

05

Микромагнитная структура и локальные магнитные свойства пермалловых полосок микронных размеров

© Е.Е. Шалыгина, Н.М. Абросимова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
E-mail: shal@magn.phys.msu.su

Поступило в Редакцию 10 января 2002 г.
В окончательной редакции 18 марта 2002 г.

Микромагнитная структура и локальные магнитные свойства пермалловых полосок микронных размеров (микрострайпов) с аспект-отношением, изменяющимся от 2 до 15, были исследованы с помощью сканирующей Керр-микроскопии. Обнаружена сильная зависимость локальных магнитных свойств микрострайпов от их размеров и положения измеряемого микроучастка. Установлено, что локальные магнитные свойства и распределение намагниченности в изучаемых образцах определяются неоднородными магнитодипольными полями.

В последние годы большое внимание уделяется исследованию локальных магнитных свойств и процессов перемагничивания $2D$ - и $1D$ -низкоразмерных магнитных материалов (НММ), в которых один или два размера лежат в микро- или нанометрическом диапазоне. Наибольший интерес привлекают к себе НММ, представляющие собой совокупность магнитных микро- или нанопроволок, частным случаем которых являются ультратонкие полоски микронных размеров и магнитные точки (dots). Основными методами получения НММ являются высокоразрешающая электронно-лучевая литография и электро- или химическое осаждение магнитных $3d$ -металлов на пористые полупроводниковые подложки. Изучение микромагнитной структуры (равновесного распределения намагниченности) указанных образцов, влияния их размеров на локальные магнитные свойства, а также взаимного влияния низкоразмерных магнитных элементов на процессы перемагничивания является актуальной проблемой физики магнитных явлений. Контроль магнитного поведения НММ представляет интерес и с точки зрения практических приложений, что обусловлено применением этих

материалов в миниатюризованных устройствах современной микроэлектроники. Различные экспериментальные методики (включая атомный и магнитный силовой микроскоп, СКВИД-магнитометр) используются при исследовании микромагнитной структуры и магнитных свойств низкоразмерных магнитных материалов (см., например, [1–9]). Наиболее оперативным способом изучения НММ является сканирующая Керр-микроскопия.

Целью данной работы является изучение с помощью метода сканирующей Керр-микроскопии локальных магнитных свойств пермаллоевых полосок микронных размеров с аспект-отношением (отношение длины l к ширине w), изменяющимся от 2 до 15. В рамках решаемой задачи большое внимание было уделено проблеме магнитоэлектрического взаимодействия микрострайпов.

Изучаемые образцы, представляющие собой совокупность периодически расположенных микрострайпов, были приготовлены из пермаллоевых $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ пленок методом высокоразрешающей электронно-лучевой литографии. $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ пленки толщиной 30 нм были получены методом DC магнетронного напыления при базовом давлении в камере порядка 10^{-8} Торр и давлении аргонового газа $1 \cdot 10^{-4}$ Торр. Было обнаружено, что исходные $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ пленки имеют одноосную магнитную анизотропию с осью легкого намагничивания (ОЛН) в их плоскости. В случае перемагничивания пленок вдоль ОЛН поле насыщения H_S и коэрцитивная сила H_C были равны 8.2 и 1.2 Ое соответственно. Полное число микрострайпов в каждом образце было $\sim 1 \cdot 10^6$. Большая сторона микрострайпов с длиной l была параллельна ОЛН исходных пленок. Ширина страйпа w была равна $2 \mu\text{m}$. Фактически был получен набор образцов, в которых аспект-отношение l/w варьировалось от 2 до 15, а расстояние между микрострайпами в ряду S_1 — от 0.25 до $4 \mu\text{m}$. Расстояние между рядами (S_2) было равно $2 \mu\text{m}$. Исследуемые микрострайпы имели четкие 90° боковые грани. Были приготовлены также образцы с одиночными микрострайпами с размерами, указанными выше.

Исследования микромагнитной структуры и локальных магнитных свойств описанных выше образцов были выполнены на магнитооптическом микромагнетометре. Экспериментальная установка создана на базе поляризационного микроскопа с 1200-кратным увеличением и линейным разрешением вплоть до $0.2 \mu\text{m}$. Размер изучаемого приповерхностного микроучастка образца определяется размером щели,

установленной в плоскости изображения микроскопа перед световым детектором. В данной работе при перемещении $0.5 \times 2 \text{ mm}$ щели по изображению микрострайпа вдоль его длины l локальные петли гистерезиса и распределения плоскостных компонент намагниченности были измерены с помощью экваториального эффекта Керра. Распределения компоненты намагниченности, перпендикулярной к поверхности микрострайпа M_n , были измерены с помощью полярного эффекта Керра. Поскольку для повышения чувствительности методики использовался модуляционный метод регистрации магнитооптических сигналов, то образец перемещался переменным магнитным полем \mathbf{H} с частотой $f = 80 \text{ Hz}$. Поле \mathbf{H} было приложено в плоскости образцов вдоль длины микрострайпов. Фактически измерялись зависимости $\delta(l, H)/\delta_S \sim M(l, H)/M_S$, где $\delta = (I - I_0)/I_0$; I и I_0 — интенсивности света, отраженного от намагниченного и не намагниченного образца соответственно, δ_S — величина δ при $M = M_S$, M_S — намагниченность насыщения. Все измерения были выполнены в центральной части изучаемых образцов.

На рис. 1 приведены локальные петли гистерезиса, измеренные на центральном и краевом участках микрострайпов различной длины. Из рис. 1 можно видеть, что локальные магнитные характеристики микрострайпов зависят как от их размеров, так и от месторасположения диагностируемого участка в микрострайпе. В частности, локальные значения H_S возрастают с уменьшением l и с увеличением расстояния от центра микрострайпа. Было найдено, что локальные значения поля насыщения H_S микрострайпов больше, чем H_S сплошных пленок, но меньше, чем H_S одиночных микрострайпов. Мы рассчитали локальные значения H_S , используя аналитическое выражение для локального размагничивающего фактора центральной части прямоугольного элемента [10] (рис. 2, а). Оказалось, что при $l/w < 7$ рассчитанные и экспериментальные значения H_S практически совпадают, а при $l/w > 7$ экспериментальные значения H_S значительно выше рассчитанных. Объяснение этого факта может состоять в следующем. Измерения распределений намагниченности показали, что в микрострайпах с $l/w > 7$ существуют как параллельная (M_{\parallel}), так и перпендикулярная (M_{\perp}) приложенному магнитному полю плоскостные компоненты намагниченности. Зависимость $M_{\perp}(l)$ имеет знакопеременный характер, причем M_{\perp} отлична от нуля вплоть до больших магнитных полей, в которых компонента M_{\parallel} уже практически не изменяется и равна $0.97\text{--}0.98 M_S$. Эти данные позволили предположить, что в микрострайпах с $l/w > 7$

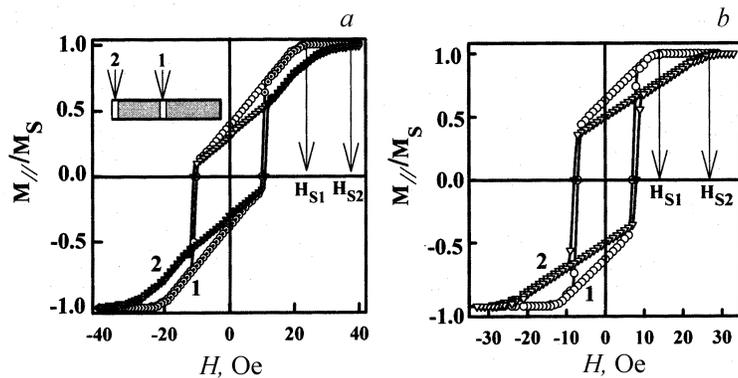


Рис. 1. Локальные петли гистерезиса для центрального (1) и краевого (2) участков микрострейпов с размерами $2 \times 4 \times 0.015 \mu\text{m}$ и $2 \times 6 \times 0.015 \mu\text{m}$ (левая и правая панель соответственно). Измерения были выполнены с помощью экваториального эффекта Керра. Низкочастотное магнитное поле было приложено вдоль длины микрострейпа l . Расстояние между стрейпами для обоих образцов $S_1 = 0.5 \mu\text{m}$. Вставка на левой панели показывает участки, для которых были измерены петли.

реализуется buckling мода перемагничивания. Существование M_{\perp} вызывает появление полей рассеяния, перпендикулярных приложенному магнитному полю \mathbf{H} , что обуславливает блокировку процессов перемагничивания и приводит к возрастанию H_S .

Форма локальных петель гистерезиса на рис. 1, в частности практически линейная зависимость намагниченности от величины магнитного поля, свидетельствует о том, что перемагничивание микрострейпов осуществляется в основном за счет вращения векторов локальной намагниченности.

Остановимся подробнее на результатах исследования микромагнитной структуры (равновесного распределения намагниченности) в микрострейпах. На рис. 3,а приведены распределения плоскостных компонент намагниченности, параллельных приложенному вдоль l магнитному полю, полученные для образцов с микрострейпами одного размера, но с различными расстояниями между ними S_1 . Измерения полярного эффекта Керра (ПЭК) показали, что помимо плоскостных компонент намагниченности существуют составляющие намагничен-

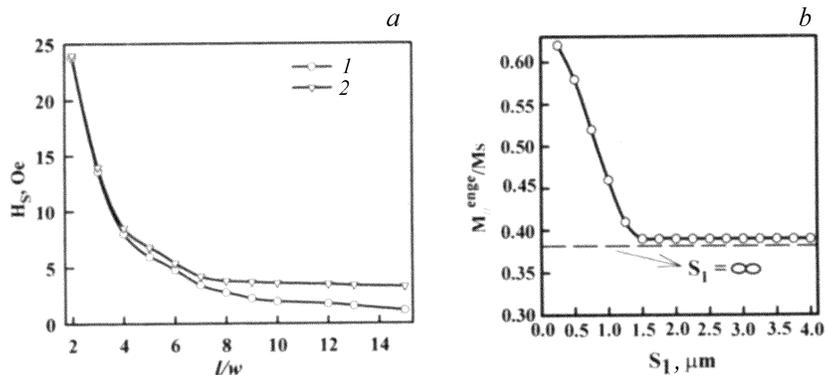


Рис. 2. Зависимость рассчитанных (1) и экспериментально найденных (2) локальных значений поля насыщения H_s центрального участка страйпа от аспектно-отношения l/w (a) и зависимость плоскостной компоненты намагниченности краевого участка микрострайпа размером $2 \times 6 \times 0.015 \mu\text{m}$ от расстояния S_1 между микрострайпами (b). Пунктирная линия соответствует намагниченности краевого участка изолированного микрострайпа.

ности, перпендикулярные поверхности микрострайпов M_n . ПЭК был измерен в поле \mathbf{H} , параллельном l , при нормальном падении света на образец. Зависимости $M_n(l)$, измеренные на тех же образцах, приведены на рис. 3, b. Из рис. 3 видно, что в плоскостном поле компонента M_n существует только на краевых участках микрострайпов. Появление M_n можно объяснить наличием полей рассеяния в этих областях. Можно видеть также, что локальные компоненты намагниченности (как M_n , так и M_{\parallel}) на краевых участках микрострайпов увеличиваются при уменьшении S_1 , при этом локальные значения M_n и M_{\parallel} центральных участков изменяются незначительно. Более того, было обнаружено, что зависимости $M_{\parallel}(l)$ и $M_n(l)$ имеют асимметричную форму, если значения S_1 имеют различные значения с ближайшими соседними микрострайпами.

На рис. 2, b приведена зависимость плоскостной компоненты намагниченности краевого участка M_{\parallel}^{edge} от значения S_1 . Здесь M_{\parallel}^{edge} есть усредненное по начальному краевому участку площадью $0.25 \times 2 \mu\text{m}$ локальное значение плоскостной намагниченности. Из рис. 2, b можно видеть, что при $S_1 < 1.25 \mu\text{m}$ значение M_{\parallel}^{edge} увеличивается с

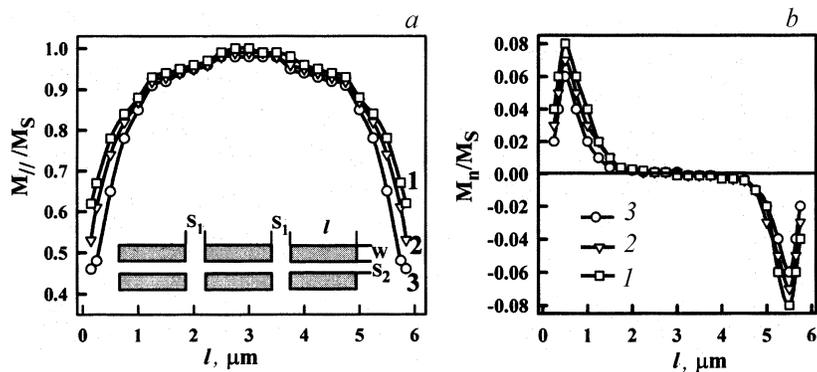


Рис. 3. Распределение плоскостных (а) и нормальных (b) компонент намагниченности вдоль длины микрострипа, полученное с помощью экваториального и полярного эффектов Керра соответственно. Кривые 1, 2 и 3 были измерены для образцов с $2 \times 6 \times 0.015 \mu\text{m}$ микрострипами, но $S_1 = 0.25, 0.5$ и $1.0 \mu\text{m}$ соответственно. Низкочастотное магнитное поле $\mathbf{H} = 13 \text{ Oe}$ было приложено вдоль l . На вставке дано схематическое изображение микрострипов.

уменьшением S_1 , а при $S_1 > 1.25 \mu\text{m}$ асимптотически приближается к M_{\parallel}^{edge} при $S_1 = \infty$, т.е. к значению M_{\parallel}^{edge} изолированного стрипа. Объяснение полученных данных состоит в следующем. Согласно микромагнитным расчетам [11], локальный размагничивающий фактор измеряемого участка микрострипа, принадлежащего множеству (10^6) магнитных микрострипов, зависит как от расположения этого участка в микрострипе, так и от расстояния между микрострипами. Это обусловлено неоднородными магнитодипольными полями, возникающими при намагничивании указанных выше образцов. Эти поля быстро убывают ($\sim 1/r^2$) с удалением от края микрострипа к центру, что сопровождается уменьшением локального размагничивающего фактора. Следствием этого является то, что локальная намагниченность центральных участков изменяется незначительно, а краевые участки подвержены наиболее сильному влиянию неоднородных дипольных магнитных полей. Фактически это влияние увеличивается с уменьшением S_1 благодаря возрастанию магнитоэлектростатического взаимодействия между микрострипами.

В заключение, магнитооптические исследования образцов, представляющих собой совокупность ($\sim 10^6$) пермаллоевых полосок микронных размеров, показали, что локальные магнитные характеристики микрострайпов зависят от их размеров, положения изучаемого участка в микрострайпе и расположения микрострайпов относительно друг друга. Найдено, что неоднородные магнитодипольные поля главным образом определяют поведение исследуемых образцов в магнитном поле. Экспериментально установлено, что сильное магнитостатическое взаимодействие между микрострайпами проявляется начиная с расстояний между ними $S_1 < 1.25 \mu\text{m}$.

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант N 02-02-16627).

Список литературы

- [1] *Smyth J.F., Schultz S., Fredkin D.R., Kern D.P., Rishton S.A., Schmid H., Cali M., Koehler T.R.* // J. Appl. Phys. 1991. V. 69. P. 5262.
- [2] *Maeda A., Kume M., Ogura T., Kuroki K., Yamada T., Nishikawa M., Harada Y.* // J. Appl. Phys. 1994. V. 76. P. 6667.
- [3] *Kirk K.J., Chapman J.N., Wilkinson C.D.* // J. Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71. P. 539.
- [4] *Ercole A., Adeyeye A.O., Daboo C., Bland J.A.C., Hasko D.G.* // J. Appl. Phys. 1997. V. 81. P. 5452.
- [5] *Stankiewicz A., Hiebert W.K., Ballentine G.E., Marsh K.W., Freeman M.R.* // IEEE Trans. Magn. 1998. V. 34. P. 1003.
- [6] *Shi J., Zhu T., Durlam M., Chen E., Tehrani S., Zheng Y.E., Zhu J.G.* // IEEE Trans. Magn. 1998. V. 34. P. 997.
- [7] *Gomez R.D., Luu T.V., Pak A.O., Kirk K.J., Chapman J.N.* // J. Appl. Phys. 1999. V. 85. P. 6163.
- [8] *Marty F., Vaterlaus A., Weich V., Stamm C., Maier U., Pescia D.* // J. Appl. Phys. 1999. V. 85. P. 6166.
- [9] *Schrefl T.* // J. Magn. Magn. Mat. 1999. V. 207. P. 66.
- [10] *Copeland J.A.* // J. Appl. Phys. 1972. V. 35. P. 1905.
- [11] *George P.K., Hughes A.J.* // IEEE Trans. Magn. 1976. V. 12. P. 137.