

05,13

Сравнение реакции доменной структуры различных ферромагнитных микрочастиц на действие одноосного механического напряжения

© Н.И. Нургазизов¹, Д.А. Бизяев¹, А.А. Бухараев¹, А.П. Чукланов¹, В.Я. Шур², А.Р. Ахматханов²

¹ Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского, ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань, Россия

² Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

E-mail: niazn@mail.ru

Поступила в Редакцию 17 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 17 апреля 2023 г.

Принята к публикации 11 мая 2023 г.

Приводятся результаты исследования изменения доменной структуры планарной квадратной микрочастицы размерами $7.5 \times 7.5 \times 0.04 \mu\text{m}$, изготовленной из следующих материалов: пермаллой (18% Fe, 82% Ni), пермендиор (50% Co, 50% Fe), галфенол (16% Ga, 84% Fe), Ni, терфенол ($\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_{1.92}$) под действием одноосных механических напряжений. Сделаны выводы о перспективности использования данных материалов для создания микросенсоров механических напряжений и стрейнтронных устройств для обработки и хранения информации.

Ключевые слова: магнитоупругий эффект, магнитная силовая микроскопия, планарные ферромагнитные микрочастицы, доменная структура,

DOI: 10.21883/FTT.2023.06.55650.07H

1. Введение

В последнее время много внимания уделяется изучению влияния одноосных механических напряжений на магнитные свойства различных объектов. Наибольший интерес вызывают планарные микро и наноструктуры, так как на их основе возможно создание устройств для записи, обработки и хранения информации. Согласно теоретическим оценкам, устройства, работающие на магнитоупругом эффекте (эффекте Виллари), могут на несколько порядков снизить потери энергии, происходящие при записи или обработке одного бита информации по сравнению с традиционными методами [1–4]. В качестве основы для создания устройств обычно рассматривается однородно (или квазиоднородно) намагниченная частица, имеющая две или больше возможных ориентаций направления намагниченности. Для переключения направления намагниченности в такой частице и предполагается использовать магнитоупругий эффект. Наиболее перспективным для этого считается использование сегнетоэлектрических подложек, которые могут обеспечить минимальное энергопотребление [5–7], однако при проведении поисковых исследований часто используются и другие варианты. Наиболее легко реализуемым является вариант с механическим изгибом подложки, на которой расположены частицы [8–10]. Также возможно применение термоиндуцированного магнитоупругого эффекта, когда механические напряжения наводятся изменением температуры образца вследствие разности в термических коэффициентах расширения подложки по разным кристаллографическим осям [11,12] или за счет

изменения размеров ее кристаллической решетки при фазовом переходе [13].

Однако при наведении механических напряжений в частицах возникает вопрос о том, насколько эффективно передается изменение линейных размеров подложки на частицу, и насколько сильно это влияет на ее магнитные свойства (в частности, на изменение направления намагниченности). Понятно, что чем меньшим механическим напряжением можно изменить направление намагниченности частицы, тем более энергоэффективным может стать созданное на ее основе устройство. Одной из актуальных задач при этом становится подбор материала для изготовления частицы, который обеспечит ей необходимые магнитные свойства. Очевидно, что чем выше абсолютное значение магнитострикции материала, тем сильнее изменяются его линейные размеры под действием внешнего магнитного поля. Данная работа посвящена изучению влияния магнитострикции материала на изменение его магнитных свойств под действием одноосного механического напряжения. Для этого оценивается влияние величины одноосного механического напряжения на доменную структуру планарных микрочастиц одинаковой квадратной формы и размеров, изготовленных из разных ферромагнитных материалов.

2. Выбор объекта исследования

Для тестирования изменения магнитных свойств под действием механических напряжений нужно чтобы эти изменения происходили плавно. Поэтому однодоменные частицы здесь плохо подходят. Процесс переключения

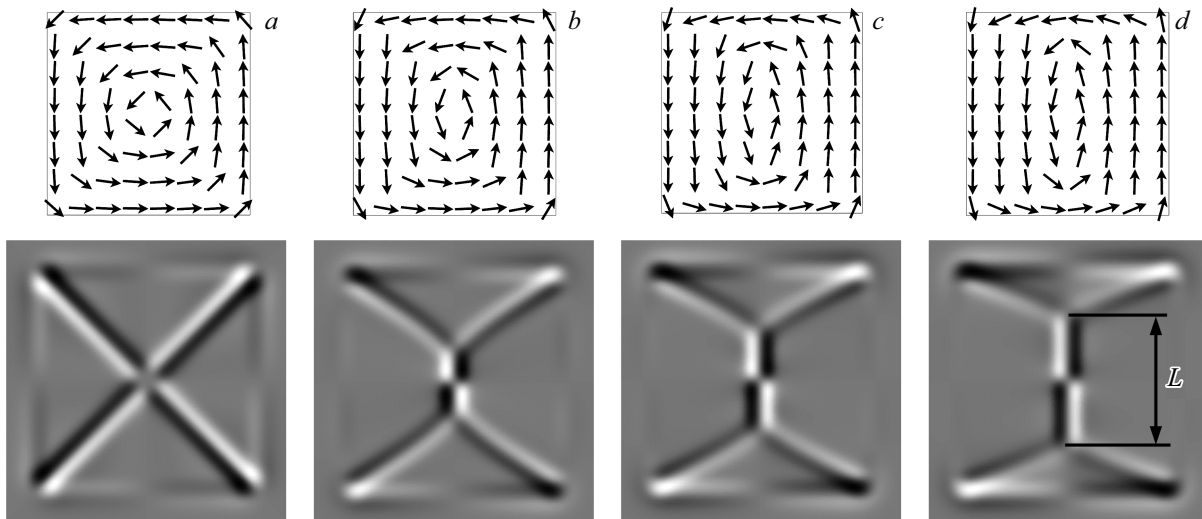


Рис. 1. Смоделированное распределение намагниченности в планарной CoNi микрочастице (*a, b, c, d*) и виртуальное MCM изображение (*e, f, g, h*) при энергии наведенной анизотропии, соответствующей механическому напряжению 0 МПа (*a, e*), 27 МПа (*b, f*), 43 МПа (*c, g*), 59 МПа (*d, h*). L — длина доменной стенки между двумя увеличившимися в размерах доменами. Размер скана $9.5 \times 9.5 \mu\text{m}$. Градации цвета соответствуют размаху фазы 1° .

намагниченности в них носит пороговый характер и может сильно отличаться от частицы к частице при очень небольшом разбросе геометрических параметров. Поэтому оптимальным микросенсором для решения такой задачи может стать микрочастица, доменная структура которой будет плавно изменяться при изменении действующего на нее механического напряжения, и это изменение можно будет численно охарактеризовать. При этом доменная структура частицы должна быть достаточно простой для того, чтобы можно было однозначно интерпретировать данные об изменении этой структуры под действием механических напряжений. Размеры такого микросенсора должны быть по размерам сопоставимы с размерами частицы, используемой для создания устройств, работающих на магнитоупругом эффекте.

Оптимальными микросенсорами, на наш взгляд, могут стать планарные микрочастицы квадратной формы. В определенном диапазоне латеральных размеров и высоты, при отсутствии внешних воздействий, такие микрочастицы имеют четырехдоменную структуру с направлением намагниченности в домене параллельным стороне, у которой они расположены, так называемую структуру Ландау (рис. 1, *a*). Квадратная форма частицы позволяет направить одноосное напряжение вдоль одной из сторон, что за счет магнитоупругого эффекта будет приводить к появлению оси анизотропии, коллинеарной направлению намагниченности двух доменов, размер которых будет изменяться за счет двух других. При этом между двумя доменами, увеличившимися в размерах, образуется доменная стенка (рис. 1, *b–d*). Для характеристики изменений, происходящих в доменной структуре квадратной микрочастицы, можно использовать длину этой доменной стенки (L), что делалось нами

ранее [8,12] или соотношение площади, занимаемой доменами с перпендикулярным друг другу направлением намагниченности [5]. В случае, например, треугольной формы частицы вдоль оси анизотропии, наведенной за счет магнитоупругого эффекта, может быть направлена намагниченность только одного домена. Направление намагниченности двух других доменов будет находиться под углом к этой оси, и интерпретация получаемых данных может быть затруднена. Оптимально использовать не абсолютную длину доменной стенки, наблюдаемую в квадратной микрочастице, а привести ее к длине стороны. Это позволит сравнивать между собой микрочастицы с разными размерами, и исследовать влияние размеров на магнитные свойства.

В нашем случае моделирование было проведено для планарных микрочастиц размерами $7.5 \times 7.5 \times 0.04 \mu\text{m}$. Это в первую очередь связано с достаточно простой технологией изготовления таких микрочастиц и возможностью сравнивать полученные теоретические результаты с экспериментальными. Для создания таких микрочастиц используется напыление через маску в сверхвысоком вакууме методом распыления твердотельной мишени электронным лучом. В качестве маски используется металлическая сетка, плотно прижатая к поверхности подложки. Такая маска может использоваться многократно и при необходимости легко заменяется на аналогичную новую, т.к. представляет собой стандартную сетку 2000 mesh для электронной микроскопии. Область, которую на поверхности подложки занимают микрочастицы, представляет из себя окружность диаметром около 2 mm, что позволяет использовать для изучения магнитных свойств не только магнитно-силовую микроскопию (MCM), но и другие методы.

Параметры материалов, использованные при моделировании распределения намагниченности в микрочастицах. В скобках указаны максимальные возможные значения

Материал	Намагниченность насыщения (кА/м)	Константа обменного взаимодействия $\times 10^{-12} \text{ J/m}^3$	Магнитострикция насыщения ($\times 10^{-6}$)
Pu (82% Ni, 18% Fe)	800	13	-3
CoNi (18% Co, 82% Ni)	650	11.2	-25
Никель	490	9	-35
Пермендюр (50% Co, 50% Fe)	1950	18	60
Галфенол (16% Ga, 84% Fe)	1432	10	200 (400)
Терфенол ($\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_{1.92}$)	800	9	800 (2000)

3. Моделирование доменной структуры квадратных микрочастиц

Для проведения моделирования распределения намагниченности в микрочастице использовался программный пакет OOMMF [14]. Предполагалось сопоставить полученные теоретические данные о поведении доменной структуры под действием одноосных механических напряжений с экспериментальными МСМ-измерениями. Для этого по полученному распределению намагниченности рассчитывалось виртуальное МСМ-изображение с помощью, разработанной ранее программы „Виртуальный МСМ“ [15].

Особый интерес при проведении моделирования представляли материалы, обладающие гигантским значением магнитострикции при комнатной температуре. К ним можно отнести сплавы терфенол ($\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_{1.92}$) и галфенол (16% Ga, 84% Fe). Также была смоделирована доменная структура микрочастиц, изготовленных из сплава пермаллой (Pu) (82% Ni, 18% Fe), сплава пермендюр (50% Co, 50% Fe), сплава CoNi (18% Co, 82% Ni), никеля (Ni). При моделировании использовались параметры, представленные в таблице. Микрочастица разбивалась на элементарные ячейки размером $5 \times 5 \times 40 \text{ nm}$. Направление одноосных механических напряжений при моделировании задавалось вдоль одной из сторон микрочастицы. Влияние наводимых механических напряжений на распределение намагниченности учитывалось введением в расчеты константы одноосной анизотропии (K_{eff}), значение которой увеличивалось от 0 до 2000 J/m^3 с шагом 200 J/m^3 , от 2000 до 5000 J/m^3 с шагом 400 J/m^3 , для некоторых микрочастиц были проведены дополнительные расчеты в интервале от 5000 до 15000 J/m^3 с шагом 1000 J/m^3 . Значение K_{eff} можно пересчитать в величину механического напряжения (σ), действующего на микрочастицу, исходя из формулы: $\sigma = -2/3 \cdot K_{\text{eff}}/\lambda_s$, где λ_s — это константа магнитострикции насыщения используемого материала [5].

Результаты зависимости длины перемишки от действующего на микрочастицу механического напряжения

приведены на рис. 2. Наиболее слабо реагирующей на механические напряжения ожидаемо оказалась микрочастица, изготовленная из пермаллой со значением магнитострикции $-3 \cdot 10^{-6}$. Далее следует пермендюр несмотря на то, что у него достаточно большое значение магнитострикции. Однако при этом он имеет самое высокое значение намагниченности насыщения и обменного взаимодействия, что и приводит к такому эффекту. Несмотря на высокое значение магнитострикции у галфенола (200×10^{-6}), его доменная структура слабее реагирует на наведенные механические напряжения, чем у никеля (-35×10^{-6}), что также, по всей видимости, связано с высоким значением намагниченности насыщения. Сильнее всего изменяется доменная структура у микрочастиц изготовленных из терфенола, что, по всей видимости, связано с наибольшим значением магнитострикции и средними значениями намагниченности насыщения. Для изменения доменной структуры

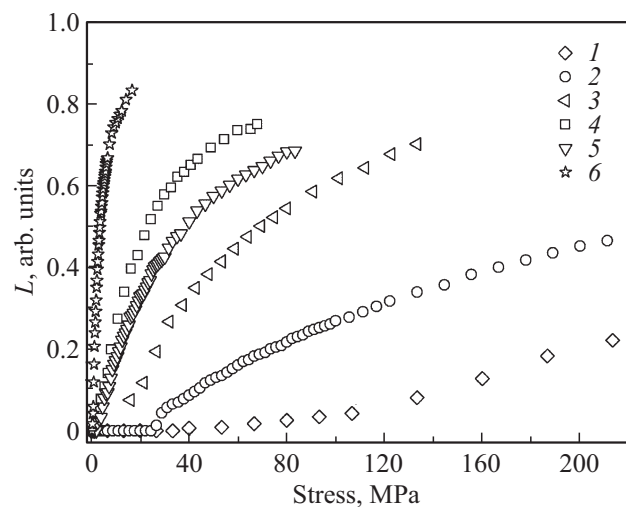


Рис. 2. Зависимость длины доменной стенки (L) от одноосного механического напряжения, наведенного в квадратной микрочастице, сформированной из различных материалов: 1 — Pu, 2 — CoFe, 3 — CoNi, 4 — Ni, 5 — галфенол, 6 — терфенол.

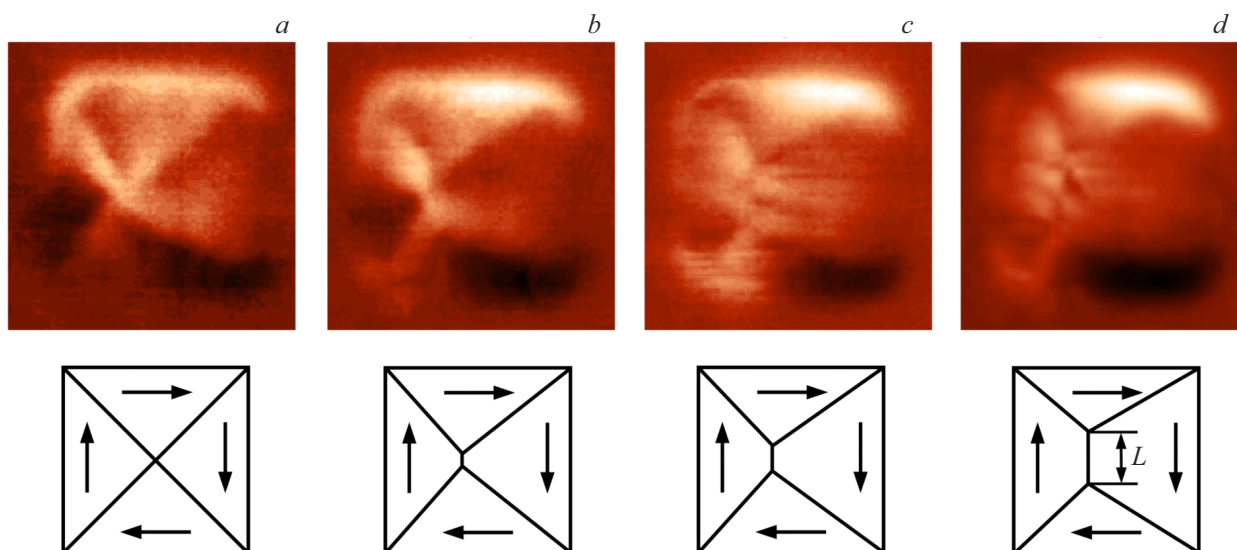


Рис. 3. МСМ-изображение CoNi микрочастицы под действием одноосных механических напряжений: 0 МПа (*a*), 15 МПа (*b*), 23 МПа (*c*), 30 МПа (*d*). Сжатие микрочастицы происходит вдоль вертикальной оси. Под МСМ изображением схематично изображена доменная структура микрочастицы L — длина доменной стенки между двумя увеличившимися в размерах доменами. Размер скана $10.5 \times 10.5 \mu\text{m}$. Градации цвета соответствуют размаху фазы 0.5° .

такой микрочастицы достаточно напряжений в диапазоне 0.5–10 МПа. Более высокие значения напряжения скорее всего приведут к состоянию квазиоднородной намагниченности микрочастицы.

4. Экспериментальные данные об изменении доменной структуры микрочастиц под действием одноосных механических напряжений

Полученные расчетные данные о влиянии одноосных механических напряжений на доменную структуру микрочастицы были протестированы экспериментально на примере микрочастиц изготовленных из CoNi и Ni. Для этого на поверхности подложек из оптически полированного монокристаллического ниобата лития LiNbO₃ (CLN) были сформированы массивы микрочастиц размерами $7.5 \times 7.5 \times 0.04 \mu\text{m}$. Напыление микрочастиц проводилось в условиях сверхвысокого вакуума при комнатной температуре. Металлическая сетка, которая использовалась в качестве маски для создания микрочастиц, была ориентирована таким образом, чтобы стороны получаемых микрочастиц были параллельны осям „*a*“ и „*c*“ кристаллической подложки. За счет того, что коэффициент линейного расширения CLN по оси „*a*“ ($\alpha_1 = 15 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$) в два раза выше, чем по оси „*c*“ ($\alpha_3 = 7.5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$), можно было создавать одноосные механические напряжения в микрочастицах, изменяя температуру образца. Исходя из коэффициентов теплового расширения Ni ($13 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$) и Co ($12 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$),

нагрев образца должен приводить к сжатию микрочастиц вдоль оси „*c*“ подложки.

Для контроля геометрических параметров полученных микрочастиц и исследования их доменной структуры использовался сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) Solver P47 (NT MDT). СЗМ был дополнительно оборудован термоячейкой, которая позволяла нагревать образец до температуры 110°C . МСМ-измерения проводились по однопроходной методике (когда во время сканирования зонд находится на постоянном удалении от исследуемой поверхности) для того, чтобы снизить возможное влияние зонда на распределение намагниченности в микрочастицах. Для измерений использовались магнитные кантилеверы „Multi75M-G“ (BudgetSensor) и „PPP-LM-MCMR“ (Nanosensor). При проводимых экспериментах один МСМ-скан содержал изображение 4 или 9 микрочастиц, для каждой из которых находилась длина доменной стенки (L) между двумя увеличившимися в размерах доменами при заданной температуре. Полученные значения усреднялись. Шаг по температуре составил 5°C . Температура нагрева образца не превышала 65°C , т.к. дальнейший нагрев мог приводить к необратимым изменениям в доменной структуре микрочастиц. При температурах ниже 65°C после остывания образца до комнатной температуры, его доменная структура возвращалась к изначальному виду. Как показали МСМ-измерения при комнатной температуре у микрочастиц наблюдалась классическая четырехдоменная структура (рис. 3, *a*). Под МСМ-изображением схематично представлено изображение доменной структуры такой CoNi микрочастицы. Небольшая разница в площади доменов наблюдаемая на рис. 3, *a* в отличии от модельной

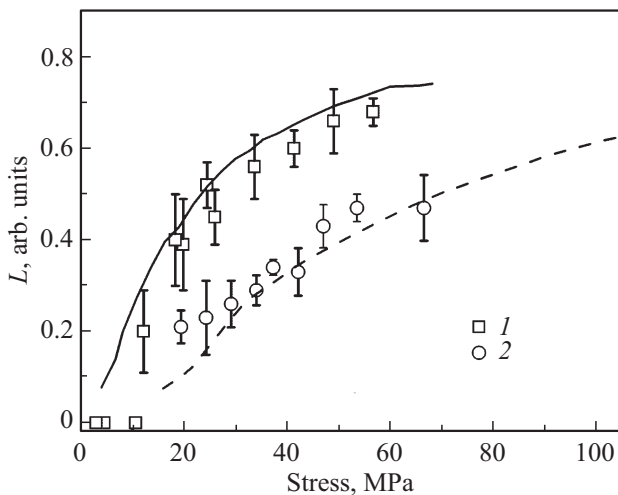


Рис. 4. Экспериментальная зависимость длины доменной стенки (L) от одноосного механического напряжения, наведенного в квадратной микрочастице ($7.5 \times 7.5 \times 0.04 \mu\text{m}$), изготовленной из Ni (1) и CoNi (2). Сплошная линия — OOMMF расчеты для Ni микрочастицы, штриховая — для CoNi.

микрочастицы (рис. 1, *a*) связана, по нашему мнению, с неидеальной квадратной формой микрочастицы.

Увеличение температуры образца на 5°C практически не изменяет наблюдаемую на рис. 3, *a* доменную структуру микрочастиц. Изменения становятся заметны при нагреве на 10°C (что соответствует механическому напряжению $\sim 15 \text{ MPa}$), между доменами появляется перемычка, длину которой (L) можно измерить по МСМ-изображению (рис. 3, *b*). Дальнейшее увеличение температуры приводит к увеличению длины этой доменной стенки (рис. 3, *c, d*). У никелевых микрочастиц наблюдаются аналогичные изменения доменной структуры, только они происходят при меньших значениях механического напряжения, действующего на микрочастицу.

Полученные экспериментальные данные об изменении длины доменной стенки для Ni и CoNi микрочастиц представлены на рис. 4. Наблюдается хорошее совпадение экспериментальных результатов с результатами моделирования. Одноосное механическое напряжение одинаковой величины приводит к практически в два раза большему изменению длины доменной стенки у Ni микрочастиц по сравнению с CoNi.

Проведенные исследования показывают, что квадратная планарная микрочастица может использоваться в качестве микросенсора для детектирования механических напряжений. При этом, изменяя материал, из которого изготовлена микрочастица, можно выбрать, например, самый чувствительный к механическому напряжению материал или подобрать материал, доменная структура которого будет изменяться в определенном диапазоне механических напряжений.

5. Заключение

Было показано, что изменение магнитной структуры ферромагнитной микрочастицы зависит не только от магнитоstriction, но и от намагниченности насыщения используемого материала. Чем больше модуль магнитоstriction микрочастицы и ниже ее намагниченность насыщения, тем сильнее изменяется ее доменная структура под действием механического напряжения. Моделирование изменения доменной структуры микрочастиц под действием механического напряжения хорошо совпало с экспериментальными результатами о поведении доменной структуры Ni и CoNi микрочастиц. Наиболее перспективным материалом из исследованных в данной работе с точки зрения реакции на механическое напряжение является терфенол.

Благодарности

Авторы статьи хотели бы выразить благодарность УЦКП „Современные нанотехнологии“ УрФУ (рег. № 2968) за помощь в подготовке подложек для формирования микрочастиц.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-29-00352).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.K. Biswas, S. Bandyopadhyay, J. Atulasimha. *Appl. Phys. Lett.* **104**, 23, 232403 (2014).
- [2] J. Atulasimha, S. Bandyopadhyay. *Nanomagnetic and Spintronic Devices for Energy-Efficient Memory and Computing*. WILEY (2016). 352 c.
- [3] A.A. Бухараев, A.K. Звездин, A.П. Пятаков, Ю.К. Фетисов. *УФН* **188**, 1288, (2018).
- [4] S. Bandyopadhyay, J. Atulasimha, A. Barman. *Appl. Phys. Rev.* **8**, 041323 (2021).
- [5] S. Finizio, M. Foerster, M. Buzzi, B. Kruger, M. Jourdan, C.A.F. Vaz, J. Hockel, T. Miyawaki, A. Tkach, S. Valencia, F. Kronast, G.P. Carman, F. Nolting, M. Klau. *Phys. Rev. Appl.* **1**, 021001 (2014).
- [6] Y. Zhang, Z. Wang, Y. Wang, C. Luo, J. Li, D. Viehland. *J. Appl. Phys.* **115**, 084101 (2014).
- [7] A. Chen, Y. Zhao, Y. Wen, L. Pan, P. Li, X. Zhang. *Sci. Adv.* **5**, eaay5141 (2019).
- [8] Н.И. Нургазизов, Д.А. Бизяев, A.A. Бухараев, A.П. Чукланов. *ФТТ* **62**, 9, 1503 (2020).
- [9] О.Л. Ермолаева, Н.С. Гусев, E.B. Скороходов, B.B. Рогов, O.Г. Удалов. *ФТТ* **61**, 9, 1623 (2019).

- [10] A. Bur, T. Wu, J. Hockel, C. Hsu, H. Kim, T. Chung, K. Wong, K.L. Wang, G.P. Carman. *J. Appl. Phys.* **109**, 123903 (2011).
- [11] D.A. Bizyaev, A.A. Bukharaev, N.I. Nurgazizov, A.P. Chuklanov, S.A. Migachev. *Phys. Status Solidi Rapid Res. Lett.* **2000256** (2020).
- [12] Н.И. Нургазизов, Д.А. Бизяев, А.А. Бухараев, А.П. Чуکلанов, В.Я. Шур, А.Р. Ахматханов. *ФТТ* **64**, 9, 1316 (2022).
- [13] J. Venta, S. Wang, J.G. Ramirez, I.K. Schuller. *Appl. Phys. Lett.* **102**, 122404 (2013).
- [14] M.J. Donahue, D.G. Porter. OOMMF User's Guide <http://math.nist.gov/oommf>
- [15] Д.В. Овчинников, А.А. Бухараев. *ЖТФ* **71**, 8, 85 (2001).

Редактор Д.В. Жуманов