

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ МЕТАЛЛОФИЗИКИ

На правах рукописи

УДК 537.611

ГОЛУБ Владимир Олегович

МНОГОКВАНТОВЫЕ ЭФФЕКТЫ И ЯДЕРНОЕ СПИНОВОЕ ЭХО
В НЕОДНОРОДНЫХ МАГНЕТИКАХ

Специальность 01.04.07. - физика твердого тела

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Киев - 1994

АВ 30.087



00756465 (X)

Результат диссертации в отделе физики сплавов Института металлофизики
АН Украины.

Диссертация является рукописью.

Научные руководители

Доктор физико-математических наук
профессор А.Н. ПОГОРЕЛЫЙ

Кандидат физико-математических наук
В.В. КОТОВ

Официальные опоненты

Доктор физико-математических наук
профессор М.А. ИВАНОВ

Кандидат физико-математических наук
А.В. ТЫЧИНСКИЙ

Ведущая организация

Институт физики полупроводников
АН Украины

Защита диссертации состоится "13" июня 1994 года в 14⁰⁰ на заседании специализированного совета К 016.37.01. при Институте металлофизики АН Украины по адресу: 252142, г. Киев, пр. Вернадского, 36.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим прислать по адресу: 252680, ГСП, г. Киев, пр. Вернадского, 36, Институт металлофизики АН Украины, ученому секретарю специализированного совета К 016.37.01. О.П. Федорову.

О диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИМФ АН Украины

Автореферат разослан "4" июня 1994 р.

Ученый секретарь
специализированного совета К 016.37.01.
доктор физико-математических наук

О.П. Федоров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Резонансные свойства электронно-ядерной системы магнетика привлекают к себе внимание исследователей благодаря сочетанию разнообразных физических явлений. Здесь наблюдаются хановские и многоуровневые сигналы ядерного спинового эха. При низких температурах движение ядерной намагниченности становится существенно нелинейным. Метод ЯМР широко используется для исследования электронной магнитной структуры, сигналы ядерного спинового эха находят применение в радиотехнических устройствах. Все это диктует необходимость поиска новых резонансных эффектов, досконального изучения динамики ядерных спинов в реальных магнетиках.

Большинство экспериментальных исследований по ЯМР в магнетиках проведено импульсными методами. Основные наблюдаемые сигналы - это двухимпульсное и стимулированное эхо. Однако в ряде случаев помимо основных эхо-сигналов возникают дополнительные. Данное явление получило название: многократное эхо. Когда к концу семидесятых годов были выяснены основные механизмы (рассмотрено влияние Сул-Накамуrowsкого взаимодействия и многоквантовых каскадных переходов), которые могут приводить к формированию сигналов многократного эха, стало ясно, что с помощью этой методики можно получать уникальную информацию о кристаллической и магнитной структуре вещества. Однако при попытке применить методику многократного спинового эха к изучению широкого класса неоднородных магнетиков, экспериментаторы столкнулись с целым рядом проблем: невозможность использования мощностных и частотных зависимостей из-за сильного разброса величин локальных полей и коэффициентов усиления радиочастотного поля на ядрах, а также связанные с этим трудности при разделении вкладов различных механизмов в формирование дополнительных эхо-сигналов.

Научной задачей работы являлось определение вкладов различных механизмов в формирование сигналов многократного ядерного спинового эха в неоднородных магнетиках при произвольном соотношении параметров системы, поиск конкретных методов, позволяющих оде-

лать это, и оценка возможности использования данных методов для исследования электронной и кристаллической структуры вещества.

Научная новизна. В работе впервые:

1. В широком температурном диапазоне исследовались зависимости дополнительных эхо-сигналов от временного интервала между возбуждающими импульсами в сильно неоднородных магнетиках. При этом особое внимание уделялось начальному участку временной зависимости (поведение ядерной намагниченности на данном участке до сих пор практически не использовалось при интерпретации экспериментальных данных). Проанализировано влияние различных механизмов на формирование сигналов многократного эха.

2. Экспериментально показано, что в пленках Co и FeCo с наведенной анизотропией в области гелиевых температур наблюдается сильная корреляция в движении ядерных спинов, обусловленная Сул-Накамуровским взаимодействием. Проведены теоретические и экспериментальные оценки параметра динамического сдвига частоты для этих и других тонких ферромагнитных пленок.

3. Предложено использовать "нестандартную" временную последовательность возбуждающих импульсов для разделения влияния Сул-Накамуровского взаимодействия и многоквантовых процессов на формирование сигналов спинового эха при низких температурах. Проведена теоретическая интерпретация полученных результатов. Представлены новые возможности использования методики многократного эха для исследования электронной и кристаллической структуры вещества.

Научное и практическое значение. В работе предложены конкретные методы, позволяющие получить информацию о кристаллической и магнитной структуре сильно неоднородных магнетиков. Результаты работы использовались для постановки и интерпретации экспериментов, стимулировали дальнейшее развитие теоретических исследований. Полученные эффекты могут быть использованы при создании радиотехнических устройств, основанных на применении спинового эха.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. В магнетиках с существенно неоднородным зеемановским и квадрупольным взаимодействием спад четных сигналов ядерного спинового эха при высоких температурах характеризует неоднородность квадрупольного взаимодействия.

2. В ферромагнитных пленках с малой магнитной анизотропией в области гелиевых температур наблюдается существенная корреляция в движении ядерных спинов с большим магнитным моментом, обусловленная Сул-Накамуrowsким взаимодействием.

3. Серия сигналов многократного ядерного спинового эха, появляющаяся непосредственно перед стимулированным эхо-сигналом, формируется исключительно за счет многоквантовых каскадных переходов.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на:

1. Международной конференции по сверхтонкому взаимодействию (НІ, Прага, 1989).
2. Семинарах по спиновому эху (Алушта, 1989, 1990, 1992).
3. Международной конференции по физике переходных металлов (ICPTM, Дармштадт, 1992).
4. Украинско-польском семинаре по физике магнитных явлений (Киев, Феофания, 1992).
5. Всесоюзной школе-семинаре "Новые магнитные материалы микроволновой электроники" (Новгород, 1990, Астрахань, 1992).
6. Европейской конференции по магнитным материалам и их применению (ЕММА, Кошице, 1993).

Публикации. Результаты диссертации изложены в 6 печатных работах, приведенных в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 78 наименований. Диссертация изложена на 108 страницах, содержит 25 рисунков и 1 таблицу.

СО Д Е Р Ж А Н И Е Р А Б О Т Ы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель работы и основные положения, выносимые на защиту. Отображены новизна, научное и практическое значение работы.

Первая глава посвящена обзору литературных данных по ЯМР в магнетиках, многократному спиновому эху и механизмам, отвечающим за формирование дополнительных эхо-сигналов.

В параграфе 1.1 приведена классическая теория ядерного спинового эха (хановского). Поведение ядерной намагниченности в этом случае описывается уравнением Блоха. Для расчета сигналов эха решения этого уравнения усредняют с функцией распределения частоты ЯМР ω_0 . Релаксационные процессы в ядерной системе описывают блоховскими членами с характерным временем поперечной T_2 и продольной T_1 релаксации.

В п.1.2 рассматриваются особенности ЯМР в магнитоупорядоченных веществах. Во-первых, это - наличие внутренних локальных магнитных полей на ядрах порядка 10^5 - 10^7 э. Таким образом, частота ЯМР определяется именно этими полями, а внешние лишь слегка смещают ее. Во-вторых, сигналы ЯМР возбуждаются, и регистрируются через электронную подсистему. Поэтому амплитуда колебаний сверхтонкого поля на ядре может существенно превышать амплитуду возбуждающего радиочастотного поля. И третье - наличие косвенного взаимодействия ядерных спинов через электронную систему (так называемое Сул-Накамуrowsкое взаимодействие). Важнейшим его проявлением является динамический сдвиг частоты ядерных колебаний на величину ω_p .

П.1.4 посвящен ЯМР в тонких поликристаллических ферромагнитных пленках. Эти пленки обладают одноосной наведенной анизотропией, формирующейся в процессе осаждения под действием постоянного магнитного поля, приложенного в плоскости подложки. Величина энергии наведенной анизотропии на несколько порядков ниже величины магнитной кристаллографической. Благодаря этому в пленках возможно возбуждение всех ядер вещества в отличии от массивного

материала, где "работают" лишь ядра (порядка 1% от всего количества), расположенные в доменных стенках.

В п.1.5 рассмотрено явление многократного спинового эха и описаны процессы, приводящие к формированию дополнительных сигналов эха. Основные механизмы многократного спинового эха - это механизмы "эхо-импульса" [1,2], частотной модуляции [3] и многоквантовых каскадных переходов [4-7].

Первые два механизма - суть проявления Сул-Накамуровского взаимодействия. Поскольку неоднородность сверхтонких полей на ядрах $\Delta\omega$ имеет микроскопический характер, а величина этой неоднородности значительно превышает величину Сул-Накамуровского уширения, рассмотрение проводилось для двух случаев.

1). $\omega_p < \Delta\omega$ (механизм "эхо-импульса"). Систему ядерных спинов можно считать набором невзаимодействующих осцилляторов и использовать формальный подход. Появляющийся сигнал спинового эха, усиливаясь через электронную систему, действует как возбуждающий импульс, что приводит к появлению дополнительных эхо-сигналов. Относительная амплитуда и количество таких сигналов пропорционально параметру динамического сдвига частоты D .

2). $\omega_p > \Delta\omega$ (механизм частотной модуляции). В этом случае движение ядерных спинов будет сильно коррелированным. Уравнение, описывающее движение ядерной намагниченности, становится нелинейным. Это приводит к появлению дополнительных сигналов эха. Количество и амплитуда этих эхо-сигналов зависят от величины динамического сдвига частоты. Важно отметить, что такие сигналы возникают при гораздо меньшей мощности возбуждающих импульсов, чем обычное (хановское) эхо. При малых задержках между возбуждающими импульсами амплитуда эхо-сигналов возрастает с увеличением временного интервала, а не спадает, как это характерно для всех остальных механизмов.

Случай $\omega_p \sim \Delta\omega$ практически не изучался.

Для ядер со спином $I > 1/2$ появление дополнительных сигналов может быть обусловлено многоквантовыми переходами. Количество и спектр этих сигналов, а также условия их возникновения зависят от величины неоднородности зеемановского и квадрупольного взаи-

модействия.

Во второй главе описаны экспериментальная установка для исследования ЯМР в магнитоупорядоченных веществах, приготовление образцов и обосновывается выбор объектов для исследования явления многократного эха.

П.2.1 посвящен объектам исследования. На первом этапе (исследование особенностей формирования многократного спинового эха) в качестве основных объектов исследований были выбраны пленки кобальта, FeCo , $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$. Ядерное спиновое эхо наблюдалось на ядрах Ni^{61} и Co^{59} . Выбор объектов обусловлен следующими причинами:

1. Большая величина сигнала ЯМР во всем исследуемом диапазоне температур (от 2.2 до 300К).
2. Отсутствие в этом диапазоне в данных образцах фазовых переходов и эффектов, связанных с ними, которые могли бы затруднить интерпретацию полученных результатов.
3. Наличие большого массива справочной литературы по магнитным и кристаллическим свойствам этих образцов.
4. Возможность исследования квадрупольных эффектов на ядрах с $I > 1/2$ ($\text{Ni}^{61} - I = 3/2$, $\text{Co}^{59} - I = 7/2$).
5. Возможность численного расчета таких параметров ЯМР, как коэффициент усиления радиочастотного поля на ядре η и параметр динамического сдвига частоты D .

В последующих опытах и контрольных экспериментах использовались также порошки этих и других материалов. Основные выводы были проверены на пленках других магнетиков.

В п.2.2 описано приготовление образцов. Все исследуемые в работе пленки были изготовлены методом конденсации паров металлов на холодные или подогретые подложки из различных материалов. Во время осаждения в камере поддерживалось давление 10^{-6} торр. Скорость осаждения регулировалась изменением тока электронно-лучевой пушки и составляла в большинстве случаев 5-6 Å/сек. Чтобы создать одноосную анизотропию, в плоскости подложки прикладывалось магнитное поле порядка 70 э.

Используемые в экспериментах порошки заливались парафином для

уменьшения электропроводности. Далее полученным таким образом образцам придавалась форма удобная для эксперимента,

В п.2.3 описан спектрометр ядерного спинового эха. Генераторы СВЧ позволяли получить импульсы длительностью меньше 0.2 мкс. В наших экспериментах использовались три СВЧ генератора: один - для наблюдения ЯМР от ядер Fe^{57} , Ni^{61} , γ^{89} (в диапазоне 50-150 МГц), второй (в диапазоне 150-400 МГц) - для резонанса на ядрах Mn^{55} и Co^{59} и третий - для ядер Tb^{159} (2500-3500 МГц). Параметры приемника: время восстановления - менее 3 мкс, полоса пропускания - 3 МГц, чувствительность - 1 мкВ. Для проведения экспериментов при низких температурах резонатор с образцом помещали в гелиевый криостат. Чтобы изменить коэффициент связи между ядерной и электронной системами, к образцу прикладывалось внешнее магнитное поле 0-200 э, создаваемое катушками Гельмгольца, параллельно или перпендикулярно оси легкого намагничивания.

В третьей главе изложены результаты исследования многократного спинового эха при двухимпульсном возбуждении. Величины сверхтонкого и квадрупольного взаимодействия в наших образцах существенно неоднородны (ширина линии ЯМР на несколько порядков превосходит естественное уширение). Величина этой неоднородности настолько велика, что практически невозможно изучать механизмы формирования многократного спинового эха по спектрам ЯМР эхо-сигналов. Значительная неоднородность поля анизотропии (а, следовательно, и коэффициента усиления радиочастотного поля на ядре) сильно усложняет исследование мощностных характеристик дополнительных эхо-сигналов. Поэтому основное внимание было уделено исследованию зависимостей амплитуды эхо-сигналов от временного интервала между возбуждающими импульсами.

Спиновое эхо изучалось в температурном диапазоне от 2.2 до 300 К. Если нечетные эхо-сигналы (возникающие в моменты времени $t = (2n+1)\tau$ после второго импульса, где τ - временной интервал между возбуждающими импульсами, n - целое число) спадают с характерным временем спин-спиновой релаксации, возрастающим с понижением температуры, то зависимость амплитуды четных ($t = 2n\tau$) состо-

ит из двух частей: участка быстрого спада при малых интервалах между возбуждающими импульсами и участка пологого спуска. Характерное время спада на первом участке практически не зависит от температуры. Второй участок — более пологий, а его поведение аналогично тому, что наблюдается для нечетных эхо-сигналов.

При комнатной температуре, когда интенсивность обычного эха относительно невелика, наблюдается лишь первый участок. По мере понижения температуры появляется второй участок, а при температуре жидкого гелия он уже играет основную роль. Подобные зависимости получены и для других образцов. Поскольку скорость спада на первом участке практически не зависит от температуры, то можно с уверенностью утверждать, что он не может быть объяснен формированием эхо-сигналов за счет Сул-Накамуровского взаимодействия (в этом случае теория дает сильную зависимость от температуры). Таким образом, пояснить его появление можно лишь в рамках механизма многоквантовых каскадных переходов. Проведенный нами теоретический анализ для случая неоднородного зеемановского и квадрупольного взаимодействия показал, что для объяснения полученных результатов достаточно ограничиться рассмотрением фазового члена в выражении для амплитуды эхо-сигналов

$$S(t) = Sp[\rho(t)I_{\pm}], \quad (1)$$

где $\rho(t)$ — матрица плотности, описывающая движение спиновой системы; $I_{\pm} = I_x \pm I_y$; I_x, I_y, I_z — операторы ядерного спина. Такие эхо-сигналы могут появляться, если неоднородность зеемановского взаимодействия $\delta\Omega$ намного больше неоднородности квадрупольного δQ . И тогда условием для наблюдения четных эхо-сигналов будет

$$|2n(m_2 - m_1 - 2m - 1)\delta Q t| \leq 2\pi, \quad (2)$$

где m — собственные значения оператора I_z . Как видно из полученного выражения, характерная скорость спада таких эхо-сигналов пропорциональна неоднородности квадрупольного взаимодействия.

Таким образом, данные измерения позволяют определить квадрупольное уширение спектра даже тогда, когда оно скрыто неоднородностью локальных магнитных полей на ядрах, в том числе и в куби-

ческих кристаллах, где средняя величина квадрупольного взаимодействия, как известно, равна нулю. Никакие другие методики не позволяют сделать это.

Для выяснения природы второго участка было проведено ряд экспериментов по исследованию зависимостей амплитуды эхо-сигналов от мощности, частоты и спектра возбуждающих импульсов, а также от величины внешнего магнитного поля при временных интервалах $\tau \gg 1/\delta Q$. Показано, что полученные результаты хорошо согласуются с теорией "эхо-импульса". Тогда из соотношения амплитуд первого E_1 и второго E_2 эхо-сигналов можно определить параметр динамического сдвига частоты

$$D = \frac{2}{\tau_e} \frac{E_2}{E_1}, \quad (3)$$

где τ_e - длительность первого эха. Выбор образцов позволил провести также и теоретический расчет этой величины. Для случая ферромагнитной пленки

$$D = \omega_0 \eta \frac{\mu_\pi (I+1)}{3\mu_e} \frac{\hbar \omega_0}{k_B T} n_\pi, \quad (4)$$

где μ_π - магнитный момент ядра, μ_e - магнитный момент на атом, n_π - концентрация ядер данного сорта, T - температура образца. Полученные из эксперимента и теоретические данные хорошо согласуются. Однако необходимо учесть, что коэффициент усиления радиочастотного поля на ядре сильно зависит не только от поля аннотропии, а и от магнитострикции.

Интересно, что в пленках Co и FeCo величина параметра динамического сдвига частоты уже при гелиевых температурах становится сравнимой с шириной линии ЯМР. Обычно считается, что в ферромагнетиках такие эффекты наблюдаются при гораздо более низких температурах.

Для исследования формирования сигналов многократного спинового эха при этих условиях был выполнен целый ряд экспериментов на различных пленках Co и FeCo. В этих пленках при 2.2 K удавалось наблюдать до тридцати эхо-сигналов. Характерным является наличие двух пиков на мощностной зависимости амплитуды эхо-сигналов. Для

выяснения их природы снова были использованы временные зависимости. При малых мощностях возбуждающих импульсов с увеличением временного интервала между ними, амплитуда эхо-сигналов вначале увеличивается. Таким образом, основной вклад в их формирование дает механизм частотной модуляции. С ним и связано появление пика в области низких мощностей. Это полностью совпадает с выводами теории: при существенной корреляции в движении ядерных спинов оптимальное условие для возбуждения эхо-сигналов - низкая мощность возбуждающих импульсов. По мере возрастания мощности участок подъема на временной зависимости переходит в полку, а затем в участок пологого спуска. То же происходит при увеличении температуры. Это связано с тем, что, увеличивая мощность, мы уменьшаем относительную величину поперечной составляющей ядерной намагниченности, а следовательно и динамический сдвиг частоты. Тогда в действие вступают механизмы многоквантовых каскадных переходов и "эхо-импульса", что приводит к появлению второго пика на мощностной зависимости.

Необходимо отметить, что хотя увеличение амплитуды эхо-сигналов с увеличением временного интервала в обычных ферромагнетиках раньше не наблюдалось, в ряде работ отмечалось увеличение скорости релаксации с увеличением времени задержки. До сих пор такое поведение приписывали передаче возбуждения на края линии.

Таким образом, в широком мощностном и температурном диапазонах в формировании эхо-сигналов принимают участие все три механизма. В этом случае с помощью двухимпульсной последовательности не удастся разделить их вклады. С этой целью нами было предложено использовать трехимпульсную последовательность с нестандартным расположением возбуждающих импульсов.

Формированию многократного спинового эха при трехимпульсном возбуждении посвящена четвертая глава. Обычно в экспериментах по ЯМР используется последовательность, когда промежуток времени между первым и вторым возбуждающими импульсами τ_{12} много меньше интервала между вторым и третьим τ_{23} . Мы использовали другую по-

следовательность $\tau_{12} \gg \tau_{23}$. Был проведен анализ формирования сигналов ядерного эха в рамках механизма многоквантовых каскадных переходов. При неоднородном зеемановском и квадрупольном взаимодействии эхо-сигналы появляются, если

$$t = (m_2 - m_1)\tau_{12} + (m_4 - m_3)\tau_{23}, \quad (5)$$

$$m_2 + m_1 = 2m + 1, \quad m_4 + m_3 = 2m + 1,$$

т.е. $|m_2 - m_1|$, $|m_4 - m_3|$ - нечетные. При нестандартном расположении возбуждающих импульсов непосредственно перед стимулированным эхо формируется серия эхо-сигналов. Теоретический анализ показал, что она возникнет за счет переходов с понижением магнитного числа (это подтверждают экспериментально полученные релаксационные и мощностные зависимости). При других последовательностях эти переходы не принимают участие в формировании эхо-сигналов. Это имело бы чисто академический интерес, если бы не ряд особенностей в их формировании. Данные эхо-сигналы не могут формироваться за счет механизма "эхо-импульса". Не может принимать участие в их формировании и механизм частотной модуляции. Это полностью подтверждается тем фактом, что для ядер со спином $I=1/2$ дополнительные эхо-сигналы непосредственно перед стимулированным эхо не наблюдаются ни при каких условиях.

Таким образом, использование этой методики позволяет получить достоверную информацию о реальном распределении локальных полей на ядрах и других ЯМР характеристиках даже тогда, когда параметр динамического сдвига частоты порядка ширины линии ЯМР.

Пятая глава посвящена явлению многократного спинного эха в тербийсодержащих сплавах и соединениях.

Характерной чертой ЯМР ядер Tb^{159} является то, что каждая из трех линий квадрупольно расщепленного спектра ($I=3/2$) сопровождается парой спутников S_1 и S_2 , неэквидистантно расположенных относительно соответствующей квадрупольной компоненты. В предшествующих работах показано, что их появление нельзя пояснить ни влиянием примесей, ни доменной структурой. Предполагалось, что они обусловлены структурными факторами. Чтобы проверить это

предположение, мы воспользовались методикой многократного спинового эха.

Дополнительные эхо-сигналы наблюдались как при двухимпульсной последовательности, так и при нестандартной трехимпульсной (в том числе непосредственно перед стимулированным эхо). Последнее, как было показано выше, полностью исключает возможность объяснить их формирование влиянием Сул-Накамуровского взаимодействия. Таким образом, единственным механизмом, который может отвечать за формирование дополнительных эхо-сигналов, является механизм многоквантовых каскадных переходов. Необходимо отказаться от возможности приписать появление сигналов многократного эха так называемым многоквантовым переходам нулевого порядка [8], так как в чистом тербии отсутствуют группы связанных между собой спинов ядер атомов, имеющих неэквивалентное расположение в решетке. Следует также исключить многоквантовые каскадные переходы на основных уровнях квадрупольно расщепленного спектра ядер Tb^{159} , поскольку ни спектр, ни мощность импульсов не достаточны для их возбуждения. Единственно возможное объяснение - это многоквантовые каскадные переходы на уровнях тонкой структуры S_1 и S_2 , сопровождающих основные линии квадрупольно расщепленного спектра. Это подтверждают и частотные зависимости дополнительных эхо-сигналов. Однако, тогда необходимо отказаться от возможности объяснить появление этих спутников влиянием структурных факторов, которые приводят к статическому разбросу частот, так как в этом случае формирование дополнительных эхо-сигналов невозможно.

Основные результаты и выводы.

1. В широком температурном и мощностном диапазоне исследовано формирование многократного ядерного спинового эха в сильно неоднородных магнетиках. Изучено влияние различных механизмов на основные ЯМР характеристики.

2. Показано, что в неоднородных магнетиках при высоких температурах (когда величина параметра динамического сдвига частоты существенно меньше ширины спектра возбужденных ядер) зависимость четных эхо-сигналов от временного интервала между возбуждающими

импульсами определяется неоднородностью квадрупольного взаимодействия, обусловленного разбросом градиентов электрического поля на ядрах по величине и направлению. Данный факт позволяет получить информацию о локальных искажениях кристаллической решетки, в том числе и для кубических кристаллов, где средняя величина квадрупольного взаимодействия равна нулю.

3. Из соотношения амплитуд четных и предшествующих им нечетных эхо-сигналов (когда временной интервал между возбуждающими импульсами велик по сравнению с обратной величиной квадрупольного уширения спектра) определены параметры динамического сдвига частоты для исследованных образцов.

4. Показано на примере пленок Co , FeCo и FeNiCo с наведенной анизотропией, что в ферромагнитных пленках с малой магнитной анизотропией в области гелиевых температур происходит существенная корреляция в движении ядерных спинов с большим магнитным моментом (в данном случае ядра Co^{59}), обусловленная Сул-Накамуровским взаимодействием. Это объясняет неэкспоненциальность зависимостей амплитуды эхо-сигналов от временного интервала между возбуждающими импульсами, наблюдаемых экспериментально.

5. Исследовано формирование сигналов ядерного спинового эха для случая, когда параметр динамического сдвига частоты сравним с шириной линии ЯМР.

6. Для разделения вкладов различных механизмов в формирование дополнительных эхо-сигналов предложено использовать "нестандартную" временную последовательность возбуждающих импульсов ($\tau_{12} \gg \tau_{23}$). Показано, что серия эхо-сигналов, возникающая непосредственно перед стимулированным эхом, формируется исключительно за счет механизма многоквантовых каскадных переходов.

7. С помощью методики многократного ядерного спинового эха показано, что появление сателлитной структуры в ЯМР спектрах Tb^{159} в тербийсодержащих сплавах и соединениях не может быть объяснено с помощью структурных факторов (как это предполагалось до сих пор).

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. В.О.Голуб, В.В.Котов, А.Н.Погорельи, Д.А.Подъельц. Особенности многократного спинового эха в неоднородных магнетиках.- ФТТ, 1989, т.31, № 11, с.48-51.
2. V.O.Golub, V.V.Kotov, Yu.A.Podyelets, A.N.Pogorely. Nuclear spin echo in magnetics with inhomogeneous hyperfine and quadrupole interaction.- Нур.Int., 1990, в.59, N 1-4, p.293-296.
3. В.В.Котов, Д.А.Подъельц, В.И.Чернецкий, В.О.Голуб. О происхождении дополнительных сигналов ядерного спинового эха в магнетиках.- ФТТ, 1990, т.32, № 4, с.1108-1111.
4. V.O.Golub, V.V.Kotov, A.N.Pogorely. Multiple spin echo formation.- J.Appl.Phys., 1991, в.69, N 8, p.6231(K).
5. А.Н.Погорельи, В.В.Котов, В.О.Голуб, А.П.Левковский. Многократное спиновое эхо на ядрах Tb^{159} в тербийсодержащих сплавах и соединениях.- ФТТ, 1992, т.34, № 10, с.3001-3005.
6. V.O.Golub, V.V.Kotov. Spin echo in thin ferromagnetic films with Suhl-Nakamura interaction.- ЕММА'93 digests, Košice, 1993, p.171.

Цитируемая литература

1. Searle O.W., Davis J., Hirai A., Fukuda K.// Phys. Rev. Lett.- 1971.- 27, N 20.- P.1380-1382.
2. Петров М.П., Москалев В.В., Смоленский Г.А.// Письма ЖЭТФ.- 1972.- 15, вып.3.- С.132-135.
3. Боровик-Романов А.С., Буньков Ю.М., Думеш Б.С., Куркин М.И., Петров М.П., Чекмарев В.П.// УФН.- 1984.- 142, вып.4.- С.537-570.
4. Solomon I.// Phys. Rev.- 1958.- 110, N 1.- P.61-65.
5. Abe H., Yasuoka H., Hirai A.// J. Phys. Soc. Japan.- 1966.- 21, N 1.- P.77-89.
6. Цифринович В.И.// ЖЭТФ.- 1988.- 94, вып.7.- С.208-212.
7. Абеяшев Г.Н., Бержанский В.Н., Сергеев Н.А., Федотов Ю.В. // ЖЭТФ.- 1988.- 94, вып.1.- С.227-237.
8. Эрнст Р., Боденхаузен Дж., Вокаун А.// ЯМР в одном и двух измерениях.- М.: Мир, 1990.- С.712.

Подписано в печать 13.04.94 г формат 60x84/16

Бумага писчая. Усл. печ.л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ №662

Отпечатано ЦУОП ГНПП "Плодвинконсерв" г. Киев, Саксаганского, 1

AB 30.087

AB 30.087