Письма в ЖЭТФ, том 103, вып. 4, с. 298 – 302

Кинетика перемагничивания микрополосок пермаллой–ниобий под действием импульсов магнитного поля и тока

С. В. Егоров, Л. С. Успенская[1)]

Институт физики твердого тела РАН, 142432 Черноголовка, Россия

Поступила в редакцию 8 декабря 2015 г.

После переработки 31 декабря 2015 г.

Экспериментально изучена кинетика перемагничивания двухслойных микрополосок пермаллой–ниобий под действием импульсов магнитного поля и под действием тока тока. Обнаружено принципиальное отличие как в виде формирующихся магнитных структур, так и в динамических характеристиках процесса. Это отличие особенно разительно при низких температурах. Предпринята попытка качественного объяснения обнаруженной аномально высокой скорости процессов за счет возникновения нелинейных возбуждений перед движущейся доменной границей в условиях понижения приложенным током барьеров для ее движения. Для окончательных выводов требуются серьезные количественные расчеты.

DOI: 10.7868/S0370274X16040111

Изменение магнитной доменной структуры ферромагнитного слоя спин-поляризованным током в ферромагнитных структурах широко исследуется в связи с потенциальными применениями этих эффектов в спинтронике [1–3]. Изучаются преобразования структуры под действием тока, движение магнитных доменных границ (ДГ), обсуждаются механизмы влияния тока на структуру [4–9], определена скорость движения ДГ [9], обнаружены осцилляции ДГ при предельных скоростях движения [10]. Более того, в настоящее время уже разрабатываются новые типы устройств записи и считывания информации, новые логические элементы, резистивные переключатели [11–13], использующие действие спин-поляризованного тока. Фазовращатели, магниторезистивные переключатели, диоды, транзисторы и ячейки памяти на основе гибридных наноструктур сверхпроводник–ферромагнетик (S/F) создаются для криоэлектроники [14–16]. Сейчас эти элементы переключаются магнитным полем. Однако возможно, что более эффективным в плане увеличения интеграции и уменьшения энергозатрат будет их переключение спин-поляризованным электрическим током.

В нашей предыдущей публикации [17] было показано, что смещение ДГ током в магнитном слое бислойной ферромагнитно-сверхпроводящей (F/S) полоски возможно реализовать как при высокой, так и при низкой температуре, т.е. и когда S-слой находится в нормальном состоянии, и когда он находится в сверхпроводящем состоянии. Кроме того, было показано, что при $T \sim 6$ K скорость ДГ достигает гигантской величины, $V_I \sim 4000$ м/с, при относительно малых плотностях тока, $j \sim 5 \cdot 10^{11}$ A/м^2. Эта скорость по крайней мере на два порядка превышает максимальную скорость движения той же ДГ при ее смещении под действием импульсного магнитного поля. Тогда же было замечено, что движущаяся со скоростью V_I граница значительно расширяется и даже может трансформироваться в домен с поперечной к полосковой линии намагниченностью, сохраняющийся и после окончания действия тока [18]. Данный результат не удалось объяснить в рамках существующих моделей. Было высказано предположение, что эффект может быть связан с поперечным магнитным полем, неизбежно возникающим при протекании тока. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования преобразования магнитной доменной структуры под действием импульсных магнитных полей различной ориентации и под действием импульсов тока. Сообщается о наблюдении принципиальных отличий при возбуждении границ полем и током. Обсуждается природа наблюдаемых отличий. Предложена схема использования обнаруженного эффекта для создания резистивных устройств, последовательно переключаемых импульсами тока.

Эксперименты выполнялись на двухслойной полоске пермаллой–ниобий длиной 1 мм, шириной 5 мкм с толщинами слоев 40 и 100 нм (рис. 1). Струк-

[1)]e-mail: uspenska@issp.ac.ru

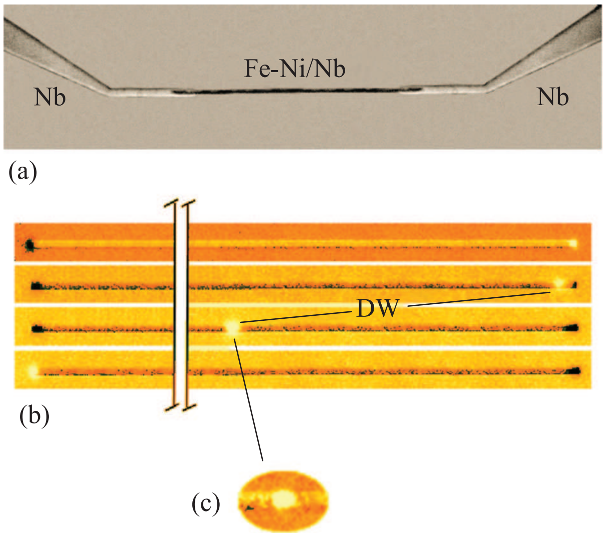

Рис. 1. (Цветной онлайн) (a) – Реальное изображение структуры: полоска пермаллоя на ниобии в центре с токоподводящими ниобиевыми контактами. (b) – Доменная структура одной и той же полоски пермаллоя в нулевом поле (однодоменное состояние), а также в полях $0.80 \cdot 10^3$ и $0.81 \cdot 10^3$ А/м (часть изображения вырезана, чтобы были видны оба конца пермаллоя; DW – доменная граница, зародившаяся на правом конце полоски и смещающаяся под действием магнитного поля налево). (c) – Увеличенное изображение ДГ

тура формировалась методом взрывной литографии из соответствующей двухслойной пленки, изготовленной магнетронным распылением (при комнатной температуре в присутствии плоскостного поля ~ 5000 А/м) на окисленную кремниевую подложку. Анизотропия в плоскости в направлении полоски составляла ~ 80 А/м. Спонтанная намагниченность $\mu_0 M_s \sim 1$ Т была направлена вдоль полоски.

Как и в предыдущих работах, наблюдение магнитной доменной структуры выполнялось методом магнитооптической визуализации [17, 18] с помощью пленки иттрий-железистого граната (индикатор), помещенной на поверхность исследуемого образца. Поля рассеяния на краях образца и над доменными границами обусловливают локальное вращение плоскости поляризации проходящего через индикатор линейно поляризованного света, пропорциональное величине поля. При наблюдении в поляризационно-оптическом микроскопе при раскрещенных на $5°$ поляризаторе и анализаторе области с противоположным направлением индукции выявляются как области локального просветления или затемнения на изображении образца (рис. 1b, c и 2). Однако видимые изображения границ в узких полосках пермаллоя при таких наблюдениях (рис. 1b, c и 2a, b) не соответствуют реальному распределению намагниченности в окрестности границ, а ширина изображения не отражает реальную ширину доменных границ. Поле насыщения индикаторной пленки $\sim 8 \cdot 10^4$ А/м. Спонтанная намагниченность пермаллоя ~ 1 Т. Поэтому поля рассеяния в окрестности границ насыщают индикатор в области много шире самих границ. В результате границы и блоховского, и вихревого типа выглядят яркими симметричными пятнами, как на рис. 1b, c и 2a, b, а скрученные или неелевские границы имеют малую яркость и дают несимметричный контраст по сторонам полоски пермаллоя.

Для определения типа границ в наших образцах мы использовали биттеровский метод [19], декорируя структуру феррожидкостью EMG 705, в которой были взвешены наночастицы размером 10 нм с намагниченностью ~ 22 мТ. Сравнивая магнитооптические наблюдения с биттеровскими фигурами, мы установили, что на торцах наших полосок в нулевом магнитном поле формируются обычные замыкающие домены, а доменные границы представляют собой тонкие линии, расположенные поперек полосок пермаллоя. Это дало нам основания предположить, что в полосках шириной 5 мкм, как и в широких пленках [20], реализуются границы блоховского типа с разворотом намагниченности через перпендикулярное к плоскости полосок направление.

Квазистатический и динамический процессы перемагничивания регистрировались в реальном времени камерой SDU285. Использовались экспозиции от 1 мкс до 10 мс. Последовательная регистрация видеокадров осуществлялась по синхросигналу, передаваемому с возбуждающего генератора с заданной задержкой по времени. Для регистрации более коротких промежутков времени использовалась вспышка лазера. Для улучшения контраста изображения и повышения чувствительности применялось вычитание фона. Скорость движения границ оценивалась по расстоянию, проходимому границей за время между кадрами, как это делалось в работе [18].

В результате проведенных исследований было установлено, что после квазистатического перемагничивания магнитным полем любого направления полоски пермаллоя остаются в однодоменном состоянии с намагниченностью, ориентированной вдоль полос. Это находится в согласии с условиями изготовления образцов и их формой, характеризующейся большим отношением геометрических размеров образцов, равным 25000 : 125 : 1. При импульсном перемагничивании сформировавшаяся структура зависит от направления поля, длительности и амплитуды импульсов.

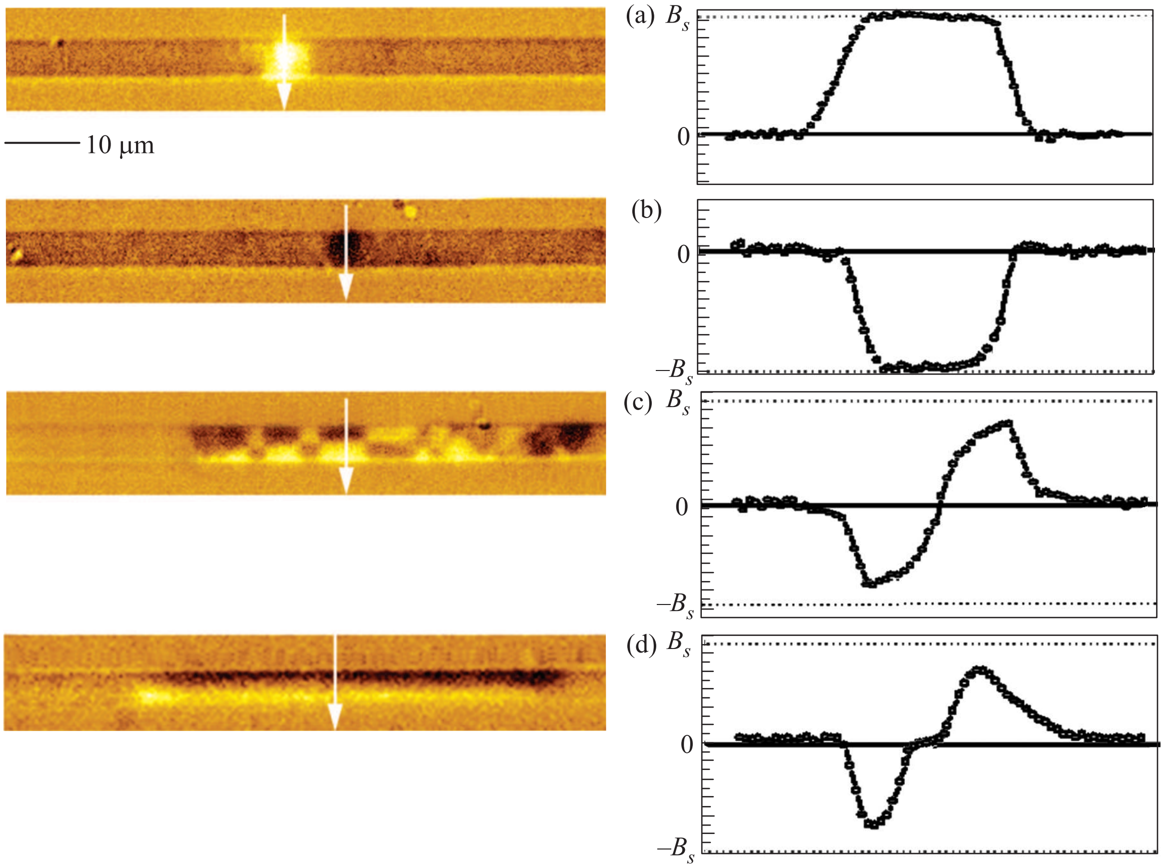

Рис. 2. (Цветной онлайн) Доменная структура, сформировавшаяся в полоске пермаллоя после импульсного перемагничивания продольным полем (a, b), перпендикулярным полем (c) и током (d), и профили распределения перпендикулярной компоненты намагниченности в структурах, взятые вдоль направлений, показанных белыми стрелками

В плоскостном поле, приложенном вдоль или под углом, отличным от 90°, к полоске, на одном или обоих ее концах зарождаются ДГ, которые смещаются в глубь образца. Зарождение происходит с задержкой относительно начала импульса, которая при температуре 10 К достигает 10^{-4} с. Коэрцитивность возрастает по мере увеличения угла почти пропорционально уменьшению проекции поля на направление вдоль полоски, увеличиваясь в три раза при изменении угла от 0° до 80°. По мере увеличения угла предельная скорость границ также возрастает. В работе [21] было показано, что при наклоне поля может наблюдаться трехкратное увеличение скорости границ по сравнению с их скоростью в продольном поле. При достаточно коротких импульсах поля удается "заморозить" границы в полоске. Их внешний вид при этом остается достаточно симметричным, т.е. структура не меняется (рис. 2a).

Экспериментально наблюдаемая картина перемагничивания в перпендикулярном магнитном поле оказалась зависящей не столько от длительности импульсов поля, сколько от их величины и обратного фронта. Если поле не превышало ∼24000 А/м, то имели место вращение намагниченности к направлению поля и возврат образца к однодоменному состоянию независимо от наличия или отсутствия доменных границ перед приложением поля. Если же амплитуда поля превышала величину ∼24000 А/м, то после импульсного прерывания поля в образце могла "заморозиться" доменная структура типа показанной на рис. 2b. Эта структура представляла собой набор вихрей, зародившихся на краях полоски, переместившихся на бóльшую или меньшую глубину от края полоски к центру и сформировавших структуру доменов со знакопеременной перпендикулярной намагниченностью в них. Структура являлась квазиустойчивой и исчезала после любого намагничивания полоски. Более того, эта структура была невоспроизводима. После каждого следующего мощного импульса перпендикулярного поля "замораживалась" структура такого же типа, но с доменами другой длины и другим количеством доменов, расположенных в других местах полоски. Здесь важно отметить, что ни при каких условиях не удалось создать состояние с намагниченностью, ориентированной перпендикулярно к полоске, показанное на рис. 2c, которое возникало при приложении достаточно сильных импульсов тока. Расчет с помощью программы OMMMF [22] "равновесного" процесса перемагничивания узких полосок пермаллоя в плоскостном магнитном поле также не позволил найти такое соотношение геометрических размеров и анизотропий, чтобы оказалось возможным остаточное (в нулевом внешнем магнитном поле) распределение векторов магнитного момента, ориентированное в плоскости поперек узкой и длинной полоски пермаллоя. Таким образом, "раскрытие" доменной границы в домен с поперечной намагниченностью является специфической чертой именно изменения структуры под действием протекающего тока.

Экспериментально наблюдаемое изменение вида доменных границ при их движении под действием импульсов продвигающего тока подробно описано в нашей предыдущей работе [18]. Когда амплитуда импульсов тока превосходит величину $j \sim 10^{11}$ А/м^2, граница начинает смещаться на малые расстояния, $\sim 10^{-8}$ м. По мере усиления воздействия смещение возрастает и становится заметным искажение структуры границы: нарушается симметрия в их изображении, свидетельствуя о наклоне векторов намагниченности к плоскости полоски пермаллоя (рис. 3a). И наконец, при токе $j \sim 5 \cdot 10^{11}$ А/м^2 наклон достигает такой величины, что в результате движения границы формируется домен с намагниченностью в плоскости пластины, отделенный от основных доменов (бывших доменов 180-градусного соседства) 90-градусными границами. Расширение доменной границы означает, что ее передний и задний фронты двигались с различными скоростями (рис. 3a). Характерно, что и та, и другая скорости возрастают при понижении температуры (рис. 3b). При этом скорость заднего фронта V_I^{back} изменяется всего в пару раз, в то время как скорость переднего фронта V_I^{front} возрастает в два десятка раз. Величины V_I^{back} при комнатной температуре ($T = 300$ K) и при низкой температуре ($T = 6$ K) находятся в разумном согласии с оценками, сделанными в [17]. Величина смещения заднего фронта границ также соответствует ожидаемой согласно представлениям о смещении ДГ под действием мгновенно нарастающего тока спин-поляризованных электронов, взаимодействующих с магнитной подсистемой через $s{-}d$ обменное взаимодействие [23]. Однако поведение переднего фронта границы не описывается в рамках существующих представлений.

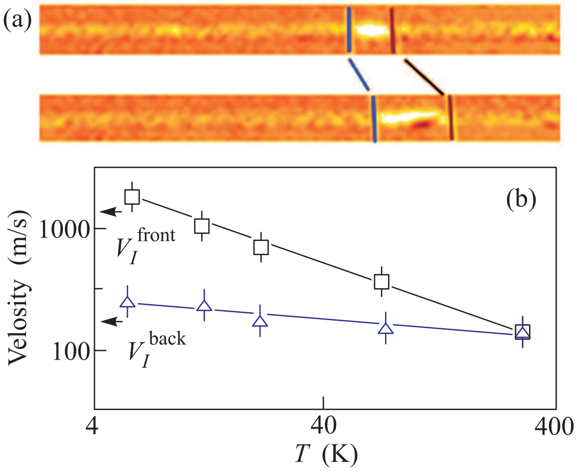

Рис. 3. (Цветной онлайн) (a) – Расширение ДГ при смещении под действием импульсов электрического тока (линии проведены, чтобы подчеркнуть различие в смещении переднего и заднего фронтов границы). (b) – Вариация максимальных скоростей переднего и заднего фронтов границы с температурой

Таким образом, ни поперечное магнитное поле, ни ток не могут сами по себе привести к гигантскому "раскрытию" доменной границы и к развитию гигантской скорости порядка скорости спиновых волн. Вместе с тем ток может изменить структуру границы, наклонить ее [23] и тем самым изменить пиннинг в области границы и перед ней и создать новые условия для действия перпендикулярного магнитного поля на границу. Если без тока перпендикулярное поле обусловливает лишь процессы вращения намагниченности, то в присутствии поля из-за индуцированного током наклона спинов в границе такое поле уже может оказывать давление на границу и давать свой вклад в ее смещение и раскрытие, преимущественно в направлении протекания тока, где пиннинг подавлен. Кроме того, плоскостное поле увеличивает предельную скорость движения границы [24] пропорционально отношению величины этого поля к полю анизотропии. И наконец, протекающий ток может генерировать спиновые волны перед движущейся границей, которые обеспечивают возмущение намагниченности перед фронтом границы и в результате объединения этих возмущений с движущейся границей дают эффективное возрастание скорости распространения фронта перемагничивания. Аналогичный эффект наблюдался при импульсном перемагничивании ферритов-гранатов [25] и в тонких магнитных пленках при протекании тока через контакт

[26, 27]. Остается открытым вопрос о том, почему после разворота магнитных моментов в плоскость поперек узкой полоски полем они не стабилизируются, а после тока стабилизируются. Этот эффект можно пытаться объяснить через различие в эффектах магнитного последействия. Вместе с тем не вполне ясно, какова конфигурация магнитного поля в магнитном проводнике с доменной структурой при импульсном включении тока. Совершенно не исключено, что при субмикросекундных временах нарастания тока и его конфигурация, и конфигурация поля значительно отличаются от статической. Все это требует серьезных электромагнитных расчетов.

В заключение хотелось бы подчеркнуть, что образование рассмотренного домена наблюдалось в полосках шириной 5 и 7 мкм при температурах 6–12 К. Длина формирующегося домена однозначно задается параметрами импульса тока. Формирование домена происходит за десятые доли микросекунды. При этом изменяется конфигурация полей рассеяния: под и над полоской пермаллоя в области домена появляется плоскостное поле, а рядом – перпендикулярное плоскости полоски поле. Импульсы обратного тока сокращают этот домен. Поэтому если над структурой напылить некий набор элементов, резистивное состояние которых зависит от магнитного поля, то можно организовать последовательное переключение элементов, сохраняющееся при выключении тока, открывая домен, и последовательное восстановление резистивного состояния, укорачивая этот домен импульсами обратного тока. При расстоянии между элементами порядка 10 мкм время переключения будет определяться длительностью фронта импульса тока и может составлять $2 \cdot 10^{-9}$ с, что соответствует времени распространения спиновых волн в пермаллое.

Работа выполнена в ИФТТ РАН в рамках проекта # 14-12-01290 Российского научного фонда. Авторы благодарны В. Эдельштейну, И. и А. Бобковым, А. Звездину и А. Морозову за полезные обсуждения результатов работы.

---

1. S. S. P. Parkin, Science **320**, 190 (2008).
2. D. A. Allwood, G. Xiong, C. C. Faulkner, D. Atkinson, D. Petit, and R. P. Cowburn, Science **309**, 1688 (2005).
3. M. Hayashi, L. Thomas, R. Moriya, C. Rettner, and S. S. P. Parkin, Science **320**, 209 (2008).
4. L. Berger, J. Appl. Phys. **55**, 1954 (1984).
5. J. C. Slonczewski, J. Mag. Mag. Mat. **159**, L1 (1996).
6. J. Grollier, P. Boulenc, V. Cros, A. Hamzic, A. Vaurès, A. Fert, and G. Faini, Appl. Phys. Lett. **83**, 509 (2003).
7. N. Vernier, Europhys. Lett. **65**, 526 (2004).
8. G. Tatara, H. Kohno, and J. Shibata, Phys. Rep. **468**, 213 (2008).
9. O. Boulle, G. Malinovski, and M. Klaui, Mat. Sci. Engin. R **72**, 159 (2011).
10. L. Thomas, M. Hayashi, X. Jiang, R. Moriya, C. Rettner, and S. S. P. Parkin, Nature **443**, 197 (2006).
11. S. Maekawa, Nat. Mat. **8**, 777 (2009).
12. C. H. Marrows, Adv. Phys. **54**, 585 (2005).
13. Yu. V. Gulyaev, P. E. Zil'berman, A. I. Panas, and E. M. Epshtein, Phys. Usp. **52**, 335 (2009).
14. M. G. Blamire and J. W. A. Robinson, J. Phys.: Cond. Mat. **26**, 453201 (2014).
15. T. I. Larkin, V. V. Bol'ginov, V. S. Stolyarov, V. V. Ryazanov, I. V. Vernik, S. K. Tolpygo, and O. A. Mukhanov, Appl. Phys. Lett. **100**, 222601 (2012).
16. A. Brataas and K. M. D. Hals, Nat. Nanotechnol. **9**, 86 (2014).
17. С. В. Егоров, А. М. Бобков, И. В. Бобкова, Л. С. Успенская, Письма ЖЭТФ **101**, 34 (2015).
18. L. S. Uspenskaya, S. V. Egorov, and V. A. Skidanov, IEEE Trans. Magn. **51**, 4300104 (2015).
19. A. Hubert and R. Schafer, *Magnetic Domains: The Analisys of Magnetic Microstructures*, Springer, Berlin (1998).
20. L. S. Uspenskaya, O. A. Tikhomirov, S. I. Bozhko, S. V. Egorov, and A. A. Chugunov, J. Appl. Phys. **113**, 163907 (2013).
21. S. Glathe, M. Zeisberger, U. Hübner, and R. Mattheis, Phys. Rev. B **81**, 020412 (2010).
22. M. J. Donahue and D. G. Porter, *OOMMF User's Guide, Version 1.0. Interagency Report NISTIR 6376*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (1999).
23. L. Berger, J. Appl. Phys. **71** 2721 (1992)
24. В. В. Волков, В. А. Боков, ФТТ **50**, 193 (2008).
25. Л. П. Иванов, А. С. Логгинов, В. В. Рандошкин, Р. В. Телеснин, Письма в ЖЭТФ **23**, 627 (1976).
26. М. В. Цой, В. С. Цой, Письма в ЖЭТФ **73**, 104 (2001).
27. M. Tsoi, A. G. M. Jansen, J. Bass, W.-C. Chiang, M. Seck, V. Tsoi, and P. Wyder, Phys. Rev. Lett. **80**, 4281 (1998).