

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРИБЛИЖЕНИЯ К НАМАГНИЧЕННОСТИ НАСЫЩЕНИЯ МАССИВА НАНОЧАСТИЦ CoO/Co НА ГРАФЕНЕ

Назаренко Е.С.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** В работе представлены результаты расчетов закономерностей приближения к намагниченности насыщения массива наночастиц CoO/Co, синтезированных методом электрохимического осаждения на графене, нанесенным на медную подложку. Расчет основан на использовании интегрального представления для двумерных магнитных систем, описывающего экспериментальные зависимости петель гистерезиса. Получены зависимости закономерностей приближения к намагниченности насыщения при температуре 4 К и 25 К массива наночастиц CoO/Co на графене от соотношения поля обмена к напряженности внешнего магнитного поля при различных значениях поля обмена. Показано, что эти зависимости являются немонотонными при росте напряженности магнитного поля с наличием максимума в области, где квадратный корень соотношений поля обмена и напряженности внешнего поля равен 1.0-1.5.

**Ключевые слова:** графен, массив, наночастицы оксид кобальта/кобальт, поле обмена, поле анизотропии, преобразование Мейера.

Системы ферромагнитных наночастиц на поверхности графена вызывают большой исследовательский интерес в таких областях как углеродная спинтроника, сенсоры. Подобные композиционные структуры синтезируются методами электрохимического осаждения на графене, осажденном или перенесенном на металлические подложки, в частности медные [1].

Для интерпретации результатов магнитных измерений таких магнитных композитов обычно применяется модель случайной анизотропии (RAM), но она ограничивается однозначным выбором корреляционной функции, характеризующей случайную анизотропию, только одного типа, а также соотношениями между напряженностью внешнего магнитного поля  $H$  и полем обмена  $H_{ex}$  [2]. Указанные недостатки отсутствуют в методе, развитом в работе [3], который описывает закон приближения к намагниченности насыщения (LAS) в интегральной форме и позволяет находить корреляционные функции для осей случайной магнитной анизотропии непосредственно из функций-образов, определяющих этот закон. Также данный подход свободен от ограничивающих RAM соотношений между внешним полем и полем обмена.

Для исследования закона приближения к намагниченности насыщения предполагаем, что рассматриваемая система CoO/Co/графен является двумерной и описывается интегральным выражением, полученным Е. М. Чудновским в работе [3] для намагниченности

$$M(H) = M_S \left[ 1 - \frac{(H_a / H_{ex})^2}{32(H / H_{ex})^{1/2}} 4\pi \int_0^\infty z^2 C(z) K_1[(H / H_{ex})^{1/2} z] dz \right], \quad (1)$$

где  $M_S$  – намагниченность насыщения,  $H_a$  – поле случайной магнитной анизотропии,  $H_{ex}$  – поле обмена,  $C(z)$  – корреляционная функция, определяющая корреляцию осей случайной анизотропии наночастиц в массиве,  $K_1$  – модифицированная функция Бесселя второго рода первого порядка.

Обозначая  $p=(H/H_{ex})^{1/2}$ , и преобразуя выражение для намагниченности (1), получим зависимость  $\delta M/M_S$  в виде преобразования Мейера (K- transform) [4]

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

где  $\delta M(p)=M_S-M(H)$ .

Преобразуя (2), получаем функцию-образ  $F(p)$ , с помощью которой, используя экспериментальные данные, можно найти корреляционную функцию осей случайной анизотропии  $C(z)$ . Для этого представим (2) в следующем виде

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

Из интегрального уравнения (3) следует, что корреляционная функция однозначно определяется функцией образом  $F(p)$  и должна меняться при ее изменении. Как показали проведенные расчеты, получаемые из экспериментальных данных функции-образы характеризуются немонотонными зависимостями от параметра  $p$  с наличием максимума.

На рисунке 1 приведены результаты расчетов функций-образов  $F_1(p)$  и  $F_2(p)$  при температуре 4 К и 25 К с использованием полученных экспериментальных данных по измерению петель гистерезиса исследуемых массивов наночастиц CoO/Co на графене. Их функциональный вид зависит от значения поля  $H_{ex}$ , а соотношение  $(H_a/H_{ex})$  на его не влияет, а только масштабирует функцию образ. Как можно видеть при температуре 4 К функция образ при  $H_{ex} = 0,8$  кЭ характеризуется максимумом при  $p=1$ . С ростом до  $H_{ex} = 1,8$  кЭ максимум сдвигается до  $p=1,5$  и меняется функциональный вид  $F(p)$ . Это ведет к изменению параметров корреляционной функции, что говорит о том, что ее вид зависит от величины поля обмена.

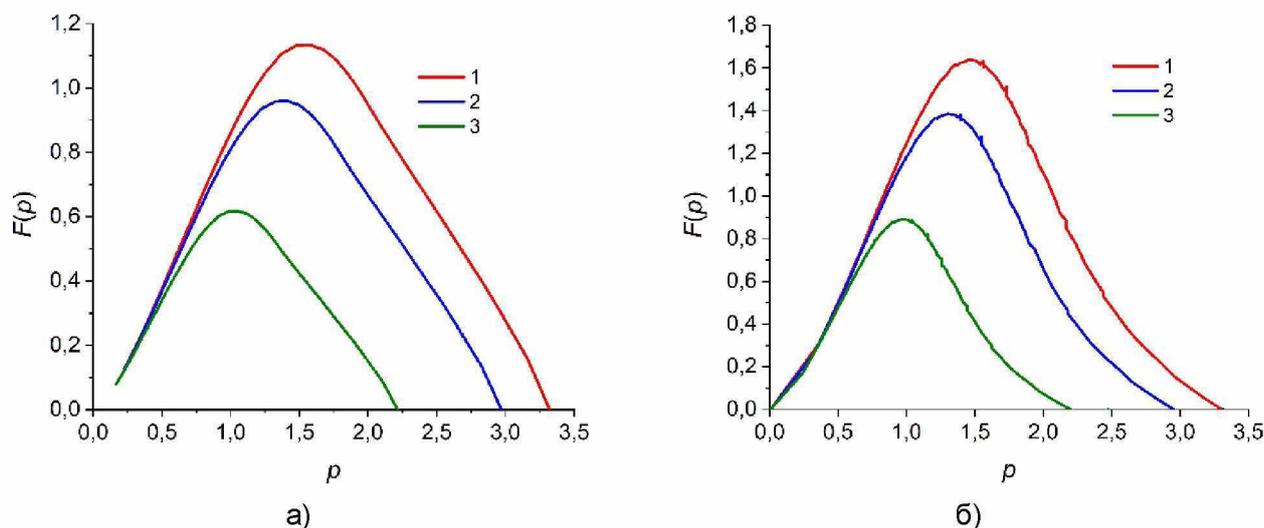


Рисунок 1 – Функции-образы  $F_1(p)$  (а) при  $T=4$  К и  $F_2(p)$  (б) при  $T=25$  К.  $H_{ex}= 0,8$  кЭ (кривая 1),  $H_{ex}=1,0$  кЭ (кривая 2),  $H_{ex}=1,8$  кЭ (кривая 3).

Можно сделать вывод о том, что спадающие участки  $F_1(p)$ , характеризующие именно LAS, являются практически линейными. Это говорит об особенностях соотношений между полем обмена и полем анизотропии, связанных с наличием дополнительных вкладов в случайную анизотропию, возможно, когерентного или наведенного типа.

Полученные результаты отличаются от функций-образов для композита наночастицы CoO/Co на медной подложке, полученных в работе [5] при  $T=4$  К, которые имеют вогнутость при  $p > p_{max}$ , что приводит к слабо затухающим осциллирующим корреляционным функциям  $C(z)$ .

Особенностью функций  $F(p)$  для массива CoO/Co на графене является отсутствие вогнутости части кривой при  $p > p_{max}$ , соответствующей закону приближения к намагниченности насыщения. Это говорит о существенном отличии корреляционных функций осей случайной анизотропии для массивов CoO/Co на медной подложке с графеном и без него. Данный тип функций-образов возможно ведет к корреляционным функциям осей случайной анизотропии ступенчатого или экстремального вида.

Полученные функции  $F_2(p)$  при  $T= 25$  К отличаются функциональным видом от  $F_1(p)$  при тех же значениях поля обмена, что говорит о том, что корреляционные функции также будут отличаться в случае изменения температуры. Функции-образы  $F_2(p)$  имеют характерную

вогнутость в области LAS при  $p > p_{max}$ . Их функциональный вид ближе к подобным функциям-образам для массива CoO/Co на меди [5]. Это говорит о том, что в данном случае при  $T=25$  К случайная анизотропия будет характеризоваться колебательными корреляционными функциями.

Таким образом, проведенные расчеты функций-образов, характеризующих закономерности приближения к намагниченности насыщения массива наночастиц CoO/Co на графене, показали что при температуре 4 и 25 К они характеризуются немонотонным поведением с наличием максимума в области параметра  $p=1.0-1.5$ , а также наличием практически линейной зависимости в области LAS для  $T=4$  К и вогнутости для  $T=25$  К, что свидетельствует о модификации вклада случайной анизотропии, связанного с присутствием различных механизмов магнитной анизотропии в данной системе.

#### **Список использованных источников:**

1. Bayev, V. G. The effect of quasi-free graphene layer on the electrical transport properties of sandwich-like graphene / Co nanoparticles / graphene structure / Bayev, V. [et al.] // Applied Surface Science – 2022- 579 152119 (1-13).
2. Bayev, V. G. CVD graphene sheets electrochemically decorated with “core-shell” Co/CoO nanoparticles / Bayev, V. G. [et al.] // Appl. Surf. Sci. 440. – 2018. – p.1252-1260.
3. Alben, R. Random anisotropy in amorphous ferromagnets / R. Alben, J.J. Becker, M.C. Chi J. / Appl. Phys. 49. – 1978. – p.1653-1658.
4. 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.
5. Erdelyi. Tables of Integral Transforms / Erdelyi. A. – vol. 2. – McGraw-Hill Book Co., New York. – 1954.
6. A.L. Danilyuk. Low-temperature magnetic ordering in Co core/CoO shell nanoparticles on the copper surface / A.L. Danilyuk [et al.] // Current Applied Physics. – 2023. – Vol. 56 – p.79-84.