

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. Таюрский Д.А.



\_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

*подписано электронно-цифровой подписью*

### Программа дисциплины

Радиоспектроскопия конденсированных сред Б1.В.ДВ.4

Направление подготовки: 03.04.02 - Физика

Профиль подготовки: Физика конденсированного состояния

Квалификация выпускника: магистр

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 663817

Казань

2017

## 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 "Радиоспектроскопия конденсированных сред" 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.4 Дисциплины (модули)" основной образовательной программы 03.04.02 Физика и относится к дисциплинам по выбору. Осваивается на 1 курсе, 1, 2 семестры.

Дисциплина профессионального цикла является дисциплиной по выбору, адресованной в первую очередь для студентов профиля "Физика конденсированного состояния" 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
ОК-1 (общекультурные компетенции)	(ОК-1) способностью к абстрактному мышлению, анализу, синтезу. Дисциплина содержит большое количество экспериментального материала, который с помощью математического аппарата преобразуется в закономерности, выдвигаются и проверяются гипотезы. Все это развивает у слушателей способность к абстрактному мышлению, анализу, синтезу

Шифр компетенции	Расшифровка приобретаемой компетенции
ОПК-5 (профессиональные компетенции)	(ОПК-5) способностью использовать свободное владение профессионально-профилированными знаниями в области компьютерных технологий для решения задач профессиональной деятельности, в том числе находящихся за пределами направленности (профиля) подготовки Использование современных компьютерных пакетов для численного решения актуальных задач физики, а также использование различных поисковых научных систем, учит слушателей курсу использованию компьютерных технологий для решения задач профессиональной деятельности
ОПК-6 (профессиональные компетенции)	(ОПК-6) способностью использовать знания современных проблем и новейших достижений физики в научно-исследовательской работе Преподаваемый материал показывает развитие научных проблем от времени их формирования до самых современных способов решения. Современность способ гарантируется использованием новейших научных статей, освящающих данную проблему.
ПК-1 (профессиональные компетенции)	способностью самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего отечественного и зарубежного опыта Самостоятельная работа, основанная на поиске нового научного материала, развивает у слушателей курсу способности к постановке и решению научных задач с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего отечественного и зарубежного опыта
ПК-2 (профессиональные компетенции)	(ПК-2) способностью свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности Преподаваемый материал предусматривает обзор разделов физики соответствующих следующим разделам ?Приоритетные направления развития науки, технологий и техники в Российской Федерации? ?Индустрия наносистем?, ?Науки о жизни?, ?Рациональное природопользование?, таким образом готовя слушателей курсу к решению научно-инновационных задач.
ПК-5 (профессиональные компетенции)	(ПК-5) способностью использовать навыки составления и оформления научно-технической документации, научных отчетов, обзоров, докладов и статей Результаты самостоятельной работы оформляются слушателями курсу в соответствии с правилами оформления научных отчетов ГОСТ 7.32-2001, что формирует у слушателей курсу навыки составления и оформления научно-технической документации, научных отчетов, обзоров, докладов и статей.

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 демонстрировать 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 6 зачетных(ые) единиц(ы) 216 часа(ов).

Форма промежуточного контроля дисциплины отсутствует в 1 семестре; экзамен во 2 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.	1	1	3	0	0	Отчет
2.	Тема 2. Введение в магнитный резонанс. Квантовая теория.	1	2	3	0	0	Устный опрос
3.	Тема 3. Стационарные методы в магнитном резонансе	1	3,4	3	0	0	Устный опрос
4.	Тема 4. Импульсные методы в магнитном резонансе	1	5,6	3	0	0	Устный опрос
5.	Тема 5. Введение в теорию кристаллического поля	1	7	3	0	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	
6.	Тема 6. Применение спинового гамильтониана для вывода уровней энергий иона $Mn^{2+}$	1	8	3	0	0	Устный опрос
7.	Тема 7. Электронная и ядерная спин-решеточная релаксации	2	9,10	3	3	0	Устный опрос
8.	Тема 8. Взаимодействие ядер и электронов в атоме.	2	11	3	3	0	Устный опрос
9.	Тема 9. Магнитно резонансные методы в веществах в различных агрегатных состояниях.	2	12	3	3	0	Устный опрос
10.	Тема 10. Магнитно резонансные методы в медицине. ЯМР томография.	2	13,14	3	3	0	Устный опрос
11.	Тема 11. Наблюдение ЭПР при проведение радиационного облучения веществ. Классификация центров окраски.	2	15	3	3	0	Устный опрос
12.	Тема 12. Определение количества парамагнитных центров. Типы стандартов.	2	16	3	3	0	Устный опрос
	Тема . Итоговая форма контроля	2		0	0	0	Экзамен
	Итого			36	18	0	

## 4.2 Содержание дисциплины

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

#### *лекционное занятие (3 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.

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

#### *лекционное занятие (3 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.

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

#### **лекционное занятие (3 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.

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

#### **лекционное занятие (3 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.

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

#### **лекционное занятие (3 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. Вывод зависимости уровней энергий  $Mn^{2+}$  от внешнего магнитного поля. Матрица энергий.

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

#### **лекционное занятие (3 часа(ов)):**

Вывод зависимости уровней энергий  $Mn^{2+}$  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.

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

#### **лекционное занятие (3 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 (3 часа(ов)):**

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

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

#### **лекционное занятие (3 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 (3 часа(ов)):**

Расчет химического сдвига.

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

#### **лекционное занятие (3 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 (3 часа(ов)):**

Определение спектра ЭПР в кристалле известной симметрии

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

#### **лекционное занятие (3 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 (3 часа(ов)):**

Двумерное фурье преобразование формы эха.

### **Тема 11. Наблюдение ЭПР при проведении радиационного облучения веществ. Классификация центров окраски.**

#### **лекционное занятие (3 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 (3 часа(ов)):**

Расчет возраста песка

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

#### **лекционное занятие (3 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 (3 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
1.	Тема 1. Введение в магнитный резонанс. Классическая теория.	1	1	Вывод уравнения прецессии на основе уравнений Блоха.	9	отчет
2.	Тема 2. Введение в магнитный резонанс. Квантовая теория.	1	2	Поиск научных статей в которых применяется матрица плотности.	9	устный опрос
3.	Тема 3. Стационарные методы в магнитном резонансе	1	3,4	Поиск информации в сети интернет о структуре и характеристиках современных стационарных ЯМР и ЭПР сп	9	устный опрос
4.	Тема 4. Импульсные методы в магнитном резонансе	1	5,6	Поиск информации в сети интернет о структуре и характеристиках современных импульсных ЯМР и ЭПР спек	9	устный опрос
5.	Тема 5. Введение в теорию кристаллического поля	1	7	Поиск информации в сети интернет о применении параметров кристаллического поля для построения соврем	9	устный опрос
6.	Тема 6. Применение спинового гамильтониана для вывода уровней энергий иона Mn <sup>2+</sup>	1	8	Поиск информации в сети интернет о виде спектров ЭПР ионов Mn <sup>2+</sup> в кристаллах CaF <sub>2</sub> , ГАП и растворах м	9	устный опрос

N	Раздел Дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды самостоятельной работы студентов	Трудоемкость (в часах)	Формы контроля самостоятельной работы
7.	Тема 7. Электронная и ядерная спин-решеточная релаксации	2	9,10	Поиск информации в сети интернет о параметрах релаксации крамерсовых и некрамерсовых ионов.	12	устный опрос
8.	Тема 8. Взаимодействие ядер и электронов в атоме.	2	11	Поиск информации в сети интернет современных возможностях ЯМР высокого разрешения. Поиск информации	12	устный опрос
9.	Тема 9. Магнитно резонансные методы в веществах в различных агрегатных состояниях.	2	12	Поиск информации о безконтактных расходомерах нефти	12	устный опрос
10.	Тема 10. Магнитно резонансные методы в медицине. ЯМР томография.	2	13,14	Поиск информации о типах ЯМР томографов расположенных в Приволжском регионе.	12	устный опрос
11.	Тема 11. Наблюдение ЭПР при проведение радиационного облучения веществ. Классификация центров окраски.	2	15	Поиск и изучение научных работ посвященных изменению цвета драгоценных камней под действием гамма о	12	устный опрос
12.	Тема 12. Определение количества парамагнитных центров. Типы стандартов.	2	16	Поиск и изучение научных работ посвященных радиационному облучению дентина зуба (гидроксиапатита) в	12	устный опрос
	Итого				126	

## 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.**

отчет , примерные вопросы:

Проверка правильности вывода уравнения прецессии

### **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 о применении параметров кристаллического поля для построения первого в мире лазера - лазера на рубине.

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

устный опрос , примерные вопросы:

Проводится проверка знаний студентов о трансформации тонкой структуры спектров ЭПР в указанных в задании веществах

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

устный опрос , примерные вопросы:

Проводится проверка знаний студентов о температурном диапазоне наблюдения указанного им центра.

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

устный опрос , примерные вопросы:

Проводится проверка поиска студентами информации о спектрометрах ЯМР высокого разрешения.

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

устный опрос , примерные вопросы:

Проводится проверка поиска студентами информации о патентах расходомеров.

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

устный опрос , примерные вопросы:

Проводится проверка поиска студентами информации о спектрометрах ЯМР томографов. Ведется дискуссия о сильных и слабых сторонах томографов.

### **Тема 11. Наблюдение ЭПР при проведении радиационного облучения веществ. Классификация центров окраски.**

устный опрос , примерные вопросы:

Проводится проверка знаний студентах об изменении цвета окраски различных кристаллов. Ведется дискуссия о возможности применения метода ЭПР для определения искусственной природы окраски.

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

устный опрос , примерные вопросы:

Ведется дискуссия о сильных и слабых сторонах различных стандартов.

## **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 (двухфонный) 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 рамановский (двухфонный) процесс релаксации через модуляцию электрического кристаллического поля. Температурные зависимости времен спин-решеточной релаксации для крамеровских, некрамеровских ионов и мультеплетов.
- 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 двухмерной 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:

Курс общей физики, Кн. 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц, , 2007г.

Магнитный резонанс в химии и медицине, Фримэн, Рэй;Волынкин, В. А., 2009г.

Основы теории спектров электронного парамагнитного резонанса в кристаллах, Зарипов, Максут Мухаметзянович, 2009г.

4. 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/catalog.php?bookinfo=209952>

5. Методическое пособие "Настройка спектрометра X-диапазона фирмы Брукер серии Elexsys и измерение спектров ЭПР в стационарном режиме" / Ю.С. Кутьин, 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)

6. 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. электронный образовательный ресурс <http://gmamin.kpfu.ru/MRpract/easyspin.pdf>

## 7.2. Дополнительная литература:

1. С.А.Айтшулер, Б.М.Козырев. ЭПР соединений переходных групп. М., Наука, 1972.
2. Абрагам А., Блини Б. Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов. т.1 и т.2. Изд. "Мир", М., 1973
3. Абрагам А. Ядерный магнетизм. Изд. Ин. Лит., 1963
4. Александров И.В. Теория ядерного магнитного резонанса. "Наука" 1964
5. Кессених А.В. Ядерный магнитный резонанс. "Знание", 1965
6. Зарипов М.М. Основы теории спектров электронного парамагнитного резонанса в кристаллах Изд. Казанский государственный университет, 2009, 208 с.
7. Леше А. Ядерная индукция. Изд. Ин. Лит. 1963
8. Эндрю Э. Ядерный магнитный резонанс. Изд. Ин. Лит. 1957
9. Попп Дж., Шнейдер В., Бернштейн Т. Спектры ЯМР высокого разрешения. Изд. Ин. Лит. 1962
10. Вертц. Дж. Болтон. Дж. Теория и практические приложения метода ЭПР. "Мир", М. 1975
11. Peter A.Rinck Magnetic Resonance in Medicine Blackwell Wissenschafts-Verlag Berlin Vienna 2001

## 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 "Радиоспектроскопия конденсированных сред" 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.

Лабораторный вычислительный комплекс Easyspin на основе Matlab.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВПО и учебным планом по направлению 03.04.02 "Физика" и магистерской программе Физика конденсированного состояния .

Автор(ы):

Мамин Г.В. \_\_\_\_\_

"\_\_" \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

Рецензент(ы):

Орлинский С.Б. \_\_\_\_\_

"\_\_" \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.