

Корреляционные функции случайной анизотропии двумерной системы ферромагнитных наночастиц

Е. С. Назаренко

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

В данной работе представлены результаты расчетов корреляционных функций осей случайной анизотропии двумерной системы ферромагнитных наночастиц на поверхности твердого тела с помощью интегрального преобразования Мейера, описывающего закон приближения к намагниченности насыщения. Рассмотрены примеры, характеризующие экспериментальные данные в виде аналитических функций-образов, на основании которых получены корреляционные функции двух видов – колебательные с нарастающей и затухающей амплитудами, а также немонотонные.

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

Системы ферромагнитных наночастиц на поверхности твердых тел – металлов, диэлектриков, а также двумерных кристаллов, в частности, графена, вызывают большой интерес у исследователей. Создание и исследование таких магнитных композиционных структур является весьма актуальной задачей для разработки приборов спинтроники. Подобные композиционные структуры могут успешно синтезироваться посредством осаждения на поверхность твердого тела наночастиц различных ферромагнитных металлов (Co, Ni и др.) [1]. Из экспериментальных данных по измерению намагниченности $M(H)$ структур получена функция-образ $F(p) = kp^{3/2}\delta M(p)/M_S$ для массива CoO/Co на меди при температуре 4 К. Здесь k – постоянный коэффициент, параметр $p = (H/H_{ex})^{1/2}$, M_S – намагниченность насыщения, H_{ex} – поле обмена. Проведенное фитирование показало, что экспериментальные данные хорошо укладываются на аналитические зависимости, описываемые спадающими монотонными функциями.

Для анализа результатов магнитных измерений таких магнитных структур и их интерпретации обычно используется модель случайной анизотропии (RAM). Однако известно, что она имеет ограничения, связанные с лежащими в ее основе приближениями – выбором корреляционной функции, описывающей корреляции осей случайной анизотропии, только одного типа, а также необходимостью учитывать соотношения между внешним магнитным полем и полем обмена. Указанных недостатков лишен подход, развитый в работе [2]. Он описывает закон приближения к намагниченности насыщения (LAS) в интегральной форме и позволяет находить корреляционные функции для случайной анизотропии непосредственно из функций-образов, определяющих этот закон. Также данный подход свободен от ограничивающих RAM соотношений между внешним полем и полем обмена. LAS для 2D 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 2D магнитной системы, полученный в [2], может быть записан в виде преобразования Мейера [3]

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

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 немонотонной зависимостью от параметра p с наличием максимума. Область LAS обычно лежит на падающей части кривой $F(p)$ с ростом параметра p . Рассмотрим корреляционные функции для двух функций-образов $F(p)$, которые могут характеризовать LAS. Проведенные предварительные оценки показали, что экспериментальные данные хорошо укладываются на аналитические зависимости, описываемые функцией

$$F_1(p) = kp^{3/2}/[(p^2 + a^2)^{m+2}], \quad (2)$$

где k – постоянный коэффициент, a , m – параметры, зависящие от величины поля обмена H_{ex} . В этом случае, согласно интегральному преобразованию Мейера, корреляционная функция

$$C_1(z) = z^m J_m(az), \quad (3)$$

где $J_m(az)$ – функция Бесселя первого рода m -го порядка, z – координата, нормированная на радиус наночастицы, a – параметр, определяющий период $C(z)$.

Вторая функция-образ имеет вид

$$F_2(p) = kp^{-3/2} J_3[(2ap)^{1/2}] \cdot K_3[(2ap)^{1/2}], \quad (4)$$

для нее корреляционная функция

$$C_2(z) = z^{1/2} J_{3/2}(a/z). \quad (5)$$

Здесь J_3 , $J_{3/2}$ – функции Бесселя первого рода 3-го и 3/2-го порядка соответственно, K_3 – модифицированная функция Бесселя второго рода 3-го порядка.

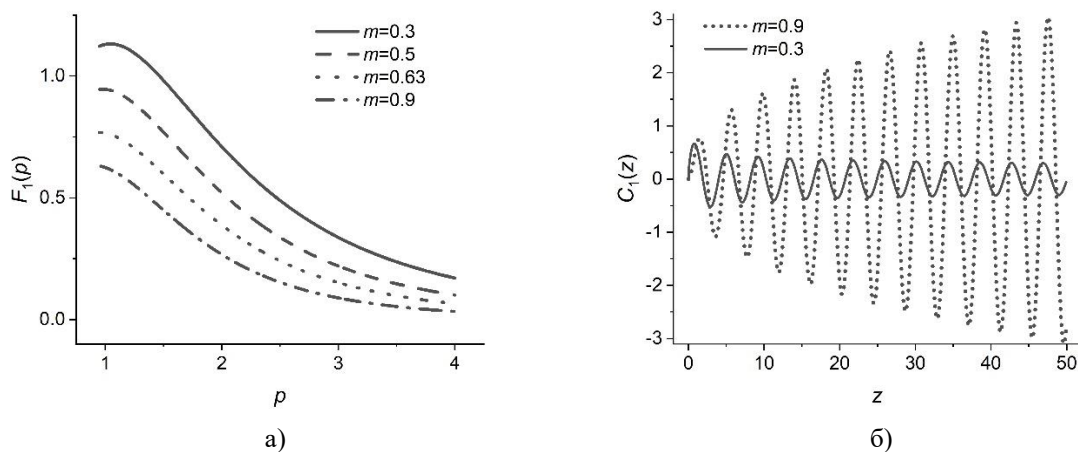


Рис. 1. Функции $F_1(p)$ (а) и $C_1(z)$ (б) при $m=0,3$ и $0,9$, $a=1,5$

На рис. 1 приведены результаты расчетов функции-образа $F_1(p)$ и соответствующие ей корреляционные функции, определенные из обратного преобразования Мейера. Для функции-образа первого типа корреляционная функция носит колебательный характер с постоянным периодом, амплитуда которой затухает при $m=0,3$ и растет при $m=0,9$.

Функция образ второго типа аналогична, рис. 2,а, аналогична функции первого типа, но ее корреляционная функция носит колебательный характер только в начале координат при $z < 2$, рис. 2,б, а затем показывает немонотонный ход с одним максимумом в области $z=3-5$ и последующий спад при $z > 5$. Это значит, что для качественно одинаковых функций-образов корреляционные функции качественно различаются.

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, как осциллирующий характер, так и немонотонное поведение. Для магнитной системы, характеризующейся наличием колебательной незатухающей по амплитуде с расстоянием корреляционной функции, может иметь место усиление корреляций осей анизотропии под влиянием магнитодипольного взаимодействия, обменного смещения при наличии антиферромагнитной оболочки, или сильной анизотропии оболочки. Для магнитных систем, характеризующейся немонотонной корреляционной функцией с одним максимумом можно предполагать существенное превышение поля случайной анизотропии над полем обмена в области, где корреляционная функция растет с расстоянием.

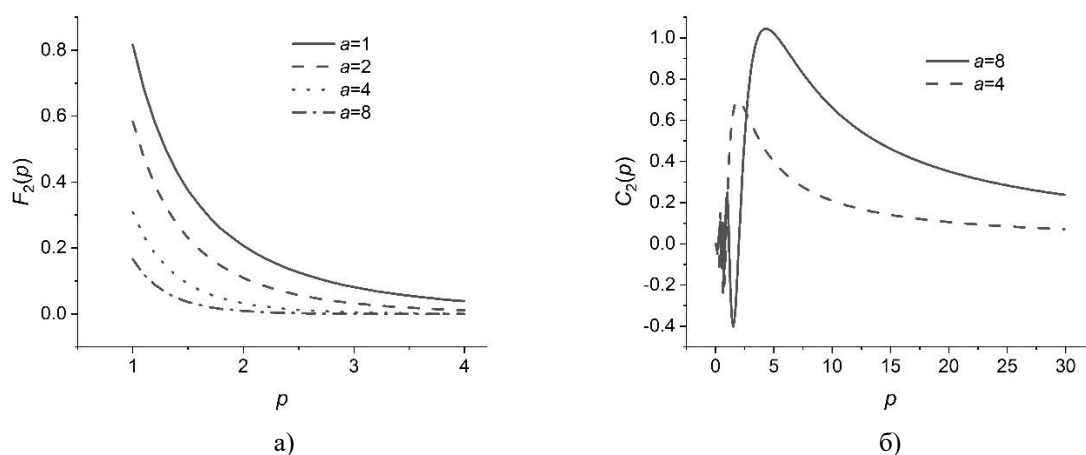


Рис. 2. Функции $F_2(p)$ (а) и $C_2(z)$ (б) при $a=1-8$

Список источников

- [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] 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.
- [3] 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).

Correlation functions of random anisotropy of a two-dimensional system of ferromagnetic nanoparticles

K. S. Nazarenka

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Annotation

This paper presents the results of calculations of the correlation functions of the random anisotropy axes of a two-dimensional system of ferromagnetic nanoparticles on a solid surface using the Meyer integral transformation, which describes the law of approximation to saturation magnetization. Examples describing experimental data in the form of analytical functions-images are considered, on the basis of which correlation functions of two kinds – oscillatory with increasing and decaying amplitudes, as well as non-monotone functions – are obtained.

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