

05,12

Изменение направления оси легкого намагничивания массивов сегментированных нанонитей Ni/Cu с увеличением длины сегмента Ni

© А.А. Мистонов¹, И.С. Дубицкий^{2,¶}, А.Х.А. Елмакави^{1,3}, Е.Г. Яшина², С.В. Сотничук^{1,4}, К.С. Напольский^{4,5}, Д. Менцель⁶

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра „Курчатовский институт“, Гатчина, Россия

³ Cyclotron Project, Nuclear Research Center, Atomic Energy Authority, Cairo, Egypt

⁴ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁵ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

⁶ TU Braunschweig, Institute of Condensed Matter Physics, Braunschweig, Germany

E-mail: ilya.dubitskiy@mail.ru

Поступила в Редакцию 2 ноября 2020 г.

В окончательной редакции 2 февраля 2021 г.

Принята к публикации 2 февраля 2021 г.

Массивы упорядоченных сегментированных нанонитей, представляющих собой ферромагнитные участки, разделенные немагнитными вставками, рассматриваются в качестве перспективного материала для систем трехмерного хранения информации. Однако наличие большого числа конкурирующих взаимодействий заметно усложняет описание магнитного поведения таких систем. В настоящей работе исследовано влияние длины сегмента на интегральные магнитные свойства массивов нитей Ni/Cu. Показано, что коэрцитивная сила возрастает с ростом длины магнитного сегмента как для продольного, так и для поперечного направления длинной оси нитей относительно внешнего магнитного поля. Обнаружено изменение направления оси легкого намагничивания при соотношении длины сегмента Ni к диаметру в диапазоне от 10 до 15.

Ключевые слова: сегментированные нанонити, массивы нанонитей, микромагнетизм, взаимодействие нанонитей.

DOI: 10.21883/FTT.2021.07.51037.237

1. Введение

Развитие методов синтеза магнитных наноструктур в последние годы привело к возможности создания систем с заданными геометрическими параметрами [1]. Существенный прогресс в понимании магнитных состояний отдельных нанобъектов (кубов, дисков, пирамид) [2–4] позволил перейти к изучению ансамблей частиц [5,6] и пористых упорядоченных структур [7,8].

Однако большинство изучаемых в настоящий момент систем представляет собой объекты, упорядоченные на плоскости. По-видимому, дальнейшее продвижение будет связано с исследованием трехмерно-упорядоченных систем. Можно выделить две основные группы методов, применяемых для синтеза подобных структур: литографию [9] и техники, основанные на эффекте самоупорядочения частиц [10,11]. Литографические методы позволяют с высокой точностью контролировать геометрические характеристики синтезируемых систем. В качестве примеров объектов, полученных при помо-

щи данной техники, можно выделить усеченный икосаэдр [9], наноспираль [12], упорядоченную решетку нанопроволок [13]. Технология самосборки более проста в использовании и допускает создание образцов большей площади, однако непосредственный контроль геометрических параметров системы затруднен. Тем не менее, при помощи данного метода были успешно получены высокоупорядоченные трехмерные периодические структуры: искусственные прямые [14] и инвертированные опалы [15–17], мезокристаллы [18,19], гироиды [20].

Одно из наиболее интересных проявлений эффекта самоупорядочения наблюдается при получении пористых пленок анодного оксида алюминия (АОА) [21]. Образующиеся в результате анодирования металла структуры с гексагональным упорядочением пор могут быть использованы в качестве темплата для синтеза массивов магнитных нанонитей [22]. Совершенствование данной технологии позволило получать хорошо упорядоченные массивы нанонитей и обеспечить воспроизводимость результатов экспериментов, что привело к расширению

спектра возможных применений данных систем [23]. Нанонити могут быть использованы в медицине для разрушения клеток при помощи гипертермии или механических колебаний [24,25]; на их основе могут быть изготовлены волноводы и магنونные кристаллы для нужд магноники [26,27]; вследствие большой магнитной анизотропии нанонити могут применяться при создании постоянных магнитов [28] или игл для количественной магнитно-силовой микроскопии [29].

Следующий шаг, по-видимому, состоит в переходе к трехмерно-упорядоченным массивам сегментированных нанонитей. Они могут быть получены при помощи последовательного осаждения магнитного и немагнитного материалов, например никеля и меди, в поры темплата [30]. Интерес к данным системам обусловлен в первую очередь возможностью применения подобных нанонитей в спинтронике [31] и сверхплотной записи информации [32]. В то же время распределение намагниченности в массивах сегментированных нанонитей нетривиально вследствие дальнедействующего характера взаимодействия между нанонитями [33]. Кроме того, магнитная структура нанонитей существенным образом зависит от их геометрических характеристик [34]. В частности, изменяя длину немагнитного сегмента, можно модифицировать величину взаимодействия в системе [35,36]. Еще более богатую картину магнитных состояний можно получить, варьируя длину ферромагнитных сегментов. В этом случае может измениться не только величина, но и сам характер взаимодействия, так как при определенной критической длине ферромагнитного сегмента ось легкого намагничивания должна поменять свое направление. Первые результаты, полученные для сегментов малой длины (до 140 nm), указывают на возможность антиферромагнитного упорядочения магнитных моментов [37]. Настоящая работа посвящена изучению данного явления в массиве сегментированных нанонитей Ni/Cu с длиной никелевого сегмента от 140 nm до 1 μm .

2. Образцы

Формирование массивов сегментированных нанонитей Ni/Cu (рис. 1) проводили с использованием метода темплатного электроосаждения в пористые пленки анодного оксида алюминия (АОА). Для получения пористых темплатов использовали двухстадийную методику анодирования алюминия в 0.3 mol $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ при постоянном напряжении 40 V и температуре 0°C, подробно описанную во многих работах [38–41]. Такая двухстадийная методика приводит к образованию высокоупорядоченной структуры АОА с гексагональным расположением пор в плоскости пленки. Толщина оксидного слоя, сформированного в ходе первой и второй стадий, составляла 10 и 35 μm соответственно. Травление барьерного слоя АОА проводили в растворе 3 mol H_3PO_4 , контролируя при этом момент открытия пор и их дальнейшее

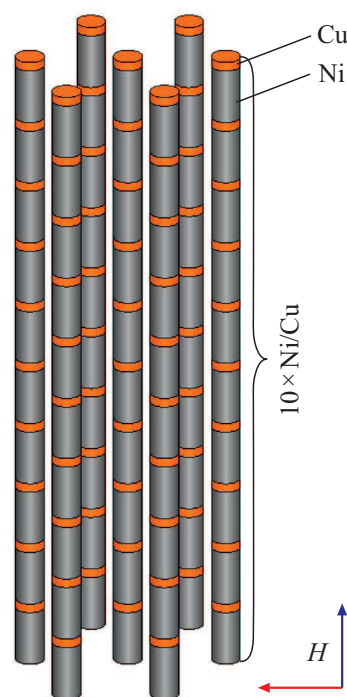


Рис. 1. Схематическое изображение массива сегментированных нанонитей.

растваривание до значения диаметра пор ~ 50 nm. На последнем этапе на нижнюю сторону темплата АОА наносили слой золота толщиной 200 nm с помощью магнетронного напыления на установке Quorum Technologies Q 150T ES.

Электроосаждение нанонитей Ni осуществляли при комнатной температуре в трехэлектродной ячейке из электролита, одновременно содержащего ионы меди и никеля. В качестве рабочего электрода выступала пористая пленка АОА с напыленным токосъемником, вспомогательным электродом служила проволока Pt, электродом сравнения являлся насыщенный (KCl) электрод Ag/AgCl, соединенный с ячейкой через капилляр Лuggина–Габера. В настоящей работе использовали электролит следующего состава: 0.005 mol CuSO_4 , 0.5 mol NiSO_4 , 0.6 mol H_3BO_3 . Потенциал осаждения Cu составлял -0.4 V, Ni осаждали при -1.0 V. Следует отметить, что при данных условиях формируются металлические осадки, содержащие одновременно оба металла: при потенциале осаждения меди ($E_d = -0.4$ V) осадок может содержать до 12% Ni, а при потенциале осаждения никеля ($E_d = -1.0$ V) — до 3% Cu [42]. Для увеличения конвективного массопереноса ионов металла в растворе электролита была реализована циркуляция раствора при помощи перистальтического насоса Heidolph PD5006, скорость прокачки составляла 0.5 l/min. Длину сегментов меди и никеля контролировали кулонометрически. В итоге были синтезированы три массива сегментированных нанонитей с длиной никелевого сегмента 140, 300 и 1000 nm; длина медных

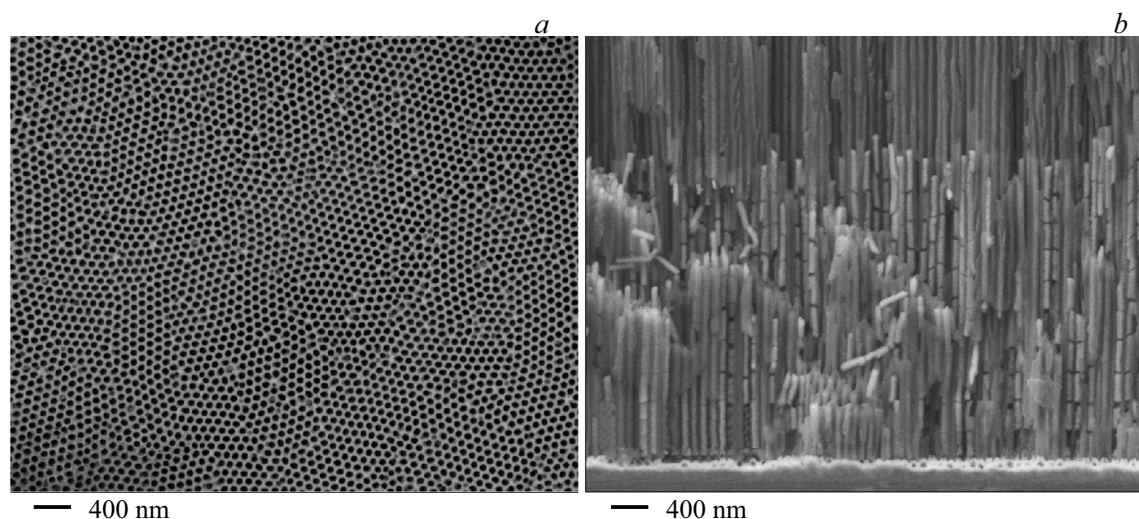


Рис. 2. СЭМ-изображения поверхности (а) и скола (б) нанокompозита, содержащего нанонити с длиной магнитного сегмента 300 нм.

сегментов была одинаковой и составляла 25 нм. Нанонити в каждом образце содержали по 10 повторяющихся фрагментов Ni/Cu.

Исследование морфологии поверхности и скола массивов нанонитей в матрице АОА проводили методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе Zeiss AURIGA Laser (Научный парк СПбГУ) и Carl Zeiss Vision 40 (ИОНХ РАН). Поскольку контраст между никелевыми и медными участками слишком мал, образцы предварительно погружались в азотную кислоту для растворения медных сегментов. Таким образом, на СЭМ-изображениях скола можно рассмотреть никелевые участки, разделенные пустотами.

Типичные СЭМ-изображения поверхности и скола представлены на рис. 2. Для определения диаметров нитей D_n и расстояний между длинными осями нитей D_{int} СЭМ-изображения поверхностей обрабатывались с помощью программы Statistics2D [43]. Длины сегментов определялись путем построения профилей интенсивностей вдоль нитей на изображениях сколов. В результате было установлено, что диаметр нанонитей, длина медных сегментов и периоды структуры одинаковы для всех трех образцов и составляют соответственно: $D_n = 50 \pm 6$ нм, $D_{int} = 101 \pm 8$ нм, $L_{Cu} = 25 \pm 5$ нм. Длины сегментов никеля различаются для разных образцов и равны $L_{1Ni} = 145 \pm 5$ нм, $L_{2Ni} = 302 \pm 5$ нм, $L_{3Ni} = 1000 \pm 5$ нм.

Исследование атомной структуры массивов сегментированных нанонитей проводили с помощью рентгеновского дифрактометра Rigaku D/MAX 2500. Измерения проводили в геометрии Брэгга–Брентано с использованием $CuK\alpha$ -излучения ($\lambda = 1.5418$ Å) в диапазоне 2θ от 30 до 120 градусов.

Основные дифракционные пики, наблюдаемые на рентгенограмме, соответствуют Ni (рис. 3), оксидные фазы отсутствуют. Также можно различить слабые пики

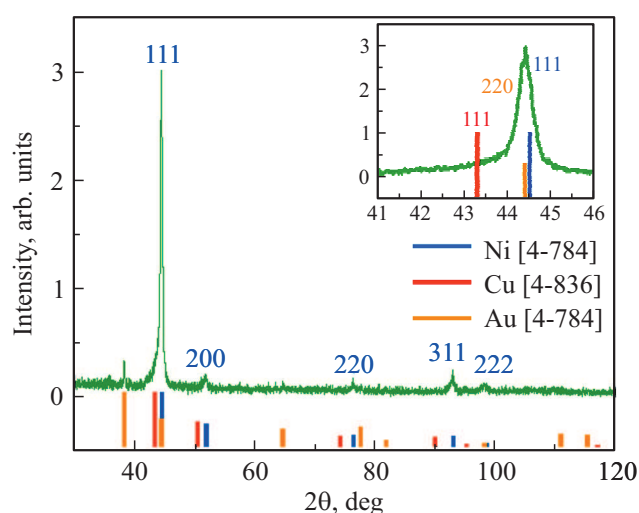


Рис. 3. Дифрактограмма массива сегментированных нанонитей Ni/Cu в матрице АОА.

меди, содержание которой гораздо меньше, чем никеля, и золота (от токосъемника). Сегменты Ni являются сильно текстурированными, показывая высокую интенсивность отражения (111), тогда как интенсивности других пиков существенно ниже. Обычно для объемного материала отражение Ni (200) имеет относительную интенсивность 42% (база PC-PDF 2 [4-784]). Учитывая высокую интенсивность отражения (111) и малую ширину линии, можно сделать вывод, что все никелевые участки состоят из монокристаллических крупных зерен, ориентированных, в основном, в кристаллографическом направлении $\langle 111 \rangle$. Интересно отметить, что в образцах с меньшими длинами, которые были исследованы в работе [37], было обнаружено текстурирование вдоль направления $\langle 220 \rangle$.

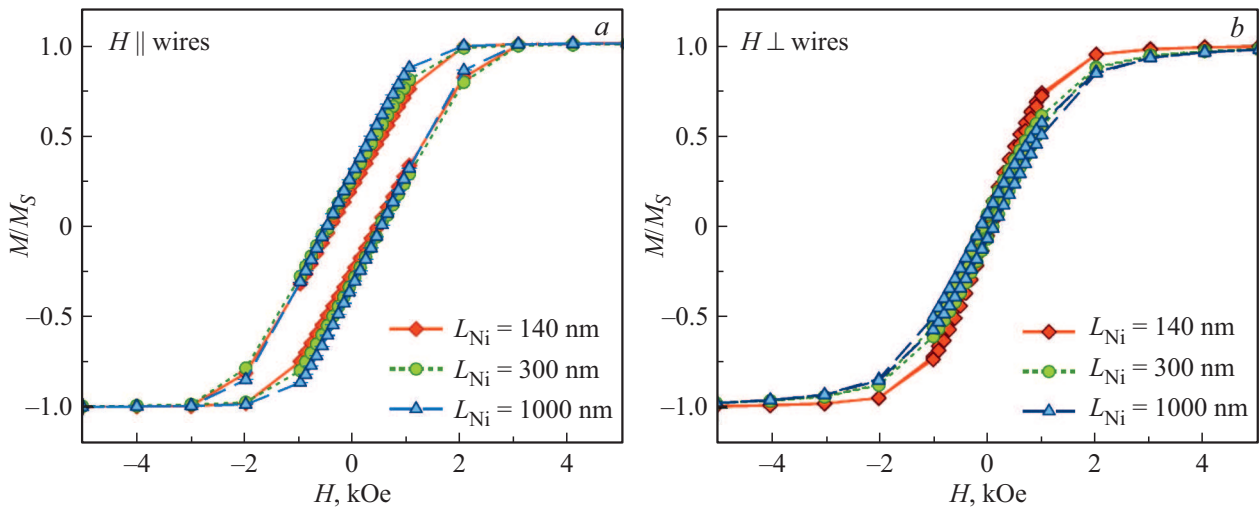


Рис. 4. Кривые перемагничивания при приложении внешнего магнитного поля вдоль (a) и перпендикулярно (b) длинной оси нитей.

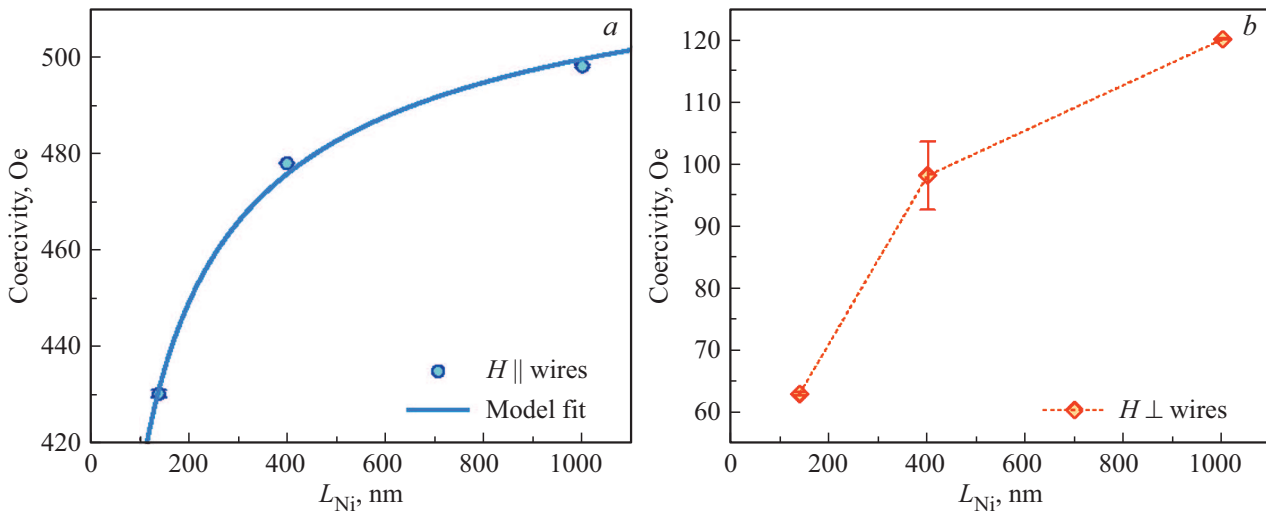


Рис. 5. Зависимости коэрцитивной силы от длины сегмента Ni при приложении поля вдоль (a) и перпендикулярно (b) длинной оси нитей.

3. Магнитные свойства

Измерения кривых перемагничивания массивов сегментированных нанонитей в матрицах АОА проводились на СКВИД-магнитометре QuantumDesign MPMS-5S в диапазоне магнитных полей от -20 кОе до 20 кОе с шагом от 100 Ое до 1 кОе в зависимости от диапазона полей при $T = 300$ К.

На рис. 4 представлены данные, полученные при приложении магнитного поля параллельно и перпендикулярно длинной оси магнитных нанонитей. Кривые были нормированы на величину намагниченности насыщения M_S .

Видно, что кривые различаются незначительно, однако при приложении поля перпендикулярно оси нитей кривая для $L_{Ni} = 140$ nm выделяется из серии. Для проведения более подробного анализа магнитного по-

ведения исследованных массивов нанонитей из кривых перемагничивания определялись следующие параметры: коэрцитивная сила, квадратичность петли (отношение остаточной намагниченности к намагниченности насыщения M_R/M_S) и наклон кривой на линейном участке вблизи нулевого поля.

Для обоих направлений поля коэрцитивная сила возрастает с ростом длины Ni сегмента. При этом наблюдается резкий рост при переходе от $L_{Ni} = 140$ nm к $L_{Ni} = 300$ nm (рис. 5).

Такое поведение коэрцитивной силы свидетельствует об уменьшении полей взаимодействия между нитями с ростом длины сегмента Ni. Для описания этого поведения мы применили модель длинных взаимодействующих нитей, использованную в [44]. В этом случае зависимость коэрцитивной силы от длины описывается

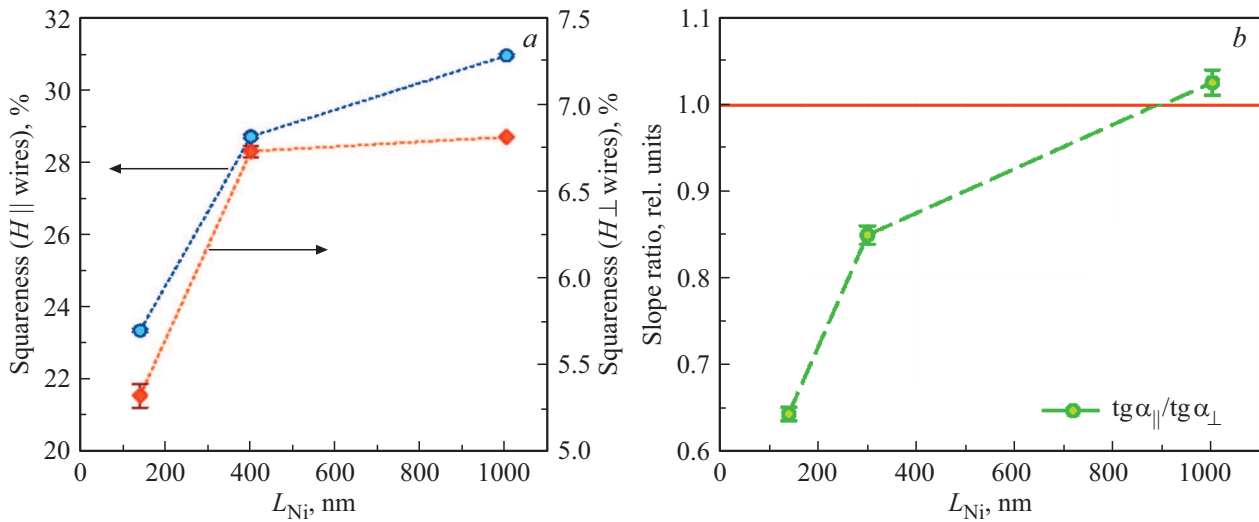


Рис. 6. Зависимости квадратичности петли от длины сегмента Ni при приложении поля вдоль и перпендикулярно длинной оси нитей (a). Зависимость отношения тангенсов углов наклона нормализованных кривых перемагничивания при приложении магнитного поля вдоль и перпендикулярно нанонитям от длины сегмента Ni (b).

выражением

$$H_C = H_0 \left(1 - \sqrt{\frac{\varepsilon M_S D_n^2}{4 H_0 D_{\text{int}} L} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{L^2}{D_{\text{int}}^2}}} \right)} \right), \quad (1)$$

где h_0 — коэрцитивная сила бесконечно длинного уединенного цилиндра, $m_s = 6.1$ кОе — намагниченность насыщения объемного никеля, ε — эмпирический параметр, зависящий преимущественно от взаимного расположения нитей и учитывающий понижение энергетического барьера при развороте намагниченности нитей [44], $D_n = 50$ nm и $D_{\text{int}} = 100$ nm.

На рис. 5, a представлена подгоночная кривая со следующими параметрами: $H_0 = 541 \pm 4$ Ое, $\varepsilon = 81 \pm 9$. Следует отметить, что в данном случае в качестве независимой переменной L была взята длина никелевого сегмента, а не совокупная длина нити.

Выбранная модель хорошо описывает экспериментальные данные, однако если в качестве независимой переменной L использовать полную длину нитей, а не длину сегмента, для H_0 получается то же значение (эта величина ограничивает значения поля перемагничивания сверху и не должна меняться с изменением масштаба горизонтальной оси). В то же время ε возрастает в 10 раз и превышает значения, имеющие физический смысл [45,46]. Кроме того, значение коэрцитивной силы, полученное для аналогичного массива сплошных (не сегментированных) никелевых нанонитей, оказывается в два раза больше H_0 [47].

Такое поведение может быть интерпретировано следующим образом: никелевые сегменты сильнее всего взаимодействуют с ближайшими соседями, расположенными вдоль той же оси, но все же не образуют единую нить.

Зависимости квадратичности от длины никелевого сегмента представлены на рис. 6. Характер зависимости аналогичен поведению коэрцитивной силы. Для поля, направленного перпендикулярно оси нитей, также наблюдается резкий скачок при переходе к $L_{Ni} = 400$ nm, дальнейшее изменение выражено слабо.

Направлению внешнего поля вдоль оси легкого намагничивания соответствует более низкое значение поля насыщения по отношению к соответствующей величине для направления вдоль оси трудного намагничивания. Однако шаг по полю в области насыщения в проведенных измерениях слишком большой для определения точного значения поля насыщения. Тем не менее можно заметить, что эта величина коррелирует с наклоном кривой в линейной области в центре петли, в которой расположено большое число измеренных точек. Таким образом, данный угол, по сути, определяется скоростью намагничивания.

В связи с этим, для анализа анизотропии намагничивания был вычислен тангенс угла наклона α линейных участков нормализованных кривых перемагничивания в диапазоне от -1 кОе до 1 кОе. В качестве параметра, определяющего „легкость“ направления было вычислено отношение тангенсов при продольном и перпендикулярном направлениях внешнего поля. Результаты представлены на рис. 6, b.

Можно видеть, что соотношение тангенсов углов наклона кривых перемагничивания в случае приложения внешнего поля параллельно и перпендикулярно длинной оси нитей возрастает с ростом длины никелевого сегмента, и когда L_{Ni} достигает $800-900$ nm, становится больше единицы. Таким образом, направление оси легкого намагничивания меняется с перпендикулярного нитям на продольное. Возможно, это происходит при меньших длинах, но тем не менее при довольно большом отноше-

нии длины нити к диаметру (от 10 до 15). В работе [37] аналогичное изменение происходит до $L_{Ni} = 100$ nm, то есть при соотношении длины к диаметру равном двум.

Вероятно, именно межсегментное взаимодействие внутри одной нити делает состояние анизотропии типа „легкая плоскость“ (перпендикулярно нитям) более выгодным, чем „легкая ось“ (параллельно нитям). Общее поведение всего массива определяется балансом взаимодействий между сегментами внутри нити, в соседних нитях, и вкладом анизотропии формы сегмента. Также наличие заметной текстуры никелевых зерен, безусловно, влияет на магнитные характеристики, однако для сегментов с высоким соотношением длины к диаметру этот фактор играет меньшую роль. Дополнительное влияние может оказывать и количество сегментов, т.е. совокупная длина нити, что представляет интерес для дальнейших исследований.

4. Заключение

В настоящей работе были исследованы магнитные свойства массивов сегментированных нанонитей Ni/Cu с различной длиной сегмента Ni. Было показано, что заметное изменение свойств происходит при изменении длины от 140 до 300 nm. Характер зависимости коэрцитивной силы от длины никелевых сегментов является монотонным и схож для направлений поля вдоль и перпендикулярно длиной оси нитей. Показано, что направление оси легкого намагничивания меняется с перпендикулярного нитям на продольное. Наблюдаемое поведение обусловлено, по всей видимости, тем, что взаимодействие между различными сегментами одной нити больше, чем между сегментами соседних нитей.

Благодарности

Авторы благодарны Научному парку СПбГУ и сотруднику ресурсного центра „Нанотехнологии“ (<http://nano.spbu.ru>) В.Д. Калганову за неоценимый вклад в получение экспериментальных данных. Кроме того, авторы благодарят разработчиков программного обеспечения Magic Plot (<https://magicplot.com/>), в котором построена большая часть графиков. Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета „Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды“.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-72-00011).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.O. Adeyeye, N. Singh. *J. Phys. D* **41**, 153001 (2008).
- [2] W. Rave, K. Fabian, A. Hubert. *J. Magn. Magn. Mater.* **190**, 332 (1998).
- [3] J.-P. Adam, S. Rohart, J.-P. Jamet, J. Ferre, A. Mougin, R. Weil, H. Bernas, G. Faini. *Phys. Rev. B* **85**, 214417 (2012).
- [4] A. Knittel, M. Franchin, Th. Fischbacher, F. Nasirpour, S.J. Bending, H. Fangohr. *New J. Phys.* **12**, 113048 (2010).
- [5] R.F. Wang, C. Nisoli, R.S. Freitas, J. Li, W. McConville, B.J. Cooley, M.S. Lund, N. Samarth, C. Leighton, V.H. Crespi, P. Schiffer. *Nature* **439**, 303 (2006).
- [6] S. Rajaram, D.K. Karunaratne, S. Sarkar, S. Bhanja. *IEEE Trans. Magn.* **49**, 3129 (2013).
- [7] K.J. Merazzo, D.C. Leitao, E. Jimenez, J.P. Araujo, J. Camarero, R.P. Del Real, A. Asenjo, M. Vazquez. *J. Phys. D* **44**, 505001 (2011).
- [8] S. Michea, J.L. Palma, R. Lavin, J. Briones, J. Escrig, J.C. Denardin, R.L. Rodriguez-Suarez. *J. Phys. D* **47**, 335001 (2014).
- [9] C. Donnelly, M. Guizar-Sicairos, V. Scagnoli, M. Holler, Th. Huthwelker, A. Menzel, I. Vartiainen, E. Müller, E. Kirk, S. Gliga, J. Raabe, L.J. Heyderman. *Phys. Rev. Lett.* **114**, 115501 (2015).
- [10] M. Albrecht, G. Hu, I.L. Guhr, T.C. Ulbrich, J. Boneberg, P. Leiderer, G. Schatz. *Nature Mater.* **4**, 203 (2005).
- [11] R. Streubel, V.P. Kravchuk, D.D. Sheka, D. Makarov, F. Kronast, O.G. Schmidt, Yu. Gaididei. *Appl. Phys. Lett.* **101**, 132419 (2012).
- [12] A. Fernandez-Pacheco, L. Serrano-Ramon, J.M. Michalik, M.R. Ibarra, J.M. De Teresa, L. O'Brien, D. Petit, D.J. Lee, R.P. Cowburn. *Sci. Rep.* **3**, 1492 (2013).
- [13] A. May, M. Hunt, A. Van Den Berg, A. Hejazi, S. Ladak. *Commun. Phys.* **2**, 1 (2019).
- [14] K.S. Napolskii, I.A. Sapoletova, D.F. Gorozhankin, A.A. Eliseev, D.Yu. Chernyshov, D.V. Byelov, N.A. Grigoryeva, A.A. Mistonov, W.G. Bouwman, K.O. Kvashnina. *Langmuir* **26**, 2346 (2010).
- [15] И.С. Дубицкий, Н.А. Григорьева, А.А. Мистонов, Г.А. Вальковский, Н.А. Саполетова, С.В. Григорьев. *ФТТ* **59**, 12, 2435 (2017).
- [16] I.S. Dubitskiy, A.V. Syromyatnikov, N.A. Grigoryeva, A.A. Mistonov, A. Sapoletova, S.V. Grigoriev. *J. Magn. Magn. Mater.* **441**, 609 (2017).
- [17] A.A. Mistonov, I.S. Dubitskiy, I.S. Shishkin, N.A. Grigoryeva, A. Heinemann, N.A. Sapoletova, G.A. Valkovskiy, S.V. Grigoriev. *J. Magn. Magn. Mater.* **477**, 99 (2019).
- [18] M. Okuda, T. Schwarze, J.C. Eloi, S.E.W. Jones, P.J. Heard, A. Sarna, E. Ahmad, V.V. Kruglyak, D. Grundler, W. Schwarzhacher. *Nanotechnology* **28**, 155301 (2017).
- [19] Ju. Brunner, I.A. Baburin, S. Sturm, K. Kvashnina, A. Rossberg, T. Pietsch, S. Andreev, E. Sturm, H. Colfen. *Adv. Mater. Interfaces* **4**, 1600431 (2017).
- [20] Ch. Phatak, Yu. Liu, E.B. Gulsoy, D. Schmidt, E. Franke-Schubert, A. Petford-Long. *Nano Lett.* **14**, 759 (2014).
- [21] H. Masuda, K. Fukuda. *Science* **268**, 1466 (1995).
- [22] M. Vazquez. *Magnetic nano- and microwires: design, synthesis, properties and applications*. Woodhead Publishing Ltd, Cambridge (2020).
- [23] M. Stano, O. Fruchart. *Handbook Magn. Mater.* **27**, 155 (2018).
- [24] P.W. Egolf, N. Shamsudhin, S. Pane, D. Vuarnoz, J. Pokki, A.G. Pawlowski, P. Tsague, B. de Marco, W. Bovy, S. Tucev, M.H.D. Ansari, B.J. Nelson. *J. Appl. Phys.* **120**, 064304 (2016).

- [25] S. Leulmi, X. Chauchet, M. Morcrette, G. Ortiz, H. Joisten, Ph. Sabon, Th. Livache, Ya. Hou, M. Carriere, St. Lequien, B. Dieny. *Nanoscale* **7**, 15904 (2015).
- [26] J.A. Otalora, M. Yan, H. Schultheiss, R. Hertel, A. Kakay. *Phys. Rev. B* **95**, 184415 (2017).
- [27] Zh. Li, M. Wang, Ya. Nie, D. Wang, Q. Xia, W. Tang, Zh. Zeng, G. Guo. *J. Magn. Magn. Mater.* **414**, 49 (2016).
- [28] K. Gandha, K. Elkins, N. Poudyal, X. Liu, J.P. Liu. *Sci. Rep.* **4**, 1 (2014).
- [29] A. Winkler, M.S. Menzel, R. Kozhuharova-Koseva, S. Hampel, A. Leonhardt, B. Bochner. *J. Appl. Phys.* **99**, 104905 (2006).
- [30] N. Maleak, P. Potpattanapol, N.N. Bao, J. Ding, W. Wongko-kuo, I.M. Tang, S. Thongmee. *J. Magn. Magn. Mater.* **354**, 262 (2014).
- [31] C. Bran, E. Berganza, J.A. Fernandez-Roldan, E.M. Palmero, J. Meier, E. Calle, M. Jaafar, M. Foerster, L. Aballe, R.A. Fraile. *ACS Nano* **12**, 5932 (2018).
- [32] Ph. Sergelius, J.H. Lee, O. Fruchart, M.S. Salem, S. Allende, R.A. Escobar, J. Gooth, R. Zierold, J.-Ch. Toussaint, S. Schneider, D. Pohl, B. Rellinghaus, S. Martin, J. Garcia, H. Reith, A. Spende, M.-E. Toimil-Molares, D. Altbir, R. Cowburn, D. Görlitz, K. Nielsch. *Nanotechnology* **28**, 065709 (2017).
- [33] A.J. Grutter, K.L. Krycka, E.V. Tartakovskaya, J.A. Borchers, K.S.M. Reddy, E. Ortega, A. Ponce, B.J.H. Stadler. *ACS nano* **11**, 8311 (2017).
- [34] D. Wolf, N. Biziere, S. Sturm, D. Reyes, T. Wade, T. Niermann, J. Krehl, B. Warot-Fonrose, B. Blichner, E. Snoeck. *Commun. Phys.* **2**, 87 (2019).
- [35] S. Moraes, D. Navas, F. Beron, M.P. Proenca, K.R. Pirota, C.T. Sousa, J.P. Araujo. *Nanomaterials* **8**, 490 (2018).
- [36] A. Nunez, L. Perez, M. Abuin, J.P. Araujo, M.P. Proenca. *J. Phys. D* **50**, 155003 (2017).
- [37] M. Susano, M.P. Proenca, S. Moraes, C.T. Sousa, J.P. Araujo. *Nanotechnology* **27**, 335301 (2016).
- [38] А.Д. Давыдов, В.М. Волгин. *Электрохимия* **52**, 9, 905 (2016).
- [39] A.H.A. Elmekawy, E.G. Iashina, I.S. Dubitskiy, S.V. Sotnichuk, I.V. Boshev, K.S. Napolskii, D. Menzel, A.A. Mistonov. *Mater. Today Commun.* **25**, 101609 (2020).
- [40] I.S. Dubitskiy, A.H.A. Elmekawy, E.G. Iashina, S.V. Sotnichuk, K.S. Napolskii, D. Menzel, A.A. Mistonov. *J. Supercond. Nov. Magn.* **34**, 539 (2021).
- [41] K.S. Napolskii, I.V. Roslyakov, A.A. Eliseev, D.I. Petukhov, A.V. Lukashin, S.F. Chen, C.P. Liu, G.A. Tsirlina. *Electrochim. Acta* **56**, 5, 2378 (2011).
- [42] К.С. Напольский, И.В. Росляков, А.А. Елисеев, А.В. Лукашин, Ю.Д. Третьяков. *Альтернативная энергетика и экология* **8**, 79 (2010).
- [43] I.V. Roslyakov, D.S. Koshkodaev, A.A. Eliseev, D. Hermida-Merino, V.K. Ivanov, A.V. Petukhov, K.S. Napolskii. *J. Phys. Chem. C* **121**, 27511 (2017).
- [44] S.L. Lim, F. Xu, N.N. Phuoc, C.K. Ong. *J. Alloys Compd.* **505**, 2, 609 (2010).
- [45] P. Allia, M. Coisson, P. Tiberto, F. Vinai, M. Knobel, M. Novak, W. Nunes. *Phys. Rev. B* **64**, 14, 144420 (2001).
- [46] J. Escrig, R. Lavin, J. Palma, J. Denardin, D. Altbir, A. Cortes, H. Gomez. *Nanotechnology* **19**, 7, 075713 (2008).
- [47] R. Lavin, J. Denardin, J. Escrig, D. Altbir, A. Cortes, H. Gomez. *J. Appl. Phys.* **106**, 10, 103903 (2009).

Редактор Е.Ю. Флегонтова