

ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ИРАКИ МОХАМЕД РАМАДАН МОХАМЕД

محمد عرفان

ЯМР И МАГНИТНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ  
В ГЕКСАФЕРРИТАХ ТИПА M

01.04.11 - физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Харьков - 1994

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00756107 (Q)

ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ИГАНИ МОХАМЕД РАМАДАН МОХАМЕД

محمد عرفان

ЯДР И МАГНИТНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ

В ГЕКСАФЕРРИТАХ ТИПА M

01.04.11 - физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Харьков - 1994

ІНД. ІМ. В. СЕРПІН  
АН України

7631.652

Диссертация является рукописью

Работа выполнена в Харьковском государственном университете

Научный руководитель: кандидат физ.-мат.наук, доцент

Кунцевич Станислав Петрович

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат.наук, профессор

Андерс Александр Георгиевич

(ФТИНТ НАН Украины)

доктор физ.-мат.наук, профессор

Финкець Виталий Александрович

(ХФТИ НАН Украины)

Ведущая организация: Радиоастрономический институт

НАН Украины (Харьков)

Защита состоится "27" января 1995 г. в 13<sup>00</sup> часов  
на заседании специализированного совета Д 053.06.02  
Харьковского государственного университета (310077, г.Харьков,  
пл.Свободы, 4, ауд. им.Синельникова).

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке ХГУ.

Автореферат разослан "26" декабря 1994 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета



В.П.Пойда

ЛНБ ім. В. Стефани  
АН України

Актуальность и степень исследования тематики диссертации. Основной отличительной особенностью гексаферритов типа М, по сравнению с ферритами других типов, является большая величина энергии анизотропии и, соответственно, поля анизотропии. Эта особенность обуславливает их обширные технические применения в качестве постоянных магнитов, носителей информации при вертикальной магнитной записи, рабочих элементов СВЧ устройств. Вопрос о физических механизмах, ответственных за анизотропные свойства гексаферритов, начал обсуждаться в литературе вскоре после создания этого класса ферритов /1/ и в последующие годы /2,3/. Были проведены расчеты вкладов магнитоактивных ионов в различных кристаллографических позициях в константы энергии анизотропии и магнитострикции, которые давали лишь качественное согласие с экспериментальными данными. В 80-х годах стала очевидной возможность получения достоверной информации о локальных характеристиках магнитоактивных ионов методом ЯМР для многоподрешеточных ферритмагнетиков и использования ее для анализа физических механизмов, определяющих их магнитные свойства /4/. Было показано экспериментально /5/, что анизотропия локальных полей на ядрах  $^{57}\text{Fe}$   $\delta_{\text{H}}$  в ферритах М типа определяется, в основном, дипольными полями, а для некоторых кристаллографических позиций ионов  $\text{Fe}^{3+}$  значения  $\delta_{\text{H}}$  близки по абсолютной величине к полю анизотропии.

Обширные технические применения ферритов типа М на СВЧ в значительной мере обусловлены малыми диэлектрическими потерями в этом диапазоне и малой величиной магнитоупругой свя-

зи. Введение в феррит примесных ионов  $Fe^{2+}$  приводит к возрастанию констант магнитоупругости в структурах М типа более чем на порядок /6/. Для анализа механизмов, определяющих магнитоупругие свойства многоподрешеточных ферритов, очень полезной является информация о релаксационных свойствах ядерной подсистемы, поскольку передача ядерных возбуждений фононам происходит через промежуточное звено - электронную подсистему. В литературе имеется мало сведений о влиянии примесных ионов  $Fe^{2+}$  на скорость спин-спиновой и спин-решеточной ядерной релаксации в гексаферритах /7/. Поэтому представляется актуальной задача комплексного экспериментального исследования на одних и тех же объектах анизотропных магнитных свойств и релаксационных характеристик ядерной и электронной подсистем.

Цель диссертационной работы состоит в следующем: экспериментально изучить в широких интервалах температур и напряженностей магнитных полей резонансные и релаксационные характеристики ядерной подсистемы многоподрешеточных ферритмагнетиков (гексаферриты типа М) с сильным и слабым спин-решеточным взаимодействием для электронной подсистемы.

Применить результаты резонансных исследований для анализа механизмов изменения констант и поля анизотропии при диамагнитных замещениях в гексаферритах типа М.

В связи с указанной целью работы были поставлены следующие основные задачи исследования:

- осуществить выбор объектов исследования;
- провести исследование скорости спин-спиновой и спин-решеточной релаксации ядерной подсистемы при слабой и сильной спин-решеточной связи для электронной подсистемы;

- изучить температурные особенности механизмов релаксации при ЯМР и ФМР;

- проанализировать полученные экспериментальные результаты по скорости релаксации и интерпретировать физические механизмы, их определяющие;

- исследовать влияние внутриграницных магновов на процессы ядерной релаксации ядер в доменных границах;

- исследовать резонансные и анизотропные магнитные характеристики в диамагнитнозамещенных гексаферритах М типа и проанализировать физические механизмы формирующие анизотропные магнитные свойства.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней экспериментально методом спинового эха в интервале температур 4,2 - 295К, определены времена спин-спиновой и спин-решеточной релаксации ядер  $^{57}\text{Fe}$  в гексаферритах с сильным ( $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$ ) и слабым ( $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ) спин-решеточным взаимодействием для электронной подсистемы. Впервые экспериментально выделены вклад в скорость спин-решеточной релаксации примесного механизма, связанного с быстрорелаксирующими ионами  $\text{Fe}^{2+}$  и вклад собственных процессов релаксации через ионы  $\text{Fe}^{3+}$ .

Показано, что в многоподрешеточных ферримagnetиках при отсутствии быстрорелаксирующих ионов основным фактором, влияющим на скорость спин-решеточной релаксации ядер  $^{57}\text{Fe}$  в определенной подрешетке, является величина обменного взаимодействия ионов  $\text{Fe}^{3+}$  подрешетки.

Для ядер  $^{57}\text{Fe}$  всех кристаллографических положений в  $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$  в интервале температур 4,2 - 77К обнаружены максимумы скоростей спин-спиновой и спин-решеточной релаксации, а при температуре ~ 180К на частоте 53,9 ГГц максимумы ширины

линии ФМР, которые интерпретированы в рамках теории медленной релаксации.

Путем совместного анализа данных ФМР и ЯМР определено время релаксации быстрорелаксирующих примесей.

Экспериментально изучены температурные особенности процесса диссипации энергии осциллирующими блоховскими доменными границами в PbM. Обнаруженное увеличение диссипации энергии при температуре  $\sim 140\text{K}$  связано с резким усилением релаксационных процессов на частоте естественного ферромагнитного резонанса и обусловлено механизмом медленной релаксации при обмене валентностями  $\text{Fe}^{2+} \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+}$ .

Проведено комплексное исследование влияния диамагнитных замещающих ионов  $\text{Al}^{3+}$  на магнитную анизотропию и ЯМР в системе  $\text{SrAl}_8\text{Fe}_{12-\delta}\text{O}_{19}$ .

На основе совместного анализа статических и резонансных характеристик предложен механизм изменения энергии и поля анизотропии в системе  $\text{SrAl}_8\text{Fe}_{12-\delta}\text{O}_{19}$ . На основе этого механизма и экспериментальных данных сделан оценочный расчет вклада ионов  $\text{Fe}^{3+}$  в позициях 2a в константу энергии анизотропии  $K_1$   $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  при температуре 77K. Показано, что для ядер  $^{57}\text{Fe}$  в доменных границах (ДГ) скорость ядерной релаксации существенно больше как в случае слабой магнитоупругой связи (BaM), так и в случае сильной магнитоупругой связи (PbM). Такое различие связано с вкладом в процессы релаксации ядер в ДГ внутриграницных винтеровских магненов.

Теоретическая и практическая ценность работы состоит в том, что полученные в ней результаты исследования влияния ионов  $\text{Fe}^{2+}$  и валентного обмена  $\text{Fe}^{2+} \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+}$  на процессы магнитной релаксации могут быть использованы при создании мате-

риалов с нужными характеристиками для СВЧ устройств.

Разработанный метод экспериментального определения вкладов ионов  $Fe^{3+}$  в константу энергии анизотропии  $K_1$  может быть использован для проверки теоретических расчетов этих вкладов.

Предложенный в работе механизм увеличения поля анизотропии в системе  $SrAl_5Fe_{12-5}O_{19}$  может быть использован при создании многоподрешеточных ферримагнетиков с заданным комплексом магнитных свойств.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Скорость спин-решеточной релаксации ядер  $^{57}Fe$  в многоподрешеточной системе ионов  $Fe^{3+}$ , при отсутствии быстрорелаксирующих ионов, определяется превалирующим фактором, а именно, величиной обменного взаимодействия ионов подрешетки. Наличие в составе феррита типа М быстрорелаксирующих ионов с сильным спин-решеточным взаимодействием приводит при температуре 77К к уменьшению на два порядка времени спин-решеточной релаксации и на порядок времени спин-спиновой релаксации.

2. В интервале температур 4,2 - 77К для гексаферрита  $PbFe_{12}O_{19}$  имеют место максимумы скорости спин-спиновой и спин-решеточной релаксации при ЯМР, а при температуре 180К на частоте 53,9 ГГц максимум ширины линии при ФМР. Наблюдаемые максимумы связаны с присутствием ионов  $Fe^{2+}$  и объясняются механизмом медленной релаксации. Совместный анализ данных ФМР и ЯМР позволяет определить энергию активации для процессов обмена валентностями  $Fe^{2+} \rightleftharpoons Fe^{3+}$  и время релаксации быстрорелаксирующих примесей.

3. Скорость продольной и поперечной релаксации ядер  $^{57}Fe$

в гексаферритах М типа как с сильной ( $\text{PbFe}_{12}^{0}{}_{19}$ ), так и со слабой ( $\text{BaFe}_{12}^{0}{}_{19}$ ) магнитоупругой связью существенно больше для ядер в ДГ, чем для ядер в доменах, что связано с вкладом в процессы релаксации, вносимым внутриграницными винтеровскими магнонами.

4. Для  $\text{PbFe}_{12}^{0}{}_{19}$  в интервале температур 120 - 160К диссипация энергии для осциллирующих блоховских доменных границ возрастает. Рост диссипации связан с усилением релаксационных процессов на частоте естественного ферромагнитного резонанса и обусловлен механизмом медленной релаксации при обмене валентностями  $\text{Fe}^{2+} \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+}$ .

Публикации. Основные результаты, полученные в ходе выполнения настоящей работы, опубликованы в шести работах.

Личный вклад соискателя. Среди материалов, которые изложены в диссертации, лично соискателю принадлежат следующие результаты экспериментального исследования скоростей спин-спиновой и спин-решеточной релаксации гексаферритов  $\text{BaFe}_{12}^{0}{}_{19}$  и  $\text{PbFe}_{12}^{0}{}_{19}$  в интервале температур 4,2 - 295К; экспериментальное разделение примесного вклада и вклада матрицы в скорость спин-решеточной релаксации при температуре 77 К; экспериментальное обнаружение и интерпретация максимумов  $T_1^{-1}$  и  $T_2^{-1}$  и максимума ширины линии ФМР в PbM, а также расчет на основании этих данных энергии активации и времени релаксации быстрорелаксирующих примесей; результаты экспериментального исследования скоростей ядерной релаксации в ДГ и их сравнительный анализ; результаты экспериментальных исследований ЯМР в  $\text{SrAl}_8\text{Fe}_{12-\delta}^{0}{}_{19}$  и их анализ, расчет вкладов ионов  $\text{Fe}^{3+}$  в позиции 2а в константу энергии анизотропии  $K_1$   $\text{SrFe}_{12}^{0}{}_{19}$ .

Апробация работы. Основные результаты работы были доложены и обсуждены на Международном семинаре по физике магнитных явлений (г.Донецк, 1994г.), Международной конференции по магнетизму (Варшава, 1994г.) и конференции физического факультета ХГУ "Физические явления в твердых телах", Харьков, 1993.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, примечания и списка литературы. Она содержит 130 страниц машинописного текста, включая 38 рисунков, 19 таблиц и библиографию из 88 наименований.

### Краткое содержание работы

Во введении сформулирована цель работы, обоснована актуальность вопросов рассматриваемых в диссертации, рассмотрены новизна работы и положения выносимые на защиту.

В первой главе являющейся обзорной рассмотрены основные особенности ЯМР в магнитоупорядоченных веществах и особенности магнитной релаксации ядерной подсистемы. Приведен обзор основных экспериментальных результатов по исследованию ЯМР в гексаферритах типа М.

Вторая глава так же носит обзорный характер. В ней рассмотрены химический состав, кристаллическая и магнитная структура гексаферритов М типа, приведены результаты исследования энергии анизотропии и магнитострикции гексаферритов М типа.

Третья глава посвящена описанию методики синтеза исследуемых образцов, описанию экспериментальных установок и экспериментальной техники. Описаны некогерентный спектрометр спинового вхв диапазона 50–80 МГц для наблюдения ЯМР на яд-

рах  $^{57}\text{Fe}$  в магнитоупорядоченных веществах и спектрометр ФМР прямого усиления 6 мм диапазона.

В четвертой главе приведены результаты исследования ЯМР и магнитной релаксации в гексаферритах  $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$  (PbM) и  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  (BaM).

В первом разделе изложены результаты исследования скорости спин-решеточной релаксации  $T_1^{-1}$  в PbM и BaM при температурах 77 К и 295 К. Обнаружено, что при 77К величины  $T_1^{-1}$  у PbM для ядер  $^{57}\text{Fe}$  в кристаллографических положениях 12k, 2a, 4f<sub>1</sub>, 4f<sub>2</sub> и 2b (подрешетки a, b, c, d и e) мало отличаются и изменяются в пределах 2 - 2,7 мс. Для BaM существенно больше как время релаксаций, так и его различие для разных подрешеток 100 - 730 мс. Путем анализа данных ЯМР и результатов исследования магнитострикции показано, что такое различие в величинах  $T_1^{-1}$  связано с присутствием в PbM примесных ионов  $\text{Fe}^{2+}$  с сильным спин-решеточным взаимодействием. Примесный механизм релаксации при 77К в PbM является наиболее эффективным и при возбуждении ЯМР у любой из подрешеток ядерная спин-решеточная релаксация происходит приблизительно с одинаковой скоростью. Показано, что для PbM экспериментально можно выделить вклад в скорость спин-решеточной релаксации примесных быстрорелаксирующих ионов и вклад собственных процессов релаксации ионов  $\text{Fe}^{3+}$  подрешеток. У гексаферрита BaM нет заметного количества примесных быстрорелаксирующих ионов и превалирующим фактором, задающим скорость  $T_1^{-1}$  будет величина обменного взаимодействия соответствующей подрешетки. Обнаружено, что в BaM минимальным значениям  $T_1 = 100$  мс при 77К обладают ядра  $^{57}\text{Fe}$  в позициях 12k (подрешетка a), ионы  $\text{Fe}^{3+}$  в которых имеют минимальное значение обменной частоты.

При комнатных температурах у PbM и BaM преобладающим является магنونный вклад в  $T_1$  и численные значения  $T_1$  для этих ферритов одного порядка величины.

Во втором разделе изложены результаты исследования температурных зависимостей скоростей спин-решеточной релаксации в PbM и BaM.

В интервале температур 77 - 295 К и при 4,2 К были измерены скорости спин-решеточной релаксации  $T_1^{-1}$  ядер  $^{57}\text{Fe}$  в доменах PbM и BaM для всех кристаллографически неэквивалентных позиций. Для всех позиций  $\text{Fe}^{3+}$  BaM в интервале 77 - 295 К наблюдается монотонный рост  $T_1^{-1}$  с температурой приблизительно по квадратичному закону. У PbM характер температурных зависимостей также одинаков для всех подрешеток. Для PbM  $T_1^{-1}$  слабо изменяется с температурой в интервале 140 - 295 К и резко возрастает при  $T < 140$  К с максимумом в интервале 4,2 - 77 К. Исследуемые образцы обладают малой величиной электросопротивления  $\rho$ . Малая величина  $\rho$  обусловлена присутствием ионов  $\text{Fe}^{2+}$  и перескоковым механизмом проводимости, связанным с обменом валентностями  $\text{Fe}^{2+} \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+}$ . Наличие разновалентных ионов железа и максимумов  $T_1^{-1}$  в интервале 4,2 - 77 К для PbM указывают на то, что основной вклад в скорость ядерной релаксации в области максимума  $T_1^{-1}$  дают процессы, связанные с обменом валентностями ионов железа, а наличие самих максимумов можно объяснить в рамках теории медленной релаксации. Эту точку зрения подтверждают результаты исследования ФМР. Поскольку передача ядерных возбуждений фононной подсистеме происходит через промежуточное звено - электронную подсистему, то скорость релаксации электронной и ядерной подсистем будет определяться релаксационными свойствами примес-

ных быстрорелаксирующих ионов, характеризуемых временем релаксации  $\tau$ . Максимум ширины линии  $\Delta H$  при ФМР на частоте 53,9 ГГц был обнаружен в PbM при температуре 180 К. Совместный анализ результатов исследования ФМР и ЯМР позволил определить энергию активации процесса обмена валентностями  $E = 2,5 \cdot 10^{-2}$  эВ и время релаксации примесных ионов  $\tau_{\infty} = 0,53$  пс. Слабая температурная зависимость  $T_1^{-1}$  для PbM в интервале 130–295 К объясняется компенсацией вкладов в  $T_1^{-1}$  от примесного механизма медленной релаксации и магнетонного вклада.

В третьем разделе изложены результаты исследования магнитной релаксации осциллирующих блоховских доменных границ PbM.

Экспериментально на частоте 70 МГц была изучена температурная зависимость добротности колебательного контура, содержащего сферический образец PbM. В интервале температур 77 – 295 К на фоне общей тенденции роста добротности при понижении температуры наблюдали ее минимум при 140 К. Общая тенденция роста добротности связана с увеличением электросопротивления образца при понижении температуры вследствие полупроводникового характера проводимости. Минимум добротности  $Q$  при 140 К соответствует максимальной диссипации энергии для осциллирующих блоховских ДГ. Появление минимума  $Q(T)$  при 140К было интерпретировано, как следствие резкого возрастания скорости релаксации на частоте естественного ФМР  $\omega_0$ , поскольку поступательное движение ДГ будет сопровождаться прецессией вектора намагниченности и генерацией спиновых волн. При выполнении условия  $\omega_0 \tau(T) = 1$ , в соответствии с теорией медленной релаксации должен наблюдаться максимум потерь энергии. В работе экспериментально была определена величина  $\omega_0 =$

$\approx 38,6$  ГГц для  $T = 140$  К и определено из условия  $w_0 \tau = 1$  значение  $\tau(140\text{К}) = 4,15$  пс, соответствующее максимуму потерь. Это значение хорошо соответствует  $\tau = 4,3$  пс, рассчитанному для этой температуры на основании данных ЯМР и ФМР в одномономном состоянии.

В четвертом разделе приведены результаты исследования скорости спин-спиновой релаксации в PbM и BaM.

Времена спин-спиновой релаксации были изучены в интервале температур 77 - 295 К. Наибольшее различие в скоростях спин-спиновой релаксации  $T_2^{-1}$  для BaM и PbM наблюдалось при низких температурах. Величины  $T_2^{-1}$  при 77 К у PbM для всех кристаллографических положений ионов  $\text{Fe}^{3+}$  на один-два порядка больше, чем у BaM. При комнатных температурах для BaM и PbM скорость  $T_2^{-1}$  одного порядка величины. Для анализа экспериментальных данных был сделан оценочный расчет вклада в  $T_2^{-1}$  сул-накамуровского взаимодействия. Показано, что при азотных температурах для PbM этим вкладом можно пренебречь.

Для всех кристаллографических положений ионов  $\text{Fe}^{3+}$  в PbM наблюдали резкий рост  $T_2^{-1}$  в области  $T > 140$  К. Такой резкий рост  $T_2^{-1}$  объясняется ростом в интервале 140 - 70 К скорости спин-решеточной релаксации  $T_1^{-1}$  у PbM. При комнатных температурах  $T_1^{-1}$  у BaM и PbM одного порядка величины и существенного различия в величинах  $T_2^{-1}$  не наблюдается.

В пятом разделе изложены результаты исследования магнитной релаксации ядер  $^{57}\text{Fe}$  в доменных границах PbM и BaM.

Возбуждение ЯМР производилось на частотах, соответствующих ядрам на краю ДГ. Проведенные исследования показали, что для BaM при низких температурах величины  $T_1$  и  $T_2$  для ядер в ДГ на один-два порядка меньше, чем для ядер в доменах. В таб-

лице 1 приведены значения  $T_1$  и  $T_2$  для ядер в ДГ ВаМ при 77К.

Таблица 1

Время релаксации  $T_1$ ,  $T_2$  для ядер  $^{57}\text{Fe}$  в ДГ  
ВаМ и РbМ при 77 К

подрешетки (позиции)	$T_2$ , мс		$T_1$ , мс	
	РbМ	ВаМ	РbМ	ВаМ
a(12k)	0,15	2,0	-	2,0
b(2a)	-	3,0	-	-
c(4f <sub>1</sub> )	0,05	1,8	-	2,5
d(4f <sub>2</sub> )	0,1	2,1	-	-
e(2b)	-	1,1	-	-

Обнаружено, что отношение  $T_1/T_2$  для ядер в доменах на порядок больше, чем для ядер в ДГ. Такое различие объясняется большим вкладом в скорость поперечной релаксации ядер в доменах сул-накамуровского взаимодействия. Для ядер в ДГ вклад сул-накамуровского взаимодействия резко уменьшается из-за различия локальных частот от ядер в ДГ. Было изучено также влияние внутриграницных магненов на скорость спин-спиновой релаксации в РbМ при 77 К. Показано, что у РbМ при наличии сильного магнитоупругого взаимодействия величины  $T_2$  ядер в ДГ в 5-30 раз меньше чем для ядер в доменах.

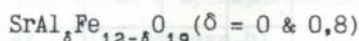
В пятой главе изложены результаты исследования анизотропных магнитных свойств и ЯМР в гексаферритах  $\text{SrAl}_8\text{Fe}_{12-\delta}\text{O}_{19}$ . Результаты исследований ЯМР и магнитной релаксации ядер  $^{57}\text{Fe}$  использованы для анализа механизма изменения констант и поля анизотропии в системе  $\text{SrAl}_8\text{Fe}_{12-\delta}\text{O}_{19}$ . Исследовались монокристаллы  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  (SrM) и  $\text{SrAl}_{0,8}\text{Fe}_{11,2}\text{O}_{19}$  (SrAlM), имеющие 95% обогащение изотопом  $^{57}\text{Fe}$ .

В первом разделе приведены результаты исследования кон-

тант энергии анизотропии  $K_1$  и поля анизотропии  $H_a$  при 77 К и 295 К. Для определения констант и поля анизотропии изучались на сферических образцах кривые технического намагничивания в направлении легкого намагничивания (гексагональная ось  $\vec{c}$ ) и в направлении трудного намагничивания (базисная плоскость). Во всех случаях в магнитных полях меньше поля технического насыщения наблюдались линейные зависимости намагниченности от приложенного внешнего поля. Температура Кюри  $T_c$  определялась по зависимостям начальной проницаемости от температуры. Для всех исследуемых ферритов в области температуры Кюри наблюдался эффект Гопкинсона. В таблице 2 приведены значения  $K_1$ ,  $H_a$  и  $T_c$  для комнатных и азотных температур.

Таблица 2

Магнитные характеристики монокристаллов гексаферритов



Ферриты	295 К			77 К			$T_c, \text{К}$
	$H_a, \text{кЭ}$	$J_a, \text{Гс}$	$K_1 \cdot 10^6 \frac{\text{эрг}}{\text{см}^3}$	$H_a, \text{кЭ}$	$J_a, \text{Гс}$	$K_1 \cdot 10^6 \frac{\text{эрг}}{\text{см}^3}$	
SrM	17,9	380	3,5	17,4	553	4,6	727
SrAlM	21,5	346	3,68	22,3	453	5,2	670
$\delta = 0,8$							

Замещение  $\text{Fe}^{3+}$  на  $\text{Al}^{3+}$  приводит к росту  $K_1$  и  $H_a$  при уменьшении  $J_a$  и  $T_c$ . Для того, чтобы провести анализ физических механизмов, ответственных за такое изменение  $K_1$ ,  $H_a$ ,  $J_a$ , были изучены ЯМР и магнитная релаксация ядер  $^{57}\text{Fe}$  исследуемых ферритов.

Во втором разделе изложены результаты исследования ЯМР и магнитной релаксации SrM в интервале 4,2 - 295 К. Спектры

спинового вѣа от ядер в доменах в интервале температур 4,2 - 295 К имели вид узких пиков с шириной на половине высоты 20 - 70 кГц. Путем исследования ЯМР в магнитном поле была определена анизотропия локальных полей на ядрах  $^{57}\text{Fe}$   $\delta\text{H}_n$  для позиций 2а, 4f<sub>1</sub>, 4f<sub>2</sub>, 2b и 12к. Величины  $\delta\text{H}_n$  для SrM мало отличались от значений  $\delta\text{H}_n$  для BaM /8/. Для ядер в ДГ SrM стационарной методикой зафиксировано 11 линий, принадлежащих либо ядрам в середине ДГ, либо на краѣ ДГ.

Времена спин-спиновой и спин-решеточной релаксации SrM были изучены при температурах 77 К и 295 К. В таблице 3 приведены значения  $T_1$  и  $T_2$  для подрешеток а, b, с, d и е при 77К.

Таблица 3  
Величины времени релаксации  $T_1$  и  $T_2$   
для SrM и SrAlM при 77 К

подрешетка		е	а	с	б	д	с <sub>1</sub>	с <sub>2</sub>	а <sub>1</sub>
SrM	ферриты								
	$T_1, \text{мс}$	315	44	105	185	84	-	-	-
	$T_2, \text{мс}$	0,64	0,22	4,2	10,2	0,59	-	-	-
SrAlM	$T_1, \text{мс}$	400	110	220	307	293	420	370	130
	$\delta=0,8$ $T_2, \text{мс}$	0,81	0,76	5,1	5,1	1,4	4,0	2,1	0,8

Для подрешетки а(12к)  $T_1$  в несколько раз меньше, чем у остальных подрешеток, что связано с минимальным значением обменной частоты для ионов  $\text{Fe}^{3+}$  этой подрешетки. Величины  $T_1$  у SrM при 77 К на один-два порядка меньше, чем у PmM при этой температуре. Это обстоятельство свидетельствует о том, что в SrM отсутствуют быстрорелаксирующие ионы с сильным спин-решеточным взаимодействием.

В третьем разделе приведены результаты исследования ЯМР

и магнитной релаксации в феррите SrAlM. Замещение ионов  $Fe^{3+}$  на  $Al^{3+}$  в SrM приводит к существенному изменению спектров спинового эха. Ширины линий сигналов эха 0,3 - 0,8 МГц, что существенно больше чем у SrM (0,020 - 0,070 МГц). Такое уширение связано с ростом катионной неупорядоченности. Поэтому не удается наблюдать сигналы стационарного ЯМР от ядер в ДГ SrAlM. Часть частот линий сигналов эха для SrAlM совпадала с частотами соответствующих линий SrM и была интерпретирована как сигналы от ядер  $^{57}Fe$ , в ближайшем окружении которых нет ионов  $Al^{3+}$ . Для интерпретации спутанных линий  $a_1, c_1, c_2, c_3$  были изучены их полевые и температурные зависимости. Установлено, что линии  $c_1, c_2$  и  $c_3$  принадлежат позициям  $4f_1$  (подрешетка c), а линии  $a_1$  позициям  $12k$  (подрешетка a). Сравнительный анализ спектров SrM и SrAlM позволяет сделать вывод о преимущественной локализации ионов  $Al^{3+}$  в позициях 2a (подрешетка b).

О характере возмущений, вносимых ионами  $Al^{3+}$ , можно судить, исследуя скорость ядерной релаксации. Значения  $T_1$  и  $T_2$  для SrAlM при 77 К приведены в таблице 3. Времена спин-решеточной релаксации для всех кристаллографически неэквивалентных положений ионов  $Fe^{3+}$  в SrAlM значительно больше, чем у SrM. Это обстоятельство свидетельствует о том, что замещение  $Fe^{3+}$  на  $Al^{3+}$  не приводит к появлению магнитоактивных ионов с сильным спин-решеточным взаимодействием. Рост  $T_1$  у SrAlM связан с уменьшением обменных частот подрешеток, поскольку температура Кюри SrAlM меньше, чем у SrM (табл.1).

В четвертом разделе рассмотрен механизм изменения  $K_1, H_A$  и  $J_B$  при замещении  $Fe^{3+}$  на  $Al^{3+}$  в SrM. Из полученных экспериментальных данных следует, что 82% ионов  $Al^{3+}$  занимают по-

зиции 2а, а 18% распределяются по остальным позициям. Рост при низких температурах  $K_1$  у SrAlM связан с тем обстоятельством, что ионы  $Fe^{3+}$  в позициях 2а вносят в  $K_1$  вклад противоположный по знаку по отношению к результирующему значению  $K_1$  и удаление их из кристаллической решетки приводит к росту  $K_1$ . Магнитные моменты в позициях 2а ориентированы также как и результирующая намагниченность феррита. Поэтому замещение  $Fe^{3+}$  на  $Al^{3+}$  в позициях 2а приводит к увеличению константы анизотропии  $K_1$ , уменьшению намагниченности насыщения и росту величины поля анизотропии. На основе такого подхода в разделе 4 рассчитан вклад ионов  $Fe^{3+}$  для позиций 2а в константу энергии анизотропии  $K_1$  феррита SrM при 77 К  $\Delta K_1(2a) = -0,9 \cdot 10^6$  эрг/см<sup>3</sup>.

В заключении кратко резюмированы основные выводы и результаты диссертации.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена актуальная научная задача для физики магнитных явлений - изучено влияние примесных быстроекспандирующих парамагнитных и диамагнитных ионов на ЯМР и процессы магнитной релаксации в гексаферритах М типа; показано, как на основе экспериментальной информации о локальных ЯМР характеристиках магнитоактивных ионов можно определить механизмы, формирующие анизотропные магнитные свойства многоподрешеточных ферримангнетиков.

Основные результаты, полученные в работе, можно изложить в виде следующих обобщающих выводов.

1. В широких интервалах температур и напряженностей магнитных полей исследован ЯМР и магнитная релаксация гексаферритов типа М с сильной и слабой магнитоупругой связью для

электронной подсистемы. Показано, что наличие в гексаферритах типа М быстрорелаксирующих ионов с сильным спин-решеточным взаимодействием определяет скорость спин-решеточной и спин-спиновой релаксации при ЯМР.

2. Для гексаферрита  $PbFe_{12}O_{19}$ , содержащего примесные ионы  $Fe^{2+}$ , в интервале температур 4,2 - 77К обнаружены максимумы скорости спин-спиновой и спин-решеточной релаксации при ЯМР, а при температуре  $\sim 180K$  на частоте 53,9 ГГц максимум ширины линии при ФМР. Наблюдаемые максимумы связаны с присутствием в гексаферрите данного состава ионов  $Fe^{2+}$  и объясняются механизмом медленной релаксации. Совместный анализ данных ЯМР и ФМР позволяет определить энергию активации для процесса обмена валентностями  $Fe^{2+} \leftrightarrow Fe^{3+}$  и время релаксации быстрорелаксирующих примесей.

3. Установлено, что при отсутствии быстрорелаксирующих ионов в многоподрешеточной системе основным фактором, задающим скорость спин-решеточной релаксации ядер  $^{57}Fe$ , является величина обменного взаимодействия ионов соответствующей подрешетки.

4. Показано, что скорости продольной и поперечной релаксации ядер  $^{57}Fe$  в гексаферритах М типа как с сильной ( $PbFe_{12}O_{19}$ ), так и со слабой ( $BaFe_{12}O_{19}$ ) магнитоупругой связью для ядер в доменах существенно меньше, чем для ядер в ДГ, что связано с вкладом в процессы релаксации, вносимым внутрigrаничными винтеровскими магнонами.

5. Обнаруженное при температуре  $\sim 140K$  увеличение диссипации энергии осциллирующих блоховских ДГ связано с резким усилением релаксационных процессов на частоте естественного ферромагнитного резонанса и обусловлено механизмом медленной

релаксации при обмене валентностями  $Fe^{2+} \leftrightarrow Fe^{3+}$ .

6. Показано, что совместный анализ результатов статических и резонансных измерений для системы  $SrAl_6Fe_{12-8}O_{19}$  позволяет установить механизм, ответственный за увеличение поля анизотропии при замещениях  $Fe^{3+} \rightarrow Al^{3+}$ . На основе этого механизма рассчитан вклад ионов  $Fe^{3+}$  в позициях 2a в константу энергии анизотропии  $K_1$  при низких температурах для  $SrFe_{12}O_{19}$ .

Список цитированной литературы:

1. Smit J., Casimir H.B.R. Interaction dipolore magnetique comme cause de l'energie magnetocrystalline // J.Phys.Red. - 1959. - V.20, N2-3. - P.368-370.
2. Fuchikami N. Magnetic anisotropy of magnetoplumbite  $BaFe_{12}O_{19}$  // J.Phys.Soc.Japan. - 1965. - V.20, N5. - P.760-769.
3. Theory of the single ion magnetocrystalline anisotropy of 3d ions / You Xu Gui-Ling Yang et al // Phys.Stat. Sol.B. - 1990. - V.157, N2. - P.685-693.
4. Кунцевич С.П., Мамалуй Ю.А., Палехин В.П. Подрешеточные вклады в магнитострикцию и энергию анизотропии  $BaFe_{12}O_{19}$  // ФТТ. - 1980. - Т.22, N67. - С.2192-2193.
5. Кунцевич С.П., Безлепкин А.А., Попков Ю.А. ЯМР ядер  $^{57}Fe$  в гексаферрите  $BaFe_{12}O_{19}$  // ЖЭТФ. - 1985. - Т.88, N5. - С.1820-1826.
6. Безлепкин А.А., Кунцевич С.П., Палехин В.П. Константы магнитострикции гексаферритов типа M // Изв.Вузов. - 1985. - N9. - С.106-107.
7. Температурная зависимость магнитной релаксации ядер  $^{57}Fe$  в доменах и доменных границах бариевого гексаферрита /

А.В.Залесский, В.Т.Кривенко, А.В.Куневич и др. // ФТТ. - 1987. - Т.29, вып.4. - С.1107-1114.

8. Кунцевич С.П., Безлепкин А.А. Расщепление ядер ЯМР  $^{57}\text{Fe}$  в доменах  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  при спиновой переориентации // ФТТ. - 1989. - Т.31, N3. - С.261-263.

Основные результаты диссертации отражены в работах:

1. Магнитная релаксация ядер  $^{57}\text{Fe}$  в гексаферритах типа М / А.А.Безлепкин, М.Р.Ираки, С.П.Кунцевич, В.П.Палехин // УФЖ. - 1994. - Т.39, N4. - С.37-40.
2. Магнитная релаксация ядер  $^{57}\text{Fe}$  в магнетоплюмбите / А.А.Безлепкин, М.Р.Ираки, С.П.Кунцевич, В.П.Палехин // ФНТ. - 1994. - Т.20, N9. - С.886-890.
3. Магнитная релаксация ядер  $^{57}\text{Fe}$  в гексаферритах бария и свинца / А.А.Безлепкин, М.Р.Ираки, С.П.Кунцевич, В.П.Палехин // Мат. конференции "Физические явления в твердых телах". - ХТУ, 1993. - С.20.
4. Nuclear Magnetic Relaxation in hexaferrites / А.А.Безлепкин, М.Р.Ираки, С.П.Кунцевич, В.П.Палехин // International Conference on magnetism ICM'94. - Warszawa, 1994. - P.446.
5. Ядерная магнитная релаксация в гексаферритах структурного типа М / А.А.Безлепкин, М.Р.Ираки, В.И.Костюков и др. // Сб. трудов конф. "Физика магнитных явлений". - Донецк, 1994. - С.42.
6. Магнитная релаксация на частоте естественного ферромагнитного резонанса осциллирующих блоховских доменных границ / А.А.Безлепкин, М.Р.Ираки, В.И.Костюков и др. // Сб. трудов конф. "Физика магнитных явлений". - Донецк, 1994. - С.43.

Іракі М.Р. ЯМР і магнітна релаксація в гексаферитах М-типу.

Дисертація у вигляді рукопису на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.11 - фізика магнітних явищ, Харківський держуніверситет, Харків 1994.

За темою дисертації опубліковано 6 наукових праць, які містять експериментальне дослідження ЯМР та магнітної релаксації в багатограткових гексаферитах М-типу. Встановлено, що в багатогратковій системі іонів  $Fe^{3+}$  швидкість спінограткової релаксації ядер  $^{57}Fe$  в певній підгратці задається переважаючим фактором - величиною обмінної взаємодії іонів цієї підгратки. Для гексафериту  $PbFe_{12}O_{19}$  виявлені при низьких температурах максимуми швидкості ядерної релаксації і максимуми ширини лінії ФМР. Максимуми пов'язані з присутністю домішкових іонів і інтерпретовані в рамках теорії повільної релаксації. Визначена енергія активації процесу обміну валентностями  $Fe^{3+} \rightleftharpoons Fe^{2+}$  та час релаксації швидкокорелаксуючих домішок. Показано, що в гексаферитах типу М як при слабкому, так і при сильному магнітопружному зв'язку швидкість релаксації ядер  $^{57}Fe$  в доменних стінках суттєво більша, ніж ядер в доменах, що пов'язано з внеском внутрішньограничних магнітів. Вивчені анізотропні властивості і ЯМР в системі  $SrAl_8Fe_{12-8}O_{19}$ . Розраховано внесок іонів  $Fe^{3+}$  в позиціях  $2a$  в сталу енергію анізотропії  $K_1$  для  $SrFe_{12}O_{19}$  при низьких температурах.

Ключові слова: гексаферит, ядерна релаксація, стала анізотропія.

Eraky M.R. NMR and magnetic relaxation in hexaferrite M-type.

Thesis in manuscript form is introduced to the scientific degree of candidate of physics and mathematics sciences in 01.04.11 - Physics of Magnetic Phenomena, Kharkov state University, Kharkov 1994.

6 scientific articles containing the experimental investigation of NMR and magnetic relaxation in many sublattical hexaferrite M-type. It is shown that in many sublattical systems of ions  $Fe^{3+}$  the exchanging interaction in sublattices of nuclei  $^{57}Fe$  is a principal factor of the rate of spin-lattice relaxation for each of the sublattices. It is found that for hexaferrite  $PbFe_{12}O_{19}$  spin-lattice relaxation rate exhibits maximum at low temperature and exhibits maximum FMR line width at 180 K. The maximum are related with presence of impure ions and interpreted within the framework of the theory of slow relaxation. The activation energy in the process of valence exchange  $Fe^{2+} \leftrightarrow Fe^{3+}$  and the time of relaxation of fastrelaxing impurities are determined. It is shown, that for hexaferrite of M type with strong as well as with weak spin-lattice interaction relaxation rate of nuclei  $^{57}Fe$  is significantly greater in the domain walls than it is in the domains themselves, which related with the contribution of internally bounded magnons. The anisotropic magnetic properties and NMR of  $SrAl_5Fe_{12}O_{19}$  systems are studied. The contribution of  $Fe^{3+}$  ions in the positions of 2a to the magnetic anisotropy constant of  $SrFe_{12}O_{19}$  in low temperature are calculated.

Подписано к печати 16.12.94 г.  
Формат 60x84 1/16. Уч.-изд.л. 1,0  
Тираж 85. Зак. 38 Бесплатно.

Ротапринт Института монокристаллов  
Харьков, пр. Ленина, 60  
30-70-97

456383

10 31.652  
**AB 31.652**