

13

## Влияние термоиндуцированного магнитоупругого эффекта на переключение намагниченности в Ni-частицах с конфигурационной анизотропией

© А.А. Бухараев, Д.А. Бизяев, Н.И. Нургаизов, А.П. Чукланов

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского, ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань, Россия  
E-mail: a\_bukharaev@mail.ru

Поступило в Редакцию 11 июля 2024 г.

В окончательной редакции 11 сентября 2024 г.

Принято к публикации 21 сентября 2024 г.

Исследовано влияние термоиндуцированного магнитоупругого эффекта на поле переключения квазиоднородной намагниченности планарных Ni-частиц микронного размера, обладающих конфигурационной анизотропией. Квадратные частицы Ni двух типов сформированы на поверхности монокристаллического трибората лития. Экспериментально показано, что при изменении температуры структуры на  $\pm 20^\circ\text{C}$  относительно температуры формирования частиц ( $50^\circ\text{C}$ ) наблюдается как уменьшение, так и увеличение поля переключения частиц. Это обусловлено наводимой в них магнитоупругой анизотропией, индуцируемой при изменении температуры, за счет разности в коэффициентах теплового расширения подложки по разным кристаллическим осям.

**Ключевые слова:** термоиндуцированный магнитоупругий эффект, поле переключения, магнитно-силовая микроскопия, квазиоднородная намагниченность, конфигурационная анизотропия.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.03.59810.20055

Ферромагнитные планарные частицы, обладающие конфигурационной анизотропией, могут иметь несколько квазиоднородных магнитных состояний, разделенных достаточно высокими энергетическими барьерами, что обеспечивает стабильность этих состояний во времени [1]. Под „квазиоднородной намагниченностью“ (КОН) здесь понимается такое состояние магнитной подсистемы частицы с размерами, заметно большими радиуса однодоменного состояния, при котором из-за анизотропии формы она имеет отличный от нуля суммарный магнитный момент [2,3]. Обычно такой структурой обладают частицы, имеющие латеральные размеры около одного микрометра и сильно вытянутые в одном направлении, или равносторонние частицы, у которых стороны вогнуты к центру [1–5]. Такие частицы являются перспективными элементами для создания запоминающих магнитоэлектрических стрейнтронных ячеек памяти произвольного доступа (magnetoelectric random access memory, MeRAM). MeRAM-ячейка состоит из двух планарных ферромагнитных однородно или квазиоднородно намагниченных частиц с фиксированной (магнито жесткой) и относительно свободной (магнито мягкой) ориентацией намагниченности, разделенных туннельным зазором, нанесенных на пьезоэлектрическое основание [4,5]. Ориентация намагниченности магнитомягкого слоя, расположенного на пьезоэлектрике, может переключаться на противоположное направление за счет механических напряжений, индуцированных деформацией пьезоподложки под действием электрического потенциала, или за счет совместного действия таких напряжений и внешнего магнитного поля. Ориентация намагниченности

магнито жесткого слоя при этом не изменяется. Электрическое сопротивление такой структуры зависит от угла между векторами намагниченности в магнито жестком и магнитомягком ферромагнитных слоях [6]. Сопротивление будет максимальным, когда эти векторы развернуты на  $180^\circ$  относительно друг друга, и минимальным, когда они параллельны [4,5].

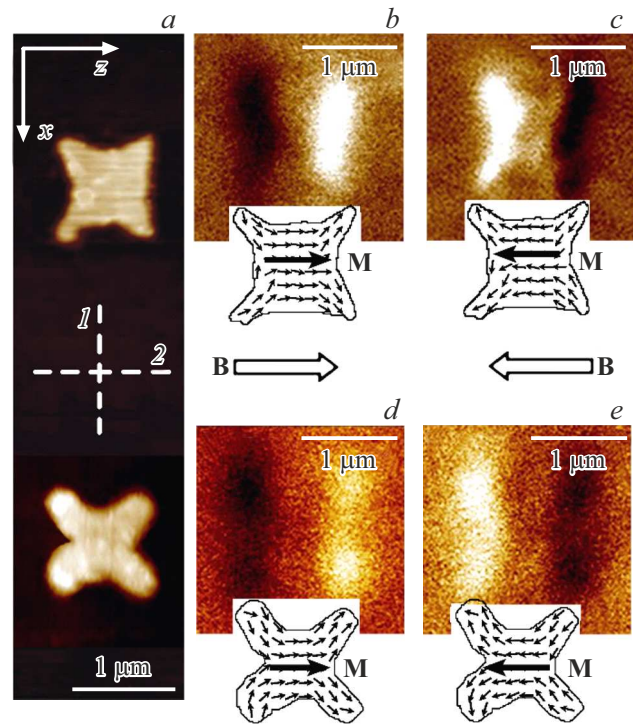
Кроме пьезоэлектрического эффекта на деформацию ферромагнитных частиц, сформированных на подложке (при условии, что она является монокристаллической), может влиять и разность в ее коэффициентах теплового расширения. Недавно нами было показано, что поле переключения прямоугольных Ni-частиц с КОН, сформированных на поверхности монокристаллического трибората лития ( $\text{LiB}_3\text{O}_5$ , далее LBO), может изменяться в 1.57 раза при изменении температуры всего на  $15^\circ\text{C}$  [7]. Данное изменение было обусловлено наводимой в частицах магнитоупругой анизотропией, вызванной разностью в коэффициентах теплового расширения подложки по разным кристаллическим осям. Соответственно термоиндуцированный магнитоупругий эффект может оказать влияние и на поле переключения других частиц, имеющих КОН, обусловленную конфигурационной анизотропией, что может сказаться на работе MeRAM-ячейки, построенной на их основе. В настоящей работе мы оценили влияние термоиндуцированного магнитоупругого эффекта на поле переключения планарных Ni-частиц, представляющих собой квадрат микронного размера с различной степенью вогнутости сторон. Как показано в работе [1], такие частицы обладают КОН, и их поле переключения зависит от степени вогнутости сторон.

Кристаллы LBO характеризуются большими коэффициентами теплового расширения, поэтому можно ожидать существенного изменения поля переключения частиц, сформированных на их поверхности, под действием термоиндуцированного магнитоупругого эффекта.

Исследовались два типа частиц: 1) частицы с небольшой степенью вогнутости сторон (concave side) (далее CS-частицы); 2) частицы крестообразной формы (далее X-частицы) (рис. 1, *a*). В качестве подложки для формирования частиц использовался монокристаллический LBO фирмы HG Optonics. Плоскость, на которой формировались частицы, была образована осями кристалла  $x$  и  $z$ . Согласно данным производителя, коэффициент теплового расширения LBO вдоль оси  $x$  составлял  $\alpha_x = 10.8 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , вдоль оси  $z$  —  $\alpha_z = 3.4 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Ni-частицы имели поликристаллическую структуру и изотропный коэффициент теплового расширения  $\alpha_p = 1.3 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  [7]. За счет разности в коэффициентах теплового расширения LBO по разным осям снижение температуры образца ниже температуры напыления Ni приводило к сжатию частиц. При увеличении температуры происходило их растяжение, а при  $50^\circ\text{C}$  деформация отсутствовала.

Частицы формировались методом lift-off после напыления металла через маску в условиях сверхвысокого вакуума при температуре подложки  $50^\circ\text{C}$ . Маска для напыления формировалась с помощью сканирующей зондовой литографии в тонком слое (около 100 nm) полиметилметакрилата, нанесенного на поверхность LBO методом spin-coating [8]. Было сформировано два массива отдельно расположенных CS- и X-частиц по 35 штук в каждом. Расстояние между краями частиц в массиве составляло  $3.5 \mu\text{m}$ . Изображения отдельных CS- и X-частиц, полученные методом атомно-силовой микроскопии, представлены на рис. 1, *a*. Их латеральные размеры можно охарактеризовать длиной стороны квадрата, в который такая частица может быть вписана. Этот размер составлял  $1.1 \mu\text{m}$ , а высота частиц — 30 nm. Частицы были сформированы таким образом, чтобы стороны квадрата, в который вписывалась частица, были ориентированы вдоль кристаллических осей подложки (рис. 1, *a*).

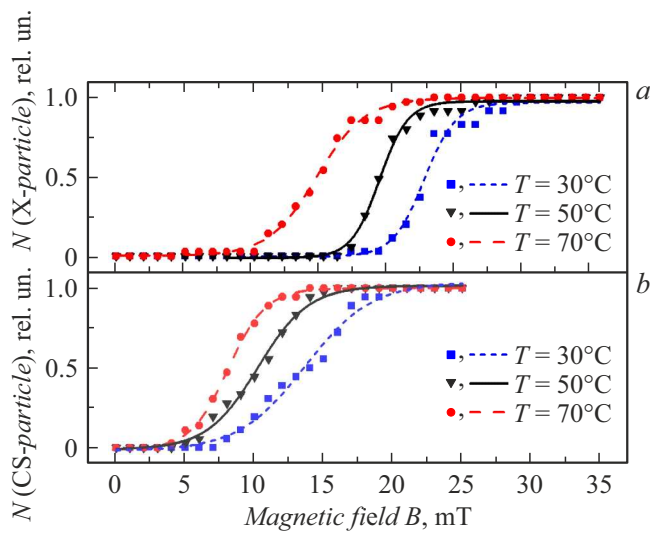
Для формирования маски и дальнейшего исследования полученных частиц использовался сканирующий зондовый микроскоп Ntegra, работающий в режиме атомно-силового (АСМ) и магнитно-силового микроскопа (МСМ). МСМ-измерения были выполнены по однопроходной методике, чтобы снизить влияние МСМ-зонда на получаемые результаты. В режиме *in situ* с использованием встроенной в МСМ термоячейки было измерено поле переключения при трех температурах:  $30$ ,  $50$  и  $70^\circ\text{C}$ . Под полем переключения частицы понималось такое значение внешнего магнитного поля, при котором направление КОН изменялось на противоположное. На МСМ-изображениях это приводило к инверсии изображения частицы (рис. 1, *b, c*, или рис. 1, *d, e*). При измерении поля переключения образец



**Рис. 1.** *a* — экспериментальные АСМ-изображения CS-частиц (верхнее) и X-частиц (нижнее) с указанием направления кристаллических осей LBO-подложки (стрелки). Штриховыми линиями показаны направления действия наведенной магнитоупругой анизотропии при  $30$  (*1*) и  $70^\circ\text{C}$  (*2*). *b–e* — МСМ-изображения: исходное состояние намагниченности в CS-частице (*b*) и X-частице (*d*); после поворота намагниченности на  $180^\circ$  в CS-частице (*c*) и X-частице (*e*). На вставках — смоделированные на основе геометрических данных для соответствующих частиц распределения намагниченности. Темными стрелками показана ориентация среднего магнитного момента ( $\mathbf{M}$ ) в частицах, светлыми — направление действия магнитного поля ( $\mathbf{B}$ ).

был ориентирован таким образом, что при  $30^\circ\text{C}$  ось магнитоупругой анизотропии, обусловленная одноосной деформацией частиц, формировалась перпендикулярно направлению внешнего магнитного поля, а при  $70^\circ\text{C}$  — вдоль этого поля (рис. 1, *a*).

Моделирование возможного распределения намагниченности в частицах было выполнено с помощью компьютерной программы OOMMF [9] на основе их экспериментальных АСМ-изображений. Результаты моделирования представлены на вставках к рис. 1, *b–e*, на которых маленькими темными стрелками показано локальное распределение намагниченности в частице, а большими темными стрелками — ориентация среднего магнитного момента ( $\mathbf{M}$ ) всей частицы. На основе совпадения смоделированных и экспериментальных МСМ-изображений был сделан вывод, что в частицах действительно наблюдается квазиоднородное распределение намагниченности и под действием внешнего поля происходит переключение направления намагниченности.



**Рис. 2.** Зависимости нормированного числа ( $N$ ) X-частиц (a) и CS-частиц (b), переключивших направление намагниченности, от внешнего поля при различных температурах. Символы — экспериментальные данные, линии — результаты подгонки для соответствующих температур.

На основе полученных МСМ-изображений определялось нормированное число частиц ( $N$ ), переключивших направление намагниченности при данных значениях температуры и внешнего магнитного поля (рис. 2). Для удобства восприятия и возможного сравнения с другими данными полученные зависимости нормированы на общее количество частиц. Для нахождения среднего значения поля переключения частиц экспериментальные зависимости были аппроксимированы стандартной функцией вида  $N = 1/(1 + \exp[(B_{av} - B)/S])$ , где  $B_{av}$  и  $S$  выступали в качестве подгоночных параметров. Параметр  $S$  характеризовал наклон полученных кривых, а  $B_{av}$  — (среднее) поле переключения частиц. Согласно полученным данным, понижение температуры образца с 50 до 30°C приводит к увеличению поля переключения с 10 до 14 мТ для CS-частиц и с 19 до 22 мТ для X-частиц за счет одноосного сжатия Ni-частиц. Увеличение температуры образца с 50 до 70°C уменьшает поле переключения с 10 до 8 мТ для CS-частиц и с 19 до 14 мТ для X-частиц за счет одноосного растяжения частиц. Максимальное понижение поля переключения намагниченности при нагреве структуры от 30 до 70°C в сформированных на LBO CS-частицах составило 6 мТ (в 1.75 раза), а в X-частицах — 8 мТ (в 1.53 раза).

Метод создания масок (сканирующая зондовая литография) обусловил разброс сформированных частиц по форме и латеральным размерам. Это приводит к изменению поля переключения для каждой из них, и на полученных зависимостях наблюдается наклон (рис. 2). Кроме того, форма частиц сказывается и на наблюдаемом поведении изменения величины поля переключения при нагревании/охлаждении, поскольку направление

наведенной магнитоупругой анизотропии в этом случае тоже меняется (рис. 1, a).

Таким образом, продемонстрировано, что квазиоднородная структура намагниченности в Ni-частицах может сохраняться при размерах, заметно превышающих радиус однодоменного состояния, за счет конфигурационной анизотропии. Показано, что даже небольшое изменение температуры образца, состоящего из монокристаллической подложки с разными коэффициентами теплового расширения и сформированных на ней ферромагнитных частиц с конфигурационной анизотропией и квазиоднородной структурой намагниченности, может приводить к существенному изменению поля переключения таких частиц.

### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 23-29-00085).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] B. Lambson, Z. Gu, M. Monroe, S. Dhuey, A. Scholl, J. Bokor, *Appl. Phys. A*, **111**, 413 (2013). DOI: 10.1007/s00339-013-7654-y
- [2] P.B. Горев, О.Г. Удалов, *ФТТ*, **61** (9), 1614 (2019). DOI: 10.21883/FTT.2019.09.48099.02N [R.V. Gorev, O.G. Udalov, *Phys. Solid State*, **61**, 1563 (2019). DOI: 10.1134/S1063783419090087].
- [3] J. Cui, S.M. Keller, C.-Y. Liang, G.P. Carman, C.S. Lynch, *Nanotechnology*, **28**, 08LT01 (2017). DOI: 10.1088/1361-6528/aa56d4
- [4] S. Bandyopadhyay, J. Atulasimha, A. Barman, *Appl. Phys. Rev.*, **8**, 041323 (2021). DOI: 10.1063/5.0062993
- [5] А.А. Бухараев, А.К. Звездин, А.П. Пятаков, Ю.К. Фетисов, *УФН*, **188** (12), 1288 (2018). DOI: 10.3367/UFNr.2018.01.038279 [A.A. Bukharaev, A.K. Zvezdin, A.P. Pyatakov, Yu.K. Fetisov, *Phys. Usp.*, **61**, 1175 (2018). DOI: 10.3367/UFNe.2018.01.038279].
- [6] А.А. Bukharaev, D.A. Bizyaev, N.I. Nurgazizov, A.P. Chuklanov, N.Kh. Useinov, *J. Magn. Magn. Mater.*, **500**, 166315 (2020). DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.166315
- [7] Д.А. Бизяев, А.П. Чукланов, Н.И. Нургазизов, А.А. Бухараев, Письма в ЖЭТФ, **118** (8), 602 (2023). DOI: 10.31857/S1234567823200090 [D.A. Bizyaev, A.P. Chuklanov, N.I. Nurgazizov, A.A. Bukharaev, *JETP Lett.*, **118**, 591 (2023). DOI: 10.1134/S0021364023602968].
- [8] Д.А. Бизяев, А.А. Бухараев, А.С. Морозова, Н.И. Нургазизов, А.П. Чукланов, *ЖТФ*, **93** (7), 913 (2023). DOI: 10.21883/JTF.2023.07.55745.56-23 [D.A. Bizyaev, A.A. Bukharaev, A.S. Morozova, N.I. Nurgazizov, A.P. Chuklanov, *Tech. Phys.*, **68**, 849 (2023). DOI: 10.61011/TP.2023.07.56626.56-23].
- [9] M.J. Donahue, D.G. Porter, *OOMMF User's Guide. Version 1.0* (Natl. Inst. Standards Technol., Gaithersburg, USA, 1999). <http://math.nist.gov/oommf>