен владеть:

навыками построения установок и постановки экспериментов в области магнитного резонанса и двойных резонансов, направленных на решение конкретных научных и технологических задач

4. должен продемонстрировать способность и готовность:

Применять полученные знания и навыки в области магнитного резонанса при решении фундаментальных и практических задач в областях физики, химии и биологии.

#### 4. Структура и содержание дисциплины/ модуля

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетных(ые) единиц(ы) 144 часа(ов).

Форма промежуточного контроля дисциплины экзамен в 8 семестре.

Суммарно по дисциплине можно получить 100 баллов, из них текущая работа оценивается в 50 баллов, итоговая форма контроля - в 50 баллов. Минимальное количество для допуска к зачету 28 баллов.

- 86 баллов и более - "отлично" (отл.);  
 71-85 баллов - "хорошо" (хор.);  
 55-70 баллов - "удовлетворительно" (удов.);  
 54 балла и менее - "неудовлетворительно" (неуд.).

#### 4.1 Структура и содержание аудиторной работы по дисциплине/ модулю

##### Тематический план дисциплины/модуля

N	Раздел Дисциплины/ Модуля	Семестр	Неделя семестра	Виды и часы аудиторной работы, их трудоемкость (в часах)			Текущие формы контроля
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
1.	Тема 1. Введение в магнитный резонанс. Классическая теория.	8	1	1	2	0	Письменное домашнее задание
2.	Тема 2. Введение в магнитный резонанс. Квантовая теория.	8	2	1	4	0	Устный опрос
3.	Тема 3. Стационарные методы в магнитном резонансе	8	3,4	2	4	0	Устный опрос
4.	Тема 4. Импульсные методы в магнитном резонансе	8	5,6	2	4	0	Устный опрос
5.	Тема 5. Введение в теорию кристаллического поля	8	7	2	4	0	Устный опрос
6.	Тема 6. Применение спинового гамильтониана для вывода уровней энергий иона $Mn^{2+}$	8	8	2	4	0	Устный опрос
7.	Тема 7. Электронная и ядерная спин-решеточная релаксации	8	9,10	1	4	0	Устный опрос
8.	Тема 8. Взаимодействие ядер и электронов в атоме.	8	11	1	4	0	Устный опрос
9.	Тема 9. Магнитно резонансные методы в веществах в различных агрегатных состояниях.	8	12	1	4	0	Устный опрос
10.	Тема 10. Магнитно резонансные методы в медицине. ЯМР томография.	8	13,14	2	4	0	Устный опрос

N	Раздел Дисциплины/ Модуля	Семестр	Неделя семестра	Виды и часы аудиторной работы, их трудоемкость (в часах)			Текущие формы контроля
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
11.	Тема 11. Наблюдение ЭПР при проведение радиационного облучения веществ. Классификация центров окраски.	8	15	1	4	0	Устный опрос
12.	Тема 12. Определение количества парамагнитных центров. Типы стандартов.	8	16	2	4	0	Устный опрос
	Тема . Итоговая форма контроля	8		0	0	0	Экзамен
	Итого			18	46	0	

#### 4.2 Содержание дисциплины

##### Тема 1. Введение в магнитный резонанс. Классическая теория.

###### **лекционное занятие (1 часа(ов)):**

Определение магнитного резонанса. Определение спектра. Линии спектра, положение линий в спектре, ширина и интенсивность линии. Определение электронного парамагнитного резонанса. Определение ядерного магнитного резонанса. Связь магнитной восприимчивости и магнитно-резонансных методов. Уравнение прецессии. Вращающаяся система координат. Резонанс во ВСК.

###### **практическое занятие (2 часа(ов)):**

Расчет угла поворота магнитного момента под воздействием внешнего электромагнитного излучения

##### Тема 2. Введение в магнитный резонанс. Квантовая теория.

###### **лекционное занятие (1 часа(ов)):**

Квантово-механическое описание магнитного резонанса. Зеемановское расщепление уровней энергии. История открытия ЭПР и ЯМР. Особенности метода ЭПР и ЯМР. Величины электронных и ядерных магнитных моментов. Ширины линий и интенсивности линий ЭПР и ЯМР. Природа парамагнитных центров в веществе. Магнитный момент ядер в качестве объекта магнитно-резонансных методов.

###### **практическое занятие (4 часа(ов)):**

Применение уравнения Шредингера для получения структуры электронных уровней и расчет положения линии ЭПР при заданном g-факторе

##### Тема 3. Стационарные методы в магнитном резонансе

###### **лекционное занятие (2 часа(ов)):**

Стационарные методы в магнитном резонансе. Колебательный контур. Собственная частота и полоса пропускания контура. Добротность колебательного контура. Колебательный контур с распределенными параметрами - СВЧ резонатор. Положение образца в колебательном контуре и резонаторе. Согласование колебательных контуров. Применение колебательных контуров и резонаторов с высокой добротностью в спектроскопии. Простейший стационарный спектрометр. Недостатки усилительного такта постоянной частоты. Модуляция как средство компенсации дрейфа нуля. Модуляция магнитного поля в спектрометрах. Фаза сигнала. Синхронный детектор. Первая производная линии поглощения. Спектрометр с двойной модуляцией. Мостовой детектор. Метод скрещенных катушек блоха. Автодинный детектор. Супергетеродинный спектрометр.

**практическое занятие (4 часа(ов)):**

Расчет рабочей частоты, полосы пропускания, добротности ЯМР контура. Расчет рабочей частоты, полосы пропускания, добротности ЭПР резонатора.

**Тема 4. Импульсные методы в магнитном резонансе**

**лекционное занятие (2 часа(ов)):**

Импульсные методы в магнитном резонансе. Прецессия. Продольная и перпендикулярная намагниченности. Влияние радиочастотного импульса. Спин-решеточная релаксация. Спин-спиновая релаксация. Неоднородные магнитные поля. Уравнения Блоха. Измерение релаксации. Спектрометр с импульсным насыщением. Спад свободной индукции (ССИ). Преобразование Фурье для ССИ. Некогерентный импульсный спектрометр. Формирователь импульсов. Диодный переключатель. Диодный переключатель СВЧ. Схема развязки генератора и предусилителя спектрометра. Когерентный спектрометр. Спектрометр с преобразованием Фурье. Спиновое эхо. Последовательность Хана. Измерение спин-спиновой релаксации. Измерение спин-решеточной релаксации.

**практическое занятие (4 часа(ов)):**

Расчет времени парализации спектрометра при известных параметрах ЯМР контура. Расчет времени парализации спектрометра при известных параметрах ЭПР резонатора. Расчет добротности контура и резонатора при заданном времени парализации на разных частотах.

**Тема 5. Введение в теорию кристаллического поля**

**лекционное занятие (2 часа(ов)):**

Строение атома. Термы. Правило Хунда. Мультиплеты. Формула Ланде. Электрическое кристаллическое поле. Сферические функции и сферические операторы. Классификация Ватанабе для парамагнитных центров. Эквивалентные операторы Стивенса. Спиновый гамильтониан. Тонкая структура спектров ЭПР.

**практическое занятие (4 часа(ов)):**

Расчет нижележащего электронного уровня для ионов  $\text{Cr}^{3+}$  и  $\text{Mn}^{2+}$ . Расчет параметров кристаллического поля для кубической ячейки.

**Тема 6. Применение спинового гамильтониана для вывода уровней энергий иона  $\text{Mn}^{2+}$**

**лекционное занятие (2 часа(ов)):**

Вывод зависимости уровней энергий  $\text{Mn}^{2+}$  от внешнего магнитного поля. Матрица энергий. Решения для случая сильных и слабых полей. Сверхтонкая структура спектров ЭПР. Суперсверхтонкая (лигандная) структура спектров ЭПР. Необходимость изменения температуры для наблюдения спектров ЭПР.

**практическое занятие (4 часа(ов)):**

Численный расчет уровней энергии иона  $\text{Mn}^{2+}$  в среде Matlab-Easyspin. Определение положения линий в магнитном поле и их интенсивности с помощью функций диагонализации матрицы и поиска минимума оптимизирующей функции

**Тема 7. Электронная и ядерная спин-решеточная релаксации**

**лекционное занятие (1 часа(ов)):**

Спин-решеточная релаксация. Восстановление продольной намагниченности. Электромагнитное излучение (теория Эйнштейна). Механизм Валлера. Прямой процесс релаксации. Рамановский (двухфонный) процесс релаксации. Температурные зависимости времен спин-решеточной релаксации в областях низких и высоких температур для рамановского процесса. Релаксация через модуляцию электрического кристаллического поля. Прямой и рамановский процесс релаксации через модуляцию электрического кристаллического поля. Температурные зависимости времен спин-решеточной релаксации для крамерсовых некрамерсовых ионов и мультиплетов. Ядерная спин-решеточная релаксация. Релаксация через парамагнитные примеси. Спиновая диффузия. Ядерная квадрупольная спин-решеточная релаксация.

**практическое занятие (4 часа(ов)):**

Расчет времен релаксации по измеренному распаду поперечной намагниченности и восстановлению продольной намагниченности.

**Тема 8. Взаимодействие ядер и электронов в атоме.**

**лекционное занятие (1 часа(ов)):**

Взаимодействие ядер и электронов в атоме. Химический сдвиг. ЯМР высокого разрешения. Косвенное ядерное спин-спиновое взаимодействие. Сдвиг Найта. Ядерный квадрупольный резонанс. Уровни энергий при квадрупольном расщеплении, случаи слабого и сильного магнитных полей. Спектр порошка. ЯМР в антиферромагнетиках.

**практическое занятие (4 часа(ов)):**

Расчет химического сдвига.

**Тема 9. Магнитно резонансные методы в веществах в различных агрегатных состояниях.**

**лекционное занятие (1 часа(ов)):**

Магнитно резонансные методы в веществах в различных агрегатных состояниях. ЭПР в газах. ЯМР в газах. ЭПР и ЯМР в жидкостях. Усреднение спектров движением молекул. Использование усреднения спектров движением в ЯМР высокого разрешения. Измерение скорости потока жидкости. Диффузия в жидкости. Магнитно-резонансные методы в кристаллах. Угловые зависимости. Зависимость спектров ЭПР от локальной симметрии. Изменение спектров ЭПР при фазовых переходах. Фазовые переходы первого и второго рода и их влияние на спектры ЭПР. Эффект Яна-Теллера.

**практическое занятие (4 часа(ов)):**

Определение количества линий ЭПР в кристалле известной симметрии

**Тема 10. Магнитно резонансные методы в медицине. ЯМР томография.**

**лекционное занятие (2 часа(ов)):**

Магнитно резонансные методы в медицине. ЭПР в медицине. ЯМР в медицине. Типы используемых ядер. Релаксация биологических объектов. Томография. Соленоид. Шиммирующие катушки. Градиентные катушки. РЧ катушки. Принципы выделения нужных областей в томографии. Формирование слоя в томографии. Использование слоев для сокращения времени измерений. Спиновое эхо. Частотное детектирование. Фазовое детектирование. Преобразование Фурье в построении двухмерной картины. Использование слоев для построения трехмерной картины. Исследование распределения времен релаксации в томографии. Контрастные вещества. Исследование потока жидкости. Исследование диффузии жидкости.

**практическое занятие (4 часа(ов)):**

Двумерное Фурье преобразование формы эха.

**Тема 11. Наблюдение ЭПР при проведение радиационного облучения веществ.**

**Классификация центров окраски.**

**лекционное занятие (1 часа(ов)):**

Проведение радиационного облучения веществ при наблюдении ЭПР. Ультрафиолетовое облучение. Рентгеновское излучение. Мягкий и жесткий рентген. Гамма излучение. Образование центров с локальной компенсацией заряда. Образование центров с нелокальной компенсацией заряда. Центры окраски в кристаллах. Классификация центров окраски. F, U, V ?центры окраски. VF, Vt, и H центры окраски.

**практическое занятие (4 часа(ов)):**

Расчет возраста песка

**Тема 12. Определение количества парамагнитных центров. Типы стандартов.**

**лекционное занятие (2 часа(ов)):**

Определение количества парамагнитных центров. Вычисление количества парамагнитных центров по известным характеристикам спектрометра. Вычисление количества парамагнитных центров методом сравнения с откалиброванным образцом. Типы веществ применяемых в качестве калиброванных образцов. Определение дозы облучения. Измерение возраста песка в нефтяной промышленности.

**практическое занятие (4 часа(ов)):**

Расчет концентрации парамагнитных центров



## 4.3 Структура и содержание самостоятельной работы дисциплины (модуля)

N	Раздел Дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды самостоятельной работы студентов	Трудоемкость (в часах)	Формы контроля самостоятельной работы
2.	Тема 2. Введение в магнитный резонанс. Квантовая теория.	8	2	Поиск научных статей в которых применяется матрица плотности.	4	устный опрос
3.	Тема 3. Стационарные методы в магнитном резонансе	8	3,4	Поиск информации в сети интернет о структуре и характеристиках современных стационарных ЯМР и ЭПР сп	4	устный опрос
4.	Тема 4. Импульсные методы в магнитном резонансе	8	5,6	Поиск информации в сети интернет о структуре и характеристиках современных импульсных ЯМР и ЭПР спек	4	устный опрос
5.	Тема 5. Введение в теорию кристаллического поля	8	7	подготовка к устному опросу	4	устный опрос
6.	Тема 6. Применение спинового гамильтониана для вывода уровней энергий иона $Mn^{2+}$	8	8	подготовка к устному опросу	4	устный опрос
7.	Тема 7. Электронная и ядерная спин-решеточная релаксации	8	9,10	подготовка к устному опросу	4	устный опрос
8.	Тема 8. Взаимодействие ядер и электронов в атоме.	8	11	подготовка к устному опросу	4	устный опрос
9.	Тема 9. Магнитно резонансные методы в веществах в различных агрегатных состояниях.	8	12	подготовка к устному опросу	4	устный опрос
10.	Тема 10. Магнитно резонансные методы в медицине. ЯМР томография.	8	13,14	подготовка к устному опросу	4	устный опрос

N	Раздел Дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды самостоятельной работы студентов	Трудоемкость (в часах)	Формы контроля самостоятельной работы
11.	Тема 11. Наблюдение ЭПР при проведение радиационного облучения веществ. Классификация центров окраски.	8	15	подготовка к устному опросу	4	устный опрос
12.	Тема 12. Определение количества парамагнитных центров. Типы стандартов.	8	16	подготовка к устному опросу	4	устный опрос
	Итого				44	

### 5. Образовательные технологии, включая интерактивные формы обучения

Лекционные и практические занятия проводятся с использованием мультимедийного комплекса, позволяющего наглядно получать студентам всю необходимую информацию. Занятия проводятся в интерактивной форме, позволяющей студентам лучше усваивать материал. В лекциях уделено большое внимание разбору конкретных ситуаций, где необходимо применение магнитного резонанса. Читаемый курс лекций размещен в интернете <http://www.gmamin.kpfu.ru>.

### 6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

**Тема 1. Введение в магнитный резонанс. Классическая теория.**

**Тема 2. Введение в магнитный резонанс. Квантовая теория.**

устный опрос , примерные вопросы:

Проверка знаний студентов о применении матрицы плотности для расчета спинового эха.

**Тема 3. Стационарные методы в магнитном резонансе**

устный опрос , примерные вопросы:

Проводится проверка знаний студентов на основные частотные диапазоны спектрометров ЯМР и ЭПР, а также о максимальной чувствительности спектрометров

**Тема 4. Импульсные методы в магнитном резонансе**

устный опрос , примерные вопросы:

Проводится проверка знаний студентов на параметры импульсов спектрометров ЯМР и ЭПР

**Тема 5. Введение в теорию кристаллического поля**

устный опрос , примерные вопросы:

Проводится проверка знаний студентов по определению основных состояний заданного термина или мультиплета.

**Тема 6. Применение спинового гамильтониана для вывода уровней энергий иона  $Mn^{2+}$**

устный опрос , примерные вопросы:

Проводится проверка знаний студентов об использовании среды Matlab-EasySpin

**Тема 7. Электронная и ядерная спин-решеточная релаксации**

устный опрос , примерные вопросы:

Проводится проверка знаний студентов об основных температурных зависимостях времен спин-решеточной релаксации

## **Тема 8. Взаимодействие ядер и электронов в атоме.**

устный опрос , примерные вопросы:

Студентами дается расшифровка спектров ЯМР высокого разрешения

## **Тема 9. Магнитно резонансные методы в веществах в различных агрегатных состояниях.**

устный опрос , примерные вопросы:

Студенты представляют результаты определения количества линий ЭПР при заданной ориентации и симметрии кристалла

## **Тема 10. Магнитно резонансные методы в медицине. ЯМР томография.**

устный опрос , примерные вопросы:

Проводится опрос на знание студентами основных последовательностей ЯМР томографии

## **Тема 11. Наблюдение ЭПР при проведение радиационного облучения веществ.**

### **Классификация центров окраски.**

устный опрос , примерные вопросы:

Проводится опрос на знание основных центров окраски в кристаллах.

## **Тема 12. Определение количества парамагнитных центров. Типы стандартов.**

устный опрос , примерные вопросы:

Студенты представляют результаты расчета количества парамагнитных центров в заданном веществе.

## **Тема . Итоговая форма контроля**

Примерные вопросы к экзамену:

### **ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ**

1 Определение магнитного резонанса. Определение спектра. Линии спектра, положение линий в спектре, ширина и интенсивность линии. Определение электронного парамагнитного резонанса. Определение ядерного магнитного резонанса. Связь магнитной восприимчивости и магнитно-резонансных методов.

2 Уравнение прецессии. Вращающаяся система координат. Резонанс во ВСК.

Квантово-механическое описание магнитного резонанса. Зеемановское расщепление уровней энергии.

3 История открытия ЭПР и ЯМР. Особенности метода ЭПР и ЯМР. Величины электронных и ядерных магнитных моментов. Ширины линий и интенсивности линий ЭПР и ЯМР. Природа парамагнитных центров в веществе. Магнитный момент ядер в качестве объекта магнитно-резонансных методов.

4 Стационарные методы в магнитном резонансе. Колебательный контур. Собственная частота и полоса пропускания контура. Добротность колебательного контура. Колебательный контур с распределенными параметрами - СВЧ резонатор. Положение образца в колебательном контуре и резонаторе. Согласование колебательных контуров. Применение колебательных контуров и резонаторов с высокой добротностью в спектроскопии.

5 Простейший стационарный спектрометр. Недостатки усилительного такта постоянной частоты. Модуляция как средство компенсации дрейфа нуля. Модуляция магнитного поля в спектрометрах. Фаза сигнала. Синхронный детектор. Первая производная линии поглощения. Спектрометр с двойной модуляцией.

6 Мостовой детектор. Метод скрещенных катушек блоха. Автодинный детектор. Супергетеродинный спектрометр.

7 Импульсные методы в магнитном резонансе. Продольная и перпендикулярная намагниченности. Влияние радиочастотного импульса. Спин-решеточная релаксация. Спин-спиновая релаксация. Неоднородные магнитные поля.

8 Измерение релаксации. Спектрометр с импульсным насыщением. Спад свободной индукции (ССИ). Преобразование Фурье для ССИ. Некогерентный импульсный спектрометр. Когерентный импульсный спектрометр. Спектрометр с преобразованием Фурье.

9 Спиновое эхо. Последовательность Хана. Измерение спин-спиновой релаксации. Измерение спин-решеточной релаксации.

- 10 Строение атома. Термы. Правило Хунда. Мультиплеты. Формула Ланде. Электрическое кристаллическое поле. Сферические функции и сферические операторы. Классификация Ватанабе для парамагнитных центров.
- 11 Эквивалентные операторы Стивенса. Спиновый гамильтониан. Тонкая структура спектров ЭПР. Сверхтонкая структура спектров ЭПР. Суперсверхтонкая (лигандная) структура спектров ЭПР.
- 12 Спин-решеточная релаксация. Восстановление продольной намагниченности. Электромагнитное излучение (теория Эйнштейна) (принцип). Механизм Валера (принцип). Прямой процесс релаксации. Рамановский (двухфонновый) процесс релаксации. Температурные зависимости времен спин-решеточной релаксации в областях низких и высоких температур для раммановского процесса.
- 13 Релаксация через модуляцию электрического кристаллического поля (принцип). Прямой и раммановский (двухфонновый) процесс релаксации через модуляцию электрического кристаллического поля. Температурные зависимости времен спин-решеточной релаксации для крамерсовых, некрамерсовых ионов и мультиплетов.
- 14 Ядерная спин-решеточная релаксация. Релаксация через парамагнитные примеси. Спиновая диффузия. Ядерная квадрупольная спин-решеточная релаксация.
- 15 Взаимодействие ядер и электронов в атоме. Химический сдвиг. ЯМР высокого разрешения. Косвенное ядерное спин-спиновое взаимодействие. Сдвиг Найта.
- 16 Ядерный квадрупольный резонанс. Уровни энергий при квадрупольном расщеплении, случаи слабого и сильного магнитных полей. Спектр порошка. ЯМР в антиферромагнетиках
- 17 Магнитно резонансные методы в веществах в различных агрегатных состояниях. ЭПР в газах. ЯМР в газах. ЭПР и ЯМР в жидкостях. Усреднение спектров движением молекул. Использование усреднения спектров движением в ЯМР высокого разрешения.
- 18 Измерение скорости потока жидкости . Диффузия в жидкости.
- 19 Магнитно-резонансные методы в кристаллах. Угловые зависимости. Зависимость спектров ЭПР от локальной симметрии. Изменение спектров ЭПР при фазовых переходах. Фазовые переходы первого и второго рода и их влияние на спектры ЭПР. Эффект Яна-Теллера.
- 20 Магнитно резонансные методы в медицине. ЯМР в медицине. Типы используемых ядер. Томография. Соленоид. Шиммирующие катушки. Градиентные катушки. РЧ катушки. Принципы выделения нужных областей в томографии. Формирование слоя в томографии.
- 21 Частотное детектирование. Фазовое детектирование. Преобразование Фурье в построении двумерной картины. Использование слоев для построения трехмерной картины.
- 22 Образование центров с локальной компенсацией заряда. Образование центров с нелокальной компенсацией заряда. Центры окраски в кристаллах. ЭПР в облученном веществе. Зависимость количества центров от дозы облучения. Рекомбинация. Энергия активации. Зависимость скорости рекомбинации от температуры, закон Аррениуса. Нарастание количества центров под действием облучения при рекомбинации. Определение дозы облучения.
- 23 Определение количества парамагнитных центров. Вычисление количества парамагнитных центров по известным характеристикам спектрометра (особенности). Вычисление количества парамагнитных центров методом сравнения с откалиброванным образцом. Типы веществ применяемых в качестве калиброванных образцов.
- 24 Классификация центров окраски. F,U,V -центры окраски. VF, Vt, и H центры окраски.

### 7.1. Основная литература:

1. М.М.Зарипов Основы теории спектров электронного парамагнитного резонанса в кристаллах: курс лекций. - Казань: Казан.гос.ун-т, 2009
2. Электронные приборы и устройства: Учебник / Ф.А. Ткаченко. - М.: ИНФРА-М; Мн.: Нов. знание, 2011. - 682 с.: ил.; 60x90 1/16. - (Высшее образование). (переплет) ISBN 978-5-16-004658-7. <http://znanium.com/bookread.php?book=209952>
3. Сергеев, Н. А. Основы квантовой теории ядерного магнитного резонанса : монография / Н. А. Сергеев, Д. С. Рябушкин. - М. : Логос, 2013. - 272 с. - ISBN 978-5-98704-754-5

<http://www.znaniium.com/bookread.php?book=469025>

## 7.2. Дополнительная литература:

1. Методическое пособие 'Настройка спектрометра X-диапазона фирмы Брукер серии Elexsys и измерение спектров ЭПР в стационарном режиме' / Ю.С. Кутын, Г.В. Мамин, С.Б. Орлинский, Н.И. Силкин // 2014. электронный образовательный ресурс [http://gmamin.kpfu.ru/MRpract/X\\_band\\_CW.pdf](http://gmamin.kpfu.ru/MRpract/X_band_CW.pdf)
2. Методическое пособие 'Использование программного модуля EasySpin в анализе спектров магнитного резонанса' / Г.В. Мамин, С.Б. Орлинский, Н.И. Силкин, И.Н. Субачева, Р.В. Юсупов // 2014. <http://gmamin.kpfu.ru/MRpract/easyspin.pdf>
3. Ядерный магнитный резонанс. Теория и практика. В 3 ч. Ч. 2: Учебное пособие / Бельская Н.П., Ельцов О.С., - 2-е изд., стер. - М.:Флинта, 2018. - 124 с.: ISBN 978-5-9765-3557-2 <http://znaniium.com/bookread2.php?book=966424>

## 7.3. Интернет-ресурсы:

Лекции в электронном формате - <http://www.gmamin.kpfu.ru>  
Поисковая система Scopus - <http://www.scopus.com/home.url>  
Сайт издателя Elsevier - <http://elsevierscience.ru/>  
Центр коллективного пользования КПФУ - [http://www.kpfu.ru/main\\_page?p\\_sub=11446](http://www.kpfu.ru/main_page?p_sub=11446)  
Электронный журнал Physical Review B - <http://prb.aps.org/>

## 8. Материально-техническое обеспечение дисциплины(модуля)

Освоение дисциплины "Основы магнитного резонанса" предполагает использование следующего материально-технического обеспечения:

Мультимедийная аудитория, вместимостью более 60 человек. Мультимедийная аудитория состоит из интегрированных инженерных систем с единой системой управления, оснащенная современными средствами воспроизведения и визуализации любой видео и аудио информации, получения и передачи электронных документов. Типовая комплектация мультимедийной аудитории состоит из: мультимедийного проектора, автоматизированного проекционного экрана, акустической системы, а также интерактивной трибуны преподавателя, включающей тач-скрин монитор с диагональю не менее 22 дюймов, персональный компьютер (с техническими характеристиками не ниже Intel Core i3-2100, DDR3 4096Mb, 500Gb), конференц-микрофон, беспроводной микрофон, блок управления оборудованием, интерфейсы подключения: USB, audio, HDMI. Интерактивная трибуна преподавателя является ключевым элементом управления, объединяющим все устройства в единую систему, и служит полноценным рабочим местом преподавателя. Преподаватель имеет возможность легко управлять всей системой, не отходя от трибуны, что позволяет проводить лекции, практические занятия, презентации, вебинары, конференции и другие виды аудиторной нагрузки обучающихся в удобной и доступной для них форме с применением современных интерактивных средств обучения, в том числе с использованием в процессе обучения всех корпоративных ресурсов. Мультимедийная аудитория также оснащена широкополосным доступом в сеть интернет. Компьютерное оборудование имеет соответствующее лицензионное программное обеспечение.

Компьютерный класс, представляющий собой рабочее место преподавателя и не менее 15 рабочих мест студентов, включающих компьютерный стол, стул, персональный компьютер, лицензионное программное обеспечение. Каждый компьютер имеет широкополосный доступ в сеть Интернет. Все компьютеры подключены к корпоративной компьютерной сети КФУ и находятся в едином домене.

Учебно-методическая литература для данной дисциплины имеется в наличии в электронно-библиотечной системе "ZNANIUM.COM", доступ к которой предоставлен студентам. ЭБС "ZNANIUM.COM" содержит произведения крупнейших российских учёных, руководителей государственных органов, преподавателей ведущих вузов страны, высококвалифицированных специалистов в различных сферах бизнеса. Фонд библиотеки сформирован с учетом всех изменений образовательных стандартов и включает учебники, учебные пособия, УМК, монографии, авторефераты, диссертации, энциклопедии, словари и справочники, законодательно-нормативные документы, специальные периодические издания и издания, выпускаемые издательствами вузов. В настоящее время ЭБС ZNANIUM.COM соответствует всем требованиям федеральных государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) нового поколения.

Учебно-методическая литература для данной дисциплины имеется в наличии в электронно-библиотечной системе Издательства "Лань", доступ к которой предоставлен студентам. ЭБС Издательства "Лань" включает в себя электронные версии книг издательства "Лань" и других ведущих издательств учебной литературы, а также электронные версии периодических изданий по естественным, техническим и гуманитарным наукам. ЭБС Издательства "Лань" обеспечивает доступ к научной, учебной литературе и научным периодическим изданиям по максимальному количеству профильных направлений с соблюдением всех авторских и смежных прав.

Лабораторный вычислительный комплекс Easyspin на основе Matlab.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВПО и учебным планом по направлению 03.03.03 "Радиофизика" и профилю подготовки Физика магнитных явлений .

Автор(ы):

Мамин Г.В. \_\_\_\_\_

"\_\_" \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

Рецензент(ы):

Орлинский С.Б. \_\_\_\_\_

"\_\_" \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.