

05,13

Влияние термоиндуцированного магнитоупругого эффекта на доменную структуру планарных Ni-микрочастиц

© 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 29 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 29 апреля 2022 г.

Принята к публикации 12 мая 2022 г.

Приведены результаты исследования доменной структуры планарных Ni-микрочастиц, сформированных на монокристаллических подложках из ниобата лития и титанил-фосфата калия при различных температурах. Исследована зависимость размера доменов от температуры образца. Показано, что наблюдаемое изменение доменной структуры обусловлено магнитоупругим эффектом, возникающим за счет разности в термических коэффициентах расширения подложки и микрочастиц при изменении температуры образца. Показано, что, изменяя температуру подложки при формировании частиц, можно задавать размеры магнитных доменов, вплоть до создания состояния с квазиоднородной намагниченностью микрочастицы.

Ключевые слова: магнитоупругий эффект, магнитная силовая микроскопия, перемагничивание, ниобат лития, титанил-фосфат калия, температура.

DOI: 10.21883/FTT.2022.09.52826.29NN

1. Введение

Одним из возможных способов изменения магнитных свойств может стать использование магнитоупругого эффекта (эффекта Виллари), при котором за счет одноосного механического напряжения в магнитной среде наводится магнитная анизотропия. Наиболее перспективным в настоящее время считается использование такого подхода для изменения направления намагниченности микро и наночастиц. Если отдельная частица выступает в качестве среды для записи бита информации, то, по проведенным теоретическим оценкам, потери рассеиваемой энергии, могут быть снижены на несколько порядков по сравнению с традиционной записью информации внешним магнитным полем [1–5]. Направление исследований, когда для управления магнитными свойствами микро и нанообъектов используются механические напряжения, получило название стрейнтроники [1,4].

Для создания механических напряжений в микро и наноструктурах могут использоваться различные методы. Одним из наиболее перспективных методов создания одноосных механических напряжений в планарных частицах является использование подложек из пьезоэлектрических материалов, линейные размеры которых могут контролируемо изменяться под действием электрического поля [4–7]. Однако при проведении поисковых исследований часто используются и другие методы, например, механическое воздействие на подложку со сформированными на ней магнитными структурами [8]. Также механические напряжения могут создаваться за счет изменения температуры образца [9,10]. В этом

случае фактором, определяющим создаваемые механические напряжения, может стать фазовый переход материала подложки или использование разницы в термических коэффициентах расширения между подложкой и сформированными на ней структурами. Последний вариант подложек может оказаться интересным для создания тестовых структур, т.к. он позволяет плавно изменять механическое напряжение, действующее на магнитную структуру за счет плавного изменения температуры. Кроме того, сформировав микрочастицы на поверхности подложки при температуре, отличной от той, при которой будут проводиться дальнейшие исследования, можно заранее задать в них величину действующего механического напряжения.

В настоящей работе были проведены исследования доменной структуры планарных Ni-микрочастиц квадратной формы, которые имели латеральный размер $7.5 \mu\text{m}$ и высоту $0.03 \mu\text{m}$. Микрочастицы формировались на поверхности монокристаллических подложек из конгруэнтного ниобата лития LiNbO_3 (CLN) и титанил-фосфата калия KTiOPO_4 (КТР) при температурах от комнатной и до 80°C . Для проведения исследования использовались методы магнитно-силовой микроскопии (МСМ) и компьютерного моделирования.

2. Создание образцов и методика проведения исследований

Для создания микрочастиц были использованы монокристаллические подложки с оптически полированной

поверхностью (Crystal Technology Inc.). Подложки из CLN были вырезаны таким образом, что кристаллографическая ось c и перпендикулярная ей ось a лежали в плоскости, на которой формировались микрочастицы. Размеры таких подложек составляли $9 \times 3 \times 1$ mm. При этом ось c была направлена вдоль длинной стороны подложки, что позволяло ее ориентировать при напылении и измерениях. Согласно данным производителя, температурный коэффициент линейного расширения CLN вдоль оси a $\alpha_a = 15 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, а вдоль оси c $\alpha_c = 7.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Таким образом расширение кристалла при нагревании вдоль оси a в 2 раза больше, чем вдоль оси c . КТР подложки были вырезаны таким образом, чтобы кристаллографические оси Y и Z лежали в плоскости для формирования частиц, термические коэффициенты расширения вдоль которых составляли $\alpha_y = 9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ и $\alpha_z = 0.6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Размеры таких подложек составляли $10 \times 4 \times 1$ mm и длинная сторона была направлена вдоль оси Y .

Методом распыления твердотельной мишени электронным лучом в условиях сверхвысокого вакуума на поверхности подложек формировались массивы планарных никелевых микрочастиц квадратной формы. Напыление проводилось через прижатую к поверхности металлическую сетку с одинаковыми квадратными отверстиями. В одном цикле напыления создавалось два образца на подложках первого и второго типа. Было изготовлено четыре партии образцов при температурах: 32, 45, 60 и 80°C, что позволило изменять направление наводимой в микрочастицах магнитоупругой анизотропии, нагревая или охлаждая образец относительно температуры напыления. После формирования микрочастиц сетка удалялась и на поверхность образца при тех же температурах напылялась сплошная пленка Ni толщиной 3 nm для нейтрализации электростатического взаимодействия МСМ-зонда с образцом. При проведении измерений пленка и МСМ-зонд заземлялись. Пленка напылялась при параметрах, аналогичных параметрам напыления микрочастиц для того, чтобы иметь одинаковые температурные коэффициенты линейного расширения. Использование других проводящих пленок для нейтрализации заряда кристалла могло привести к созданию дополнительных механических напряжений в микрочастицах при изменении температуры.

Расстояние между сторонами соседних частиц $5.2 \mu\text{m}$ позволило исключить влияние магнитной структуры одной частицы на соседние. Сформированный массив микрочастиц занимал площадь около 4 mm^2 , что позволяло при МСМ-исследованиях выбирать необходимый ансамбль микрочастиц. Полученные Ni-микрочастицы имели поликристаллическую структуру и коэффициент линейного расширения равный $13 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [11]. Константа магнитоэлектрического насыщения (λ_s) микрочастиц имела отрицательный знак и была равна $-37 \cdot 10^{-6}$ [12].

Соотношение коэффициентов линейного расширения микрочастиц и подложки должно было привести к тому,

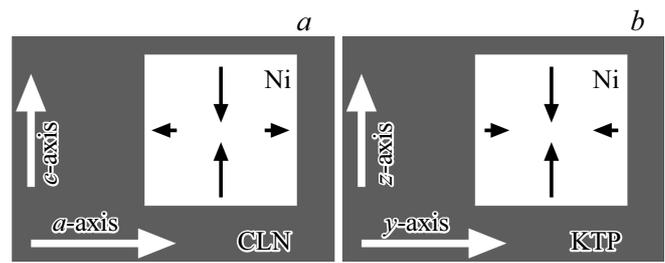


Рис. 1. Схема расположения Ni-микрочастицы на подложках из ниобата лития (a) и титанил-фосфата калия (b) и действующих на нее сил при нагреве образца выше температуры формирования частиц.

что на CLN-подложках нагрев образца выше температуры напыления вызовет в основном сжатие микрочастиц вдоль оси c кристаллической подложки и их небольшое расширение вдоль оси a (рис. 1, a). За счет отрицательного знака магнитоэлектричества это приведет к формированию оси легкого намагничивания микрочастиц вдоль оси c подложки. При охлаждении образца ниже температуры напыления будет происходить в основном растяжение микрочастицы вдоль оси c и слабое сжатие вдоль оси a , что приведет к формированию оси легкого намагничивания микрочастиц вдоль оси a . При этом и сжатие, и растяжение микрочастицы на CLN-подложках приведет к наведению магнитной анизотропии в одном направлении.

При нагреве микрочастиц на КТР-подложках выше температуры напыления должно происходить в основном сжатие микрочастиц вдоль оси z кристаллической подложки и их небольшое сжатие вдоль оси y (рис. 1, b). Это приводит к формированию оси легкого намагничивания вдоль оси z , а сжатие вдоль оси y ослабляет наводимую одноосную анизотропию. При охлаждении образца ниже температуры напыления должно происходить в основном растяжение микрочастицы вдоль оси z и небольшое растяжение вдоль оси y , что приводит к формированию оси легкого намагничивания микрочастиц вдоль оси y .

Для изучения геометрических параметров и распределения намагниченности в микрочастицах использовался сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) Solver P47 (NT MDT), дополнительно снабженный электромагнитом и термокамерой, что позволяло в процессе МСМ-измерений создавать постоянное магнитное поле до $\pm 16 \text{ mT}$ в плоскости образца и нагревать его до температуры 110°C. МСМ-измерения проводились по однопроводной 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. Использовались магнитные кантилеверы „Multi75M-G“ (BudgetSensor) и „PPP-LM-MCMR“ (Nanosensor).

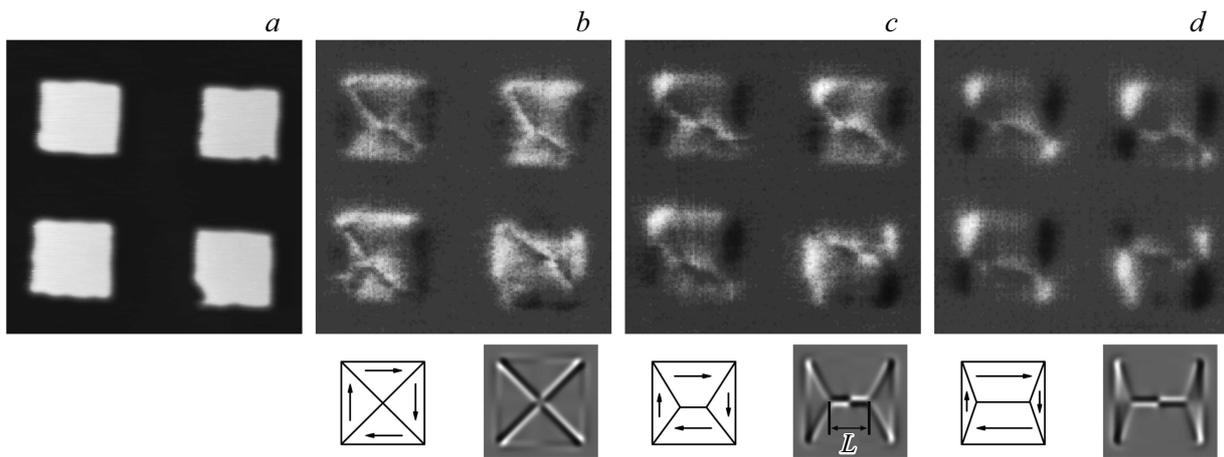


Рис. 2. АСМ-изображение Ni-микрочастиц — (а), сформированных при комнатной температуре на подложке CLN, и соответствующие МСМ-изображения этих микрочастиц, полученные при комнатной температуре — (b), 40°С — (c), 60°С — (d). Под каждым МСМ-изображением схематично представлено распределение намагниченности в микрочастице, смоделированное при помощи ООММФ, и соответствующее этому распределению виртуальное МСМ-изображение. Поле сканирования $23 \times 23 \mu\text{m}^2$. Размах высот на АСМ-изображении (а), соответствующий градиентам серого равен 35 nm. Размах фазы для МСМ-изображений, соответствующий градиентам серого равен 1° . L — длина доменной стенки между двумя доменами, увеличившимися за счет наведенной магнитоупругой анизотропии.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) полученных образцов показала, что сформированные микрочастицы имеют хорошую повторяемость формы и размеров на всей занимаемой области (рис. 2, а). Размеры частиц составили $7.5 \times 7.5 \times 0.03 \mu\text{m}^3$. Краевые дефекты некоторых микрочастиц не оказывали заметного влияния на МСМ-изображение (рис. 2).

Исследование магнитной структуры Ni-микрочастиц, которые были сформированы без дополнительного подогрева подложек показало, что при комнатной температуре, доменная структура состоит из четырех доменов приблизительно одинакового размера, направление намагниченности в которых параллельно стороне, у которой расположен домен (рис. 2, b). Это так называемая структура Ландау, которая характерна для квадратных планарных частиц, на которые не действует механическое напряжение и внешнее магнитное поле. Увеличение температуры образца приводит к наведению механического напряжения в микрочастицах и изменению доменной структуры. За счет сжатия частицы в направлении оси c для CLN подложек или оси z для подложек КТР и отрицательного знака магнитоупругости микрочастиц, увеличиваются домены, направление намагниченности которых направлено вдоль этих осей (рис. 2, c). Между этими доменами формируется доменная стенка, длина (L) которой пропорциональна размерам увеличившихся доменов, и которая может быть использована для характеристики действующего на частицу механического напряжения [8]. С увеличением

температуры образца увеличивается длина этой доменной стенки (рис. 2, d).

Образцы, сформированные при температурах выше комнатной, имели в основном четырехдоменную структуру. При этом два домена были увеличены в размерах и между ними наблюдалась характерная доменная стенка. В микрочастицах на CLN-подложках направление намагниченности в этих доменах было перпендикулярно оси c , что говорит о растяжении частиц в данном направлении (рис. 3, a). В микрочастицах на КТР-подложках увеличивались домены перпендикулярные оси z , что говорит о растяжении частиц в данном направлении.

У образца на CLN-подложке, сформированном при 80°С, некоторые микрочастицы при комнатной температуре находились в квазироднородно намагниченном состоянии (рис. 3, a). Увеличение температуры образца приводит к формированию четырехдоменной структуры в таких микрочастицах и к общему уменьшению размеров двух больших первоначальных доменов у всех микрочастиц (рис. 3, b). При температуре близкой к температуре формирования микрочастиц, размеры доменов становятся приблизительно одинаковыми (рис. 3, c), что свидетельствует о том, что термоиндуцированное одноосное механическое напряжение в микрочастице стремится к нулю и перестает влиять на доменную структуру. Дальнейшее увеличение температуры приводит к увеличению размера доменов, намагниченность которых направлена вдоль оси c для подложек CLN и вдоль оси z для подложек КТР.

Для характеристики изменений, наблюдаемых в доменной структуре микрочастиц, измерялась длина доменной стенки L , образующейся между двумя увеличившимися доменами. Отношение длины доменной

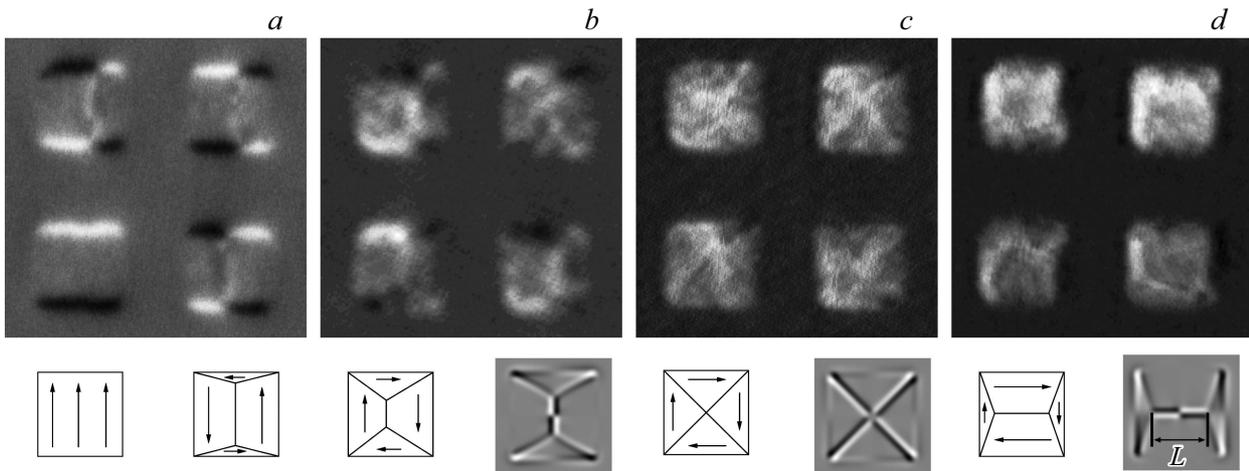


Рис. 3. МСМ-изображения Ni-микрочастиц, сформированных на CLN-подложке при температуре 80°C, полученные при: (a) комнатной температуре, (b) 70°C, (c) 80°C, (d) 100°C. Под МСМ-изображением (a) приведены только схемы распределения намагниченности в микрочастицах (квазиоднородная намагниченность для нижней левой частицы и четырехдоменная для остальных). Под остальными МСМ-изображениями приведены схемы распределения намагниченности в микрочастице смоделированные при помощи OOMMF и соответствующие этому распределению виртуальные МСМ-изображения. Поле сканирования $23 \times 23 \mu\text{m}^2$. Размах фазы для МСМ-изображений, соответствующий градициям серого равен 1° . L — длина доменной стенки между двумя доменами, увеличившимися за счет наведенной магнитоупругой анизотропии.

стенки к размеру микрочастицы в данном направлении усреднялось по 9 микрочастицам, полученным на одном МСМ-скане. Результаты измерений для всех образцов представлены на рис. 4. Измерения проводились с шагом 5°C , причем образец нагревался не более чем на 40°C относительно температуры формирования микрочастиц. Было установлено, что в этом случае при многократных циклах нагрева и охлаждения образца доменная структура микрочастицы возвращается к первоначальному состоянию. При нагреве более чем на 40°C доменная структура микрочастиц после охлаждения до комнатной температуры могла не вернуться к первоначальному состоянию.

В общем случае, исходя из полученного МСМ-изображения, нельзя однозначно восстановить распределение намагниченности в исследуемом объекте. При МСМ-измерениях регистрируется сигнал пропорциональный разнице фаз между сигналом, вызывающим колебания магнитного зонда на резонансной частоте, и сигналом, характеризующим эти колебания. Этот сигнал пропорционален градиенту силы взаимодействия зонда с магнитным полем образца в данной точке [13]. Для визуализации распределения намагниченности используют следующий подход. На основе данных о форме и размерах объекта, и параметрах, характеризующих его магнитные свойства (константа обменного взаимодействия, намагниченность насыщения, кристаллическая анизотропия и т.п.), рассчитывается такое распределение локальных магнитных моментов, при котором его магнитная энергия минимальна. Затем на основе этого распределения моделируется МСМ-изображение, которое сравнивается с экспериментальным. При совпадении

этих изображений делается вывод о том, что модельное распределение намагниченности соответствует реальному. Если изображения не совпадают, то варьируется какой-либо из параметров, на основе которых проводится моделирование.

Для моделирования магнитной структуры частицы была использована программа OOMMF [14] и по полученному распределению намагниченности рассчитывалось виртуальное МСМ-изображение. Для этого использовалась разработанная ранее программа „Virtual MFM“ [15], которая позволяет учитывать геометрические параметры зонда и высоту его перемещения над исследуемой структурой. При OOMMF-моделировании намагниченность насыщения Ni принималась равной 490 kA/m , константа обменного взаимодействия равной $9 \cdot 10^{-12} \text{ J/m}^3$ [14]. Влияние магнитоупругого эффекта на распределение намагниченности учитывалось введением в расчеты константы одноосной анизотропии (K_{eff}), значение которой увеличивалось от 0 до 5000 J/m^3 с шагом 100 J/m^3 . Направление анизотропии при моделировании задавалось параллельным одной из сторон микрочастицы. При $K_{\text{eff}} = 0$ в микрочастице наблюдалось четыре домена одинакового размера с направлением намагниченности параллельным стороне микрочастицы, около которой он расположен (рис. 2, b). Виртуальное МСМ-изображение, смоделированное на основе этого распределения, хорошо согласуется с экспериментальными (рис. 2, b, 3, c). При $K_{\text{eff}} > 300 \text{ J/m}^3$ начинается увеличение размера доменов, направление намагниченности которых совпадает с направлением анизотропии (рис. 2, c, d). При этом между двумя этими доменами формируется характерная перемычка, аналогичная наблюдаемой на эксперименталь-

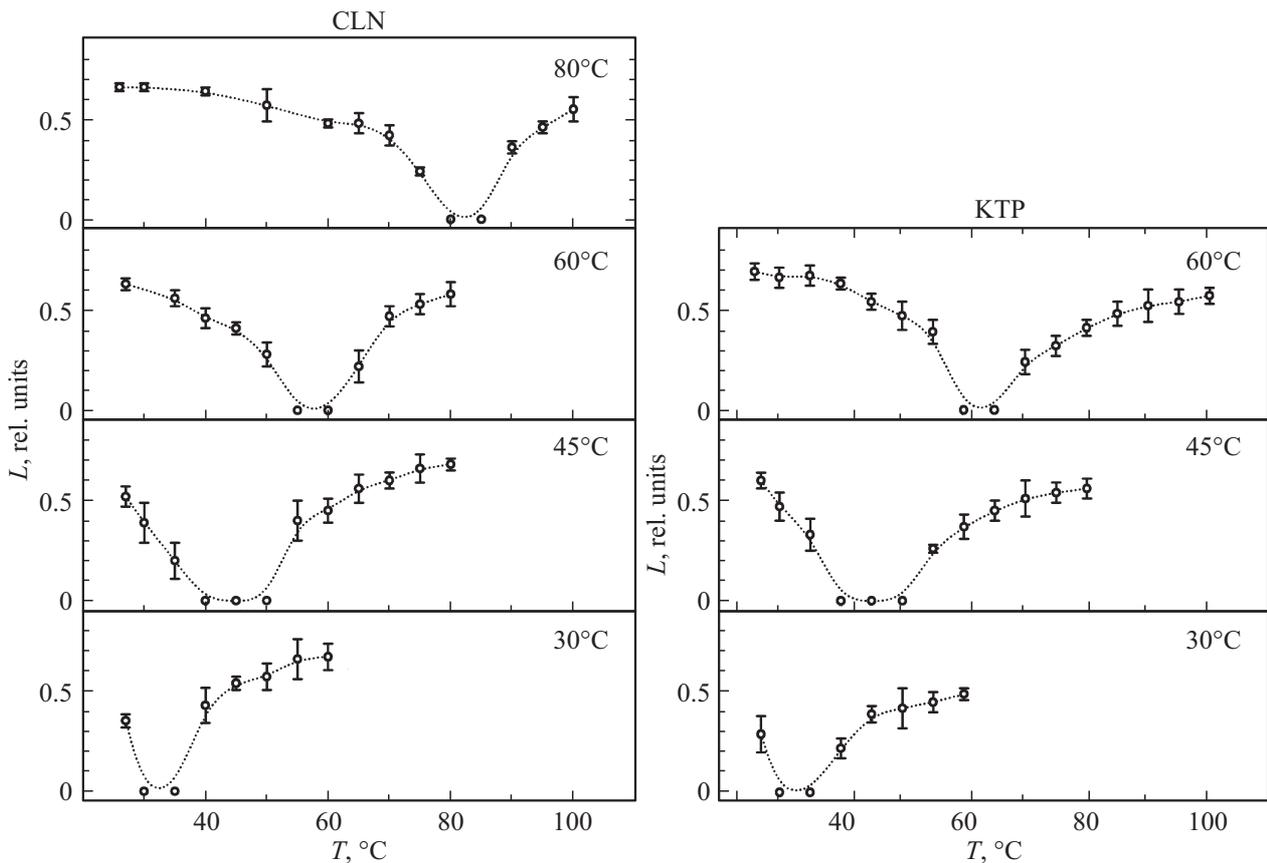


Рис. 4. Экспериментальные зависимости длины доменной стенки L от температуры образца для микрочастиц, сформированных при различных температурах (указано на графике) на подложках CLN и KTP.

ных изображениях. Значение K_{eff} можно пересчитать в значение механического напряжения (σ), действующего на микрочастицу, исходя из формулы: $\sigma = -2/3 \cdot K_{\text{eff}}/\lambda_s$, где λ_s — это константа магнестрикции насыщения используемого материала.

Исходя из разницы в коэффициентах температурного расширения подложки и микрочастицы по различным осям, можно оценить наводимое одноосное механическое напряжение при изменении температуры образца. Изменение размеров частицы (Δl) вдоль выбранной оси при условии, что она неразрывно связана с подложкой будет составлять

$$\Delta l = \Delta T \cdot L \cdot \alpha, \tag{1}$$

где ΔT — изменение температуры, L — исходный размер частицы вдоль выбранной оси (в нашем случае это сторона квадратной частицы, т.к. частицы ориентированы своими сторонами вдоль осей кристалла), α — одноосный коэффициент теплового расширения частицы относительно подложки, который равен

$$\alpha = (\alpha_1 - \alpha_p) - (\alpha_2 - \alpha_p) = \alpha_1 - \alpha_2, \tag{2}$$

где α_p — коэффициент теплового расширения микрочастицы (в нашем случае микрочастица является поликристаллической, и он одинаков для всех направлений

$-13 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), α_1 и α_2 — это линейные коэффициенты теплового расширения подложки вдоль кристаллографических осей, составляющих поверхность, на которой формируются микрочастицы. Для подложек CLN это оси a ($\alpha_1 = 15 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) и c ($\alpha_2 = 7.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), соответственно $\alpha = 7.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Для подложек KTP это оси y ($\alpha_1 = 9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) и z ($\alpha_2 = 0.6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), соответственно $\alpha = 8.4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Если принять, что механическое напряжение (σ) действующее на микрочастицу равно: $\sigma = Y \cdot \varepsilon$, где Y — модуль Юнга материала, из которого изготовлена микрочастица, ε — деформация (или одноосное изменение размера) микрочастицы ($\varepsilon = \Delta l/L$), то зависимость наводимого напряжения при изменении температуры будет равна

$$\sigma = Y \cdot \Delta T \cdot \alpha. \tag{3}$$

Таким образом, исходя из полученной экспериментальной температурной зависимости длины доменной стенки, можно рассчитать зависимость длины перемычки от механического напряжения и сравнить ее с расчетами, выполненными при помощи ООММФ (рис. 5). При расчетах значение модуля Юнга для Ni-микрочастиц принималось равным 210 ГПа согласно работе [11].

Экспериментальные и теоретические зависимости, приведенные для микрочастиц, сформированных на под-

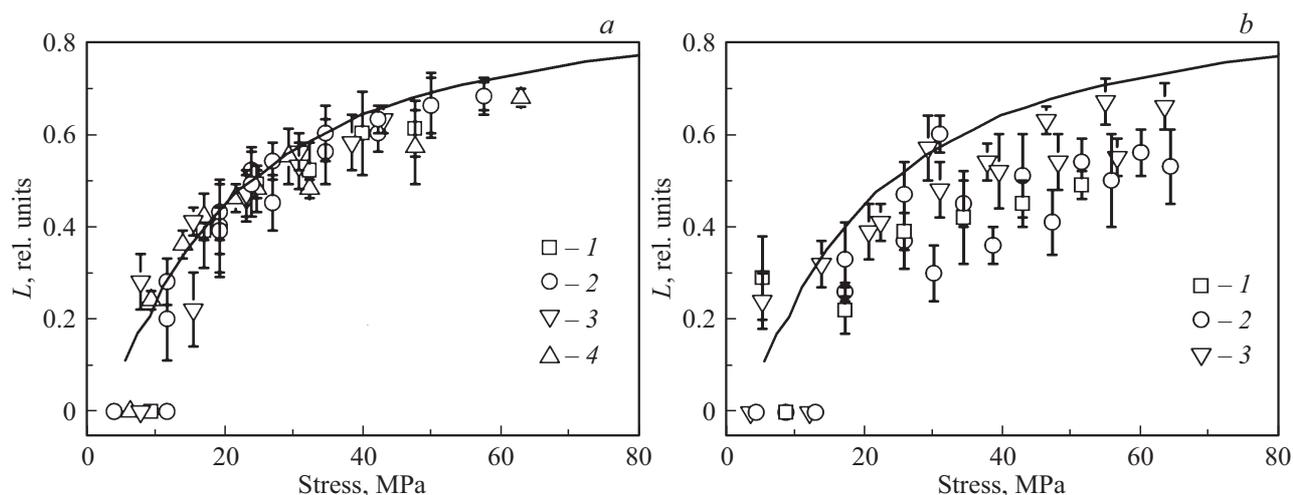


Рис. 5. Зависимость длины доменной стенки L от величины одноосного механического напряжения для микрочастиц, сформированных на CLN — (a) и КТР — (b) подложках при различных температурах. Цифрами обозначены данные, полученные для микрочастиц, сформированных: 1 — при комнатной температуре, 2 — при температуре 45°C, 3 — при температуре 60°C и 4 — при температуре 80°C. Сплошная линия результат моделирования длины доменной стенки при помощи OOMMF.

ложках CLN, достаточно хорошо совпадают. В случае использования КТР-подложек наблюдается большой разброс экспериментальных данных и их расхождение с теоретическими расчетами. Мы предполагаем, что это может быть связано с плохой адгезией Ni-микрочастиц к поверхности КТР-кристалла. В этом случае термическое расширение подложки не передается полностью на микрочастицу и наводимые в ней механические напряжения меньше, чем теоретически рассчитанные. Это позволяет сделать вывод о том, что подложки CLN являются более перспективными для создания тестовых магнитных микроструктур, несмотря на чуть более низкий показатель температурного расширения, чем у подложек КТР. Как показали проведенные исследования на подложках CLN можно создавать микрочастицы с заранее заданными размерами доменов при комнатной температуре за счет изменения температуры подложки, на которую проводится их напыление, и в дальнейшем эффективно варьировать эти размеры, изменяя температуру образца.

4. Заключение

Проведенные исследования показали, что анизотропное термическое расширение монокристаллической подложки влияет на доменную структуру, нанесенных на нее планарных Ni-микрочастиц. Таким образом при комнатной температуре можно получить необходимую доменную структуру частиц за счет формирования микрочастиц при заданной температуре. Показано, что подложки из конгруэнтного ниобата лития более перспективны, поскольку позволяют получить в микрочастицах более высокую термоиндуцированную магнитную анизотропию. Установлено, что для воспроизводимого управления доменной структурой микрочастиц Ni размерами

$7.5 \times 7.5 \times 0.03 \mu\text{m}^3$ достаточно диапазона одноосных механических напряжения до 60 МПа. Напряжения свыше 60 МПа могут привести к формированию в микрочастице состояния с квазиоднородной намагниченностью.

Финансирование работы

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- [1] K. Roy, S. Bandyopadhyay, J. Atulasimha. *Appl. Phys. Lett.* **99**, 63108 (2011).
- [2] M. Barangi, P. Mazumder. *IEEE Nanotechnol. Mag.* **9**, 3, 15 (2015).
- [3] J. Atulasimha, S. Bandyopadhyay. *Nanomagnetic and Spintronic Devices for Energy-Efficient Memory and Computing*. WILEY (2016). 352 с.
- [4] А.А. Бухараев, А.К. Звездин, А.П. Пятаков, Ю.К. Фетисов. *УФН* **188**, 1288 (2018).
- [5] S. Bandyopadhyay, J. Atulasimha, A. Barman. *Appl. Phys. Rev.* **8**, 041323 (2021).
- [6] 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. Klaufl. *Phys. Rev. Appl.* **1**, 021001 (2014).
- [7] A. Chen, Y. Zhao, Y. Wen, L. Pan, P. Li, X. Zhang. *Sci. Adv.* **5**, 12, eaay5141 (2019).
- [8] И. Нургазизов, Д.А. Бизяев, А.А. Бухараев, А.П. Чукланов. *ФТТ* **62**, 9, 1503 (2020).

- [9] D.A. Bizyaev, A.A. Bukharaev, N.I. Nurgazizov, A.P. Chuklanov, S.A. Migachev. Phys. Status Solidi Rapid Res. Lett. 2000256 (2020).
- [10] Н.И. Нургазизов, Д.А. Бизязев, А.А. Бухараев, А.П. Чукланов, В.Я. Шур, А.Р. Ахматханов. ФТТ **63**, 9, 1273 (2021).
- [11] А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. Энергоатомиздат, М. (1991) 1232 с.
- [12] К.П. Белов. Магнитострикционные явления и их технические приложения. Наука, М. (1987). 160 с.
- [13] U. Hartmann. Annu. Rev. Mater. Sci. **29**, 53 (1999).
- [14] M.J. Donahue, D.G. Porter. OOMMF User's Guide, Version 1.0. Natl. Inst. Standards Technol., Gaithersburg, MD, USA (1999). <http://math.nist.gov/oommf>.
- [15] Д.В. Овчинников, А.А. Бухараев. ЖТФ **71**, 8, 85 (2001).

Редактор К.В. Емцев