

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОРЯДКА В ГРАНУЛЯРНОЙ НАНОСТРУКТУРЕ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭСР - ЭКСПЕРИМЕНТА

Т. В. Багмут

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: bagmut@ire.kharkov.ua*

Представлена феноменологическая модель, описывающая явление ферромагнитного резонанса (ФМР) в гранулярной магнитной наноструктуре, на примере исследования магнитных свойств - аморфной двуокиси кремния с наночастицами кобальта $(\text{SiO}_2)_{100-x}\text{Co}_x/\text{GaAs}$ в широкой области концентраций кобальта ($x = 20, 30, 45, 49, 54, 63, 75$ и 85% Co). Показано, что в гранулярной наноструктуре могут формироваться магнитные кластеры, форма которых зависит от концентрации магнетика. Ил. 6. Библиогр.: 24 назв.

Ключевые слова: ферромагнитный резонанс, гранулярная магнитная наноструктура, магнитные кластеры.

Развитие нанотехнологий - одно из наиболее динамично развивающихся направлений современной науки. Успехи направления - это уменьшение размеров функциональных устройств микроэлектроники. В свою очередь, это повлекло за собой ряд технологических проблем. Среди них особый интерес представляют наноматериалы, сформированные на основе элементов группы железа. С появлением данных структур, так называемых композитных магнитных наноструктур, открываются широкие возможности для разработки и создания высокочувствительных датчиков магнитного поля и температуры, ячеек памяти, систем хранения данных, разработке сверхминиатюрных транзисторов, квантовых одноэлектронных логических структур и спининформационных систем для информатики, в которой ячейкой памяти служит спин электрона [1].

Ряд новых физических свойств, сильно отличающихся от обычных материалов, демонстрируют магнитные гранулярные структуры. Подобные структуры, состоящие из наноразмерных магнитных металлических частиц, размещенных в изолированной диэлектрической матрице, могут демонстрировать эффект гигантского магнитного сопротивления (ГМС) и гигантского магнитного импеданса (ГМИ) [2-4]. Эти явления могут найти широкие области применения в сверхвысокочастотной электронике, телекоммуникационных технологиях и др.

Метод электронного парамагнитного/ферромагнитного резонанса (ЭПР/ФМР), является наиболее эффективным для исследования магнитных наноструктур и весьма чувствителен к изменению магнитного порядка изучаемого объекта.

В данной работе проводится моделирование процессов электронного магниторезонансного поглощения в гранулярных магнитных наноструктурах. В качестве примера выбрана гетероструктура $(\text{SiO}_2)_{100-x}\text{Co}_x/\text{GaAs}$ [5]. Отметим, что

уже имеется ряд работ, посвященных решению задач о влиянии структурных параметров на резонансные свойства образца. В частности, ценная информация о магниторезонансном поглощении в гигагерцовом диапазоне частот была получена в экспериментах, описанных в работах [6-8]. Тем не менее, в моделировании процессов спинового электронного резонанса остается ряд неразрешенных задач. Данная работа является очередным шагом в изучении особенностей ЭПР в таких сложных средах, как магнитные гранулярные структуры.

1. Образец и методика эксперимента.

Исследуемая наноструктура $(\text{SiO}_2)_{100-x}\text{Co}_x/\text{GaAs}$ представляет собой пленку аморфной двуокиси кремния с внедренными наночастицами (гранулами) кобальта [5]. Пленка напылена методом ионно-лучевого распыления с композитной кобальт - кварцевой мишени на подложку GaAs, нагретую до 200°C . Форма каждой гранулы Co близка к сферической. Средний размер гранул изменялся от 2,7 нм до 3,5 нм в зависимости от концентрации Co [9-11].

Методом ФМР экспериментально были зарегистрированы зависимости значения резонансной частоты от резонансного магнитного поля (рис. 1,а). Измерения проводились нами в ИРЕ НАНУ по методике, описанной в работе [12] на радиоспектрометре «КВАРК» в диапазоне частот 25 – 27 ГГц при температуре $T = 300\text{K}$ (рис. 1).

На основе полученных экспериментальных частотно-полевых зависимостей линий ФМР рассчитана намагниченность насыщения образцов M_s для всех концентраций. При расчете M_s мы предполагаем, что исследуемый гранулярный образец имеет форму тонкой пластины с размагничивающими факторами $N^{(x)}=N^{(z)}=0$, $N^{(y)}=4\pi$.

Тогда для “параллельной геометрии”
 $\vec{H} \perp \vec{h} \perp \vec{n}$, (\vec{n} - нормаль к поверхности образца),

т. е. постоянное \vec{H} и переменное \vec{h} магнитные поля лежат в плоскости образца, резонансная частота V_{res} связана с резонансным полем H_{res} известной формулой Киттеля в частном виде.

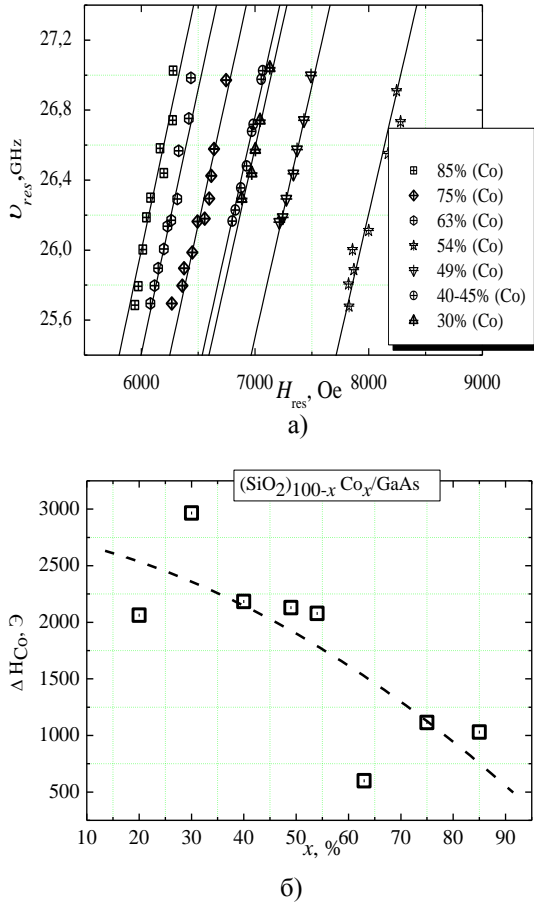


Рис. 1. Результаты эксперимента ФМР в магнитной наноструктуре $(SiO_2)_{100-x}Co_x/GaAs$ ($x=20, 30, 45, 49, 54, 63, 75$ и 85 ат.% Co): а) Резонансные частотно-полевые характеристики; б) Концентрационная зависимость полуширины ΔH ФМР линии

Подставляя значения резонансной частоты V_{res} и резонансного поля H_{res} , полученные экспериментально, в формулу (1) [13], рассчитываем намагниченность насыщения образца M_s .

$$V_{res} = \frac{g\mu_B}{h} \sqrt{H_{res}(H_{res} + 4\pi M_s)}, \quad (1)$$

где g - фактор спектроскопического расщепления; h - постоянная Планка; μ_B - магнетон Бора; H_{res} - резонансное значение постоянного магнитного поля.

Обнаружено, что в данной структуре намагниченность насыщения растет с ростом концентрации магнитных гранул (рис. 1, а), достигая примерно значения M_s для объемного материала, формирующего наногранулы ($x \rightarrow 100\%$). Заме-

тим, что такой рост ФМР данных намагниченности насыщения обнаружен во многих подобных наноструктурах [14]. Истолкование такой концентрационной зависимости в рамках известных классических представлений о кристаллических и поликристаллических магнетиках является проблематичным.

Кроме того, нами обнаружено, что форма экспериментально зарегистрированной ФМР линии наиболее точно может быть описана логнормальной зависимостью. Причем эта форма изменяется с изменением концентрации кобальта x . Такая форма линии кажется на первый взгляд неожиданной, поскольку для типичного металлического ферромагнетика, каковым является Co, ожидается классическая линия формы Лоренца.

Еще одним нетривиальным фактом является то, что ширина ФМР линии зависит от x . Линия сужается с ростом концентрации (рис. 1, б). Только лишь при $x \rightarrow 100\%$ ширина линии ΔH приближается к величине, соответствующей объемному образцу кобальта $\Delta H_{Co} \sim 200$ Э [15].

Полученные, таким образом, экспериментальные данные для магнитной наноструктуры трудно описать с помощью традиционных представлений о магнитных материалах. Очевидно, что для поиска новых моделей необходимо учитывать особенности гранулярных наноструктур.

2. Магнитные кластеры в наноструктуре. Отметим, что экспериментальные результаты, такие как форма ФМР линии, резонансные частотно-полевые зависимости, полученные в данной работе, достаточно хорошо совпадают с нашими предыдущими данными, полученными для подобных наноструктур [14]. Кроме этого результаты хорошо коррелируют с результатами других авторов, приведенными в работах [6-8], где представлены попытки модельного описания магнитного порядка в наноструктурах.

Например, в работе [6] была исследована аналогичная наноструктура - мультислойная пленка Co/Cu. Показано, что шероховатость границы между слоями оказывает существенное влияние на формирование интегральных параметров магнитных слоев, определяющих внутреннее эффективное поле. Предложенный метод дал возможность количественно определять все параметры, характеризующие процессы однородного и неоднородного уширения линии ФМР в исследуемой системе. Однако он недостаточно эффективен из-за того, что некоторые факторы, характеризующие величину резонансного поля (например, традиционно используемые в описании спектров поля анизотропии), сильно зависят от кристаллического совершенства магнитных слоев и границ их раздела [6].

Важный цикл работ по изучению магнитного порядка в гранулярных структурах на основе кобальта был проведен авторами в работах [7, 16, 17]. В работе [16] промоделировано ФМР поглощение с учетом формы структурных гранул в тонкой пленке. Модель достаточно хорошо описывает область относительно низких частот 9,4 ГГц. Авторы предполагают, что в магнитной системе образца сформированы магнитные кластеры, совпадающие по форме со структурными гранулами. При этом структурные гранулы имеют формы близкие к сфере и вытянутому цилиндру.

В работе [8] были исследованы микроволновые свойства ансамбля однодоменных наночастиц перовскита $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ и представлена модель, которая позволила адекватно описать магниторезонансные свойства системы в широком диапазоне температур. Моделирование магнитной динамики системы основано на известных уравнениях Ландау-Лифшица с учетом произвольного распределения направления осей магнитной анизотропии и размагничивающего поля частицы. Однако такая модель, предложенная для кристаллографической структуры, вряд ли может быть успешно применена к описанию исследуемой нами магнитной наноструктуры, состоящей из аморфных наночастиц кобальта.

Предложенная ниже феноменологическая модель является еще одним шагом в описании сложных магнитных объектов нанопизики.

Модель магнитных кластеров в наноструктуре. Принимая во внимание работы [5, 18], где авторы показали, что гранулы могут объединяться в магнитные конгломераты, предположим, что структурные гранулы в магнитной наноструктуре объединяются в магнитные кластеры, как это показано на рис. 2.

Как видно из рис. 2, границы таких предполагаемых магнитных кластеров совпадают с наружными границами сферических структурных гранул Co.

Это дает нам основание рассматривать образец как композитную магнитную наноструктуру, состоящую из магнитных кластеров, форма которых не совпадает с формой структурных гранул магнетика Co.

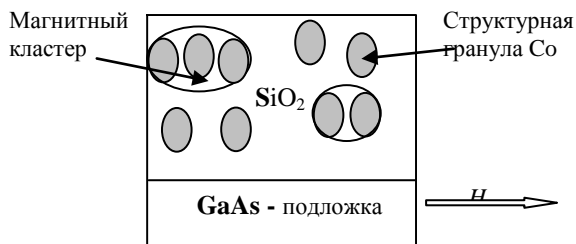


Рис. 2. Образец магнитной гранулярной наноструктуры $(\text{SiO}_2)_{100-x}\text{Co}_x/\text{GaAs}$

Кластеры вытянуты в направлении приложенного постоянного магнитного поля. Такая конфигурация магнитных кластеров представляется наиболее реальной, учитывая технологию приготовления образцов и вид взаимодействия между гранулами [5].

Известно [19], что для частиц произвольной формы и достаточно малого размера обменные силы могут обеспечивать однородную намагниченность этих частиц, а сами частицы могут быть аппроксимированы как эллипсоиды вращения. В исследуемом образце гранулы Co находятся в однодоменном ферромагнитном состоянии. Поэтому есть все предпосылки для применения такой кластерной модели к исследуемой наноструктуре.

Действительно, такое предположение обосновано, поскольку магнитное взаимодействие между гранулами является преимущественно диполь - дипольным, а тогда, сила взаимодействия в направлении приложенного внешнего магнитного поля оказывается в два-четыре раза больше, чем в ортогональном направлении [20]. Форму таких магнитных кластеров в первом приближении будем аппроксимировать эллипсоидами, так как это сделано в классической работе [21].

Моделирование линии ферромагнитного резонанса будем проводить на примере анализа магниторезонансного отклика, зарегистрированного при $\nu_{res}^* = 25,695$ ГГц и $H_{res}^* = 6217$ Э от образца магнитной гранулярной наноструктуры $(\text{SiO}_2)_{100-x}\text{Co}_x/\text{GaAs}$, где $x = 85\%$.

Расчет размагничивающих факторов магнитного кластера. Необходимо отметить, что расчет намагниченности насыщения по формуле (1) является полностью корректным только для образца, имеющего форму бесконечно тонкой пластины. Учитывая, что образец предположительно состоит из магнитных кластеров, меняющих форму от сферического до бесконечного цилиндра, вытянутого вдоль приложенного магнитного поля, необходимо учесть влияние границ такого кластера. Учет границ будем проводить, используя понятие размагничивающих факторов $(N^{(x)}, N^{(y)}, N^{(z)})$, введенных Ландау - Лифшицем в работах [13, 21, 22]. Эти размагничивающие факторы получены в ходе решения задачи о нахождении потенциала поля в окрестности эллипсоида и имеют вид

$$N^{(x)} = \frac{abc}{2} \int_0^\infty \frac{ds}{(s+a^2)R_s}, \quad (2)$$

$$N^{(y)} = \frac{abc}{2} \int_0^\infty \frac{ds}{(s+b^2)R_s}, \quad (3)$$

$$N^{(z)} = \frac{abc}{2} \int_0^\infty \frac{ds}{(s+c^2)R_s}, \quad (4)$$

где $R_s = \sqrt{(s+a^2)(s+b^2)(s+c^2)}$; s - постоянная интегрирования; a, b, c - оси эллипсоида.

Полученные равенства (2-4) подставляем в известную формулу Киттеля [13] (которая является решением уравнения движения магнитных моментов в образце) в общем виде

$$v_{res} = \frac{g\mu_B}{h} \times \left[\left(N^{(x)} - N^{(z)} \right) M_s + H_{res} \left[H_{res} + \left(N^{(y)} - N^{(z)} \right) M_s \right] \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Эта формула дает возможность рассчитать влияние формы исследуемого образца на величину резонансного поля.

Нахождение преимущественной формы магнитных кластеров. На основе формулы (5) построим функцию, определяющую резонансное поле (H_{res}) для магнитных кластеров, формирующих исследуемый образец в зависимости от их формы. Учтем, что магнитные кластеры имеют наиболее вероятную форму, близкую к эллипсоиду вращения ($a=b$) с главной осью (c), направленной вдоль внешнего поля H . На рис. 3 представлена функция $H_{res}=f(c/a)$, рассчитанная по формуле (5).

Видно, что экспериментальному значению резонансного поля $H_{res}^* = 5926$ Э соответствует соотношение осей $(c/a)^* = 3,3/1$. Это означает, что данный образец состоит в основном из магнитных кластеров, которые имеют форму эллипсоидов, вытянутых вдоль приложенного магнитного поля, с соотношением осей $(c/a)^* = 3,3/1$ при $a = b = 1$.

3. Моделирование интегральной ФМР линии. Анализ экспериментальных данных. Интегральная линия ФМР является суперпозицией ФМР линий всех магнитных кластеров в образце.

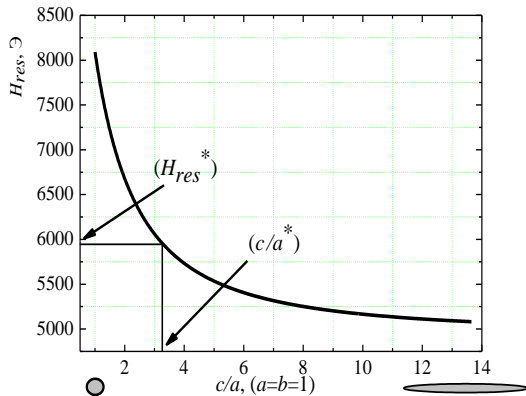


Рис. 3. Зависимость резонансного H_{res} поля для $v_{res} = 25,695$ ГГц от соотношения осей эллипсоида c/a при $a=b=1$

Положим, что распределение магнитных кластеров по форме, т. е. по соотношению осей эллипсоида, описывается логнормальным законом (6)

$$P(c_i/a) = \frac{L}{\Delta P(c_i/a)} \exp \left\{ - \frac{\ln \left(\frac{c_i/a}{m} \right)^2}{2\Delta P^2} \right\}, \quad (6)$$

где ΔP - ширина функции логнормального распределения на половине высоты; c_i/a - соотношение осей эллипсоида i -го магнитного кластера ($i = 1 \dots Q$, где Q обычно выбираем ≈ 1000); m - преимущественное соотношение осей эллипсоида c/a ; L - нормировочная константа. Значение (m) находим из эксперимента по алгоритму, описанному в разделе 2.

Действительно, логнормальное распределение наиболее часто используется для описания систем, где частицы формируются или разбиваются на мелкие гранулы в соответствии с некоторыми геометрическими параметрами частиц, такими как объем или площадь поверхности [18, 23]. Именно к таким системам относятся исследуемые магнитные наноструктуры.

Промоделируем экспериментально полученную форму ФМР линии, задавая некое, вполне определенное логнормальное распределение магнитных кластеров по соотношению осей эллипсоидов (c/a). Каждый кластер рассматриваем как массивный образец Со с ферромагнитным порядком. Учтем, что, как известно, форма ФМР линии массивного образца кобальта хорошо описывается функцией Лоренца $I_i(H)$ (рис. 4 (7))

$$I_i(H) = \frac{1}{1 + \left(\frac{H - H_{(res)_i}}{\Delta H_{Co}} \right)^2}, \quad (7)$$

где $H_{(res)_i}$ - резонансное значение магнитного поля i -го магнитного кластера; ΔH_{Co} - ширина ФМР линии массивного кобальта на половине ее высоты (обычно $\Delta H_{Co} = 200$ Э [15]).

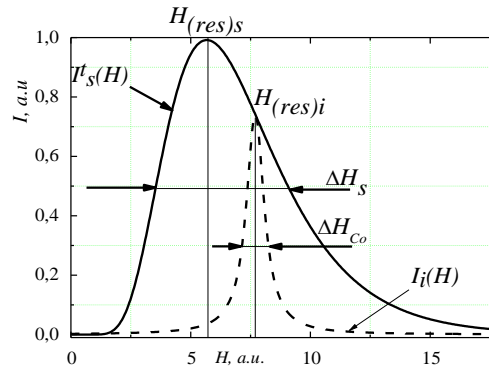


Рис. 4. Расчетная интегральная ФМР - линия $I'_s(H)$: $H_{(res)_s}$ - значение резонансного магнитного поля интегральной линии; ΔH_s - ширина интегральной линии на половине ее высоты; $I_i(H)$ - ФМР линия i -го магнитного кластера

На рис. 4 приведены результаты моделирования. Расчетная интегральная ФМР - линия $I'_s(H)$ (8) исследуемого образца представлена сплошной линией. Пунктирная линия на этом же рисунке описывает ФМР линию i -го магнитного кластера.

Таким образом, полученная функция (8) позволяет нам моделировать экспериментальные ФМР линии гранулярной наноструктуры и на основе полученных данных определять форму магнитных кластеров. На рис. 5 приведена типичная экспериментальная линия магнитного резонанса $I^e(H)$ (сплошная линия) для образца $(\text{SiO}_2)_{100-x}\text{Co}_x/\text{GaAs}$ с $x = 85\%$. Здесь же представлен результат феноменологического моделирования интегральной линии $I'(H)$ (пунктирная линия), построенной на основании формулы (8) для конкретных значений внешних параметров эксперимента. Видно, что расчетная линия достаточно хорошо воспроизводит экспериментальную зависимость качественно и количественно.

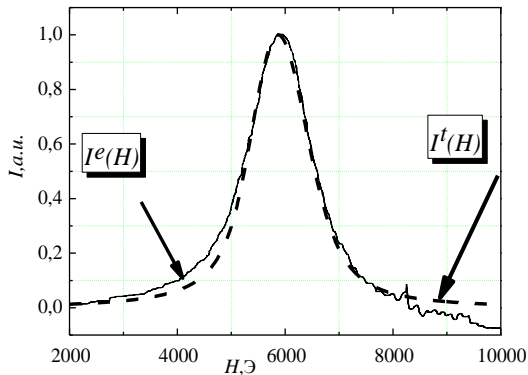


Рис. 5. Экспериментальная $I^e(H)$ и расчетная $I'(H)$ линии спектра ФМР для образца $(\text{SiO}_2)_{100-x}\text{Co}_x/\text{GaAs}$ при $x = 85\%$; $V_{\text{res}} = 25,695$ ГГц; $H_{\text{res}} = 5926$ Э, $T = 300$ К

Вероятность распределения магнитных кластеров по соотношению осей (c/a) для $x = 85\%$ полученная в ходе моделирования приведена на рис. 6. Здесь же приведены такие же распределения для концентраций $x = 49\%$ и $x = 20\%$. Видно, что с понижением концентрации преимущественная форма магнитных кластеров приближается к сферической. Этот факт хорошо коррелирует с современными представлениями о магнитных средах и свидетельствует о разупорядочении магнитной системы образца с понижением концентрации Со. Действительно, при самых малых концентрациях расстояние между гранулами возрастает настолько, что объединение в кластеры становится энергетически выгодным. В результате наноструктура переходит в состояние разупо-

рядоченного магнетика, а именно в суперпарамагнитное состояние [14].

Отметим, что во время проведения цикла экспериментов по моделированию формы ФМР линии гранулярной наноструктуры $(\text{SiO}_2)_{100-x}\text{Co}_x/\text{GaAs}$ при разных значениях частоты, а также при разных концентрациях ($x = 20, 30, 45, 49, 54, 63, 75$ и 85% Со) ошибка полученных экспериментальных данных не превышает, как правило 5 - 7%. При этом соотношение шум/сигнал в эксперименте не превышало 10%.

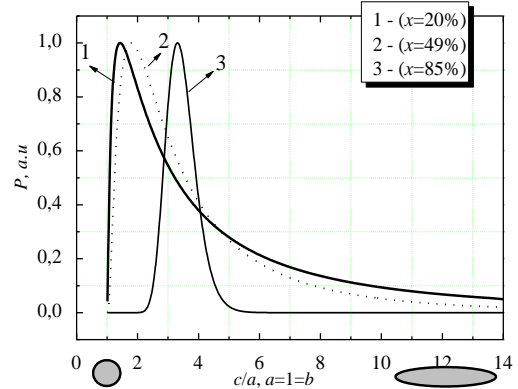


Рис. 6. Плотность распределения магнитных кластеров по форме для образца $(\text{SiO}_2)_{100-x}\text{Co}_x/\text{GaAs}$ для различных концентраций Со

Данная модель применена нами также к ряду других магнитных наноструктур, таких как $\text{Co}_x(\text{TiO}_2)_{1-x}$ [14], $\text{Co}_x(\text{NbLiO}_3)_{1-x}$ [24], а также для $(\text{SiO}_2)_{100-x}\text{Co}_x/\text{GaAs}$. В упомянутых работах продемонстрировано, что разработанная модель достаточно хорошо описывает эксперимент, обеспечивая точность не хуже 10%. Поэтому несмотря на то, что в разработанной модели не доказана единственность предположения об избранном нами способе формирования магнитного порядка, эта модель может найти свое место в работах по изучению типов магнитного порядка в сложных наноконструктах, демонстрирующих различные типы конкурирующих магнитных взаимодействий.

Выводы. Таким образом, в работе предложена феноменологическая модель, описывающая явление ферромагнитного резонанса в магнитных наноструктурах, например в $(\text{SiO}_2)_{100-x}\text{Co}_x/\text{GaAs}$.

Обосновано представление о формировании магнитных кластеров в гранулярной наноструктуре.

Показано, что магнитные кластеры могут быть аппроксимированы эллипсоидами вращения, форма которых зависит от концентрации магнетика. При этом, чем ниже магнитный порядок в наноструктуре, тем больше форма кластеров приближается к сферической.

Автор выражает благодарность за предоставленные образцы $(\text{SiO}_2)_{100-x}\text{Co}_x/\text{GaAs}$, $\text{Co}_x(\text{TiO}_2)_{1-x}$, $\text{Co}_x(\text{NbLiO}_3)_{1-x}$, Луцеву Л. В., Грановскому А. Б., Вызулину С. А., а также Ходзицкому М. К., Недуху С. В. за помощь в проведении экспериментов.

1. Золотухин И. В., Калинин Ю. К., Ситников А. В. Нанокристаллические структуры на пути в наноэлектронику // Природа. - 2006. - №1. - С.11-19.
2. Baibich M. N., Broto J. M., Fert A. et al. Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices // Phys. Rev. Lett. - 1988. - 61, N21. - P.2472-2475.
3. Быков И. В., Гальшина Е. А., Грановский А. Б., Гуцин В. С. Магниторефрактивный эффект в гранулированных пленках с туннельным магнитосопротивлением // Физика твердого тела. - 2000. - 42, №3. - С.487-491.
4. Levy P. M. Giant magnetoresistance in magnetic layered and granular materials // Chapter in SOLID STATE PHYSICS, edited by H. Ehrenreich and D. Tumbull, Cambridge MA: Academic Press. - 1994. - 47. - P.367-462.
5. Луцев Л. В., Стогней А. И., Новицкий Н. Н. Гигантское инжекционное магнитосопротивление в гетероструктурах арсенид галлия/гранулированная пленка с наноразмерными включениями кобальта // Письма в Журн. эксперим. и техн. физики. - 2005. - 81, N10. - С.636-641.
6. Каплиенко А. И., Николова Э. П., Кутько К. В. и др. Магнитный резонанс и осцилляции магнитной анизотропии в сверхрешетках Co/Cu (111) // Физика низких температур. - 2005. - 31, №3/4. - С.471-478.
7. Kakazei G. N., Pogorelov Yu. G., Lopes A M L. et al. Tunnel magnetoresistance and magnetic ordering in ion-beam sputtered $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}_2\text{O}_3$ discontinuous multilayers // Journal of Applied Physics. - 2001. - 90, N8. - P.4044-4048.
8. Криворучко В. Н., Марченко А. И., Прохоров А. А. Суперпарамагнитный резонанс однодоменных наночастиц LaSrMnO_3 // Физика низких температур. - 2007. - 33, №5. - С.578-585.
9. Yakushiji K., Mitani S., Takanashi K. et al. // J Magn. Magn. Mater. - 2000. - 212, N75. - P.243-246.
10. Barzilai S., Goldstein Y., Balberg I. et al. // Phys. Rev. - 1981. - B23, N1809. - P.389-395.
11. Sankar S., Dender D., Borchers J. A. et al. // J. Magn. Magn. Mater. - 2000. - 221, N1.
12. Деркач В. Н., Недух С. В., Равлик А. Г. и др. Нерезонансное поглощение высокочастотного электромагнитного излучения в сверхрешетках Cu/Co // Радиофизика и электроника - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 2002. - 7, №1. - С.115-118.
13. Боровик Е. С., Мильнер А. С., Еременко В. В. Лекции по магнетизму // Под ред. Л. Ф. Кизилова. - Харьков: Изд-во Харьков. Гос. ун-та. - 1972. - С.111-114.
14. Bagmut T. V., Nedukh S. V., Roschenko S. T. et al. Granule size and shape influence on static and dynamic properties of magnetic nanocomposites // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. - 2006. - 302. - P.334-339.
15. Луцев Л. В. Спиновые возбуждения в гранулированных структурах с ферромагнитными наночастицами // Физика твердого тела. - 2002. - 44, №1. - С.97-105.
16. Kakazei G. N., Kravets A. F., Lesnik N. A. et al. Ferromagnetic resonance in granular thin films // Journal of Applied Physics. - 1999. - 85, N8. - P.5654-5656.
17. Kakazei G. N., Pogorelova Yu. G., Costa M. D. et al. Interlayer dipolar interactions in multilayered granular films // Journal of Applied Physics. - 2005. - 97. - P.10A723-1- 10A723-3.
18. Lutsev L. V., Kopytin M. N., Sitnikov A. V. and Stognei O. V. Properties of Nanogranular Metal-Dielectric Composites in Strong Electric Fields and Cluster Electronic States // Physics of the Solid State. - 2005. - 47, N11. - P.2169-2179.
19. Вансовский С. В. Магнетизм. - М.: Наука, 1971. - 1030 с.
20. Стогней О. В., Ситников А. В., Калинин Ю. Е. и др. Изотропное положительное магнитосопротивление наногранулированных композиционных материалов $\text{Co-Al}_2\text{O}_3$ // Физика твердого тела. - 2007. - 49, №1. - С.158-164.
21. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред - М.: Наука, 1982. - 8. - С.37-44.
22. Киттель Ч. Ферромагнитный резонанс // М.: Изд-во иностр. лит. 1962. - 46. - 489. с.
23. Eckhard Limpert, Werner A. Stahel, and Markus Abbt. Log-normal distributions across the sciences: Keys and Clues // BioScience. - 2001. - 51, N5. - P.341-352.
24. Багмут Т. В. Магниторезонансная миллиметровая спектроскопия гранулированных наноструктур $\text{Co}_x(\text{NbLiO}_3)_{1-x}$ // Пятая Харьков. конфер. молодых ученых «Радиофизика и СВЧ электроника» Харьков. - 2005. - С.55.

PHENOMENOLOGICAL MODELLING OF MAGNETIC ORDER IN GRANULAR NANOSTRUCTURE ON THE BASIS OF RESULTS OF ESR – EXPERIMENT

T. V. Bagmut

The phenomenological model describing the phenomenon of ferromagnetic resonance (FMR) in granular magnetic nanostructure is submitted. The model is verified on the example of study of magnetic properties of nanostructure amorphous dioxide of silicon with nanoparticles cobalt $(\text{SiO}_2)_{100-x}\text{Co}_x/\text{GaAs}$ in the wide area of Co - concentration ($x = 20, 30, 45, 49, 54, 63, 75$ and 85% Co). It is shown, that magnetic clusters having the shape depended on the Co - concentration can be formed in granular nanostructure.

Key words: ferromagnetic resonance, granular magnetic nanostructure, magnetic clusters.

ФЕНОМЕНОЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МАГНІТНОГО ПОРЯДКУ В ГРАНУЛЯРНІЙ НАНОСТРУКТУРІ НА ОСНОВІ РЕЗУЛЬТАТІВ ЄСР – ЕКСПЕРИМЕНТУ

Т. В. Багмут

Подана феноменологічна модель, яка описує явище феромагнітного резонансу (ФМР) в гранулярній магнітній наноструктурі, на прикладі дослідження магнітних властивостей – аморфної двоокиси кремнію з наночастками кобальту $(\text{SiO}_2)_{100-x}\text{Co}_x/\text{GaAs}$ в широкій області концентрацій кобальту ($x = 20, 30, 45, 49, 54, 63, 75$ і 85% Co). Показано, що в гранулярній наноструктурі можуть формуватися магнітні кластери, форма яких залежить від концентрації магнетика.

Ключові слова: феромагнітний резонанс, гранулярна магнітна наноструктура, магнітні кластери.

Рукопись поступила 2 октября 2007 г.