

КОРРЕЛЯЦИИ НАМАГНИЧЕННОСТИ В ГРАНУЛИРОВАННЫХ НАНОКОМПОЗИТАХ НА ОСНОВЕ Co С АМОРФНОЙ И КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦАМИ

Е.А. Денисова^{1,2}, С.В. Комогорцев¹, Р.С. Исхаков¹, Л.А. Чеканова¹, Р.Н. Ярославцев²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики им. Л.В.Киренского Сибирского отделения Российской академии наук,
Академгородок 50, стр.38, Красноярск, Российская Федерация

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Сибирский федеральный университет»

E-mail: len-den@iph.krasn.ru

MAGNETIZATION INTENSITY CORRELATIONS IN GRANULAR Co-BASED NANOCOMPOSITES WITH AMORPHOUS AND CRYSTALLINE MATRICES

E.A. Denisova^{1,2}, S.V. Komogortsev¹, R.S. Iskhakov¹, L.A. Chekanova¹, R.N. Yaroslavtsev²

¹ L.V. Kirensky Institute of Physics SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

Проведено сравнительное исследование особенностей магнитной микроструктуры и магнитных свойств гранулированных композитов Co-SiO₂ и Co-CaF₂ с концентрацией магнитной фазы от 30 до 80%. Поле локальной магнитной анизотропии и размер области ее однородной ориентации, а также размерность упаковки обменно-связанных ферромагнитных наночастиц и характеристики стохастического магнитного домена, были определены из кривых приближения намагниченности к насыщению. Методом спин-волновой спектроскопии установлено, что в исследуемых типах наногранулированных пленок доминируют флуктуации параметра обмена.

The comparative study of features of magnetic microstructure and magnetic properties for granular composites Co-SiO₂ and Co-CaF₂ with magnetic phase concentration from 30 to 80% has been carried out. The local magnetic anisotropy field and the size of its' homogeneous orientation area, as well as package dimensionality of exchange-bounded ferromagnetic nanoparticles and characteristics of stochastic magnetic domain, have been determined from curves of approximation of magnetization intensity to saturation. It has been established via spin-wave spectroscopy method that the exchange parameter fluctuations dominate in the nanogranulated films' types under investigation.

Для развития радиоэлектроники, вычислительной техники, беспроводных сетей, увеличения скорости передачи данных необходим поиск и создание новых магнитных материалов. Материалы для высокочастотных устройств микроэлектроники должны удовлетворять следующим требованиям: большое значение поля магнитной анизотропии, высокое значение намагниченности насыщения, узкие линии ФМР [1]. Интересным классом материалов, удовлетворяющим таким требованиям, являются гранулированные магнитные пленки [1–3]. Пленки с гранулами из магнитомягкого металла в диэлектрической и немагнитной матрице вызывают интерес для высокочастотной электроники в связи с сочетанием высокого удельного электросопротивления и высокой магнитной проницаемости [4,5]. Свойства гранулированных сред зависят от объемной доли магнитных гранул и объясняются в рамках теории протекания. Взаимодействие магнитных наночастиц (размером ~10 нм) в немагнитной матрице во многом определяет различные физические свойства этих материалов. В частности, это взаимодействие формирует микромагнитную структуру данных материалов, вид и характеристики которой определяют многочисленные особенности магнитных свойств данных наноструктур. В данной работе мы исследовали влияние

структурного состояния матрицы гранулированных композитов на формирование магнитной микроструктуры, в частности изменение размера области магнитных корреляций (стохастических доменов состоящих из магнитных наночастиц) в наногранулированных пленках $\text{Co}_x(\text{SiO}_2)_{1-x}$ и $\text{Co}_x(\text{CaF}_2)_{1-x}$. Для этого исследовались магнитные свойства и характеристики микромагнитной структуры двухфазных нанокомпозитов $\text{Co}_x(\text{SiO}_2)_{1-x}$ и $\text{Co}_x(\text{CaF}_2)_{1-x}$ в широкой области концентраций ферромагнитной фазы.

Пленки исследуемых нанокомпозитов Co-SiO_2 и Co-CaF_2 представляют собой сложную систему, состоящую из наногранул кобальта, расположенных случайным образом в матрице SiO_2 или CaF_2 , с содержанием металлического (магнитного) компонента 30 -70 об.%. Нанокомпозиты $\text{Co}_x(\text{SiO}_2)_{1-x}$ и $\text{Co}_x(\text{CaF}_2)_{1-x}$ были получены методом ионно-лучевого распыления. Согласно данным электронной микроскопии и ядерного магнитного резонанса гранулы Co в пленках $\text{Co}_x(\text{SiO}_2)_{1-x}$ и $\text{Co}_x(\text{CaF}_2)_{1-x}$ характеризуются ГПУ типом ближайшего окружения для всех исследуемых концентраций металлической фазы.

Исследование спектров ФМР в пленках, полученных в различных геометриях эксперимента, выявило характерную концентрацию перехода $X \sim 36\%$ от состояния изотропного композита к ферромагнитной пленке. Обнаружено, что в перпендикулярной геометрии СВЧ-спектр Co-SiO_2 и Co-CaF_2 композитов представлен несколькими линиями поглощения (как в многофазных магнетиках). Часть этих спектров могут интерпретироваться как следствие неоднородности пространственной конфигурации ферромагнитных зерен. Но некоторые из них в полной мере могут быть описаны как спектр спин-волнового резонанса (на это указывают соотношения интенсивностей, полевые координаты, пик поверхностного закрепления магнитных моментов). По типу модификации закона дисперсии спиновых волн [6] установлено, что в гранулированных пленках Co-SiO_2 и Co-CaF_2 доминируют флуктуации параметра обмена. Установлено, что наименьшей шириной линии ФМР характеризуются композиты с кристаллической матрицей.

При интерпретации данных по приближению намагниченности к насыщению использовались методики для наноструктурированных магнетиков [7]. Для объяснения зависимостей магнитных характеристик композиционных материалов на основе сплавов кобальта от взаимодействия нанозерен в этих материалах использована модель случайной магнитной анизотропии. В этом случае магнитная система ферромагнетика описывается на основе следующих параметров: константа обменного взаимодействия A , намагниченность насыщения M_s , энергия локальной магнитной анизотропии локализованной в области размером $2R_c$ и размерности упаковки зерен d . Также оказалось, что магнитная микроструктура аморфных и нанокристаллических магнитомягких сплавов, помимо классических элементов (домен, доменная стенка), характеризуется новой масштабной единицей – стохастическим магнитным доменом или областью длины магнитной ориентационной корреляции. Макроскопические магнитные характеристики наноманетиков, в том числе и характеристики важные для приложений, во многом обусловлены размером R_L и анизотропией $\langle K \rangle_L$ этих доменов. Размер стохастического домена R_L и величина эффективной анизотропии в этом элементе, величина элемента наноструктуры и ее локальная анизотропия, а также размерность обменно-связанных ферромагнитных наночастиц, были определены из кривых приближения намагниченности к насыщению.

Исследование кривых приближения намагниченности к насыщению показало, что при подходе концентрации x к точке магнитной перколяции x_c в этой системе образуются кластеры магнитной фазы с дробной размерностью. Кривые намагничивания в области больших полей (в полях больше $3 \div 6$ кЭ) для всех величин x исследуемых нанокомпозитов $\text{Co}_x(\text{CaF}_2)_{1-x}$ и $\text{Co}_x(\text{SiO}_2)_{1-x}$ хорошо следуют известному закону Акулова ($\Delta M \sim H^2$), а в меньших полях испытывают кроссовер ($\Delta M \sim H^\alpha$) - наблюдается смена степенных зависимостей при приближении к насыщению от $M \sim H^{-2}$ к $M \sim H^{-(4-d)/2}$. Такая смена зависимости $M(H)$ связана с возникновением и распространением в спиновой системе обменно-коррелированных отклонений намагниченности. Установлено, что величина среднеквадратичной флуктуации поля локальной магнитной анизотропии H_a уменьшается с увеличением концентрации металлической фазы для всех типов матриц рис.1. Следует отметить, что значения H_a в случае композитов с аморфной матрицей больше аналогичных значений для кристаллической матрицы. По особенностям кривых намагничивания до насыщения ферромагнитная область может быть разбита еще на три подобласти, отличающиеся размерностью упаковки ФМ зерен. А именно: магнитная микроструктура формируется зернами, упакованными трехмерным

образом при концентрации металлической фазы $x > 0,6$ (что обуславливает функциональную зависимость $\Delta M \sim H^{1/2}$); в области концентраций $0,39 \leq x \leq 0,6$ – двумерная упаковка ФМ гранул ($\Delta M \sim H^1$); при $0,33 \leq x \leq 0,38$ – этой системе образуются кластеры магнитной фазы с дробной размерностью. В зависимости от концентрации металла фрактальная размерность в этой области меняется от $1,2 \leq d \leq 1,9$. В случае нанокomпозитов с кристаллическим диэлектриком Co-CaF₂ область образования фрактальной микроструктуры сдвинута в сторону больших концентраций металлической фазы.

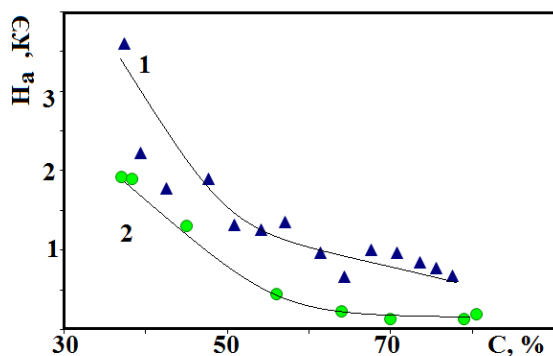


Рис.1 - Концентрационная зависимость поля локальной анизотропии для гранулированных пленок $\text{Co}_x(\text{SiO}_2)_{1-x}$ (1) и $\text{Co}_x(\text{CaF}_2)_{1-x}$ (2)

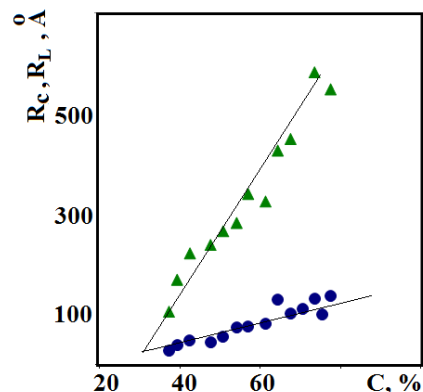


Рис.2 - Зависимости величины корреляционного радиуса случайной анизотропии R_c и размера стохастического домена R_L для пленок $\text{Co}_x(\text{SiO}_2)_{1-x}$

Величина поля, при котором происходит смена степенных зависимостей $H_{ex} = 2A/MR_c^2$, позволяет оценить величины корреляционного радиуса случайной анизотропии R_c и размер стохастического домена R_L (рис.2.) Условная экстраполяция этих зависимостей позволяет дать оценку порога протекания в котором $d = 0$, $R_L = R_c$. Критическая концентрация ферромагнитной фазы, определяемая таким образом, равна $x_c = 0,32$. Аналогичная оценка может быть получена из концентрационной зависимости константы обменного взаимодействия $A(x)$, где x_c разделяет фазовую плоскость на область, где отсутствует межчастичный обмен и ферромагнитную область с эффективным обменом: $x_c = 0,3$. Таким образом, из кривых $A(x)$, R_L , R_c , H_a получаем оценку на критическую концентрацию ферромагнитной фазы в нанокomпозите Co-SiO₂, ниже которой спиновая система может быть представлена как суперпарамагнитная: $x_c = 0,31 \pm 0,02$.

Таким образом, установлено, что наногранулированные композиционные пленки с кристаллической матрицей характеризуются минимальными значениями поля локальной анизотропии, анизотропии стохастического магнитного домена, ширины линии ферромагнитного резонанса.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ – ККФН р-сибирь-а проект № 15-42-04171, гранта РФФИ 16-03-00256

Список использованных источников:

1. Yao D., Ge S., Zhou X. // Physica B . 2010.V. 405.P.1321
2. Ikeda K., Kobayashi K., Ohta K., Kondo R., Suzuki T., Fujimoto M. // IEEE TRANS. MAGN. 2003. V. 39. P.3057
3. Yildiz F., Kazan S., Aktas B., Tarapov S.I., Tagirov L., Granovsky B. // JMMM.2006. V. 305.P. 24–27;
4. Zhan Y.D. et al. // IEEE Trans. Magn. 2001. Vol. 37. № 4. P. 2275.
5. Coonley K.D. et al. // IEEE Trans. Magn. 2000. Vol. 36. № 5 I. P. 3463.
6. Исхаков Р.С., Бруштунов М.М., Нармонеv А.Г., Турпанов И.А., Чеканова Л.А. // ФММ. 1995. Т. 79, № 5. С. 122- 135.
7. R.S. Iskhakov, S.V. Komogortsev // Phys. Met. Metall. 2011. Т.112.-С.666–681.