

УДК 537.62

МАГНИТНЫЕ СТРУКТУРЫ ПЕРМАЛЛОВЫХ ПЛЁНОЧНЫХ МИКРОПЯТЕН

© 2015 г. П. Д. Ким, В. С. Прокопенко, В. А. Орлов, Р. Ю. Руденко,
Т. В. Руденко, Б. В. Васильев, В. П. Живаев, Т. А. Ким

Представлено академиком РАН В.Ф. Шабановым 26.08.2014 г.

Поступило 17.09.2014 г.

DOI: 10.7868/S0869565215190111

Современный интерес к микронным и субмикронным магнитным объектам стимулируется, в частности, возможными их приложениями в вычислительной технике [1–4] и биомедицине [7]. В большинстве публикаций речь идет о пленочных пятнах в виде дисков. При достаточно малых размерах диска формируется магнитный вихрь с циркулярной намагниченностью в плоскости пятна на периферии и с выходом намагниченности из плоскости в центре (кор вихря). Магнитное взаимодействие двух или более вихрей во много раз меньше взаимодействия однородно намагниченных магнитных элементов той же формы и объема, что позволяет уменьшать размеры пятен с вихревой структурой и тем самым существенно увеличивать плотность информации в среде. В зависимости от направления намагниченности кора (условно — вверх или вниз) различают положительную и отрицательную поляризацию вихря, направление замыкания магнитного потока плоской части вихря определяет его киральность (правую или левую). Запоминание информации (0 или 1) на элементе с вихревой магнитной структурой возможно двумя способами: по знаку поляризации и по типу киральности (правая или левая). Цель настоящего исследования — изучить влияние размеров и формы пятна на его магнитную структуру и выяснить практические перспективы пятен иной формы (помимо круга), квадратных и треугольных.

*Красноярский научный центр
Сибирского отделения Российской Академии наук
Красноярский государственный педагогический
университет им. В.П. Астафьева
Институт физики им. Л.В. Киренского
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Красноярск
Сибирский федеральный университет, Красноярск
E-mail: plufe@yandex.ru*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

Объектом исследования являлись пермалловые пленочные пятна толщиной 30–60 нм с поперечными размерами от 20 до 1 мкм. Образцы были изготовлены фотолитографически из сплошной пленки, полученной методом вакуумной конденсации паров исходного материала (пермаллой $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) на стеклянную подложку. Для лоренцевой микроскопии пары металла осаждались на прозрачную для электронного пучка подложку (формвар) через сетку с квадратными ячейками. Визуализация магнитных структур осуществлялась с помощью магнитно-силового микроскопа VEECO multi mode III, электронного микроскопа УЭМВ-100А и оптического микроскопа МБИ-6 (с использованием в качестве магнитной суспензии разбавленного феррофлюида FER-01).

На рис. 1 показаны снимки магнитных структур, характерные для пермалловых пятен круглой, квадратной и треугольной формы. В случае круглых пятен диаметром 5 мкм и меньше в диапазоне толщин 30–50 нм возникает устойчивая равновесная структура классического магнитного вихря с центральным кором. Для квадратных пятен равновесной является структура с замкнутым магнитным потоком (квазивихрь) из четырех доменов с намагниченностью, ориентированной вдоль прилегающей стороны квадрата; домены разделены приблизительно 90-градусными неелевскими границами и с блоховской точкой (квазикором) в центре структуры. Это характерно для всех изученных размеров пятна и толщин пленки. В случае треугольных пятен также формируется квазивихрь с квазикором, но на структуру заметно влияют несовершенства формы пятна.

Одна из проблем дискретной магнитной памяти — запись информации на магнитные вихри. Наблюдения с использованием метода порошковых фигур позволили установить, что для квад-

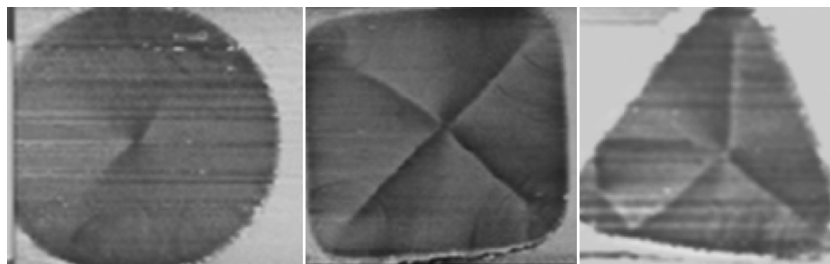


Рис. 1. Магнитная структура трехмикронных пермалловых пятен (пермаллой, магнитно-силовая микроскопия).

ратных пятен всех изученных размеров существует специфический механизм переключения киральности. Его подробности были выяснены в ходе электронно-микроскопических наблюдений (рис. 2). Оптический контраст, отображающий распределение намагниченности в пятне, возникает благодаря магнитному отклонению электронов при прохождении через пятно в условиях небольшой дефокусировки изображения.

Пятно с квазивихрем в первом приближении действует, как магнитная линза, собирающая или рассеивающая в зависимости от знака киральности квазивихря. На снимке (рис. 2) киральность пятна такова, что “линза” оказалась собирающей, электронный пучок отклоняется к центру пятна (изображение негативное).

Тонкая периодическая структура в изображении пятна свидетельствует о наличии “ряби” намагниченности, характерной для поликристаллических пленок. Темные радиально идущие линии – малые угловые (меньше 90°) неелевские доменные границы, в пересечении которых находится блоховская точка (квазикор вихря). Линии в пространстве между пятнами показывают наличие в этих местах слабого знакопеременного магнитного поля, что говорит о взаимодействии пятен. Как будет показано, важной особенностью магнитной структуры квадратного микропятна является существование в углах квадрата светлых полосок, интерпретируемых нами как границы зародышей обратной киральности.

При однократном приложении и последующем выключении плоскостного однородного магнитного поля, направленного вдоль диагонали квадрата, киральность изменяется на противоположную. Электронно-микроскопические снимки, иллюстрирующие этот процесс, приведены на рис. 3.

В исходном состоянии (рис. 3, а) магнитный поток пятна замкнут, киральность левая, пятно по отношению к электронному пучку работает как рассеивающая линза (электроны отклоняются от центра пятна к краям). С возрастанием поля (рис. 3б, в) центральная блоховская точка (квазикор) смещается вдоль диагонали квадрата, перпендикулярной направлению поля, увлекая за собой систему неелевских доменных границ; результиру-

ющий магнитный момент пятна увеличивается. При некотором значении поля H_p пятно визуально кажется однородно намагниченным (рис. 3, г). После выключения поля восстанавливается структура пятна с замкнутым магнитным потоком, но киральность изменяется на противоположную. О смене знака киральности свидетельствует изменение контраста доменных границ и квазикора (они становятся светлыми, электроны отклоняются к центру пятна).

Причина изменения киральности на противоположную кроется в особенности равновесной магнитной структуры пятна, заключающейся в существовании зародышей противоположной киральности в углах пленочного квадрата. В поле H_p “выживает” единственный такой зародыш (рис. 3, г, правый верхний угол), растущий (рис. 3, д) при $H < H_p$. При $H = 0$ он разрастается на все пятно, изменяя его исходную левую киральность на правую (рис. 3, е). В углах пятна вновь видны зародыши обратной киральности, способные снова изменить его киральность на противоположную после нового приложения и выключения поля H_p . Для пятна, процесс переключения которого показан на рис. 3 ($a = 20$ мкм), поле H_p составляло около 3 мТл. С уменьшением размеров пятна поле

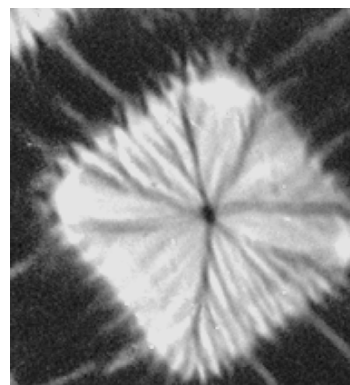


Рис. 2. Квазивихревая магнитная структура квадратного микропятна (пермаллой, сторона квадрата 20 мкм).

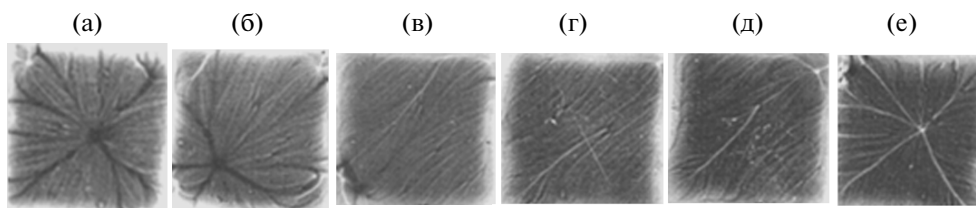


Рис. 3. Процесс переключения киральности квадратного пятна

H_p возрастает (в частности до 8 мТл для пятимикронных пятен).

Наличие равновесной квазивихревой магнитной структуры и специфического механизма переключения киральности для квадратных пермаллоевых пленочных пятен прослежено до значе-ния размера стороны пятна $L=1$ мкм.

О ВЗАИМНОМ ВЛИЯНИИ ПЯТЕН И СВЯЗИ ПОЛЯРИЗАЦИИ КОРА С КИРАЛЬНОСТЬЮ ВИХРЯ

В процессе переключения киральности магнитный поток микропятна перестает быть замкнутым (рис. 3, г), пятна могут влиять друг на друга. Методом магнитостатических зарядов был приведен расчет взаимодействия между переключаемым и соседними пятнами. Пятно рассматривалось как правильный параллелепипед, размеры квадратного пятна $a \times a \times h$, причем $h \ll a$. При намагничивании до насыщения M_s пятна вдоль одного из ребер a на двух противоположных гранях возникают магнитостатические заряды с плотностью M_s . Расчеты показывают, что при расстоянии между центрами пятен $2a$ поле, возникающее в центре соседнего пятна,

$$H_y = \frac{\mu_0 M_s a^2 h}{4\pi b^3}.$$

При $h = 500 \text{ \AA}$, $a = 5 \text{ мкм}$, $b = 2a$, $M_s = 2.1 \text{ Тл}$, $H_m = 0.75 \text{ мТл}$, т.е. $H_m < H_p$.

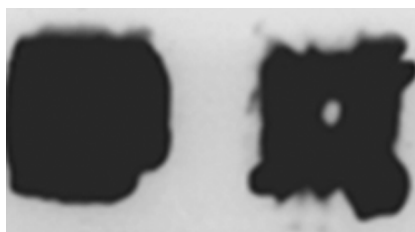


Рис. 4. Сильно дефокусированное электронно-микроскопическое изображение пятен с левой и правой киральностями: светлая точка в центре изображения присутствует при правой киральности пятна и отсутствует при левой.

В случае одиночного круглого пятна из соображений симметрии следует отсутствие корреляции между киральностью и поляризацией вихря. Однако для квадратных пятен при переключении киральности одновременно изменяется и знак поляризации квазикора в его центре. Это связано с существованием помимо центрального квазикора еще четырех подобных образований в углах квадрата (в центрах зародышей обратной киральности). Можно показать, что энергетически выгоднее, когда квазикоры в углах имеют поляризацию, противоположную центральному квазикуору. Это обстоятельство объясняет экспериментально наблюдаемый факт изменения поляризации центрального квазикора при изменении киральности квадратного пятна: уцелевший в углу квадрата (рис. 3, г, д) зародыш альтернативной киральности изначально содержит “антиквазикор”, занимающий место в центре пятна после завершения процесса переключения (рис. 3, е).

О ПЕРСПЕКТИВЕ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КВАДРАТНЫХ ПЯТЕН

Особенности магнитной структуры квадратного пятна позволяют рассматривать квадратные ферромагнитные пленочные микро- и нанопятна как потенциально перспективные элементы при синтезировании дискретных сред для магнитной памяти. Практически реализуемый способ записи информации на пятно описан выше. При кодировании информации по поляризации ко-ра, как и в случае круглых пятен, возможно ее магниторезистивное считывание. Насколько нам известно, пока еще не предложен способ считывания информации с магнитного пленочного пятна при кодировке по знаку киральности. Электронно-микроскопические наблюдения подсказывают возможный вариант: фотометрирование сильно дефокусированного электронно-лучевого изображения пятна (рис. 4).

Для биомедицинских приложений квадратные пятна могут быть перспективны как инструмент нанохирургии. Согласно процедуре, взвесь свободных от подложки магнитных пятен, покрытых аптамером, родственным опухолевой клетке, вводится в ткань. Пятна “ищут” клетки опухоли и “прилипают” к ним. Внешнее магнитное поле вызывает движение пятен, что приводит к трави-рованию

ванию клеток опухоли. В случае круглых пятен движение (поворот) обусловлено взаимодействием магнитного момента кора и внешнего поля. В случае квадратного пятна возникает плоскостная двухосная анизотропия (с эффективным полем анизотропии величиной около 5 мТл для пятна со стороной 3 мкм), что создает условия для дополнительного движения (плоского вращения) пятна во внешнем переменном магнитном поле. При этом, как показывает оценка, момент силы, вызывающий вращение, оказывается существенно больше, чем в случае круглого пятна.

Работа выполнена в рамках междисциплинарного интеграционного проекта № 26 СО РАН (2012–2014 г.г.) и при финансовой поддержке внутривузовского гранта КГПУ им. В.П. Астафьева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Raabe J., Pulwey R., Sattler R., Schweinbock T., Zweckand J., Weiss D. Magnetization Pattern of Ferromagnetic Nanodisks // *Appl. Phys.* V. 88. № 71. P. 4437–4439.
2. Вдовичев С.Н., Грибков Б.А., Гусев С.А., Миронов В.П., Никитушкин Д.С., Фраерман А.А., Шевцов В.Б. О возможности наблюдения эффектов хиральной симметрии в ферромагнитных наночастицах // *Физика твердого тела.* 2006. Т. 48. № 10. С. 1791–1794.
3. Hertel R., Gliga S., Fahnle M., Schneider C.M. Ultrafast Nanomagnetic Toggle Switching of Vortex Cores // *Phys. Rev. Lett.* 2007. V. 98. P. 117201-01–117201-04.
4. Li Sun, Xiao Zou, Wen Zhang, Guodong Li, Ya Zhai, Yongbing Xu, Hongru Zhai. Local Magnetic Switching in Patterned Permalloy Elements by Focussed – MOKE Measurements // *Phys. status solidi.* C. 2012. № 1. V. 9. P. 66–69.
5. Rozhkova E.A., Novosad V., Kim D.H., Pirson J., Divan R., Rajh T., Bader S.D. Ferromagnetic Microdisks as Carriers for Biomedical Applications // *Appl. Phys.* 2009. V. 105. № 7. 07B306.
6. Шинунова В.О., Никитин М.П., Лизунова А.А., Ермакова М.А., Деев С.М., Петров Р.В. Магнитные наночастицы с полиэтиленовой оболочкой для модификации клеток // *ДАН.* 2013. Т. 452. № 3. С. 333–335.