

УДК 53.086

## МАГНИТООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ КЕРРА И СТРУКТУРА НАМАГНИЧЕННОСТИ ПЕРМАЛЛОВЫХ МИКРОЧАСТИЦ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ НАПРЯЖЕНИИ

*Т.Ф. Ханипов<sup>1</sup>, Д.А. Бизяев<sup>1</sup>, А.А. Бухараев<sup>1,2</sup>, В.В. Чирков<sup>1</sup>,  
А.П. Чукланов<sup>1</sup>, Н.И. Нургазизов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН,  
г. Казань, 420029, Россия*

<sup>2</sup>*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия*

### Аннотация

В работе исследовано изменение доменной структуры планарных пермалловых микрочастиц за счет механического напряжения. Для этого на поверхности кремниевой подложки был сформирован массив частиц, находящихся в механически напряженном состоянии. Были изготовлены также образцы, на которых сформирован массив частиц без напряжения. На полученных образцах визуализирована магнитная структура методом магнитно-силовой микроскопии и получены петли гистерезиса методом магнитооптического эффекта Керра. Установлено, что за счет одноосной анизотропии, обусловленной механическим сжатием частиц, в них появляется ось легкого намагничивания, направление которой совпадает с направлением сжатия частицы. В то же время распределение намагниченности наблюдаемое у ненапряженных частиц определяется в основном анизотропией формы.

**Ключевые слова:** магнитоупругий эффект, магнитно-силовая микроскопия, магнитооптический эффект Керра, ферромагнитные микрочастицы  $Pu$

### Введение

Возможность использования эффекта Виллари (или магнитоупругого эффекта, при котором магнитные свойства твердого тела изменяются при механическом воздействии) для процесса перемагничивания микро- и наноструктур в последнее время интенсивно исследуется учеными [1–7]. За счет использования данного эффекта можно существенно изменить величину внешнего магнитного поля, необходимого для перемагничивания отдельной частицы, которая может использоваться как носитель одного бита информации. В некоторых случаях процесс перемагничивания частицы может быть выполнен только за счет ее механического растяжения или сжатия [3, 4].

Существенное изменение намагниченности частицы за счет механического воздействия может быть использовано также для детектирования механических напряжений, возникающих в частице. В случае планарных частиц, расположенных на твердой поверхности, по изменению их намагниченности можно судить о механических напряжениях в приповерхностном слое подложки. При этом пространственное разрешение такого подхода будет сопоставимо с размерами частиц. На основе таких частиц можно создать датчики, которые позволят выявлять на поверхности изделий участки с высоким градиентом механических напряжений и тем самым

предсказывать возможность появления в этих местах трещин, приводящих к дальнейшему механическому разрушению объекта.

Детально исследовать магнитную структуру отдельно лежащей магнитной микрочастицы можно с помощью магнитно-силового микроскопа (МСМ). Для наблюдения за изменением магнитной структуры массива частиц, равномерно покрывающего поверхность, может быть использован магнито-оптический эффект Керра (Magneto-optical Kerr effect, МОКЕ). В настоящей работе два этих метода использовались для исследования магнитных свойств планарных пермалловых (Ру) микрочастиц в зависимости от созданного в них внешнего механического напряжения.

### 1. Приготовление образцов

Исследования проводились на образцах, представляющих собой массив планарных Ру-частиц (Ni 79 мас.%, Fe 16 мас.%, Mo 4 мас.%). Каждая частица имела размер  $7.5 \times 7.5 \times 0.03$  мкм<sup>3</sup> и была расположена на поверхности кремниевой подложки на расстоянии 5 мкм от соседней. Для подложки использовался кремний КЭФ1 (толщиной 0.4 мм), что позволило избежать скопления на образце электростатического заряда, который мешает проведению измерений при помощи МСМ. Линейные размеры использованной подложки составили  $12 \times 3$  мм. Для создания массива одинаковых частиц применялась процедура напыления металла через металлическую сетку, расположенную на поверхности подложки. Напыление проводилось методом испарения электронным лучом твердотельной Ру-мишени в сверхвысоком вакууме на установке MultiprobeP (Omicron).

Для проведения исследований были созданы образцы, состоящие из ненапряженных частиц, и образцы с частицами, которые были сжаты вдоль длинной оси подложки. Для создания напряженных частиц перед проведением процесса напыления подложка упруго изгибалась за счет крепления в держателе. При этом сетка закреплялась таким образом, чтобы одна из сторон получаемой квадратной частицы была параллельна будущей оси сжатия частицы. После процесса напыления подложка извлекалась из держателя и распрямлялась, что и приводило к сжатию полученных частиц. Периодические измерения одного и того же образца в течение полугода показали, что наведенные механические напряжения стабильны. Это позволило исследовать один и тот же образец несколькими методами. Процесс изгиба подложки часто используется различными авторами [2, 6, 7] для создания напряжений в тонких ферромагнитных пленках или частицах.

Контроль над размерами и формой частиц, расположенных в разных частях образца, проводился при помощи оптической и атомно-силовой микроскопии. Согласно полученным данным размер и форма частиц являются одинаковыми по всему исследуемому образцу. Контроль идентичности частиц был важен для проведения МОКЕ-измерений, когда одновременно регистрируется сигнал от множества частиц.

### 2. Измерения магнитных свойств микрочастиц методом МОКЕ

Для регистрации петель гистерезиса Ру-частиц методом МОКЕ использовался сканирующий магнитополяриметрический комплекс, созданный на базе эллипсометра ЛЭФ-3М-1. Исследуемые образцы вращались в установке вокруг нормали к поверхности подложки с определенным шагом ( $\sim 5^\circ$ ). Перед проведением экспериментов образец располагался таким образом, чтобы начало отсчета угловой зависимости происходило от оси, параллельной одной из сторон квадратной частицы. В случае напряженного образца для начала отсчета выбиралась сторона,

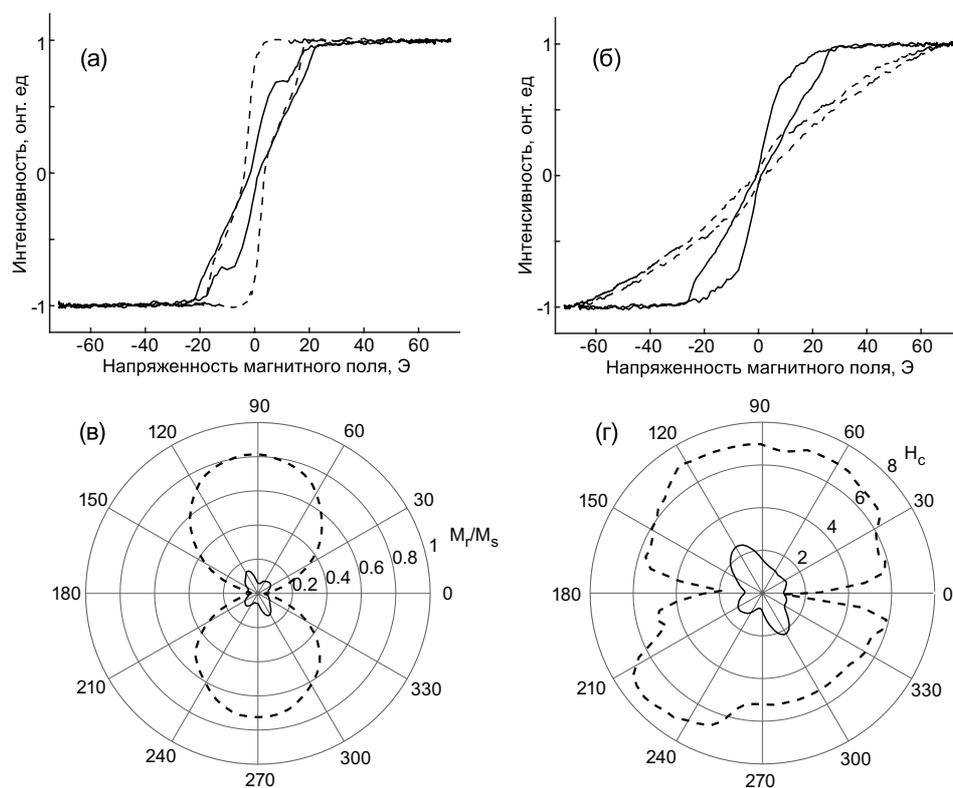


Рис. 1. Петли гистерезиса, полученные методом МОКЕ, для ненапряженных (сплошные линии) и напряженных (пунктирные линии) частиц при направлении внешнего магнитного поля вдоль ОЛН (а) и вдоль ОТН (б). Угловые зависимости нормированной остаточной намагниченности (в) и коэрцитивного поля частиц (г)

параллельная оси сжатия частицы. На каждом шаге методом МОКЕ регистрировалась петля гистерезиса от области размером  $\sim 10^{-2}$  мм<sup>2</sup> (рис. 1, а, б). Каждая полученная точка на петле гистерезиса является результатом усреднения по 200 измерениям. На основе полученных петель гистерезиса были рассчитаны азимутальные зависимости остаточной намагниченности образца (рис. 1, в) и коэрцитивного поля частиц (рис. 1, г).

Из полученных зависимостей видно, что в плоскости образца с ненапряженными частицами наблюдаются две оси легкого намагничивания (ОЛН), связанные с анизотропией формы. Направления ОЛН совпадают с границами доменных стенок, наблюдаемых на МСМ-изображениях. На напряженном образце формируется одна ОЛН, направление которой совпадает с направлением сжатия частиц. При этом перпендикулярно ей формируется ось трудного намагничивания (ОТН). Направление ОЛН вдоль оси сжатия частиц обусловлено отрицательностью коэффициента магнитострикции используемого пермаллоя (при положительном коэффициенте ОЛН была бы перпендикулярна оси сжатия частиц). Механическое напряжение в частицах приводит к увеличению коэрцитивного поля частиц в 2–3 раза во всех направлениях, за исключением направления ОТН, где коэрцитивное поле увеличивается меньше, чем в 2 раза.

Для однородного намагничивания напряженной частицы вдоль ОТН необходимо внешнее магнитное поле 60 Э, для ненапряженной частицы для однородного

намагничивания достаточно поля 27 Э. Значение внешнего магнитного поля, необходимого для однородного намагничивания частицы вдоль ОЛН, для напряженной частицы составляет 19 Э. Для ненапряженных частиц однородное намагничивание вдоль ОЛН происходит при внешнем поле 23 Э, что достаточно близко к значению поля намагничивания частицы вдоль ОТН, что говорит о слабой анизотропии ненапряженной частицы.

Полученные данные МОКЕ позволяют сделать вывод о том, что анизотропия ненапряженных частиц определяется в первую очередь их геометрической формой. Механическое напряжение в частицах приводит к образованию одноосной анизотропии. При этом происходит уменьшение значения внешнего поля, необходимого для однородного намагничивания частицы в направлении ОЛН, и существенное увеличение этого поля в направлении ОТН.

### 3. МСМ измерения доменной структуры микрочастиц во внешнем магнитном поле

Для проведения МСМ исследований использовался сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) Solver P47 (НТ-МДТ) и магнитные кантиливеры марки N18 Co-Cr (MikroScience). СЗМ был дополнительно оборудован источником внешнего магнитного поля напряженностью до 200 Э, прикладываемого в плоскости исследуемого образца. Была выполнена серия экспериментов, в которых исследовалась магнитная структура частицы во внешнем поле, прикладываемом параллельно и перпендикулярно оси сжатия частицы. Была проведена также серия экспериментов по перемагничиванию во внешнем поле с ненапряженными частицами. МСМ-измерения выполнялись по двухпроходной методике, в которой при первом проходе зонд микроскопа сканирует рельеф исследуемого образца, а при втором проходе регистрируется фазовое (МСМ) изображение, которое пропорционально градиенту силы магнитного взаимодействия зонда и исследуемого образца в данной точке.

Для определения распределения намагниченности в частице по полученным МСМ-изображениям использовался следующий подход. Сначала, исходя из трехмерного изображения частицы, полученного при МСМ-измерениях, моделировалось распределение локальных магнитных моментов в частице. Для этого использовался программный пакет ООММФ [8]. Затем на основе полученного распределения намагниченности моделировалось виртуальное МСМ-изображение частицы при помощи разработанной ранее программы «Виртуальный микроскоп» [9]. Полученное изображение сравнивалось с экспериментальным. Для того чтобы добиться совпадения получаемых изображений, проводилось изменение коэффициента анизотропии, задаваемого в программе ООММФ, и цикл расчетов повторялся заново. При совпадении полученных экспериментальных и виртуальных изображений делался вывод о том, что расчетное распределение намагниченности в Ру-частице совпадает с реальным.

Было установлено, что при отсутствии внешнего магнитного поля ненапряженные частицы имеют структуру, состоящую из четырех доменов одинакового размера, расположенных в плоскости образца (рис. 2, *a*). Направление намагниченности в магнитных доменах частицы можно определить за счет приложения внешнего магнитного поля, при наличии которого происходит увеличение размера домена, направленного вдоль поля. На полученных МСМ-изображениях наблюдались частицы с направлением намагниченности, изменяющимся как по часовой, так и против часовой стрелки. Схемы распределения намагниченности, соответствующие полученному МСМ-изображению Ру-частицы, также приведены на рис. 2, *a*.

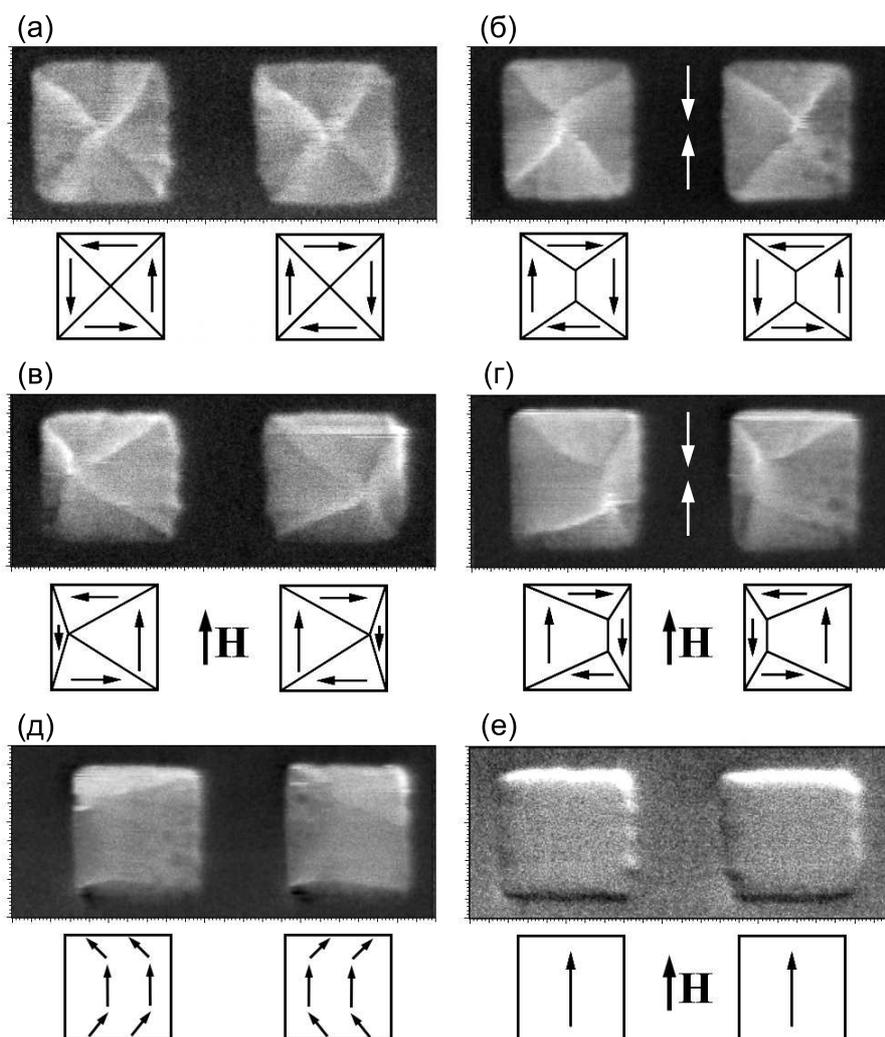


Рис. 2. МСМ-изображения двух Ru-частиц и соответствующая им структура намагниченности в случае: ненапряженных частиц без внешнего магнитного поля (а), напряженных частиц без поля (б), ненапряженных частиц в поле  $-15 \text{ Э}$  (в), напряженных частиц в поле  $-15 \text{ Э}$  (г), ненапряженных частиц (квазиоднодоменных) в поле  $-40 \text{ Э}$  (д), однородно намагниченных частиц в поле  $-100 \text{ Э}$  (е). Направление сжатия напряженных частиц показано белыми стрелками. Поле сканирования составило  $22 \times 9 \text{ мкм}$

Расположение доменных стенок в Ru-частице при этом приблизительно совпадает с диагоналями частицы и позволяет подтвердить данные о направлении ОЛН, полученные методами МОКЕ.

Напряженные частицы также имеют четырехдоменную структуру, при этом домены с направлением, параллельным направлению сжатия частиц, больше по размеру, и между ними образуется характерная перемычка (рис. 2, б). Согласно результатам моделирования распределения намагниченности в частице направление перемычки, наблюдаемое на МСМ-изображениях, характерно для ферромагнетика с отрицательным коэффициентом магнитострикции и одноосной анизотропии. Наблюдаемое направление перемычки также хорошо совпадает с направлением ОЛН, определенной на основе МОКЕ-измерений.

При проведении МСМ-исследования поведения Ру-частицы во внешнем магнитном поле перед каждым измерением образец однородно намагничивался в поле 160 Э. Затем подавалось рабочее значение магнитного поля, при котором проводилось МСМ-сканирование области, где были расположены девять Ру-частиц. Шаг по полю составил 5 Э, диапазон изменения поля от +100 до -100 Э. Предварительное намагничивание образца позволило уменьшить влияние МСМ-зонда на процесс перемагничивания частиц внешним полем.

На полученных МСМ-изображениях Ру-частиц во внешнем магнитном поле наблюдалось следующее. Для ненапряженных частиц в полях от +100 до +45 Э Ру-частицы остаются однородно намагниченными. На противоположных сторонах частиц при этом наблюдается характерный черно-белый контраст. В полях от +40 до +30 Э частицы становятся квазиоднодоменными, черно-белые контрастные области на сторонах частиц увеличиваются в размерах. В полях от +25 до -25 Э на их МСМ-изображениях наблюдается четырехдоменное состояние. При этом один из доменов, направление намагниченности которого совпадает с магнитным полем, имеет существенно больший размер, чем домен с противоположным направлением (рис. 2, в). В полях от -30 до -40 Э частицы становятся квазиоднодоменными с противоположным (изначальному) направлением намагниченности (рис. 2, д). В полях от -45 до -100 Э частицы остаются однородно намагниченными (рис. 2, е).

Для напряженных частиц наблюдается схожее поведение намагниченности во внешнем магнитном поле. При направлении магнитного поля вдоль оси сжатия частиц (или ОЛН) в полях от +100 до +55 Э они остаются однородно намагниченными. В магнитном поле от +50 до +30 Э частицы становятся квазиоднодоменными. В полях от +25 до -25 Э частицы имеют четырехдоменную структуру (рис. 2, з). В диапазоне от -30 до -50 Э они квазиоднодоменные (аналогично рис. 2, д). При полях от -55 до -100 Э частицы становятся однородно намагниченными.

При направлении магнитного поля перпендикулярно оси сжатия частиц (или вдоль ОТН) в полях от +100 до +60 Э они остаются однородно намагниченными. В магнитном поле от +55 до +45 Э частицы становятся квазиоднодоменными. В полях от +40 до -35 Э частицы имеют как четырехдоменную, так и семидоменную структуру. В диапазоне от -40 до -55 Э они квазиоднодоменные. И в полях от -60 до -100 Э частицы становятся однородно намагниченными. Согласно МСМ-измерениям процесс однородного намагничивания напряженных частиц в направлении ОТН требует больших значений напряженности внешнего магнитного поля, как это наблюдается и при МОКЕ-измерениях.

Поведение магнитной структуры исследуемых Ру-частиц во внешнем магнитном поле является типичным для многодоменных частиц [10]. При увеличении магнитного поля вначале увеличивается площадь домена, направление намагниченности которого совпадает с направлением магнитного поля. Это происходит за счет уменьшения размера домена, намагниченность которого направлена в противоположную сторону (рис. 2, в, з). Эта стадия перемагничивания частицы хорошо визуализируется при МСМ-измерениях. После поглощения домена с намагниченностью, противоположной полю, частица переходит в квазиоднодоменное состояние и дальнейшее увеличение напряженности внешнего магнитного поля приводит к слабому изменению намагниченности частицы.

В интервалах внешнего магнитного поля  $-30 \div -15$  Э и  $15 \div 30$  Э на МСМ-изображениях частиц в ряде случаев наблюдается процесс перемагничивания частицы. Если учесть влияние магнитного зонда на получаемое МСМ-изображение частиц, то процесс перемагничивания частиц во внешнем магнитном поле довольно хорошо совпадает с петлями гистерезиса полученными методами МОКЕ. При этом

можно предположить, что ступеньки, наблюдаемые на петлях гистерезиса методами МОКЕ, связаны с переходом частицы из четырех доменного в квазидоменное состояние.

### Заключение

Проведенные измерения показали, что механическое сжатие планарных Рун-микрочастиц приводит к образованию в них ОЛН, направление которой совпадает с направлением сжатия частицы. Согласно полученным МОКЕ-данным и МСМ-измерениям у сжатых частиц наблюдается снижение значения внешнего магнитного поля необходимого для однородного намагничивания частицы в направлении ОЛН. В то же время в направлении ОТН, расположенной в плоскости частицы, наблюдается существенное увеличение напряженности внешнего магнитного поля, необходимого для однородного намагничивания частицы. Это связано с тем, что за счет магнитоупругого эффекта при сжатии частицы происходит перераспределение намагниченности в частице. За счет отрицательного коэффициента магнитострикции использованного пермаллоя происходит увеличение размера доменов, направление намагниченности в которых параллельно оси сжатия. Изменение магнитной структуры частицы может быть использовано для детектирования её механического напряжения.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-08-00915).

### Литература

1. Морозов. А.И. Переключение намагниченности ферромагнетика электрическим полем // Физика твердого тела. – 2014. – Т. 56, № 5. – С. 833–840.
2. Беляев Б.А., Изотов А.В. Исследование влияния упругих напряжений на анизотропию магнитных пленок методом ферромагнитного резонанса // Физика твердого тела. – 2007. – Т. 49, № 9. – С. 1651–1659.
3. Бизяев Д.А., Бухараев А.А. Кандрашкин Ю.Е., Мингалиева Л.В., Нургазизов Н.И., Ханипов Т.Ф. Магнитоупругий эффект в микрочастицах пермаллоя // Письма в ЖТФ. – 2016. – Т. 42, Вып. 20. – С. 24–32.
4. Peng R.-C., Wang J.J., Hu J.-M., Chen L.-Q., Nan C.-W. Electric-field-driven magnetization reversal in square-shaped nanomagnet-based multiferroic heterostructure // Appl. Phys. Lett. – 2015. – V. 106, No 14. – Art. 142901, P. 1–5. – doi: 10.1063/1.4917228.
5. Finizio S., Foerster M., Buzzi M., Kruger B., Jourdan M., Vaz C.A.F., Hockel J., Miyawaki T., Tkach A., Valencia S., Kronast F., Carman G.P., Nolting F., Klauß M. Magnetic anisotropy engineering in thin film Ni nanostructures by magnetoelastic coupling // Phys. Rev. Appl. – 2014. – V. 1, No 2. – Art. 021001, P. 1–6. – doi: 10.1103/PhysRevApplied.1.021001.
6. Kumar D., Singh S., Vishwakarma P., Dev A.S., Reddy V.R., Gupta A. Tailoring of in-plane magnetic anisotropy in polycrystalline cobalt thin films by external stress // J. Magn. Magn. Mater. – 2016. – V. 418. – P. 99–106. – doi: 0.1016/j.jmmm.2016.03.072.
7. Dai G., Zhan Q., Yang H., Li R.-W. Controllable strain-induced uniaxial anisotropy of Fe<sub>81</sub>Ga<sub>19</sub> films deposited on flexible bowed-substrates // J. Appl. Phys. – 2013. – V. 114, No 17. – Art. 173913, P. 1–6. – doi: 10.1063/1.4829670.
8. The Object Oriented MicroMagnetic Framework (OOMMF) project at ITL/NIST. – URL: <http://math.nist.gov/oommf/>.

9. *Овчинников Д.В., Бухараев А.А.* Компьютерное моделирование магнитно-силовой микроскопии изображений в рамках статической модели распределения намагниченности и диполь-дипольного взаимодействия // Журн. техн. физики. – 2001. – Т. 71. Вып. 8. – С. 85–91.
10. *Вонсовский С.В.* Магнетизм. – М.: Наука, 1971. – 1032 с.

Поступила в редакцию  
29.11.17

---

**Ханипов Тимур Фаритович**, младший научный сотрудник лаборатории физики и химии поверхности отдела химической физики

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН  
ул. Сибирский тракт, д. 10/7, г. Казань, 420029, Россия

**Бизяев Дмитрий Анатолиевич**, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории физики и химии поверхности отдела химической физики

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН  
ул. Сибирский тракт, д. 10/7, г. Казань, 420029, Россия

**Бухараев Анастас Ахметович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры оптики и нанопотоники; заведующий лабораторией физики и химии поверхности отдела химической физики

Казанский (Приволжский) федеральный университет  
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия  
Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН  
ул. Сибирский тракт, д. 10/7, г. Казань, 420029, Россия

**Чирков Вячеслав Валерьевич**, младший научный сотрудник лаборатории радиационной физики и радиобиологии отдела радиационных воздействий на материалы

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН  
ул. Сибирский тракт, д. 10/7, г. Казань, 420029, Россия

**Чукланов Антон Петрович**, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории физики и химии поверхности отдела химической физики

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН  
ул. Сибирский тракт, д. 10/7, г. Казань, 420029, Россия

**Нургазизов Нияз Ильгизович**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики и химии поверхности отдела химической физики

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН  
ул. Сибирский тракт, д. 10/7, г. Казань, 420029, Россия  
E-mail: [niazn@mail.ru](mailto:niazn@mail.ru)

ISSN 2541-7746 (Print)

ISSN 2500-2198 (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA.  
SERIYA FIZIKO-MATEMATICHESKIE NAUKI  
(Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series)

2018, vol. 160, no. 1, pp. 135–144

### Magneto-Optical Kerr Effect and Magnetization Structure of Permalloy Microparticles under Mechanical Stress

*T.F. Khanipov<sup>a</sup>, D.A. Bizyaev<sup>a</sup>, A.A. Bukharaev<sup>a,b</sup>, V.V. Chirkov<sup>a</sup>,  
A.P. Chuklanov<sup>a</sup>, N.I. Nurgazizov<sup>a\*</sup>*

<sup>a</sup>*Zavoisky Physical-Technical Institute, Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences,  
Kazan, 420029 Russia*

<sup>b</sup>*Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia*

E-mail: \**niazn@mail.ru*

Received November 29, 2017

#### Abstract

In this work, changes in the domain structure of planar permalloy microparticles under mechanical stress have been studied. For this purpose, an array of particles under mechanical stress has been formed on the silicon substrate. In addition, samples with an array of unstressed particles have been made. Using the samples, the magnetic structure has been visualized by magnetic force microscopy and hysteresis loops have been obtained by the method of magneto-optical Kerr effect. It has been found that an easy magnetization axis appears in the stressed samples due to uniaxial anisotropy caused by the mechanical stress of the particles. The axis direction coincides with the direction of particle compression. At the same time, the distribution of magnetization observed in the unstressed particles is determined mainly by the shape anisotropy.

**Keywords:** magnetoelastic effect, magnetic-force microscopy, magneto-optical Kerr effect, ferromagnetic microparticles, permalloy

**Acknowledgments.** The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 17-08-00915).

#### Figure Captions

Fig. 1. Hysteresis loops obtained by the method of magneto-optical Kerr effect for unstressed (solid lines) and stressed (dashed lines) particles at the external magnetic field direction along the easy magnetization axis (*a*) and along the hard magnetization axis (*b*). Angular dependencies of the normalized remnant magnetization (*c*) and coercive field of particles (*d*).

Fig. 2. MFM image of two Py particles and the magnetization structure corresponding to them in the following cases: unstressed particles without the external magnetic field (*a*), stressed particles without the field (*b*), unstressed particles in the field  $-15$  E (*c*), stressed particles in the field  $-15$  E (*d*), unstressed particles (quasisingle domain) in the field  $-40$  E (*e*), uniformly magnetized in the field  $-100$  E (*f*). The direction of stressed particle compression is shown with white arrows. Scanning field is  $22 \times 9$   $\mu\text{m}$ .

## References

1. Morozov A.I. Ferromagnetic magnetization switching by an electric field: A review. *Phys. Solid State*, 2014, vol. 56, no. 5, pp. 865–872. doi: 10.1134/S1063783414050199.
2. Belyaev B.A., Izotov A.V. Ferromagnetic resonance study of the effect of elastic stresses on the anisotropy of magnetic films. *Phys. Solid State*, 2007, vol. 49, no. 9, pp. 1731–1739. doi: 10.1134/S106378340709020X.
3. Bizyaev D.A., Bukharev A.A., Kandrashkin Yu.E., Mingalieva L.V., Nurgazizov N.I., Khanipov T.F. The magnetoelastic effect in permalloy particles. *Tech. Phys. Lett.*, 2016, vol. 42, no. 10, pp. 1034–1037. doi: 10.1134/S1063785016100187.
4. Peng R.-C., Wang J.J., Hu J.-M., Chen L.-Q., Nan C.-W. Electric-field-driven magnetization reversal in square-shaped nanomagnet-based multiferroic heterostructure. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, vol. 106, no. 14, art. 142901, pp. 1–5. doi: 10.1063/1.4917228.
5. Finizio S., Foerster M., Buzzi M., Kruger B., Jourdan M., Vaz C.A.F., Hockel J., Miyawaki T., Tkach A., Valencia S., Kronast F., Carman G.P., Nolting F., Klau I. Magnetic anisotropy engineering in thin film Ni nanostructures by magnetoelastic coupling. *Phys. Rev. Appl.*, 2014, vol. 1, no. 2, art. 021001, pp. 1–6. doi: 10.1103/PhysRevApplied.1.021001.
6. Kumar D., Singh S., Vishwakarma P., Dev A.S., Reddy V.R., Gupta A. Tailoring of in-plane magnetic anisotropy in polycrystalline cobalt thin films by external stress. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2016, vol. 418, pp. 99–106. doi: 10.1016/j.jmmm.2016.03.072.
7. Dai G., Zhan Q., Yang H., Li R.-W. Controllable strain-induced uniaxial anisotropy of Fe<sub>81</sub>Ga<sub>19</sub> films deposited on flexible bowed-substrates. *J. Appl. Phys.*, 2013, vol. 114, no. 17, art. 173913, pp. 1–6. doi: 10.1063/1.4829670.
8. The Object Oriented MicroMagnetic Framework (OOMMF) project at ITL/NIST. Available at: <http://math.nist.gov/oommf/>.
9. Ovchinnikov D.V., Bukharaev A.A. Computer simulation of magnetic force microscopy images with a static model of magnetization distribution and dipole-dipole interaction. *Tech. Phys.*, 2001, vol. 46, no. 8, pp. 1014–1019. doi: 10.1134/1.1395123.
10. Vonsovskii S.V. *Magnetizm* [Magnetism]. Moscow, Nauka, 1971. 1032 p. (In Russian)

---

⟨ *Для цитирования:* Ханипов Т.Ф., Бизяев Д.А., Бухарев А.А., Чирков В.В., Чулкинов А.П., Нургазизов Н.И. Магнитооптический эффект Керра и структура намагниченности пермаллоевых микрочастиц при механическом напряжении // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2018. – Т. 160, кн. 1. – С. 135–144. ⟩

⟨ *For citation:* Khanipov T.F., Bizyaev D.A., Bukharaev A.A., Chirkov V.V., Chuklanov A.P., Nurgazizov N.I. Magneto-optical Kerr effect and magnetization structure of permalloy microparticles under mechanical stress. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2018, vol. 160, no. 1, pp. 135–144. (In Russian) ⟩