

УДК 537.624.21

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ДОМЕННУЮ СТРУКТУРУ ПЛАНАРНОЙ ПЕРМАЛЛОЕВОЙ МИКРОЧАСТИЦЫ

© 2019 г. Н. И. Нургазизов¹, *, Д. А. Бизяев¹, А. А. Бухараев¹

¹Казанский физико-технический институт имени Е.К. Завойского – обособленное структурное подразделение
Федерального государственного бюджетного учреждения науки “Федеральный исследовательский центр
“Казанский научный центр Российской академии наук”, Казань, Россия

*E-mail: niazn@mail.ru

Поступила в редакцию 07.09.2018 г.

После доработки 31.01.2019 г.

Принята к публикации 27.03.2019 г.

Проведены исследования влияния механического напряжения на магнитную структуру пермаллоевых микрочастиц. Исследуемые частицы имели квадратную форму со стороной 25 мкм и высотой от 15 до 50 нм, изменяющейся от образца к образцу. Было показано, что механическое напряжение приводит к изменению магнитной структуры и образованию характерной переемычки между магнитными доменами. При этом длина переемычки может использоваться для количественной характеристики механического напряжения в частице.

DOI: 10.1134/S0367676519070305

Изменение магнитных свойств материала при механическом воздействии (магнитоупругий эффект или эффект Виллари) можно использовать для количественной оценки этих напряжений [1–3]. В случае планарных ферромагнитных микрочастиц, расположенных на твердой подложке, по изменению их доменной структуры можно детектировать локальные механические напряжения, возникающие в приповерхностном слое подложки [3, 4]. При этом пространственное разрешение такого подхода будет сопоставимо с размером частицы.

В данной работе изучались изменения магнитной структуры планарной пермаллоевой (Ru) микрочастицы под действием механического напряжения и возможность использования этих изменений для оценки механического напряжения в частице. Была найдена оптимальная высота планарных частиц размером 25 × 25 мкм для детектирования механических напряжений. Для исследований использовались методы магнитно-силовой микроскопии (МСМ) и микромагнитного моделирования.

Исследуемые образцы представляли собой массив одинаковых Ru частиц (сплав 79НМ, Ni79%, Fe16%, Mo4%), равномерно расположенных на поверхности полированной кремниевой подложки. Частицы создавались методом напыления металла через плотно прижатую к поверхности

подложки металлическую сетку с квадратными отверстиями. Использовался метод распыления твердотельной мишени электронным лучом в условиях сверхвысокого вакуума (установка Multi-probe P, Omicron). Были созданы образцы с частицами, имеющими латеральный размер 25 × 25 мкм. Полученные частицы имели высоту от 15 до 50 нм. Измерения созданных образцов проводились при помощи сканирующих зондовых микроскопов Solver P47 и Solver HV (НТ-МДТ) с использованием магнитных кантилеверов MFM10 (НТ-МДТ) и Multi75M-G (BudgetSensors). Механические напряжения при проведении МСМ измерений создавались за счет упругого изгиба образца путем подкладывания под его центральную часть металлической проволоки и прижимания его концов к держателю с ровной поверхностью. Согласно выполненным расчетам, частицы в центральной части образца испытывают одноосное растяжение в направлении, перпендикулярном подложенной проволоке. При этом степень растяжения частиц можно было регулировать изменением диаметра проволоки.

Для моделирования распределения намагниченности в частицах использовался пакет программ OOMMF [5]. При этом варьировались параметры: высота частицы и эффективная константа анизотропии. За счет того, что исследуемые частицы были поликристаллическими, влиянием кристалличе-

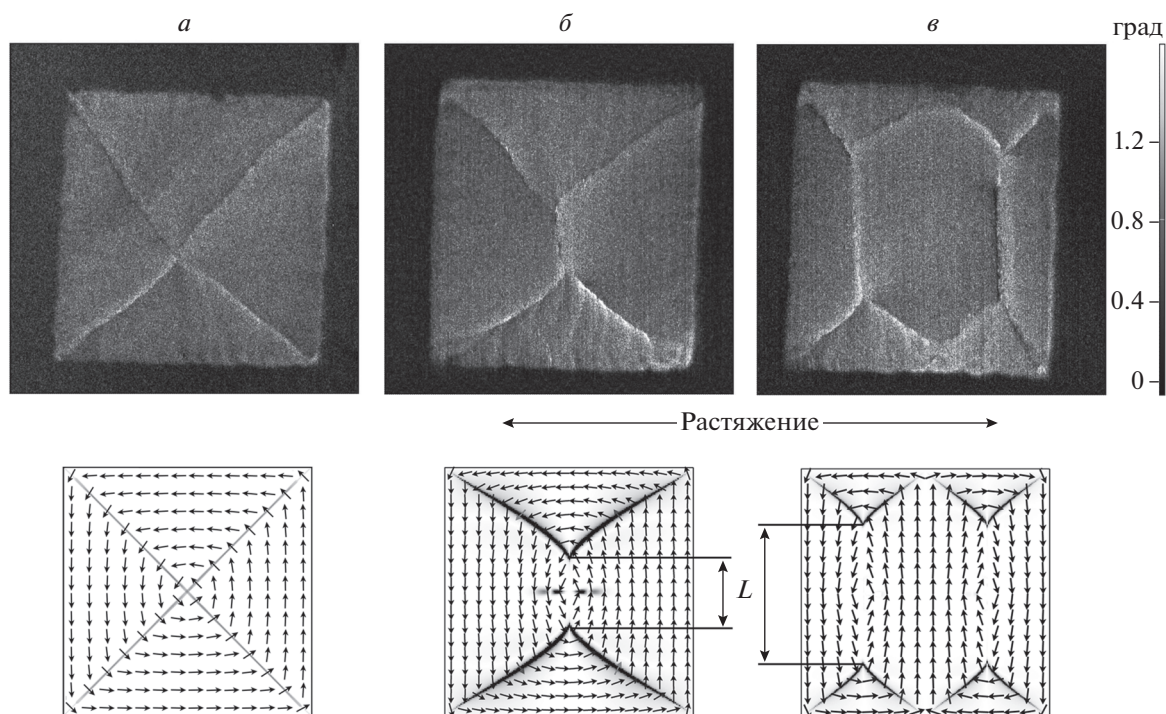


Рис. 1. МСМ-изображения Ru-частиц размером $25 \times 25 \times 0.03$ мкм (вверху) и соответствующие им распределения намагниченности (внизу): *a* – четырехдоменное состояние ненапряженной частицы; *b* – четырехдоменное состояние частицы при ее механическом растяжении; *v* – семидоменное состояние частицы при увеличении степени ее растяжения. Направление растяжения указано стрелками. Размер скана 33×33 мкм². *L* – образующаяся при механическом напряжении перемычка между магнитными доменами.

ской магнитной анизотропии можно было пренебречь, и эффективная константа анизотропии определялась магнитоупругой анизотропией, наведенной механическим напряжением. Далее по полученному распределению намагниченности строилось виртуальное МСМ-изображение по алгоритму, описанному в работе [6]. При создании виртуального МСМ изображения использовали характеристики МСМ зонда, с которыми проводили измерения. Это позволило сравнивать полученные виртуальное и экспериментальное МСМ-изображения и делать выводы о достоверности рассчитанного распределения намагниченности.

Было показано, что квадратная Ru частица в ненапряженном состоянии обладает классической четырехдоменной структурой (рис. 1*a*). При этом расположение доменных стенок совпадает с диагоналями квадрата и направление намагниченности домена параллельно стороне частицы, у которой он расположен. За счет отрицательного значения константы магнитострикции используемого Ru под действием механического растяжения наблюдается увеличение размера доменов, направление намагниченности которых перпендикулярно направлению растяжения. При этом между этими доменами образуется доменная стенка (пе-

ремычка) *L*, направление которой перпендикулярно направлению растяжения (рис. 1*b*). По экспериментальному МСМ изображению можно определить длину этой стенки и использовать ее для количественного сравнения экспериментального и модельного МСМ изображений. Фактически для каждого значения напряженности в частице определенной высоты можно найти характерное значение длины образующейся перемычки *L* и в дальнейшем использовать эти значения для определения механического напряжения σ .

Механическое напряжение σ в частице можно также оценить исходя из энергии анизотропии, наведенной магнитоупругим взаимодействием. В первом приближении оно равно: $\sigma = -2F/(3\lambda)$, где *F* – плотность энергии анизотропии, λ – константа магнитострикции [7]. Энергию анизотропии, соответствующую определенной длине перемычки, можно найти на основе ООММФ-расчетов. Значения напряжений, полученные при таких расчетах, совпали со значениями, полученными при расчете напряжений, возникающих при упругом изгибе подложки.

МСМ-исследования напряженных частиц показали, что для частиц высотой от 30 нм и выше под действием механического напряжения может

реализоваться, кроме четырехдоменного, и семидоменное состояние (рис. 1*б*). Проведенные ООММФ-расчеты подтвердили, что для частиц высотой от 30 нм семидоменное состояние обладает более низким значением полной энергии частицы по сравнению с четырехдоменным, начиная с определенного значения магнитоупругой энергии. При этом, чем больше высота частицы, тем раньше она переходит в семидоменное состояние при увеличении напряжения. Для семидоменных частиц также можно сопоставить длину перемычки между доменами со значением механического напряжения. Зависимость длины перемычки от механического напряжения для Ru частицы высотой 30 нм представлена на рис. 2. Видно, что при семидоменном состоянии длина перемычки увеличивается медленнее при увеличении механического напряжения в частице. Поэтому для более точного определения значения механического напряжения лучше использовать частицы находящиеся в четырехдоменном состоянии. При проведении МСМ-измерений частиц высотой 15–20 нм в некоторых случаях наблюдалось изменение намагниченности частиц под влиянием МСМ-зонда. Вышеизложенное позволяет сделать вывод о том, что для МСМ-измерений наиболее оптимальными для детектирования механических напряжений оказываются частицы высотой 25–30 нм.

Таким образом, по МСМ-изображению планарной ферромагнитной микрочастицы можно получить информацию о механическом напряжении в ней и оценить его величину. Оптимальными для этого являются частицы в четырехдоменном состоянии за счет более широкого диапазона определяемых значений и высокой чувствительности к изменению напряжения. Для квадратных

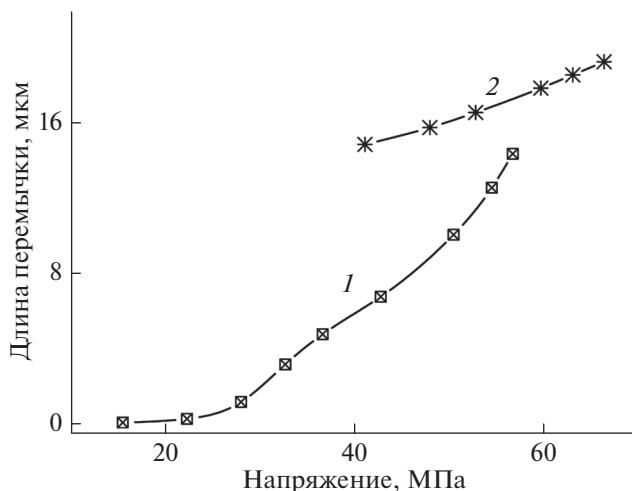


Рис. 2. Зависимость длины перемычки (доменной стенки), образующейся под действием механического напряжения σ для 4-х (1) и 7-ми (2) доменных состояний Ru -частицы размером $25 \times 25 \times 0.03$ мкм.

Ru -частиц размером 25×25 мкм оптимальная высота для этих целей составляет 25–30 нм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев Б.А., Изотов А.В. // ФТТ. 2007. Т. 49. С. 1651.
2. Kumar D., Singh S., Vishwakarma P. et al. // J. Magn. Mater. 2016. V. 418. P. 99.
3. Бизяев Д.А., Бухараев А.А. Кандрашкин Ю.Е. и др. // ПЖТФ. 2016. Т. 42. С. 24.
4. Finizio S., Foerster M., Buzzi M. et al. // Phys. Rev. Appl. 2014. V. 1. Art. № 021001.
5. <http://math.nist.gov/oommf>.
6. Овчинников Д.В., Бухараев А.А. // ЖТФ. 2001. Т. 71. № 8. С. 85.
7. Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1971. 1032 с.