

05

Магнитоупругий эффект в микрочастицах пермаллоя

© Д.А. Бизяев¹, А.А. Бухараев^{1,2}, Ю.Е. Кандрашкин¹,
Л.В. Мингалиева¹, Н.И. Нургазизов¹, Т.Ф. Ханипов¹

¹ Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского
КазНЦ РАН, Казань

² Казанский (Поволжский) федеральный университет, Казань
E-mail: timurkhanipov@gmail.com

Поступило в Редакцию 6 июня 2016 г.

С использованием двух независимых методов — ферромагнитного резонанса и магнитно-силовой микроскопии — исследован магнитоупругий эффект в микрочастицах пермаллоя. Из анализа данных ферромагнитного резонанса получены значения поля эффективной магнитной анизотропии, индуцированной механическим сжатием микрочастиц. С использованием этих данных смоделированы магнитно-силовые изображения напряженных и ненапряженных микрочастиц, которые хорошо совпадают с наблюдаемыми экспериментально изображениями.

Влияние упругих напряжений в ферромагнитных микро- и наноструктурах на их магнитные свойства, такие как коэрцитивная сила, намагниченность насыщения, магнитная анизотропия, в последнее время вызывает повышенный интерес [1–4]. Это, в частности, обусловлено возможностью использования магнитоупругого эффекта для управления их намагниченностью с помощью электрического поля, прикладывая, например, электрический потенциал к подложке из пьезоэлектрика, на котором сформирована магнитная пленка или ансамбль ферромагнитных частиц. Изучение процессов изменения магнитной анизотропии в магнитострикционном слое при его механической деформации и возможность их использования для создания логических элементов микро- и наноэлектроники с минимальным энергопотреблением привело к появлению нового направления — стрейнтроники (от английского strain — деформация) [4].

Метод ферромагнитного резонанса (ФМР) успешно используется для исследования влияния упругих напряжений в тонких пленках.

В частности, с использованием сканирующего спектрометра ФМР было визуализировано латеральное распределение наведенной деформацией магнитоупругой анизотропии с пространственным разрешением порядка 1 мкм [5].

Магнитно-силовая микроскопия (МСМ) широко применяется для визуализации трансформации структуры намагниченности в нанопроволоках и микрочастицах под воздействием различных внешних факторов [6,7]. Одним из главных достоинств метода МСМ является высокое латеральное разрешение. Применяя компьютерное моделирование МСМ изображений, удается с высоким пространственным разрешением установить распределение локальных магнитных моментов в исследуемых образцах [6–8].

Методы ФМР и МСМ хорошо дополняют друг друга, позволяя получать независимую информацию о магнитных свойствах объектов исследования. Настоящая работа посвящена согласованному использованию этих двух методов для количественной оценки величины магнитоупругого эффекта в механически деформированных микрочастицах пермаллоя и расшифровки трансформации их доменной структуры под действием механического сжатия.

Для проведения исследований массив частиц с латеральными размерами $25 \times 25 \mu\text{m}$ был сформирован на установке Omicron Multiprobe Р путем распыления в сверхвысоком вакууме электронным пучком пермаллоевой (Рu) мишени (75Ni , 25Fe). Осаждение слоя Рu толщиной 20 нм на поверхность стеклянной подложки выполнялось через маску в виде сетки с квадратными отверстиями (рис. 1). Подложка из силикатного стекла имела размеры $10 \times 4 \text{ mm}$ и толщину 0.30 мм. Было изготовлено два типа образцов (рис. 1, а). Образцы первого типа представляли собой массив частиц Рu без напряжения. Образцы второго типа представляли собой массив частиц, сжатых в одном направлении. Для создания таких частиц использовался метод, аналогичный описанному в работе [5]. Перед напылением пермаллоя стеклянная подложка закреплялась в держателе, поверхность которого имела радиус изгиба $R = 76 \text{ mm}$ (в отличие от работы [5], где под центральную часть подложки подкладывалась проволока диаметром $50 \mu\text{m}$). Благодаря тому что стеклянная подложка плотно прижималась к поверхности держателя, ее изгиб был равномерным по всей поверхности образца. После проведения напыления стеклянная подложка извлекалась из держателя. В отсутствие внешнего воздействия подложка выпрямлялась, что вело

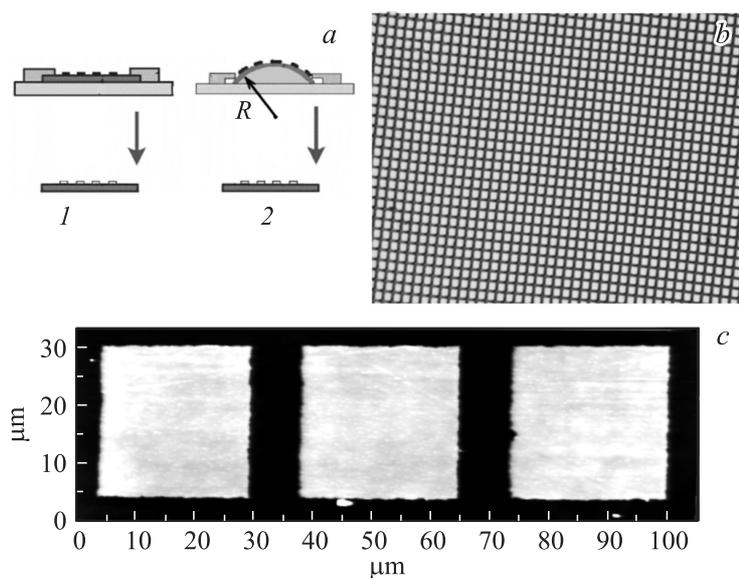


Рис. 1. *a* — схема изготовления образцов с ненапряженными (1) и напряженными (2) микрочастицами Ru; *b* — фотография изображения поверхности образца в оптическом микроскопе; *c* — АСМ-изображение топографии микрочастиц пермаллоя.

к формированию упругих напряжений в микрочастицах. Зная радиус изгиба подложки и предполагая высокую адгезию микрочастиц Ru, можно оценить относительное изменение латеральных размеров микрочастиц после выпрямления подложки, которое составило 0.2%.

Такой подход, как показали дальнейшие исследования, позволил создать максимально однородное напряжение во всех частицах на образце второго типа (в отличие от работы [5], где на образце формировался достаточно сильный градиент упругих напряжений вдоль одной из осей). Однородность напряжений в образце важна при проведении исследований ФМР, так как неоднородное напряжение частиц может привести к значительному смещению и неоднородному уширению линий ФМР спектра.

ФМР измерения проводились на установке Bruker EMX Plus с полем (H_{ex}) до 1.4 Т и микроволновым полем H_{mw} с частотой 9.8 GHz,

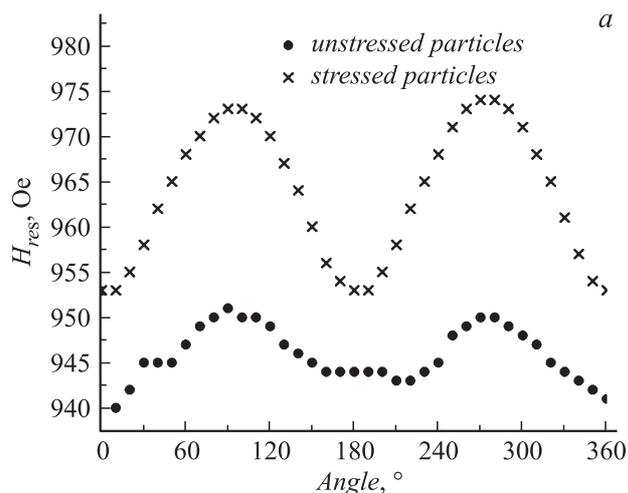


Рис. 2. *a* — график зависимости резонансного поля от угла ориентации образца по отношению к магнитному полю H_{ex} для ненапряженных и напряженных частиц; спектры ферромагнитного резонанса при значениях H_{\min} и H_{\max} для: *b* — ненапряженных частиц, *c* — для напряженных частиц.

перпендикулярным H_{ex} . При измерениях методом ФМР образец размещался в резонаторе так, что его плоскость была параллельна внешнему магнитному полю, а вращение образца проводилось вокруг оси, перпендикулярной плоскости образца. Спектры ФМР были сняты в диапазоне углов от 0° до 360° с шагом в 10° . Резонансные положения линий ФМР представлены на рис. 2, *a*. По угловой зависимости резонансного поля с помощью расчетов были определены намагниченность насыщения M_s и эффективное поле анизотропии H_k . Расчет основывался на решении уравнения Ландау–Лифшица–Гильберта для тонких пленок [5], которые имеют вид

$$\omega^2 = \gamma^2(H_{\min} + H_k)(H_{\min} + H_k + \mu_0 M_s), \quad (1)$$

$$\omega^2 = \gamma^2(H_{\max} - H_k)(H_{\max} + \mu_0 M_s), \quad (2)$$

где H_{\min} и H_{\max} — найденные из эксперимента минимальные и максимальные значения резонансного поля, γ — гиромагнитное отношение,

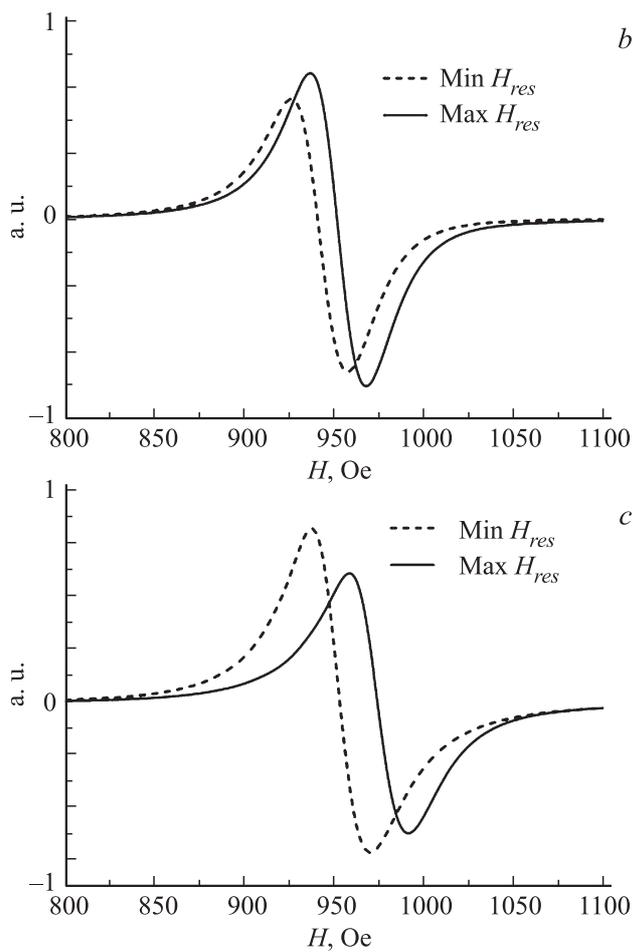


Рис. 2 (продолжение).

ω — угловая частота микроволнового поля. Из решения системы уравнений были определены поле анизотропии H_k и эффективная намагниченность насыщения M_s . Расчеты проводились для обоих типов образцов: с напряженными (механически сжатыми) и ненапряженными

ми микрочастицами Ru . Для иллюстрации изменения спектральных характеристик образцов в зависимости от приложенного напряжения на рис. 2, *b, c* представлены спектры ФМР, зарегистрированные при значениях углов, соответствующих резонансным полям H_{\min} и H_{\max} .

В результате численного решения уравнений 1–2 были получены следующие значения: для ненапряженных частиц ($H_{\min} = 94.0 \text{ мТ}$, $H_{\max} = 95.1 \text{ мТ}$) $H_k = 0.45 \text{ мТ}$, $M_s = 886 \text{ кА/м}$; для напряженных частиц ($H_{\min} = 95.3 \text{ мТ}$, $H_{\max} = 97.4 \text{ мТ}$) $H_k = 1.06 \text{ мТ}$, $M_s = 867 \text{ кА/м}$. Согласно полученным данным, в механически сжатых микрочастицах Ru происходит существенное увеличение наведенной анизотропии за счет магнитоупругого эффекта. Это обусловлено тем, что поле магнитоупругой анизотропии прямо пропорционально величине индуцированных напряжений [5]. Полученная величина поля магнитоупругой анизотропии по порядку совпадает с экспериментальными и расчетными значениями, представленными в работе [5] для пленок Ru такого же состава. Ненулевое значение H_k для первого образца обусловлено, на наш взгляд, незначительными остаточными напряжениями, возникающими в микрочастицах в процессе напыления Ru на плоскую подложку.

Для исследований МСМ использовался сканирующий зондовый микроскоп Solver P47 (НТ-МДТ) и магнитные кантилеверы марки N18/Co–Cr (MikroScience). Измерения выполнялись в полуконтактной моде по двухпроходной методике, когда на первом проходе регистрируется топографическое изображение образца. На втором проходе зонд МСМ движется по траектории, повторяющей топографию образца на небольшом удалении от поверхности, и регистрируется разность фаз между сигналом, возбуждающим колебания зонда на резонансной частоте, и реальными колебаниями зонда, которые пропорциональны градиенту силы магнитного взаимодействия зонда и образца в данной точке.

На полученных МСМ изображениях отдельных частиц также наблюдалось различие между образцами с ненапряженными и напряженными частицами (рис. 3, *a, d* соответственно). Восстановить распределение намагниченности в частице по полученному МСМ изображению практически сложно, поэтому решалась обратная задача. На первом этапе на основе трехмерного изображения частицы, полученного на сканирующем зондовом микроскопе в режиме атомно-силовой микроскопии, с помощью программы ООММФ [8] моделировалось распределение в ней локальных магнитных моментов (рис. 3, *c, f*). При моделировании использовались значения эффективной намагниченности насыщения

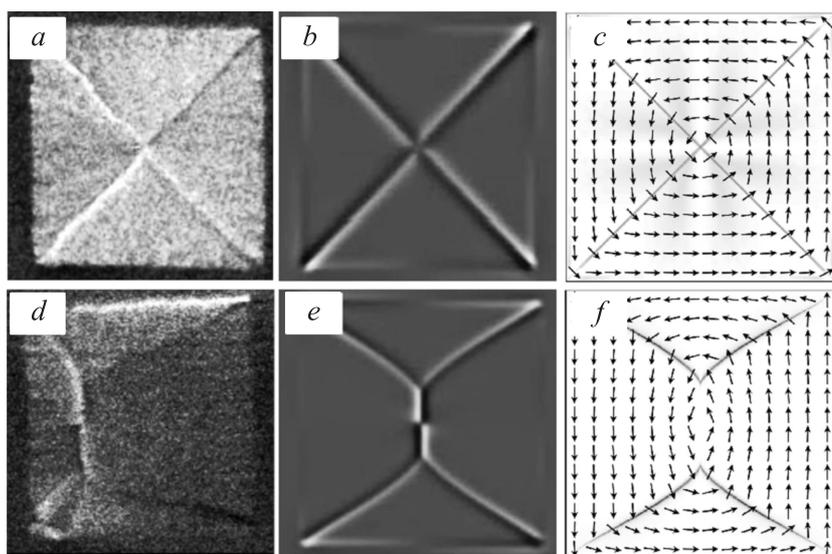


Рис. 3. *a* — экспериментальное МСМ-изображение ненапряженной частицы, *b* — смоделированное МСМ-изображение ненапряженной частицы, *c* — рассчитанное распределение локальных магнитных моментов ненапряженной частицы, *d* — экспериментальное МСМ-изображение напряженной частицы, *e* — смоделированное МСМ-изображение напряженной частицы, *f* — рассчитанное распределение локальных магнитных моментов напряженной частицы. Размеры частиц $25 \times 25 \times 0.02 \mu\text{m}$.

образца (M_s) и поля анизотропии (H_k), полученные из измерений ФМР. На втором этапе на основе полученного распределения намагниченности в частице P_u , моделировалось ее изображение МСМ. Для расчетов на этой стадии использовалась ранее созданная нами компьютерная программа „Виртуальный МСМ“ [7]. Полученное модельное изображение МСМ сравнивалось с экспериментальным. Совпадение полученных модельных и экспериментальных изображений МСМ (рис. 3, *b, e* и *a, d* соответственно) является критерием справедливости полученного модельного распределения намагниченности.

Такой подход позволил определить распределение намагниченности в частицах в зависимости от приложенного к ней внешнего напря-

жения и подтвердить достоверность значений H_k и M_s , полученных по данным измерений ферромагнитного резонанса. Согласно полученному распределению локальных моментов, ненапряженная частица имеет классическую четырехдоменную структуру, характерную для квадратных планарных частиц (рис. 3, *c*). При этом размеры всех четырех доменов приблизительно равны. Напряженная частица также имеет четырехдоменную структуру, но ее домены различаются по размерам (рис. 3, *f*). Известно, что у пермаллоя домены, в которых направление локальной намагниченности перпендикулярно оси сжатия частицы, имеют больший размер, чем домены с параллельным оси сжатия распределением намагниченности. При этом между двумя доменами, с намагниченностью, перпендикулярной оси сжатия, образуется характерная перемычка [9]. Как показали результаты компьютерного моделирования, размер данной перемычки зависит от величины механического напряжения в частице и может использоваться как параметр, характеризующий однородность распределения степени сжатия частиц по всему образцу.

Используя оптическую систему позиционирования зонда МСМ, в сканирующем зондовом микроскопе были получены изображения МСМ для различных участков образцов обоих типов, для образцов второго типа — вдоль линии, параллельной оси сжатия частиц, с шагом примерно $200 \mu\text{m}$. Для образцов первого типа с ненапряженными частицами все полученные изображения МСМ соответствовали классической четырехдоменной структуре с доменами одинакового размера. Для напряженных частиц наблюдались одинаковые изображения МСМ, совпадающие с изображением, представленным на рис. 3, *d*, а размеры перемычки между доменами были одинаковыми. Это позволяет говорить об одинаковой степени сжатия частиц по всему образцу и корректности данных об эффективной намагниченности насыщения образца (M_s) и поля анизотропии (H_k), полученных на основе измерений ФМР.

Таким образом, на основе исследований ФМР было установлено, что при механическом сжатии пермаллоевых частиц (при относительном изменении латеральных размеров 0.2%) происходит увеличение поля анизотропии с 0.45 до 1.06 мТ. Проведенные исследования МСМ позволили убедиться, что сформированный массив частиц является однородным по своим размерам и по степени сжатия частиц по всему образцу, что позволяет корректно использовать для этих образцов интегральные характеристики образца, полученные методом ФМР. Хорошее совпадение экспериментальных и смоделированных на основе

измерений ФМР изображений МСМ позволило подтвердить правильность значений эффективной намагниченности насыщения образца и поля анизотропии, полученных из анализа спектров ФМР.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект 15-02-02728).

Список литературы

- [1] Морозов А.И. // ФТТ. 2014. Т. 56. В. 5. С. 833.
- [2] Bur A., Wu T., Hockel J. et al. // J. Appl. Phys. 2011. V. 109. P. 123 903.
- [3] Dai G., Zhan Q., Yang H. et al. // J. Appl. Phys. 2013. V. 114. P. 173 913.
- [4] Roy K. // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 103. P. 173 110.
- [5] Беляев Б.А., Изотов А.В. // ФТТ. 2007. Т. 49. В. 9. С. 1537.
- [6] Нургазизов Н.И., Бизяев Д.А., Бухараев А.А. // ФТТ. 2016. Т. 58. В 5. С. 917.
- [7] Овчинников Д.В., Бухараев А.А. // ЖТФ. 2001. Т. 71. В. 8. С. 85.
- [8] Donahue M.J., Porter D.G. // <http://math.nist.gov/oommf/>
- [9] Cullity B.D., Graham C.D. Introduction to Magnetic Materials / 2nd Ed. IEEE Press, Wiley, 2009. P. 554.