

1. Электронный магнитный резонанс: теория и практические приложения

2. Лекторы.

2.1. Доктор физико-математических наук, доцент Кокшаров Юрий Алексеевич, кафедра общей физики, yak@physics.msu.ru; +7(939)939-29-73.

3. Аннотация дисциплины.

В курсе изучаются теория и практические приложения метода электронного магнитного резонанса (ЭМР), включающего в себя электронный парамагнитный резонанс (ЭПР), ферромагнитный резонанс (ФМР), антиферромагнитный резонанс (АФМР), электронный суперпарамагнитный резонанс (ЭСПР). В первом разделе обсуждаются общие вопросы спектроскопии ЭМР - разновидности спектров ЭМР, способы их регистрации. Второй раздел курса посвящён теории спектров ЭМР в материалах различной магнитной природы: обсуждаются тонкая и сверхтонкая структура спектров ЭМР, метод эффективного спин-гамильтониана, влияние на спектры ЭМР кристаллического поля и фазовых магнитных переходов. В третьем разделе изучаются теория и результаты экспериментального исследования спектров ЭМР объёмных магнитоупорядоченных сред, высокотемпературных сверхпроводников, а также наночастиц и наноструктур. Заключительный раздел курса даёт представление о практических приложениях метода ЭМР в естественных науках (физике, биологии, химии, геологии), в технике и медицине.

4. Цели освоения дисциплины.

Целью курса является изучение теории и практических приложений спектроскопии электронного магнитного резонанса.

5. Задачи дисциплины.

Формирование знания основ спектроскопии электронного магнитного резонанса и умения применять их в профессиональной области.

6. Компетенции.

6.1. Компетенции, необходимые для освоения дисциплины.

М-ОНК-2

М-ПК-1

М-ИК-1

6.2. Компетенции, формируемые в результате освоения дисциплины.

М-ПК-2

М-ПК-5

7. Требования к результатам освоения содержания дисциплины

В результате освоения дисциплины студент должен
знать основы спектроскопии электронного магнитного резонанса;
уметь анализировать основные типы спектров электронного магнитного резонанса;
владеть практической методологией спектроскопии электронного магнитного резонанса;

представлять возможности спектроскопии электронного магнитного резонанса в профессиональной области.

8. Содержание и структура дисциплины.

Вид работы	Семестр	Всего
	1	
Общая трудоёмкость, акад. часов	72	72
Аудиторная работа:	36	36
Лекции, акад. часов	18	18
Семинары, акад. часов	18	18
Лабораторные работы, акад. часов		
Самостоятельная работа, акад. часов	36	36
Вид итогового контроля (зачёт, зачёт с оценкой, экзамен)	Экзамен	

№ раз-дела	Наименование раздела	Трудоёмкость (академических часов) и содержание занятий			Самостоятельная работа	Форма текущего контроля
		Аудиторная работа				
		Лекции	Семинары	Лабораторные работы		
1	Общие вопросы спектроскопии электронного магнитного резонанса.	1 час Спектроскопические методы исследования вещества и их классификация. Особенности метода ЭМР. Спектрометры, применяемые в методе ЭМР. Стационарные и импульсные методики.	2 часа Технические параметры, влияющие на чувствительность и разрешающую способность спектрометров ЭМР. Нестандартные способы регистрации спектров ЭМР.		6 часов. Родственные ЭМР методы магниторезонансной спектроскопии (ЯМР, ЯКР, ГМР). Электронное строение и свойства основных типов магнетиков (парамагнетики, ферро-, антиферро-, ферримагнетики, спиновые стекла и др.).	Контрольная работа
		1 час Разновидности метода ЭМР: электронный парамагнитный резонанс (ЭПР), электронный спиновый резонанс (ЭСР), ферромагнитный резонанс (ФМР), антиферромагнитный резонанс (АФМР), электронный суперпарамагнитный резонанс.	2 часа Виды спектров ЭМР. Синглетные спектры и спектры со сложной разрешённой структурой. Характеристики синглетного спектра. Однородное и неоднородное уширение сигнала ЭМР.		4 часа. Принципы работы клистрона, диода Ганна, синхронного усилителя. Фурье-разложение электромагнитных импульсов.	
2	Теория ЭМР и её подтверждение в эксперименте для парамагнетиков (ЭПР).	1 час Квантовомеханическое и квазиклассическое описание явления ЭМР. Времена релаксации T_1 и T_2 , продольная и поперечная релаксация. Ме-	2 часа Уравнения Блоха, Кителя, Ландау-Лифшица-Гильберта. Тонкая и сверхтонкая структура в спектрах ЭПР. Эффективный		4 часа. Математический анализ взаимосвязи параметров основных типов формы спектральной линии – гауссиана, лорентциана, фойггиана,	Контрольная работа

		ханизмы релаксации и методы их изучения.	спин-гамильтониан.		дайсоаниана, тцаллиана. Анализ используемых приближений при решении уравнений Блоха, Киттеля, Ландау-Лифшица-Гильберта.	
		2 часа. Магнитная релаксация и явление насыщения в ЭМР. Насыщение однородно и неоднородно уширенных линий ЭПР.	2 часа Использование кривых насыщения для определения времен релаксации T_1 и T_2 . Применение метода насыщения для определения структуры плохоразрешенных спектров ЭПР.		2 часа. Анализ кривых насыщения амплитуды и ширины спектров ЭПР в рамках «двухкомпонентной» модели синглетных спектров ЭПР.	
		1 час. Магнитные взаимодействия и ЭПР. ЭПР в области магнитных фазовых переходов.			4 часа. Теория кристаллического поля. Физика магнитных фазовых переходов.	
3	Теория ЭМР и её подтверждение в эксперименте. для магнитоупорядоченных сред (ФМР, АФМР)..	2 часа. ЭМР в магнитоупорядоченных средах. Теоретические модели однодоменных ферромагнитных частиц. Особенности ФМР тонких плёнок.	1 час Уравнение Смита-Бельджерса. Влияние форм-фактора и магнитной кристаллической анизотропии на спектры ФМР.		2 часа. Модель Стонера-Вольфарта.	Контрольная работа
		1 час. Теория ЭМР в антиферромагнетиках и ферримагнетиках.	1 час ЭМР в ферромагнитных и антиферромагнитных соединениях переходных 3d, 4d и 4f металлов.		2 часа. Физика антиферро-и ферримагнетизма.	

		2 часа Особенности ЭМР в высокотемпературных сверхпроводниках и в манганитах.	2 часа Методы внутренних и поверхностных спиновых зондов для изучения ЭМР магнитоупорядоченных сред и сверхпроводников.		3 часа. Физика сверхпроводимости. Эффект Яна-Теллера и его проявление в ЭПР.	
		2 часа. Теория ЭМР суперпарамагнитных наночастиц. Размерные и поверхностные эффекты.	2 часа Квазиклассический и квантовомеханический анализ спектров ЭМР изолированных наночастиц		3 часа. Магнетизм наночастиц. Суперпарамагнетизм и магнитная блокировка.	
		1 час Влияние размера частиц, неоднородности структуры и состава, межчастичных взаимодействий на спектры ЭМР ферромагнитных наночастиц.	2 часа Методы расчёта диполь-дипольных межчастичных взаимодействий при анализе спектров ЭМР наноструктур.			
4	Применение метода ЭМР в химии, биологии, медицине, материаловедении, геологии, астрофизике, археологии.	1 час ЭПР свободных радикалов в химии и биологии. Метод «спиновых меток». Радиационные эффекты.	2 часа Методы расчёта и анализа параметров спектров ЭПР в методах «спиновых зондов» и «спиновых меток».		1 час Основы биофизики.	Контрольная работа
		1 час. ЭПР минералов земного и внеземного происхождения, нефти, угля и других углеродсодержащих веществ, технологически важных материалов.			1 час Основы геофизики.	
		1 час			2 часа.	

		ЭМР-спектроскопия для нанотехнологий, электроники, спинтроники.			Физика фуллеренов, графена, «d ⁰ магнетиков».	
		1 час Новые методы ЭМР-спектроскопии. ЭМР-микроскоп ЭПР-томография (ЭМР-MRI). Многочастотный, импульсный и комбинированный с ядерным резонансом ЭПР (ESEEM, ENDOR, DEER, PELDOR).			2 часа. Принципы магнитной томографии.	

9. Место дисциплины в структуре ООП ВПО

Вариативная часть, профессиональный блок, дисциплина по выбору.

Для изучения курса студент должен обладать знаниями по общему курсу физики, математики и теоретической физики, уметь использовать их для решения задач, иметь опыт работы в общем и специальном физическом практикумах.

10. Образовательные технологии

Преподавание дисциплины осуществляется в форме авторского курса.

11. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации

Оценочные средства для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации включают четыре контрольных работы по одной в конце прохождения каждого из четырех разделов, экзамен после прохождения курса. Экзамен проводится в устной форме и оценивается по по четырехбалльной системе: «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично».

Примеры вариантов контрольных работ.

Вариант 1

1. Общие черты и различия методов ЭПР и ФМР.
2. Влияние микроволновой частоты на чувствительность спектрометра ЭПР.
3. Предельные формы тцаллиана.

Вариант 2

1. Влияние кристаллического поля на ион Cu^{2+} .
2. Вид кривых насыщения для однородного и неоднородного насыщения..
3. Температурные зависимости параметров спектра ЭПР при антиферромагнитном переходе.

Вариант 3

1. Влияние форм-фактора на резонансное поле ФМР.
2. Метод спиновых зондов для изучения вихревой структуры сверхпроводников.
3. Проявление суперпарамагнитных флуктуаций в спектрах ЭМР наночастиц.

Вариант 4

1. Спиновые метки в биофизике.

2. ЭПР-датирование.
3. Принцип ЭМР-томографии.

Примеры билетов к экзамену.

Билет 1.

1. Магниторезонансные методы, их особенности и области применения.
2. ЭПР естественных и искусственных структурных дефектов. Радиационные эффекты в ЭПР.

Билет 2.

1. Классификация типов сигналов ЭМР.
2. Синглетные спектры ЭМР. Форма линии и её разновидности.

Билет 3.

1. Стационарные и импульсные методики ЭМР.
2. Продольная и поперечная релаксация, времена релаксации.

Билет 4.

1. Основные компоненты и принцип работы спектрометра стационарного ЭМР.
2. Квазиклассическая теория ЭМР. Уравнение Блоха.

Билет 5.

1. Однородное и неоднородное уширение сигнала ЭМР.
2. Новые методы ЭМР-спектроскопии.

Билет 6.

1. Квантовомеханическая теория ЭМР. Спин-гамильтониан.
2. ЭМР-спектроскопия современных материалов с необычными магнитными и электронными свойствами (ВТСП, манганиты, графен и др.).

Билет 7.

1. Уравнение Ландау-Лифшица-Гильберта для магнитного резонанса и его решение.
2. Применение ЭМР для анализа геологических и археологических объектов.

Билет 8.

1. Явление насыщения в ЭМР. Кривые насыщения амплитуды и ширины спектров ЭПР.
2. ЭПР свободных радикалов в химии и биологии.

Билет 9.

1. Насыщение однородно и неоднородно уширенных линий ЭПР.
2. ЭМР в твердых телах. Метод «спиновых зондов».

Билет 10.

1. Применение метода насыщения для определения структуры неразрешенных спектров ЭПР.
2. Квантовомеханическое описание ЭМР наночастиц.

Билет 11.

1. Тонкая и сверхтонкая структура спектров ЭПР.
2. Метод ФМР. Уравнение Смита-Бельджерса.

Билет 12.

1. Эффекты кристаллического поля в ЭПР.
2. Метод «спиновых меток».

Билет 13.

1. Проявление эффекта Яна-Теллера в спектрах ЭПР.
2. Магнитная релаксация в системах наночастиц. Суперпарамагнетизм и магнитная блокировка. Суперпарамагнитные флуктуации и спектры ЭМР наночастиц.

Билет 14.

1. Метод эффективного спин-гамильтониана в ЭПР-спектроскопии.
2. Влияние форм-фактора и магнитной кристаллической анизотропии на спектры ФМР.

Билет 15.

1. ЭМР и магнитные фазовые переходы.
2. Неоднородная структура реальных ферромагнитных частиц и её влияние на спектры ЭМР.

Билет 16.

1. ЭМР в антиферромагнетиках и ферромагнетиках.
2. Влияние размера наночастиц и межчастичных взаимодействий на спектры ЭМР наноструктур.

12. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

Основная литература

1. А.Абрагам, Б.Блини «Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов», Москва, Мир, 1972.
2. Дж.Вертц, Дж.Болтон «Теория и практические приложения метода ЭПР», Москва, Мир, 1975.
3. Ч. Пул «Техника ЭПР-спектроскопии», Москва, Мир, 1970.

Дополнительная литература

1. С.А. Альтшуллер, Б.М. Козырев «Электронный парамагнитный резонанс соединений элементов промежуточных групп», Москва, Наука, 1972
2. А.Г.Гуревич, Г.А.Мелков «Магнитные колебания и волны», Москва, Физматлит, 1994.

Периодическая литература

1. Журнал «Journal of magnetic resonance» (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/10907807>)

Интернет-ресурсы

1. <http://www.ieprs.org/index.php>

13. Материально-техническое обеспечение

В соответствии с требованиями п.5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика». Занятия проводятся в аудитории 4-30 с необходимыми техническими средствами (компьютер, проектор, экран).