

УДК 538.9

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ ОСЕЙ СЛУЧАЙНОЙ АНИЗОТРОПИИ
ДВУМЕРНОЙ СИСТЕМЫ ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ

Назаренко Е.С., Данилюк А.Л.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Республика Беларусь, katyanaz2001@gmail.com

Аннотация: В данной работе представлены результаты моделирования корреляционных функций осей случайной анизотропии для двумерной системы ферромагнитных наночастиц. Расчеты проведены с помощью интегрального преобразования Мейера, описывающего закон приближения к намагниченности насыщения ансамбля ферромагнитных наночастиц. Рассмотрен пример в виде аналитической функции-образа, на основании которой получены корреляционные функции различных типов, как монотонные и немонотонные, так и характеризующиеся наличием скачков.

Ключевые слова: случайная анизотропия, массив наночастиц, корреляционная функция, преобразование Мейера.

Массивы ферромагнитных наночастиц на поверхности твердых тел (металлов, диэлектриков), а также двумерных кристаллов, в частности, графена, вызывают большой интерес у исследователей. Синтез и исследование таких магнитных композитов является весьма актуальной задачей для разработки приборов спинтроники. Такие композиты могут успешно синтезироваться посредством осаждения на поверхность твердого тела наночастиц различных ферромагнитных металлов (Co, Ni и др.) [1]. Из экспериментальных данных по измерению намагниченности $M(H)$ двумерных массивов ферромагнитных наночастиц определяется функция-образ $F(p) = kp^{3/2}\delta M(p)/M_S$. Здесь k – нормировочный коэффициент, параметр $p = (H/H_{ex})^{1/2}$, M_S – намагниченность насыщения, H_{ex} – поле обменной энергии. Фитирование показало, что экспериментальные данные укладываются на аналитические зависимости, описываемые спадающими монотонными функциями [2].

Для анализа результатов магнитных измерений таких магнитных композитов и их интерпретации обычно используется модель случайной анизотропии (RAM). Однако она ограничена из-за лежащими в ее основе приближениями, такими как выбор корреляционной функции. В модели RAM корреляции осей случайной анизотропии описываются только экспоненциальной функцией, к тому же устанавливаются жесткие соотношения между внешним магнитным полем и полем обмена. Указанных недостатков лишен подход, развитый в работе [3]. Он описывает закон приближения к намагниченности насыщения (LAS) в интегральной форме и позволяет находить корреляционные функции для осей случайной анизотропии непосредственно из функций-образов, определяющих этот закон. Также данный подход свободен от ограничений модели RAM. LAS для двумерных магнитных систем соответствует интегральному преобразованию Мейера (K-transform). С его помощью возможно определить корреляционные функции осей случайной магнитной анизотропии $C(z)$, а также поля обмена H_{ex} и случайной анизотропии H_a . LAS для двумерной магнитной системы, полученный в [4], может быть записан в виде преобразования Мейера [5]

$$F(p) = \frac{32p^{3/2}}{4\pi} \left(\frac{H_{ex}}{H_a}\right)^2 \frac{\delta M(p)}{M_S} = \int_0^\infty \frac{z^3}{z^2} C(z) \sqrt{pz} K_1(pz) dz, \quad (1)$$

где $\delta M(p) = M_S - M(H)$, K_1 – модифицированная функция Бесселя второго рода первого порядка, $M(H)$, M – намагниченность в области LAS, H – напряженность внешнего магнитного поля.

Из интегрального уравнения (1) следует, что корреляционная функция однозначно определяется функцией образом $F(p)$ и должна меняться при ее изменении. Как показали предварительные исследования, получаемые из экспериментальных данных функции-образы характеризуются немонотонными зависимостями от параметра p с наличием максимума. Область LAS обычно лежит на падающей части кривой $F(p)$ с ростом параметра p . Рассмотрим корреляционные функции для функции-образа $F(p)$, которые могут характеризовать LAS. Проведенные предварительные оценки показали, что экспериментальные данные хорошо укладываются на аналитические зависимости, описываемые функцией [5]

$$F(p) = k(2\pi)^{-1/2} a^{1-\mu} p^\mu K_1(ap/2) K_{\mu-1/2}(ap/2) \quad (2)$$

где a, μ – параметры, зависящие от величины поля обмена H_{ex} . $K_{\mu-1}$ – модифицированная функция Бесселя второго рода $\mu-1$ порядка. В этом случае, согласно интегральному преобразованию Мейера для (2), корреляционная функция $C(z) = 0$ при $0 < z < a$, и

$$C(z) = z^{-\mu-\frac{3}{2}}(z^2 - a^2)^{-\frac{\mu}{2}} P_{\frac{1}{2}}^{\mu}(z/a), \quad (3)$$

при $z > a$, где $P_{\frac{1}{2}}^{\mu}(z/a)$ – шаровая функция (присоединенная функция Лежандра), z – координата, нормированная на радиус наночастицы. Шаровая функция при условии [6]

$$\left| \frac{z/a - 1}{z/a + 1} \right| < 1,$$

определяется как

$$P_{\nu-\frac{1}{2}}^{\mu}\left(\frac{z}{a}\right) = \frac{1}{\Gamma(1-\mu)} \left(\frac{z-1}{z+1}\right)^{-\mu/2} \left(\frac{z+1}{2}\right)^{-1} {}_2F_1\left(-1; -1-\mu; 1-\mu; \frac{z/a-1}{z/a+1}\right), \quad (4)$$

где $\Gamma(1-\mu)$ – гамма-функция, ${}_2F_1(z/a, \mu)$ – гипергеометрическая функция.

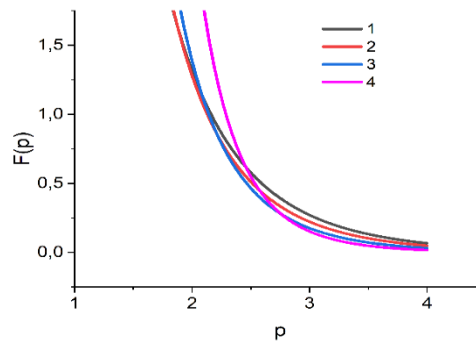


Рисунок 1. Функции $F(p)$ (а) при $a=1,0$, $\mu=-0,2$ (1), $\mu=-0,5$ (2), $\mu=-1,0$ (3), $\mu=-2,0$ (4)

На рисунке 1 приведены результаты расчетов функции-образа $F(p)$ при $a=1$ и различных величинах μ , которая слабо чувствительна к параметру μ , изменяемому в широких пределах. Соответствующие ей корреляционные функции, определенные из обратного преобразования Мейера приведены на рис. 2. Для данной функции-образа корреляционные функции различаются в зависимости от параметра μ . Они могут быть различных типов, как монотонные и немонотонные, так и характеризующиеся наличием скачков при незначительных изменениях параметра μ . Так при некоторых величинах μ , увеличивающихся от $-0,833$ до $-0,625$ корреляционная функция $C(z)$ меняется с растущей монотонной (кривая 1 на рис.2) и выходящей на насыщение (кривая 2 на рис.2), до немонотонной, характеризующейся максимумом при $z=2-3$ (кривые 3,4,5, рис.2) и далее спадающей с ростом z . При этом при некоторых критических величинах параметра μ , входящих в диапазон значений μ , приведенных на рис.2, возникают скачки корреляционной функции $C(z)$, рис. 3. Таким образом, проведенные расчеты показали, что корреляционные функции осей магнитной анизотропии двумерной систем ферромагнитных наночастиц для похожих законов приближения к намагниченности насыщения могут качественно различаться, показывая монотонный, немонотонный и скачкообразный характер.

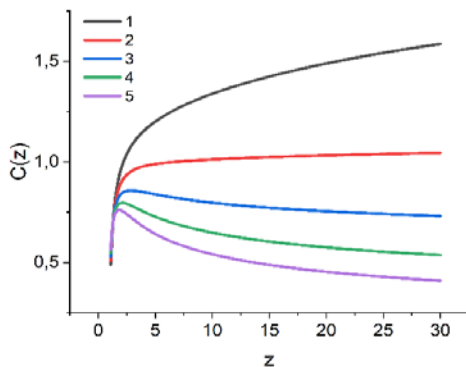


Рисунок 2. Корреляционные функции $C(z)$ (б) при $a=1,0$, $\mu=-0,833$ (1), $\mu=-0,77$ (2), $\mu=-0,714$ (3), $\mu=-0,67$ (4), $\mu=-0,625$ (5)

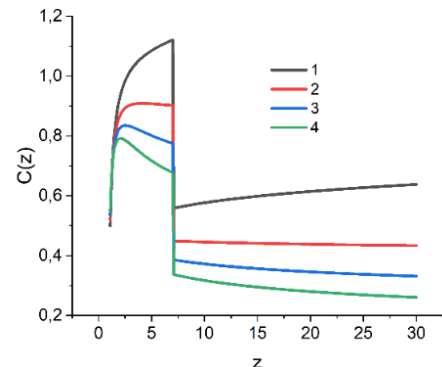


Рисунок 3. Функция $C(z)$ при $a=1$, $\mu=-0,8$ (1), $\mu=-0,74$ (2), $\mu=-0,7$ (3), $\mu=-0,662$ (4)

Для магнитной системы, характеризующейся наличием возрастающей по амплитуде с расстоянием корреляционной функции, имеет место усиление корреляций осей анизотропии под влиянием магнитодипольного взаимодействия, обменного смещения при наличии антиферромагнитной оболочки, или сильной анизотропии оболочки. Для немонотонной корреляционной функцией с одним максимумом можно предполагать существенное превышение поля случайной анизотропии над полем обмена в области, где корреляционная функция растет с расстоянием. Ее спад характеризует затухание корреляций с расстоянием для массивов ферромагнитных наночастиц со слабым дальним действием. Скачки корреляционной функции связаны с ограниченными областями сильной корреляции осей анизотропии, обусловленной самоорганизацией наночастиц в определенные кластеры, которые относительно слабо взаимодействуют друг с другом.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] С.П. Губин, Ю.А. Кокшаров, Г.Б. Хомутов, Г.Ю. Юрков. Магнитные наночастицы: методы получения, строение и свойства. Успехи химии 2005. – Том 74. – № 6. – С. 539–574.
- [2] A.L. Danilyuk, E.S. Nazarenka, S.A. Vorobyova, J.A. Fedotova and S.L. Prischepa. Low-temperature magnetic ordering in Co core/CoO shell nanoparticles on the copper surface // Current Applied Physics. – 2023. - Vol. 56. - P.79-84.
- [3] Chudnovsky, Eugene M. The magnetism of amorphous metals and alloys / Fernandez-Baca, J. A. and Ching, W.-Y. (World Scientific, Singapore). – 1995. – Ch. 3. – p.143-175.
- [4] Danilyuk, A. L., Komissarov, I. V., Kukharev, A. V., Le Normand, F., Hernandez, J. M., Tejada, J. and Prischepa, S. L. Impact of CNT medium on the interaction between ferromagnetic nanoparticles // Europhys. Lett. – 2017. – 117: 27007(1-7).
- [5] A. Erdélyi (Ed.), Tables of Integral Transforms, vol. 2, McGraw-Hill Book Co., New York, 1954. – 451 p.
- [6] И.С. Градштейн, И.М. Рыжик. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. Изд. 4-е. М. Физматгиз, 1963. – 1100 стр.

MODELING CORRELATION FUNCTIONS OF RANDOM ANISOTROPY AXES OF A TWO-DIMENSIONAL SYSTEM OF FERROMAGNETIC NANOPARTICLES

K.S. Nazarenka, A.L. Danilyuk

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
katyanaz2001@gmail.com

Abstract: This paper presents the results of modeling the correlation functions of random anisotropy axes for a two-dimensional system of ferromagnetic nanoparticles. The calculations were performed using the Meyer integral transform, which describes the law of approaching the saturation magnetization of an ensemble of ferromagnetic nanoparticles. An example is considered in the form of an analytical image function, on the basis of which correlation functions of various types are obtained, both monotonic and non-monotonic, and characterized by the presence of jumps.

Keywords: random anisotropy, nanoparticle array, correlation function, Meyer transform.