

Антонову Л.И. год 0533160!

ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Шилов Виктор Павлович

**Влияние поверхностной анизотропии на ферромагнитный
резонанс в наночастицах феррита**

01.04.07—Физика твердого тела

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

ПЕРМЬ – 2000

Работа выполнена в лаборатории кинетики анизотропных жидкостей Института механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

Научный руководитель доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник Ю.Л. Райхер

Официальные оппоненты доктор физико-математических наук, профессор
А.В. Ведяев (Московский государственный
университет, г. Москва)

доктор физико-математических наук, профессор
А.Н. Захлевыных (Пермский государственный
университет, г. Пермь)

Ведущая организация — Институт физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург.

Защита состоится 20 июля 2000г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 063.59.03 в Пермском государственном университете (г. Пермь, 614600, ГСП, ул. Букирева, 15)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пермского государственного университета.

Автореферат разослан 19 июля 2000г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
кандидат физико-математических наук, доцент

Субботин

Г.И. Субботин

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. В настоящее время одним из главных направлений физики твердого тела стала физика ультрадисперсных сред. Последняя изучает материалы, основу которых составляют системы малых частиц металла, полупроводника или диэлектрика с размерами зерен в диапазоне 1 – 10 нм. Физические свойства ультрадисперсных сред существенно отличаются от свойств того же материала в состоянии массивного кристалла и в ряде случаев являются уникальными. В указанных системах обнаружены интересные сочетания электрических, магнитных, тепловых, механических и других свойств, не встречающиеся ни в массивных материалах, ни в крупнодисперсных порошках.

Разработка новых и совершенствование известных магнитных материалов, расширяя сферу применения устройств на их основе, составляет существенный фактор научно-технического прогресса. Обширный и важный класс объектов этого типа представляют материалы, в состав которых входят высокодисперсные порошки [1]. Выполненные из них элементы и схемы необходимы для миниатюризации радиоэлектронных и радиотехнических устройств, и, особенно, для создания носителей информации (магнитные аудио/видео пленки, гибкие и жесткие диски и т.д.).

При исследовании дисперсных металлов и ферритов уже получен целый ряд фундаментальных теоретических и экспериментальных результатов, но и на сегодняшний день указанная область магнетизма содержит множество нерешенных проблем, актуальность работы над которыми не вызывает сомнений. Наличие специфических поверхностных состояний существенно сказывается, в том числе, и на высокочастотных магнитных свойствах ультрадисперсных сред. Классическая техника ферромагнитного резонанса (ФМР) позволяет уверенно выявлять эти особенности. Однако для того, чтобы действительно превратить ФМР в удобный инструмент для анализа дисперсных магнитных материалов в целом и для изучения свойств отдельных наночастиц, необходимы теоретические модели, обеспечивающие адекватную интерпретацию измерений. Именно с этой целью в настоящей диссертации изучается влияние свойств поверхности частицы дисперсного магнетика на динамику намагниченности в ее объеме.

Целями настоящей работы являются:

- исследование структуры основного состояния намагниченности в объеме малой частицы, обладающей поверхностной анизотропией;
- изучение ферромагнитного резонанса в малых частицах, магнитная анизотропия которых представляет собой комбинацию одноосного поверхностного (анизотропия Аарони) и одноосного объемного вкладов;
- исследование особенностей ферромагнитного резонанса в малых частицах с динамической обменной поверхностной анизотропией;
- изучение влияния поверхностной магнитной фазы на динамику объемной намагниченности, т.е. спин-волновой резонанс.

Научная новизна результатов. В диссертационном исследовании получены впервые следующие результаты:

- найдены равновесные распределения намагниченности (основное состояние) в ферромагнитных частицах с поверхностной магнитной анизотропией Нееля-Брауна и Аарони;
- построена макроскопическая модель, позволяющая учесть влияние поверхностной магнитной анизотропии на ФМР в частицах феррита;
- предложенная модель успешно использована для объяснения результатов измерений ФМР в наночастицах гамма-оксида железа, из сопоставления с экспериментом найдены значения констант поверхностной анизотропии.

Автор защищает:

- результаты расчетов основного состояния намагниченности в ферромагнитных частицах с поверхностной магнитной анизотропией Нееля-Брауна и Аарони;
- результаты исследования вклада поверхностной магнитной анизотропии Аарони в спектры ФМР наночастиц феррита;
- результаты исследования вклада обменной поверхностной магнитной анизотропии в спектры ФМР наночастиц феррита.

Научная и практическая значимость.

В последнее время все возрастающее внимание исследователей привлекает изучение свойств поверхности магнитных кристаллов. Это связано с осознанием огромной роли, которую играет поверхность в формировании свойств вещества, и продиктовано желанием выяснить и количественно описать влияние граничного образца на его объемную магнитную структуру. Указанная работа приобретает все большее значение и с прикладной точки зрения. Действительно, свойства ультрадисперсных магнитных систем самым существенным образом зависят от свойств поверхности образующих их наночастиц, а наноразмерные кристаллиты—это как раз те системы, с которыми связывают надежды на дальнейшее совершенствование магнитных носителей информации. Например, одним из перспективных путей к достижению сверхвысокой плотности записи является уменьшения влияния теплового шума за счет создания частиц с сильной поверхностной анизотропией.

В настоящей работе исследованы различные типы поверхностной анизотропии, а именно, модели Нееля-Брауна, Аарони и обменная анизотропия. Показано, что для ФМР влияние поверхности в малых частицах является доминирующим. Изучена "видимая" при эксперименте мода прецессии. Сравнение теоретических выводов и результатов эксперимента позволяет говорить об их хорошем согласии.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- Всероссийской научной конференции "Физико-химические проблемы нанотехнологий", Ставрополь, СГУ, 1997;
- 16 Международной школе-семинаре "Новые магнитные материалы для микроэлектроники". Москва, МГУ, 1998;
- Сессии Научного совета РАН по проблеме "Магнетизм". Москва, ИФП РАН, 1998;
- 11 и 12 Международных зимних школах по механике сплошных сред. Пермь. 1997, 1999;
- семинарах Лаборатории магнитной информатики Института физики металлов УрО РАН (Екатеринбург), Кафедры теоретической физики Пермского университета, Института механики сплошных сред УрО РАН (Пермь); Лаборатории гетерогенных и неупорядоченных сред Университета Париж 6.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитированной литературы и приложения.

Первая глава представляет собой обзор работ по ферромагнитному резонансу в малых частицах. Даны краткое объяснение явления ФМР и его разновидностей—спин-волнового резонанса. В хронологическом порядке приведены результаты основных исследований. Подробно рассмотрены критерии однодоменности магнитных зерен и продемонстрированы успехи ФМР в исследовании магнитных свойств ультрадисперсных сред. Обсуждены известные модели, описывающие поведение поверхностных спинов в пленках и малых частицах, и изложены принципиальные результаты, касающиеся влияния поверхностной магнитной анизотропии на динамику объемных спинов, т.е. на спектры спин-волнового резонанса.

Анализ собранного материала показал, что существует значительная "асимметрия" между изучением поверхностных магнитных эффектов в пленках и малых частицах: свойства частиц пока что гораздо менее исследованы. В то же время, близость физики пленок и физики малых частиц вполне очевидна. Таким образом, возникает вполне естественный вывод о том, что быстрейший путь удовлетворения интереса к свойствам высокодисперсных магнетиков лежит через максимальное использование идей, уже апробированных в физике тонких магнитных пленок. Именно эта концепция кладется в основу диссертации. Конкретным направлением исследования является феноменологическая теория магнитного резонанса в малых частицах для тех практически важных ситуаций, когда высокочастотный спектр формируется в результате совместного движения взаимодействующих между собой поверхностных и объемных спинов.

Во второй главе изучено влияние одноосной поверхностной магнитной анизотропии на основное состояние намагниченности в наночастице. Минимизацией свободной энергии сферической частицы с радиальной поверхностной анизотропией Нееля-Брауна [2,3]

$$w_s^* = -K_s^*(eN)^2, \quad (1)$$

где N — нормаль к поверхности частицы, и анизотропией Аарони [4, 5]

$$w_s = -K_s(en)^2, \quad (2)$$

(n — единичный вектор легкой оси поверхности), получена система уравнений микромагнетизма

$$e \times \left[2\alpha M^2 \nabla^2 e - \frac{\partial}{\partial e} w_A + M(H_0 - \nabla \psi^i) \right] = 0, \quad (3)$$

$$\nabla^2 \psi^i = 4\pi M \operatorname{div} e, \quad \nabla^2 \psi^e = 0.$$

Здесь α — параметр неоднородного обмена, $e(r)$ — единичный вектор намагниченности, M — намагниченность, $w_A(r, e)$ — объемная плотность анизотропии, ψ^i — магнитостатический потенциал, связанный с полем внутри частицы посредством $H_d = -\nabla \psi^i$, а ψ^e — магнитостатический потенциал вне частицы. Граничные условия на поверхности частицы имеют вид

$$e \times \left[\alpha M^2 \frac{\partial}{\partial N} e + \frac{\partial}{\partial e} w_s \right] = 0 \quad (4)$$

$$\psi^i = \psi^e, \quad \frac{\partial}{\partial N} (\psi^i - \psi^e) = 4\pi M N e;$$

а поверхностная плотность энергии анизотропии w_s выбирается в виде (1) или (2).

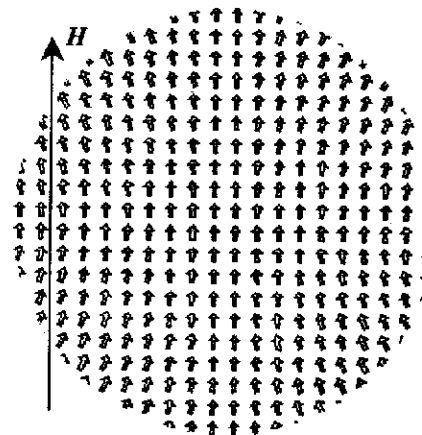
Решение системы уравнений (3) в виде ряда по малому параметру пиннинга $p = |w_s| R / \alpha M^2$ показывает, что для рассматриваемых ситуаций состояние однодоменной намагниченности, т.е. строгая однодоменность, не является стационарным. Реализующееся в действительности стационарное состояние можно представить как суперпозицию однородного состояния и набора пространственных мод. В первом порядке, поправку $e^{(1)}$ к однородному распределению e в модели (1) удобно

записать в цилиндрических координатах, где внешнее поле направлено по оси z :

$$e_\rho^{(1)} = -h_2(r) \dot{P}_2(\cos \theta) = \frac{1}{2} \frac{j_2(\sqrt{qHr})}{j_2'(\sqrt{qHr})|_{r=1}} \sin 2\theta, \quad (5)$$

здесь $j_2(r)$ — сферическая функция Бесселя первого рода, а точка означает дифференцирование по углу θ , а штрих — дифференцирование по радиусу.

Рис. 1 Неоднородное поле намагниченности, вызванное радиальной поверхностной анизотропией Нееля-Брауна, учитывающее поправку первого порядка (5). На рисунке изображено меридиональное сечение частицы, проходящее через внешнее поле (ось z). Для наглядности, вертикальная компонента намагниченности взята равной единице.



Для поверхностной анизотропии Аарони (2) компоненты вектора $e^{(1)}$ в декартовой системе координат как функции сферической координаты r , записываются в виде

$$e_x^{(1)} = n_z n_x \frac{j_0(\sqrt{-qHr})}{j_0'(\sqrt{-qHr})|_{r=1}} = n_z \sqrt{1-n_z^2} \frac{j_0(\sqrt{-qHr})}{j_0'(\sqrt{-qHr})|_{r=1}}, \quad e_y^{(1)} = 0, \quad (6)$$

здесь j_0 — сферическая функция Бесселя первого рода.

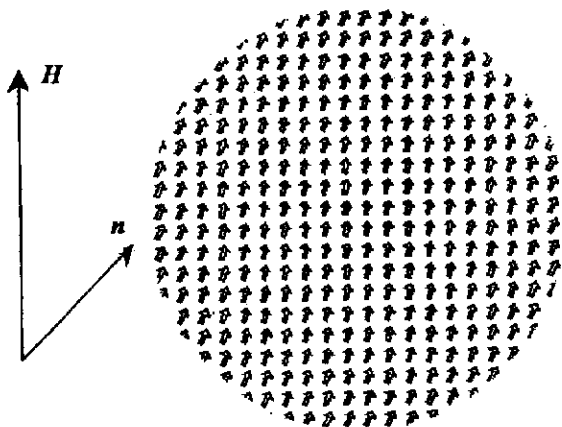


Рис.2 Неоднородность намагниченности, вызванная анизотропией Аарони, с учетом малой поправки (6). Представлено сечение частицы, проходящее через внешнее поле и ось анизотропии. Угол между векторами составляет 45° . Вертикальная компонента равна единице.

Если зондирующее поле мало по сравнению с внутренними полями, то ФМР происходит без разрушения основного состояния намагниченности. Малость радиочастотного поля h по сравнению с внутренними полями частицы в исследуемых нами случаях означает малость отношения $\varepsilon = h/H$ по сравнению с числом пиннинга $p = K_s R / \alpha M^2$. Проведем некоторые оценки. Для рассматриваемых частиц гамма-оксида железа константа неоднородного обмена $\alpha \sim 10^{-12} - 10^{-11}$ см², намагниченность $M \sim 400$ Гс, константа поверхностной анизотропии $K_s \sim 0.1$ эрг/см², радиус частицы $R \sim 10^{-6}$ см, внешнее поле (типичное для наблюдения ФМР в диапазоне 10 ГГц) $H \sim 3$ кЭ, радиочастотное поле $h \sim 3$ Э. Следовательно, характерные безразмерные параметры задачи имеют следующий порядок: $p \sim 0.01 - 0.1$ и $\varepsilon \sim 0.001$. Поэтому наблюдаемый динамический отклик системы, в соответствие с условием трансверсальности с точностью до первого порядка по параметру ε , должен быть перпендикулярен основному состоянию намагниченности.

Для анизотропии Нееля-Брауна последнее условие требует, чтобы возмущение имело проекцию только на ось ϕ цилиндрической системы координат. Поскольку существует только одно решение с азимутальным числом $m = 0$, указанная мода не может быть возбуждена линейным радиочастотным полем. Таким образом, появление стационарной пространственно-зависимой добавки к однородному распределению намагниченности накладывает существенные ограничения на возможность наблюдения линейного отклика в радиочастотном поле. В частности, для сферической частицы с анизотропией Нееля-Брауна возникает запрет на возбуждение линейного сигнала пространственно однородным переменным полем

Для анизотропии Аарони отклик перпендикулярен плоскости, в которой лежат стационарная пространственно-зависимая добавка и вектор $e^{(1)}$. Это вызывает зависимость сигнала от угла между радиочастотным полем и этой плоскостью. Заметим, что в известных нам экспериментах такая зависимость не наблюдалась. Это заставляет предположить, что гипотеза Аарони недостаточно полна для описания магнитодинамики частицы при произвольной ориентации ее оси. Однако имеются два физически важных случая — ситуации, когда равновесное распределение намагниченности остается однородным — в которых модель Аарони вполне подходит для интерпретации радиочастотных экспериментов.

В третьей главе рассмотрены высокочастотные неоднородные колебания намагниченности в сферической частице магнитодиэлектрика. Предполагается, что поверхность частицы обладает собственной магнитной анизотропией типа Аарони, а в объеме существует сонаправленная ей одноосная анизотропия.

На основе уравнения Ландау - Лифшица [6]

$$\frac{de}{dt} = -\gamma(e \times H_{\text{eff}}) - \lambda\gamma(e \times (e \times H_{\text{eff}})), \quad (7)$$

где эффективное магнитное поле, действующее внутри частицы, имеет вид

$$H_{\text{eff}} = H_0 + 2M\alpha\nabla^2 e + (2K/M)(en)n - \nabla\psi^i \quad (8)$$

(здесь γ — гиромагнитное отношение, λ — параметр затухания, i — внутренний магнитостатический потенциал, а $-\nabla\psi^i$ — магнитное поле, создаваемое объемными и поверхностными магнитными зарядами внутри частицы) изучен линейный отклик частицы на приложенное плоско-поляризованное магнитное поле. Основное

внимание уделено нижней пространственной моде, в которую при рассматриваемой ситуации "превращается" однородная прецессия. Найдены частота и время релаксации. Для случая, когда внешнее постоянное поле параллельно оси поверхностной анизотропии, имеем

$$\omega = \text{Re}\Omega = \pm\gamma[H_0 + H_A + 3K_s/MR], \quad (9)$$

$$\tau = (\text{Im}\Omega)^{-1} = (\gamma\lambda)^{-1}[H_0 + H_A + 3K_s/MR]^{-1};$$

для случая, когда внешнее постоянное поле перпендикулярно оси поверхностной анизотропии (и при этом велико по сравнению с H_A)

$$\omega = \text{Re}\Omega = \pm\gamma\left[H_0 - \frac{1}{2}(H_A + 3K_s/MR)\right], \quad (10)$$

$$\tau = (\text{Im}\Omega)^{-1} = (\gamma\lambda)^{-1}\left[H_0 - \frac{1}{2}(H_A + 3K_s/MR)\right]^{-1}.$$

Оказалось, что наличие поверхностной анизотропии приводит не только к амплитудной модуляции колебаний намагниченности внутри частицы, но и вызывает смещение резонансной частоты (поля). При этом, для случая анизотропии Аарони, как и должно быть, величина и знак смещения резонансного поля зависят от ориентации оси частицы относительно внешнего постоянного поля. В то же время, размерная зависимость поверхностного вклада (он обратно пропорционален диаметру частицы) оказывается одинаковой для всех ориентаций. Следовательно, если избранный подход справедлив, то построение экспериментально измеряемой зависимости $2/3[H_{\text{res}}(\vartheta = 90^\circ) - H_{\text{res}}(\vartheta = 0^\circ)]$ от аргумента $1/R$ должно давать прямую линию, тангенс угла наклона которой есть величина $3K_s/MR$. Пересечение этой прямой с осью ординат определяет значение поля объемной анизотропии H_A .

Выводы теории тестировались с использованием пяти образцов магнитной жидкости на основе частиц гамма-оксида железа, которые были заморожены (ориентационно текстурованы) в постоянном магнитном поле 10 кЭ. В использованных образцах распределение частиц по размерам хорошо описывается логнормальным законом с наиболее вероятным диаметром d_{mp} от 4.8 до 10 нм и параметром дисперсии 0.1 и 0.2.

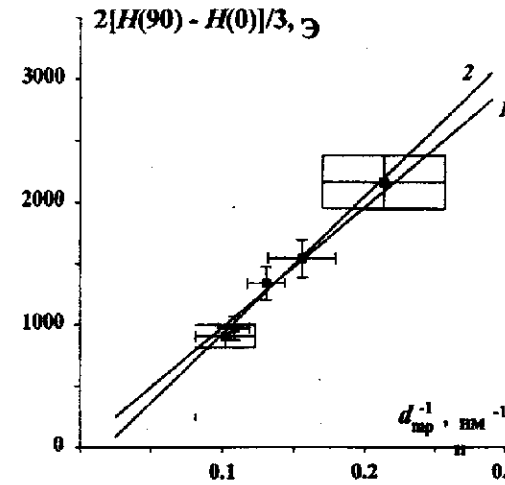


Рис. 3. Два варианта фитирования экспериментальных данных по зависимости изотропного сдвига резонансного поля от среднего размера наночастиц. Для линии 1: $H_A = 0$, константа анизотропии Аарони $K_s = 4.8 \times 10^{-2}$ эрг/см². Линия 2: $K_s = 5.6 \times 10^{-2}$ эрг/см² и $H_A = -210$ Э. Погрешность экспериментальных данных составляет порядка 10%.

Из-за погрешности измерений, величину H_A с удовлетворительной точностью найти не удается. Однако оказывается, что в изученном диапазоне размеров (4.8–10 нм) это не столь важно, поскольку, как следует из Рис.3, поверхностный вклад оказывается существенно больше объемного.

В четвертой главе рассмотрен ФМР в сферической ферромагнитной частице, покрытой тонким слоем антиферромагнетика. На границе раздела ферромагнетик-антиферромагнетик (фазы с разными типами магнитного порядка) возникает специфическое взаимодействие—обменная или односторонняя анизотропия. Поверхностная плотность энергии этого взаимодействия записывается в виде [7]:

$$f_u = -K_u(eI), \quad (11)$$

здесь $I = L_s/L_s$ — единичный вектор, определяемый через полный вектор антиферромагнетизма поверхности $L_s = M_1 - M_2$, где M_1 и M_2 — векторы намагниченности подрешеток.

Учет вклада (11) приводит к условию на границе раздела сред

$$\left(2\alpha M \frac{\partial e}{\partial N} - \frac{K_u I}{M}\right) \times e = 0, \quad (12)$$

а динамика антиферромагнитного параметра порядка поверхностной фазы описывается релаксационным уравнением

$$\frac{dl}{dt} = -\frac{\gamma}{\lambda_s} (l \times l \times H_s), \quad (13)$$

где $H_s = 2\alpha_s L_s \nabla^2 l + (K_u / L_s) e$ — эффективное поле, действующее на поверхностную антиферромагнитную фазу, λ_s — параметр затухания в ней, α_s — параметр обменной жесткости антиферромагнетика. Для больших параметров затухания в поверхностной магнитной фазе по сравнению с объемной ($\lambda_s \gg \lambda$) можно пренебречь быстрыми изменениями поверхностной фазы и считать ее состояние квазиравновесным.

Для наблюдаемой в эксперименте моды, решая уравнение Ландау-Лифшица (7) с граничным условием (12), удастся найти частоту и время релаксации для любых углов между осью анизотропии и внешним полем:

$$\omega = \text{Re} \Omega = \pm \gamma (H + H_s P_2(\cos \theta) + 3K_u / MR), \quad (13)$$

$$\tau = (\text{Im} \Omega)^{-1} = (\gamma \lambda)^{-1} (H + H_s P_2(\cos \theta) + 3K_u / MR)^{-1}.$$

При этом, как и ожидалось, для объемной анизотропии величина и знак смещения резонансного поля зависят от ориентации оси частицы (ось легкого намагничивания) относительно внешнего поля. Для обменной же анизотропии вклад в резонансное поле оказывается изотропным.

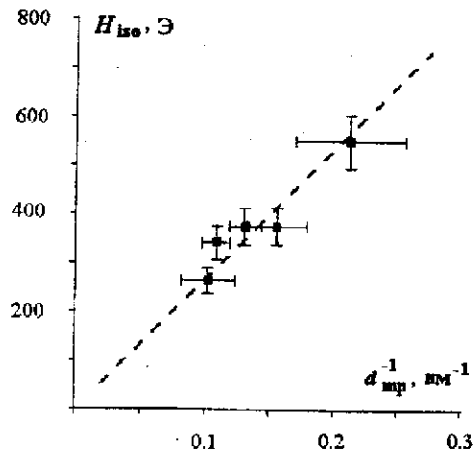


Рис. 4 Изотропный вклад в резонансное поле как функция диаметра наиболее вероятного диаметра d_{mp} . Экспериментальные точки взяты при температуре 3.5 К. Фитирование дает величину $K_u \approx 1.4 \times 10^{-2}$ эрг/см².

Размерная зависимость обоих вкладов (обратно пропорциональны размеру частицы) оказывается одинаковой для всех ориентаций оси частицы относительно внешнего поля. Применение результатов модели к данным по ФМР в замороженных без

поля образцах магнитной жидкости дает возможность определить константу обменной анизотропии.

Основные результаты и выводы

Изучен вклад поверхностной анизотропии в магнитные свойства малых частиц феррита. Исследовано основное состояние намагниченности во внешнем поле произвольного направления. Для слабого пиннинга найдены решения для моделей поверхностной анизотропии Нееля-Брауна и Аарони.

Рассмотрен ферромагнитный резонанс (ФМР) в сферической частице при двух вариантах анизотропии. Первый случай — анизотропия Аарони на поверхности и сонаправленная ей одноосная в объеме. Найден линейный отклик на переменное поле. Проанализирована низшая мода, которая занимает место однородной прецессии и обнаруживается в ФМР-эксперименте, проводимом по стандартной методике. Найдены резонансные частоты и времена релаксации для ситуаций, когда подмагничивающее поле либо параллельно, либо перпендикулярно легкой оси. Показано, что результатом действия поверхностной анизотропии являются пространственная модуляция амплитуды динамической намагниченности и сдвиг резонансного поля. Знак и величина сдвига зависят от угла между легкой осью и внешним полем. Теория хорошо согласуется с данными по измерениям ФМР в суспензиях калиброванных по размеру частиц гамма-оксида железа.

Поставлена и решена задача о ФМР в частице с динамической обменной поверхностной анизотропией, ось которой следует за направлением внешнего поля. Вызывая, как и всякий пиннинг, пространственную модуляцию амплитуды прецессии, эта поверхностная анизотропия уникальна тем, что дает изотропный сдвиг резонансного поля. Некоторое время назад этот эффект был обнаружен при измерении ФМР в замороженных феррожидкостях, теперь он получил объяснение.

В рамках линейной теории частные результаты решенных задач могут обобщены. Так, выражение для частоты прецессии, учитывающее влияние всех рассмотренных типов анизотропии записывается в виде

$$\omega = \gamma \left\{ H_0 + \left[\frac{2K_r}{M} + \frac{3K_s}{MR} \right] P_2(\cos \theta) + \frac{3K_u}{MR} \right\}. \quad (13)$$

Важный вывод, полученный путем анализа экспериментальных данных—это заключение о том, что в рассмотренных системах влияние поверхностной анизотропии существенно превосходит вклад объемных слагаемых.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Шилов В.П., Райхер Ю.Л., Влияние поверхностной анизотропии на распределение намагниченности однодоменной частицы. // 11 Международная зимняя школа по механике сплошных сред. Пермь, ИМСС УрО РАН, 1997. Тезисы докладов. т. 2, С.241.

Шилов В.П., Бакри Ж.-К., Газо Ф., Пержински Р., Райхер Ю.Л., Прецессия намагниченности в наночастицах феррита с односторонней поверхностной анизотропией. // Физико-химические и прикладные проблемы магнитных жидкостей. Ставрополь, 1997. Сб. научн. трудов, Ставрополь: Изд-во СГУ, С.13–21.

Шилов В.П., Бакри Ж.-К., Газо Ф., Пержински Р., Райхер Ю.Л., Влияние одноосной поверхностной анизотропии на магнитный резонанс в наночастицах феррита. // 16 Международная школа “Новые магнитные материалы для микроэлектроники”. Москва, МГУ, 1998. Тезисы докладов, т. 1, С.280–281.

Шилов В.П., Бакри Ж.-К., Газо Ф., Пержински Р., Райхер Ю.Л., ФМР в частицах феррита с поверхностной анизотропией. // 12 Международная зимняя школа по механике сплошных сред. Пермь, ИМСС УрО РАН, 1999. Тезисы докладов, С.319.

Shilov V.P., Bacri J.-C., Gazeau F., Gendron F., Perzynski R., Raikher Yu.L., Ferromagnetic resonance in ferrite nanoparticles with uniaxial surface anisotropy. // *J. Appl. Phys.*, 1999, Vol. 85, №9, P.6642–6647.

Gazeau F., Shilov V.P., Bacri J.-C., Dubois E., Gendron F., Perzynski R., Raikher Yu.L., Stepanov V.I., Magnetic resonance of nanoparticles in a ferrofluid: Evidence of thermofluctuational effects. // *J. Magn. Magn. Mater.*, 1999, Vol. 202, P.535–546.

Shilov V.P., Bacri J.-C., Gazeau F., Gendron F., Perzynski R., Raikher Yu.L., Effect of unidirectional anisotropy on the ferromagnetic resonance in ferrite nanoparticles. // *Phys. Rev. B.*, 1999, Vol. 60, P.11902–11905.

Shilov V.P., Raikher Yu.L., Bacri J.-C., Gazeau F., Gendron F., Perzynski R., FMR in nanoparticles with a surface anisotropy. // Accepted for 8th European Magnetic Materials and Applications Conference (EMMA' 2000), Kyiv, Ukraine. June 7–10. 2000.

Цитируемая литература

1. Котов Е.П., Руденко М.И., *Носители магнитной записи*. Справочник. М.: Радио и связь. 1990. 384 с.
2. Néel L., Anisotropie magnétique superficielle et surstructures d'orientation. // *J. phys. rad.*, 1954, Vol.15, №4, P.225–239.
3. Néel L., Anisotropie magnétique superficielle et surstructures d'orientation. // *J. phys. rad.*, 1954, Vol.15, №4, P.225–239.
4. Aharoni A., Surface anisotropy in micromagnetics. // *J. Appl. Phys.*, 1987, Vol.61, №8, P.3302–3304.
5. Aharoni A., Nucleation in ferromagnetic sphere with surface anisotropy. // *J. Appl. Phys.*, 1988, Vol.64, №11, P.6434–6438.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. // *Phys. Zs. UdSSR*. 1935. Vol.8. P.153. Перевод: Ландау Л.Д., Собрание трудов, М.: Наука, 1969. Т.1. С.128–143.
7. Meiklejohn W. H., Bean C. P., New magnetic anisotropy. // *Phys. Rev.*, 1957, Vol.105, №1, P.904–913.

Подписано в печать 24.09.00

Формат 60x84 1/16. Печать офсетная. Усл. печ. л. 0,9. Тираж 100 экз. Заказ 480.

Отпечатано на ризографе ООО "Мегатрон Плюс" 614600, г.Пермь, ГСП, ул.Героев Хасана, 9а, корпус 2.