Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

выпуск 11

ТВЕРЬ 2019

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в Межвузовском сборнике научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2019. – Вып. 11. – 680 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 7747789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2019

© Тверской государственной
университет, 2019

УДК 537.662

Оригинальная статья

ДОМЕННАЯ СТРУКТУРА И МАГНИТОТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК ФЕРРИТОВ-ГРАНАТОВ

Р.М. Егужокова, А.И. Иванова, Е.М. Семенова

ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

170002, Россия, Тверь, Садовый пер., 35

DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.123

Аннотация: Настоящая статья содержит обзор результатов эксперимента по применению магнитотранспортных свойств пленок феррит-гранатов в микрофлюидных устройствах. Приведены экспериментальные данные о силовом воздействии магнитных полей на доменную структуру пленок, связанных с микросферами, представляющими собой наночастицы магнетита, покрытые полимером. Показано направленное движение микросфер, определяемое силой и направлением приложенного магнитного поля, а также геометрией доменов феррит-гранатовых пленок.

Ключевые слова: феррит-гранатовая пленка, магнитные микросферы, магнитная манипуляция.

1. Введение

За последние несколько десятилетий существенное внимание уделяется развитию технологий магнитных манипуляций и сепарации. Практическая значимость магнитных манипуляций с микро- и наноразмерными материалами заключается в том, что они имеют множество применений в биологии, медицине и микроэлектронике [1-5]. В настоящее время наиболее широкое применение в биомедицине получили микро- и наночастицы оксида железа, что обусловлено их низкой токсичностью и стабильностью магнитных характеристик. Магнитные микросферы представляют собой новый класс функциональных материалов, созданных из полимеров, наполненных наночастицами магнетита Fe_3O_4 . Одним из основных преимуществ магнитных микросфер является их способность под действием внешнего магнитного поля контролируемо транспортировать и осуществлять доставку химикатов и лекарств к соответствующему биологическому объекту, обеспечивая эффективное применение в биомедицине. Другое важное преимущество заключается в том, что парамагнитными частицами можно легко манипулировать, применяя относительно небольшие силы, выработанные оптическими, электрическими, или тепловыми полями [5-9]. Одним из способов управления движения магнитных микросфер является метод, предложенный в [11], основанный на использовании микрокатушек с ферромагнитными сердечниками на кремниевой подложке для манипулирования микросферами с биокompонентами. Возможной альтернативой данному методу является использование феррит-гранатовых пленок для транспортировки химических или биологических грузов, прикрепленных к магнитным носителям [12].

Целью настоящей работы является исследование магнитотранспортных свойств феррит-гранатовых пленок, создание испытательного стенда магнитоуправляемого аппаратного комплекса, получение экспериментальных данных.

2. Методика эксперимента

В работе были использованы эпитаксиальные монокристаллические пленки ферритов-гранатов (ЭМПФГ), выращиваемые на подложках из гадолиний-галлиевого граната, имеющие следующие параметры: толщина эпитаксиальной пленки – 7–8 мкм; тип магнитной анизотропии – «легкая ось»; напряженность поля магнитного насыщения: 10–1000 Э; чувствительность к магнитному полю не хуже 10^{-5} Э; диапазон рабочих температур 0–150°C. ЭМПФГ имеют ряд достоинств для данной исследуемой технологии: возможность внешнего управления траекторией движения магнитной частицы, связанной с доменной структурой; отсутствие топографических микрорельефов пленки, которые могут нарушать движение частиц из-за гидродинамических или стерических взаимодействий; гранаты являются механически очень прочными материалами и инертны по отношению к большинству химикатов, и, таким образом, их можно легко интегрировать в различные среды.

В качестве микросфер исследованы парамагнитные микрочастицы оксида железа, покрытые полистеролом производства биотехнической компании Micromod Partikeltechnologie (Германия) с диаметрами $d_1 = 3,90$ мкм, $d_2 = 4,26$ мкм, $d_3 = 7,52$ мкм и $d_4 = 9,82$ мкм. Частицы стабилизированы в водных растворах без каких-либо поверхностно-активных веществ. В ходе эксперимента в водную суспензию частиц добавляли дистиллированную воду или масло и наносили несколько капель на пленку. Внешнее однородное магнитное поле, для изменения магнитного рисунка пленки и, в свою очередь, для перемещения коллоидных частиц создается соленоидом с количеством витков 4200.

Исследования доменной структуры феррит-гранатовых пленок и движения микросфер проводили на автоматизированном поляризационном микроскопе Неофот-30. Микроструктура и размер магнитных частиц определены с помощью растрового электронного микроскопа JEOL 6610 LV в режиме вторичных электронов.

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 а представлено электронно-микроскопическое изображение исследуемых магнитных микросфер в водном растворе и эмульсии типа вода/масло. Одним из применений парамагнитных микрочастиц над пленками магнитного граната является движение микросфер с грузом

Внешнее магнитное поле, генерируемое многовитковым соленоидом прикладывалось перпендикулярно поверхности феррит-гранатовой пленки. Если внешнее поле мало, магнитные сферы выстраиваются вдоль доменных границ ЭМПФГ. Меняя величину поля, наблюдали смещение доменных границ и направленное движение магнитных частиц. Благодаря дипольным отталкивающим взаимодействиям между частицами микросферы не агрегируют и находятся в разделенном состоянии. Наблюдается несколько динамических режимов в зависимости от геометрии основной магнитной структуры, а также от частоты, силы и направления внешнего поля.

Рис. 2. Распределение магнитных микросфер на границах доменов при различных значениях внешнего магнитного поля.

4. Выводы

Проведены исследования магнитотрансляционных свойств эпитаксиальных монокристаллических пленок ферритов-гранатов. Создан испытательный стенд магнитоуправляемого аппаратного комплекса на основе ЭПГФ. Продемонстрировано контролируемое направленное движение магнитных микросфер вдоль доменных границ феррит-гранатовых пленок. Сделан вывод о возможности использования ЭМПФГ

в качестве трансляторов биологических и химических грузов на магнитных носителях.

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. профессору Гречишкину Р.М. за помощь в проведении исследований и в обсуждении результатов.

Библиографический список:

1. **Pankhurst, Q.A.** Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine / Q.A. Pankhurst, J. Connolly, S.K. Jones, J. Dobson // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2003. – V. 36. – № 13. – P. R167-R181.
2. **Zhang, C.** Dielectrophoresis for manipulation of micro-nano particles in microfluidic systems / C. ZhangK. KhoshmaneshA. MitchellK. Kalantar-zadeh // Analytical and Bioanalytical Chemistry. – 2010. – V.396. – I. 1. – P. 401-420.
3. **Catillo-León, J.** Micro and nano techniques for the handling of biological samples / ed. by J. Catillo-León, W.E. Svendsen, and M. Dimaki. – Boca Raton: CRC Press, 2011. – 255 p.
4. **Desai, J.P.** Engineering approaches to biomanipulation / J.P. Desai, A. Pillarisetti, A.D. Brooks // Annual review of biomedical engineering. – 2007. – V. 9. – P. 35-53.
5. **Philippova, O.** Magnetic polymer beads: Recent trends and developments in synthetic design and applications / O. Philippova, A. Barabanova, V. Molchanov, A. Khokhlov // European Polymer Journal. – 2011. – V. 47. – I. 4. – P. 542-559.
6. **Dienerowitz, M.** Optical manipulation of nanoparticles: a review / M. Dienerowitz, M. Mazilu, K. Dholakia // Journal of Nanophotonics. – 2008. – V. 2. – № 1. – P. 021875-1-021875-32.
7. **Yang, A.H.J.** Optical manipulation of nanoparticles and biomolecules in sub-wavelength slot waveguides / A.H.J. Yang, S.D. Moore, B.S. Schmidt, et al. // Nature. – 2009. – V.457. – P.71-75.
8. **Astumian, R.D.** Thermodynamics and kinetics of a brownian motor / R.D. Astumian // Science. – 1997. – V. 276. – I. 5314. – P. 917-922.
9. **Decossas, S.** Atomic force microscopy nanomanipulation of silicon nanocrystals for nanodevice fabrication / S. Decossas, F. Mazon, T. Baron, et al. // Nanotechnology. – 2003. – V. 14. – № 12. – P. 1272-1278.
10. **Voldman, J.** Electrical forces for microscale cell manipulation / Annual Review of Biomedical Engineering. – 2006. – V. 8. – P. 425-454.
11. **Ramadan, Q.** Microcoils for transport of magnetic beads / Q. Ramadan, C. Yu, V. Samper, et al. // Applied Physics Letters. – 2006. – V. 88. – I. 3. – P. 032501-1-032501-3.
12. **Tierno, P.** Colloidal transport on magnetic garnet films / P. Tierno, F. Sagués, T.H. Johansen, T.M. Fischer // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2009. – V. 11. – I. 42. – P. 9615-9625.

References:

1. **Pankhurst, Q.A.** Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine / Q.A. Pankhurst, J. Connolly, S.K. Jones, J. Dobson // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2003. – V. 36. – № 13. – P. R167-R181.
2. **Zhang, C.** Dielectrophoresis for manipulation of micro-nano particles in microfluidic systems / C. ZhangK. KhoshmaneshA. MitchellK. Kalantar-zadeh // Analytical and Bioanalytical Chemistry. – 2010. – V.396. – I. 1. – P. 401-420.

3. **Catillo-León, J.** Micro and nano techniques for the handling of biological samples / ed. by J. Catillo-León, W.E. Svendsen, and M. Dimaki. – Boca Raton: CRC Press, 2011. – 255 p.
4. **Desai, J.P.** Engineering approaches to biomanipulation / J.P. Desai, A. Pillarisetti, A.D. Brooks // Annual review of biomedical engineering. – 2007. – V. 9. – P. 35-53.
5. **Philippova, O.** Magnetic polymer beads: Recent trends and developments in synthetic design and applications / O. Philippova, A. Barabanova, V. Molchanov, A. Khokhlov // European Polymer Journal. – 2011. – V. 47. – I. 4. – P. 542-559.
6. **Dienerowitz, M.** Optical manipulation of nanoparticles: a review / M. Dienerowitz, M. Mazilu, K. Dholakia // Journal of Nanophotonics. – 2008. – V. 2. – № 1. – P. 021875-1-021875-32.
7. **Yang, A.H.J.** Optical manipulation of nanoparticles and biomolecules in sub-wavelength slot waveguides / A.H.J. Yang, S.D. Moore, B.S. Schmidt, et al. // Nature. – 2009. – V. 457. – P. 71-75.
8. **Astumian, R.D.** Thermodynamics and kinetics of a brownian motor / R.D. Astumian // Science. – 1997. – V. 276. – I. 5314. – P. 917-922.
9. **Decossas, S.** Atomic force microscopy nanomanipulation of silicon nanocrystals for nanodevice fabrication / S. Decossas, F. Mazen, T. Baron, et al. // Nanotechnology. – 2003. – V. 14. – № 12. – P. 1272-1278.
10. **Voldman, J.** Electrical forces for microscale cell manipulation / Annual Review of Biomedical Engineering. – 2006. – V. 8. – P. 425-454.
11. **Ramadan, Q.** Microcoils for transport of magnetic beads / Q. Ramadan, C. Yu, V. Samper, et al. // Applied Physics Letters. – 2006. – V. 88. – I. 3. – P. 032501-1-032501-3.
12. **Tierno, P.** Colloidal transport on magnetic garnet films / P. Tierno, F. Sagués, T.H. Johansen, T.M. Fischer // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2009. – V. 11. – I. 42. – P. 9615-9625.

Original paper

DOMAIN STRUCTURE AND MAGNETIC TRANSPORT PROPERTIES ON THIN FERRITE-GARNET FILMS

R.M. Eguzhokova, A.I. Ivanova, E.M. Semenova

Tver State University, Tver, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.123

Abstract: This article provides an overview of the results of an experiment on the application of the magnetotransport properties of ferrite – garnet films in microfluidic devices, as well as on the determination of the composition of immunomagnetic microspheres. The article provides practical recommendations on the use of ferrite garnet films for the controlled transport of magnetic microspheres.

Keywords: ferrite-garnet films, magnetic microspheres, magnetic manipulation.

Егужокова Раиля Маратовна – аспирант кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Иванова Александра Ивановна – к.ф.-м.н., доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Семенова Елена Михайловна – к.ф.-м.н., доцент кафедры физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Railya M. Eguzhokova – postgraduate student of the Applied Physics Department, Tver State University

Alexandra I. Ivanova – Ph. D., Docent of the Applied Physic Department, Tver State University

Elena M. Semenova – Ph. D., Docent of the Condensed Matter Physic Department, Tver State University

Поступила в редакцию/received: 09.09.2019; после рецензирования/revised: 12.10.2019; принята/accepted 14.11.2019.