

**ВЛИЯНИЕ ПОДЛОЖКИ НА КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ФУНКЦИИ
ОСЕЙ СЛУЧАЙНОЙ АНИЗОТРОПИИ В МАССИВАХ
НАНОЧАСТИЦ Co/CoO**

Е.С. Назаренко, А.Л. Данилюк

*Учреждение образования «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники», г. Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Методом интегрального преобразования Мейера проведен сравнительный анализ корреляционных функций осей случайной анизотропии для двумерных массивов наночастиц Co/CoO (ядро/оболочка) на подложках меди (Cu) и медь/графен (Cu/G). Показано, что тип подложки определяет качественный вид корреляционной функции: для Co/CoO/Cu характерны осциллирующие дальнедействующие корреляции, для Co/CoO/Cu/G – монотонные, немонотонные и скачкообразные зависимости.

Ключевые слова: случайная анизотропия, корреляционная функция, преобразование Мейера, наночастицы Co/CoO, графен.

**INFLUENCE OF THE SUBSTRATE ON THE CORRELATION
FUNCTIONS OF RANDOM ANISOTROPY AXES IN ARRAYS OF
Co/CoO NANOPARTICLES**

K.S. Nazarenka, A.L. Danilyuk

*Educational Institution “Belarusian State University of Informatics and
Radioelectronics”, Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. A comparative analysis of the correlation functions of random anisotropy axes for two-dimensional arrays of Co/CoO nanoparticles (core/shell) on copper (Cu) and copper/graphene (Cu/G) substrates was performed using the Meyer integral transform method. It was shown that the substrate type determines the qualitative form of the correlation function: Co/CoO/Cu are characterized by oscillating long-range correlations, while Co/CoO/Cu/G exhibits monotonic, non-monotonic, and jump-like dependencies.

Keywords: random anisotropy, correlation function, Meyer transform, Co/CoO nanoparticles, graphene.

Введение

Массивы ферромагнитных наночастиц на поверхности твердых тел перспективны для спинтроники. Классическая модель случайной анизотропии (RAM) использует только экспоненциальную корреляционную функцию. Подход на основе интегрального преобразования Мейера [1] позволяет определять реальный вид корреляционных функций $C(z)$ из экспериментальных данных. В работе этот подход применен для сравнения двух типов подложек.

Основная часть

Закон приближения к намагниченности насыщения для двумерной магнитной системы имеет вид интегрального преобразования Мейера (K-transform) [1]

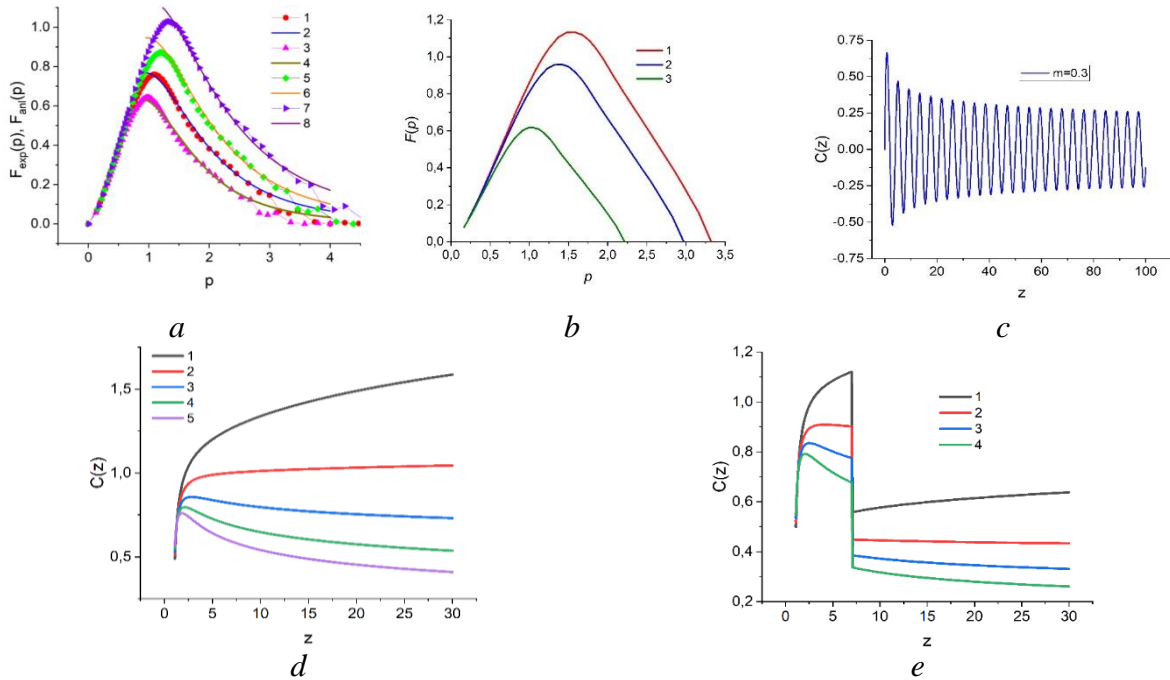
$$F(p) = \frac{32p^{\frac{3}{2}}}{4\pi} \left(\frac{H_{ex}}{H_a} \right)^2 \frac{\delta M(p)}{M_s} = \int_0^\infty z^{\frac{3}{2}} C(z) \sqrt{pz} K_1(pz) dz, \quad (1)$$

где $p = \left(\frac{H}{H_{ex}} \right)^{1/2}$, $\delta M(p) = M_s - M(H)$, H_{ex} – поле обмена, H_a – поле случайной анизотропии, K_1 – модифицированная функция Бесселя второго рода первого порядка.

Функция-образ $F(p)$ получается из экспериментальных петель гистерезиса, а корреляционная функция $C(z)$ находится путем обратного преобразования Мейера.

Рисунок представляет сопоставление функций-образов $F(p)$ для обеих систем при $T=4$ К. Для Co/CoO/Cu характерна вогнутость спадающего участка, для Co/CoO/Cu/G спад имеет практически линейный характер.

Рисунок демонстрирует корреляционные функции $C(z)$ для Co/CoO/Cu/G. В зависимости от параметра μ функция $C(z)$ может быть монотонной, выходить на насыщение или иметь немонотонный характер с максимумом (рис. 2a) или приобретать при критических параметрах μ скачкообразный характер (рис. 2b), что связано с самоорганизацией наночастиц в кластеры.



Функции-образы $F(p)$ при $T=4$ К для различных значений H_{ex} и корреляционная функция $C(z)$ для Co/CoO/Cu (c): a – для Co/CoO/Cu; b – для Co/CoO/Cu/G,

Корреляционные функции $C(z)$ при $d=1,0$: $d - \mu=-0,833$ (1),
 $\mu=-0,77$ (2), $\mu=-0,714$ (3), $\mu=-0,67$ (4), $\mu=-0,625$ (5); e – $\mu=-0,8$ (1), $\mu=-0,74$ (2),
 $\mu=-0,7$ (3), $\mu=-0,662$ (4)

В системе Co/CoO/Cu высокопроводящая медная подложка обеспечивает значительный вклад косвенного обменного взаимодействия (РККИ) [2]. Осциллирующий и слабозатухающий характер корреляционной функции связан с конкуренцией этого взаимодействия с локальными эффектами: сильной магнитной анизотропией оболочки CoO ($K \sim 10^7$ Дж/м³) и обменным смещением на границе Co/CoO. Эти факторы «закрепляют» оси анизотропии ядер Co, поддерживая корреляции на больших расстояниях.

В системе Co/CoO/Cu/G слой графена ослабляет вклад РККИ из-за меньшей концентрации носителей заряда [2]. Доминирующими становятся дипольное взаимодействие и флуктуации случайной анизотропии, что приводит к разнообразному поведению $C(z)$. При повышении температуры до 25 К функция-образ для Co/CoO/Cu/G приобретает вогнутость [2], сближаясь с поведением системы на чистой меди.

Заключение

Проведенный сравнительный анализ показал, что интегральный подход на основе преобразования Мейера позволяет выявлять качественные различия в корреляционных функциях осей случайной анизотропии. Тип подложки является ключевым фактором, определяющим характер корреляций: на меди –дальнодействующие осциллирующие

корреляции, на графене/меди – монотонные, немонотонные и скачкообразные зависимости. Полученные результаты важны для управления магнитными свойствами композитов при разработке спинтронных устройств.

Список использованных источников

1. Chudnovsky E.M., Fernandez-Bac J.A., Ching W.-Y. (1995) The magnetism of amorphous metals and alloys. *World Scientific*. Singapore. Ch. 3, 143–175.
2. Danilyuk A.L., Nazarenka E.S., Vorobyova S.A., Fedotova J.A., Prischepa S.L. (2023) Low-temperature magnetic ordering in Co core/CoO shell nanoparticles on the copper surface. *Current Applied Physics*. Vol. 56, 79–84.

References

1. Chudnovsky E.M., Fernandez-Bac J.A., Ching W.-Y. (1995) The magnetism of amorphous metals and alloys. *World Scientific*. Singapore. Ch. 3, 143–175.
2. Danilyuk A.L., Nazarenka E.S., Vorobyova S.A., Fedotova J.A., Prischepa S.L. (2023) Low-temperature magnetic ordering in Co core/CoO shell nanoparticles on the copper surface. *Current Applied Physics*. Vol. 56, 79–84.

Сведения об авторах

Назаренко Е.С., аспирант кафедры микро- и наноэлектроники, учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», katanaz2001@gmail.com.

Данилюк А.Л., к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры микро- и наноэлектроники, учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», danilyuk@bsuir.by.

Information about the authors

Nazarenka K.S., postgraduate student at the Department of Micro- and Nanoelectronics, Educational Institution “Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics”, katanaz2001@gmail.com.

Danilyuk A.L., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, Educational Institution “Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics”, danilyuk@bsuir.by.