

УДК 537.622

РАВНОВЕСНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАМАГНИЧЕННОСТИ И ПРОЦЕССЫ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ В МАГНИТОУПРУГИХ НАНОСТРУКТУРАХ

© 2020 г. М. В. Логунов^{1,*}, С. А. Никитов^{1,2}, А. Г. Темирязов³, М. П. Темирязева³,
С. Джордано⁴, Т. Матурин⁴, Я. Душч⁴, Н. Тиерцелин⁴, Ф. Перно⁴

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники
имени В.А. Котельникова Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)”,
Долгопрудный, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники
имени В.А. Котельникова Российской академии наук, Фрязинский филиал, Фрязино, Россия

⁴Университет Лилля, Институт электроники, микроэлектроники и нанотехнологий, Лилль, Франция

*E-mail: logunov@cplire.ru

Поступила в редакцию 26.08.2019 г.

После доработки 13.09.2019 г.

Принята к публикации 28.10.2019 г.

Экспериментально исследованы равновесное распределение намагниченности и процессы перемагничивания магнитоупругих наноструктур в виде полосок постоянной или переменной ширины. Показано, что нарушение симметрии устойчивых состояний намагниченности в нанополоске может быть реализовано с помощью статического магнитного поля, приложенного перпендикулярно легкой оси ферромагнетика. Дальнейшее изменение состояний намагниченности допускает их манипуляцию (например, передвижение доменной границы) посредством однородных механических воздействий, индуцированных приложением электрического поля к пьезоэлектрической подложке.

DOI: 10.31857/S0367676520020209

В ряде недавних работ было показано, что состоянием намагниченности магнитных пленок и пластин можно управлять с очень малыми затратами энергии [1–3]. Эти результаты позволяют прогнозировать возможность создания наноустройств спинтроники с рекордно низкими затратами энергии — на уровне десятков и даже единиц аттоджоуля на одну операцию по переключению состояния намагниченности [1–4], что на несколько порядков меньше, чем в устройствах традиционной электроники. Одно из перспективных направлений создания энергоэффективных устройств хранения и обработки информации отражено в работах по исследованию процессов в магнитных наноструктурах с управляемыми магнитоупругими свойствами [1, 5–7]. При этом для переключения состояния элементов используются упругие напряжения, индуцируемые слоем пьезоэлектрика.

Недавно теоретически продемонстрирована возможность манипулирования доменными границами в магнитоупругих нанополосках с помощью однородных механических напряжений [8, 9]. Интерес к исследованию движения доменов и доменных границ в значительной степени обусловлен разработкой устройств спинтроники

с нанометровыми размерами элементов. Доменные границы рассматриваются как ключевые элементы устройств обработки информации, включая устройства энергонезависимой твердотельной памяти [4, 9–15]. Такая память потенциально обеспечит значительно большую плотность записи, чем современные жесткие диски, что совместимо с высокой скоростью чтения/записи позволяет рассматривать ее как возможную универсальную память.

Управление положением или скоростью доменной границы в нанополосках определенной формы на пьезоэлектрических подложках возможно при нарушении симметрии магнитных состояний в одномерных ферромагнетиках. Такой подход дает необычные конфигурации доменных границ и скорости доменных границ того же порядка величины [9], как и при воздействии магнитными полями или спин-поляризованными токами, а потребление энергии, необходимой для перемещения доменной границы, значительно уменьшается.

В данной работе проведено экспериментальное изучение равновесного распределения намагниченности и процессов перемагничивания магнитоупругих наноструктур в виде нанополосок

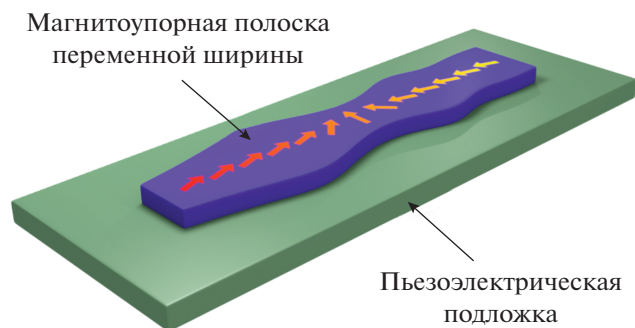


Рис. 1. Модель доменной структуры в магнитоупругой нанополоске переменной ширины.

постоянной или переменной ширины (рис. 1). Многослойные магнестрикционные пленки состава $TbCo_2/FeCo$ толщиной ~ 20 нм получены распылением на пьезоэлектрических подложках PMN-PT с помощью установки Leybold Z550 [16]. Синтез пленок проведен в присутствии магнитного поля для формирования нужной величины анизотропии и направления оси легкого намагничивания в плоскости многослойной пленки. Затем для экспериментального изучения распределения намагниченности, процессов перемагничивания, формирования и движения доменных границ в пленках с помощью литографии сформированы микро- и наноструктуры различной формы; на рис. 2, 3 представлены нанополоски параболического профиля.

В исследованных нанополосках ось легкого намагничивания направлена вдоль длинной стороны полоски. С помощью математического моделирования ранее показано [9], что доменная граница в нанополоске параболического профи-

ля в равновесном состоянии находится в центре полоски. При приложении механического напряжения (в результате приложения электрического поля к пьезоподложке) доменная граница смещается в новое равновесное положение, что и может быть использовано в логических и запоминающих устройствах наноспинтроники.

На рис. 3 приведены данные о магнитной структуре нанополоски параболической формы, полученные методом магнитно-силовой микроскопии (МСМ). Исследование доменной структуры нанополосок проводилось с помощью атомно-силового микроскопа Smart-SPM (AIST-NT). Данный прибор имеет встроенный магнит с программной механической перестройкой магнитного поля в диапазоне $-2000\dots+2000$ Э. Для регистрации магнитного состояния использовалась методика, подобная описанной в работе [17]: с малым шагом изменения магнитного поля ($1-10$ Э) снималось несколько сотен МСМ-сканов, охватывающих весь цикл перемагничивания образца. Далее из полученных изображений формировали фильм, позволяющий последовательно наблюдать различные стадии процесса изменения доменной структуры нанополоски. На рис. 3 представлены несколько МСМ-сканов, иллюстрирующих наиболее важные изменения намагниченности магнитоупругой нанополоски.

При проведении МСМ-измерений использовались зонды PPP-LM-MFMR (Nanosensors) с пониженным магнитным моментом. Все эксперименты были выполнены на воздухе при комнатной температуре. Для стабилизации работы прибора в течение длительного времени снятия серии изображений после каждого сканирования автоматически проводилась операция по коррекции амплитуды и резонансной частоты колеба-

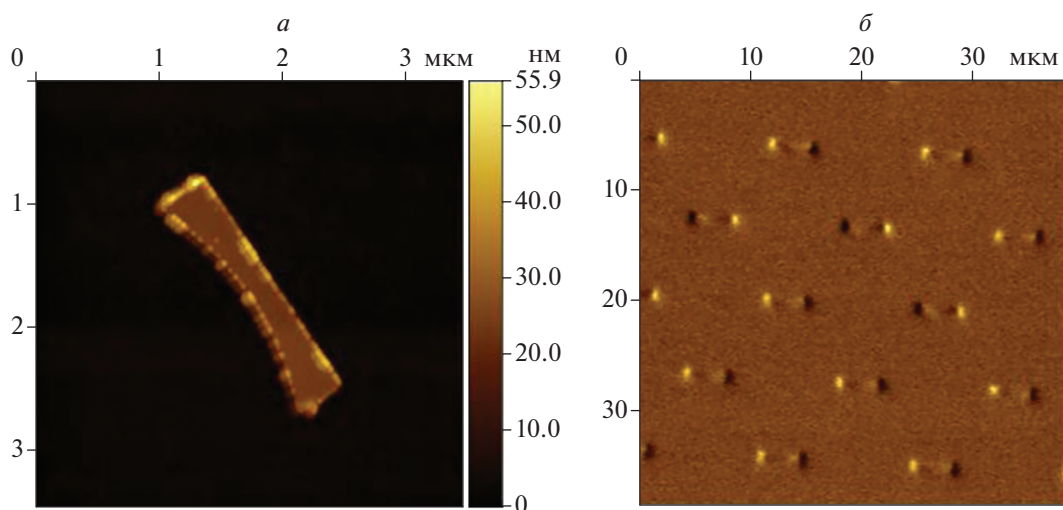


Рис. 2. *a* – Топография магнитоупругой нанополоски параболического профиля (атомно-силовая микроскопия) и *б* – массив таких нанополосок на пьезоподложке (магнитно-силовая микроскопия).

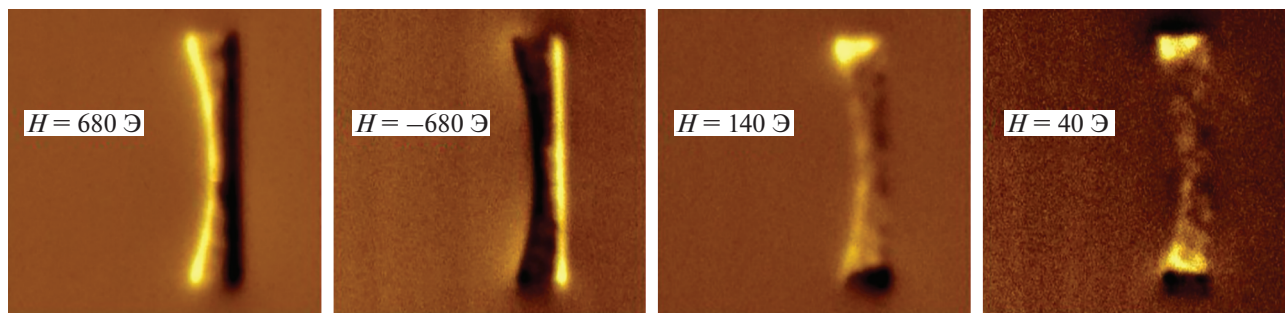


Рис. 3. Магнитная нанополоска параболического профиля в присутствии внешнего магнитного поля, направленного в плоскости пленки перпендикулярно длинной стороне структуры (магнитно-силовая микроскопия, напряженность магнитного поля указана на сканах).

ний зонда, а также компенсации дрейфа образца. Измерения проводились как на отдельных нанополосках, чтобы детально рассмотреть их доменную структуру, так и на массивах подобных нанополосок (рис. 2б), для выявления разброса полей перемагничивания.

При приложении магнитного поля H вдоль оси легкого намагничивания нанополоска обычно намагничивается до насыщения и находится в мономомном состоянии. При приложении перпендикулярно оси легкого намагничивания магнитного поля H , значительно превышающего коэрцитивную силу пленки (рис. 3, $H = \pm 680$ Э), вектор намагниченности в наноструктуре ориентируется вдоль приложенного магнитного поля. В меньших магнитных полях, в зависимости от предыстории процесса намагничивания/размагничивания нанополоски, возможны два варианта формирования равновесной магнитной структуры – с несимметричным (рис. 3, $H = 140$ Э) или симметричным (рис. 3, $H = 40$ Э) направлением векторов намагниченности на краях нанополоски. Отметим, что второй вариант близок к предложенной в [9] модели доменной структуры в магнитоупругой нанополоске переменной ширины (рис. 1).

Таким образом, экспериментально изучены квазистатические процессы перемагничивания магнитоупругих нанополосок параболической формы. Показано, что нарушение симметрии устойчивых состояний намагниченности в нанополоске может быть реализовано с помощью статического магнитного поля, приложенного перпендикулярно легкой оси ферромагнетика. При этом возможно разбиение нанополоски параболической формы на два домена; доменная граница в равновесном состоянии находится в центре нанополоски, в узкой ее части. Дальнейшее изменение состояний намагниченности допускает их манипуляцию (например, передвижение доменной границы) посредством однородных механических воздействий, индуцированных приложением электрического поля к пьезоэлектрической подложке.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 18-52-16006, 18-29-27020) и РНФ (проект 19-19-00607).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Giordano S., Dusch Y., Tiercelin N. et al. // Phys. Rev. B. 2012. V. 85. Art. № 155321.
2. Stupakiewicz A., Szerenos K., Afanasiev D. et al. // Nature. 2017. V. 542. P. 71.
3. Schlauderer S., Lange C., Baierl S. et al. // Nature. 2019. V. 569. P. 383.
4. Fernandez-Pacheco A., Streubel R., Fruchart O. et al. // Nature Commun. 2017. V. 8. P. 15756.
5. Морозов А.И. // ФТТ. 2014. Т. 56. С. 833; Morozov A.I. // Phys. Sol. St. 2014. V. 56. P. 865.
6. Biswas A.K., Atulasimha J., Bandyopadhyay S. // Nanotechnology. 2015. V. 26. Art. № 285201.
7. Si C., Suna Z., Liu F. // Nanoscale. 2016. V. 8. P. 3207.
8. Mathurin T., Giordano S., Dusch Y. et al. // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 108. Art. № 082401.
9. Mathurin T., Giordano S., Dusch Y. et al. // Phys. Rev. B. 2017. V. 95. Art. № 140405(R).
10. Parkin S., Yang S.-H. // Nature Nanotech. 2015. V. 10. P. 195.
11. Van de Wiele B., Hämäläinen S.J., Baláz P. et al. // Sci. Rep. 2016. V. 6. P. 21330.
12. Buijnsters F. J. et al. // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 116. P. 147204.
13. Gerasimov M.V., Logunov M.V., Spirin A. V. et al. // Phys. Rev. B. 2016. V. 94. Art. № 014434.
14. Moretti S., Raposo V., Martinez E. et al. // Phys. Rev. B. 2017. V. 95. Art. № 064419.
15. Quessab Y., Medapalli R., El Hadri M.S. et al. // Phys. Rev. B. 2018. V. 97. Art. № 054419.
16. Dusch Y., Tiercelin N., Klimov A. et al. // J. Appl. Phys. 2013. V. 113. P. 17C719.
17. Темирязов А.Г., Саунин С.А., Сизов В.Е. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2014. Т. 78. С. 78; Temiryazev A.G., Saunin S.A., Sizov V.E. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2014. V. 78. P. 49.