Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-3-90-104

CC BY 4.0

Структура и свойства мультиферроидальных ленгмюровских пленок на основе наночастиц титаната бария и магнетита

А. П. Кузьменко[1] ✉, И. В. Локтионова[1], П. В. Абакумов[1], А. А. Булгакова[1], А. С. Сизов[1]

[1] Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: apk3527@mail.ru

Резюме

Цель. *Получение методом Ленгмюра – Блоджетт мультиферроидальных нанопленок из стабилизированных магнетита и титаната бария, установление наноструктурной взаимосвязи и управления их свойствами под воздействием как магнитных, так и электрических полей.*

Методы. *Осаждение мультиферроидальных нанопленок магнетита и титаната бария методом Ленгмюра – Блоджетт, методы зондовой микроскопии, ИК-Фурье спектроскопии, комбинационного рассеяния света, рентгенофазового и рентгеноструктурного анализа, микроскопия пьезоотклика и температурная зависимость магнитосопротивления.*

Результаты. *Методом химической конденсации синтезирован высокодисперсный стабилизированный магнетит с размерами частиц по данным атомно-силовой микроскопии 25 нм. Получены нанопленки стабилизированного магнетита методом Ленгмюра – Блоджетт. Методом ИК-Фурье-спектроскопии и комбинационного рассеяния света подтверждена их химическая структура – наблюдались линии, соответствующие как магнетиту, так и его стабилизирующим оболочкам. По данным рентгеновской дифрактометрии рассчитан период кристаллической решетки кубической сингонии магнетита 8,3566 Å. Созданы методом Ленгмюра – Блоджетт композитные слоистые структуры из высокогомогенных пленок титаната бария и магнетита. Установлен эффект монодоменизации исследуемых пленок с размерами, соответствующими суперпарамагнитному диапазону, вызванный ожидаемым ростом намагниченности насыщения в пленочной структуре магнетита по сравнению с объемным материалом. Исследована температурная зависимость магнитосопротивления. Проведенные исследования позволили подтвердить возникновение магнитоэлектрического эффекта в данных нанокомпозитных структурах, возникновение которого обусловлено проявлением комплекса магнитострикционных и пьезоэлектрических свойств, характерных для составляющих фаз.*

Заключение. *В созданных методом Ленгмюра – Блоджетт мультиферроиках в виде композитных нанопленочных структур из стабилизированных наночастиц титаната бария/магнетита подтверждена возможность обратимого управления магнитными или электрическими полями на магнитострикционные и пьезоэлектрические свойства за счет сочетания как прямого, так и обратного пьезо- и магнитострикционных эффектов.*

© Кузьменко А. П., Локтионова И. В., Абакумов П. В., Булгакова А. А., 2022

Ключевые слова: *магнетит; титанат бария; мультиферроики; магнитоэлектрический эффект; метод Ленгмюра – Блоджетт.*

Финансирование: *Публикация подготовлена в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (Соглашения № 075-15-2021-1155 и № 075-15-2021-1213).*

Конфликт интересов: *Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Для цитирования: Структура и свойства мультиферроидальных ленгмюровских пленок на основе наночастиц титаната бария и магнетита / А. П. Кузьменко, И. В. Локтионова, П. В. Абакумов, А. А. Булгакова, А. С. Сизов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 12, № 3. С. 90–104. https://doi.org/ 10.21869/2223-1528-2022-12-3-90-104

Поступила в редакцию 30.06.2022 *Подписана в печать 29.08.2022* *Опубликована 28.09.2022*

Structure and PRoperties of Multiferroic Langmuir Films Based on Barium Titanate and Magnetite Nanoparticles

Alexandr P. Kuzmenko[1] ✉, Inna V. Loktionova[1], Pavel V. Abakumov[1], Anastasia A. Bulgakova[1], Alexandr S. Sizov [1]

[1] Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: apk3527@mail.ru

Abstract

Purpose. *Obtaining multiferroic nanofilms from stabilized magnetite and barium titanate by the Langmuir-Blodgett method, establishing the nanostructural relationship and controlling their properties under the influence of both magnetic and electric fields.*

Methods. *Deposition of multiferroic magnetite and barium titanate nanofilms by the Langmuir-Blodgett method, probe microscopy, FTIR spectroscopy, Raman light scattering, X-ray phase and X-ray structural analysis, piezo response microscopy and temperature dependence of magnetoresistance.*

Results. *A highly dispersed stabilized magnetite with a particle size of 25 nm according to atomic force microscopy data was synthesized by chemical condensation method. Stabilized magnetite nanofilms were obtained by the Langmuir-Blodgett method. Their chemical structure was confirmed by FTIR spectroscopy and Raman spectroscopy - lines corresponding to both magnetite and its stabilized shells were observed. Based on X-ray diffractometry data, the lattice period of the cubic syngony of magnetite was calculated to be 8.3566 Å. Composite layered structures made of highly homogeneous films of barium titanate and magnetite were created by the Langmuir-Blodgett method. The monodomainization effect of the investigated films with dimensions corresponding to the superparamagnetic range caused by the expected growth of saturation magnetization in the magnetite film structure as compared to the bulk material was established. The temperature dependence of magnetoresistance was investigated. The studies made it possible to confirm the occurrence of the magnetoelectric effect in these nanocomposite structures, the occurrence of which is caused by the manifestation of a complex of magnetostrictive and piezoelectric properties characteristic of the constituent phases.*

Conclusion. *In Langmuir-Blodgett multiferroics in the form of composite nanofilm structures of stabilized barium titanate/magnetite nanoparticles the possibility of reversible control of magnetic or electric fields on magnetostrictive and piezoelectric properties by combining both forward and reverse piezo- and magnetostrictive effects was confirmed.*

Keywords: *magnetite; barium titanate; multiferroics; magnetoelectric effect; Langmuir-Blodgett method.*

Conflict of interest*: The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

Funding: *The publication was prepared as part of the implementation of the strategic academic leadership program "Priority 2030" (Agreements No. 075-15-2021-1155 and No. 075-15-2021-1213).*

For citation: *Kuzmenko A. P., Loktionova I. V., Abakumov P. V., Bulgakova A. A., Sizov A. S. Structure and Properties of Multiferroic Langmuir Films Based on Barium Titanate and Magnetite Nanoparticles. Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2022; 12(3): 90–104. (In Russ.) https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-3-90-104

Received 30.06.2022 *Accepted 29.08.2022* *Published 28.09.2022*

***

Введение

Тонкие сегнетоэлектрические и магнитные пленки представляют научный и практический интерес, как по отдельности, так и в контексте композитных слоистых гетероструктур с разделением пьезоэлектрической и магнитострикционной фаз. В структуре мультиферроиков на основе магнетик-сегнетоэлектрик наблюдается прямой $P = P(H)$ и обратный $M = M(E)$ магнитоэлектрический (МЭ) эффекты, которые проявляются в индуцировании поляризации сегнетоэлектрической пленки в магнитном поле и намагниченности магнитной пленки в электрическом поле соответственно [1–4].

Магнитоэлектрический эффект нашел широкое применение в различных приложениях твердотельной электроники [5–9]. В пленочных мультиффероиках магнитоэлектрический отклик $\alpha_E = E/H$ на несколько порядков выше МЭ эффекта в объёмных природных образцах [10–12]. Существенное влияние на величину МЭ эффекта оказывают качество пленок, их толщина, число пьезоэлектрических и магнитострикционных слоев. Все эти параметры могут эффективно контролироваться в методе Ленгмюра – Блоджетт, который является уникальным инструментом получения высококачественных пленок с заданной молекулярной структурой и толщиной. Соединения на основе титаната бария и магнетита, свойства которых детально изучены [13–17], перспективны при создании мультиферроидальных композитных структур, обладающих пьезоэлектрическими и магнитострикционными свойствами [7].

Задачами настоящего исследования являлись:

– характеризация пленок стабилизированного магнетита, осажденных методом Ленгмюра – Блоджетт с водной субфазы;

– исследование свойств композитных пленочных структур титанат бария – магнетит.

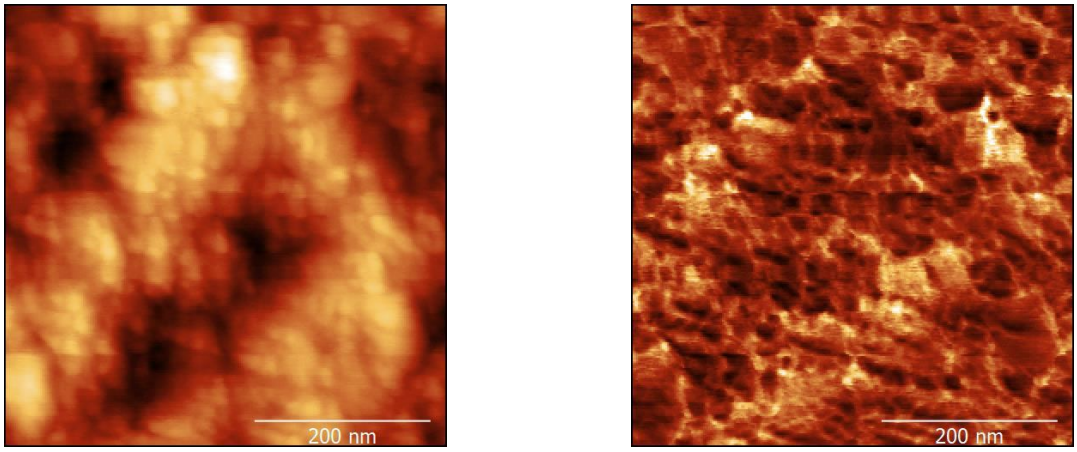
Материалы и методы

Методом пероксидного синтеза стабилизированы наночастицы титаната бария (ST $BaTiO_3$) в тетрагональной и кубической фазах ранее в [18]. Получен высокодисперсный стабилизированный магнетит (ST Fe_3O_4) методом химической конденсации, с последующей пептизацией путем добавления поверхностно-активных веществ – олеиновой кислоты с малым количеством дисперсионной среды и повторной стабилизацией полученных наночастиц олеатом натрия при температуре 80°С.

На установке KSV NIMA 2002 осаждались пленки ST $BaTiO_3$ нами ранее в [18] и ST Fe_3O_4 (8 слоев) на платиновой подложке по следующим параметрам переноса: объем наносимого на водную поверхность ST Fe_3O_4 5 мкл, скорость движения барьеров 5 мм/мин, давление переноса 20 мН/м, температура 298 К, а также композитные структуры из чередующихся ST $BaTiO_3$ и ST Fe_3O_4 пленок с одинаковым количеством слоев. Структурные особенности пленочного магнетита исследовались на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ) типа SmartSPM 1000, AIST-NT в полуконтактном режиме атомно-силовой микроскопии (АСМ) методом пьезоотклика (зонд радиусом ~30 нм с напылением из PtTi) и магнитно-силовой (МСМ) микроскопии (зонд радиусом 60 нм с напылением из CoCr). Химическая структура пленок ST Fe_3O_4 была изучена методами ИК-Фурье-спектроскопии (iS50 Nicolet, спектральное разрешение 1 $см^{-1}$) и комбинационного рассеивания света (КРС) на установке AIST-NT OmegaScope ($\lambda = 532$ нм, $P = 50$ мВт, пространственное разрешение 0,25 мкм, спектральное разрешение 0,8 $см^{-1}$). Анализ элементного состава пленки выполнялся с помощью энергодисперсионной микрорентгеновской спектроскопии в сканирующем электронном микроскопе (FEI Nova Nano SEM). Для изучения кристаллической структуры наночастиц магнетита применялась рентгеновская дифрактометрия (ARL X'TRA) в геометрии Брега – Брентано с использованием излучения CuK_α, $\lambda = 0{,}154$ нм, с шагом 0,02°. Параметры кристаллической решетки наночастиц рассчитывались с помощью ПО Powder Cell.

Результаты и их обсуждение

АСМ-изображение пленки ST Fe_3O_4 представлено регулярной структурой (рис. 1, а). Средний диаметр стабилизированных наночастиц магнетита составил ~25 нм. На магнитно-силовом изображении отчетливо видны магнитные доменные структуры (рис. 1, б). Из-за малой толщины пленки магнитная структура является сильно дисперсной, что не позволило выделить период магнитных неоднородностей.



а б

Рис. 1. Изображения пленки ST Fe_3O_4, полученные с помощью сканирующего зондового микроскопа: а – АСМ; б – МСМ

Fig. 1. Images of ST Fe_3O_4 film obtained with a scanning probe microscope: a – AFM; б – MSM

Данными ИК-Фурье-спектроскопии подтверждено наличие магнетита и его стабилизирующих оболочек: олеиновой кислоты ($C_{18}H_{34}O_2$) и олеата натрия ($NaC_{18}H_{33}O_2$) (рис. 2), что в полной мере согласовывалось с данными КРС (рис. 3).

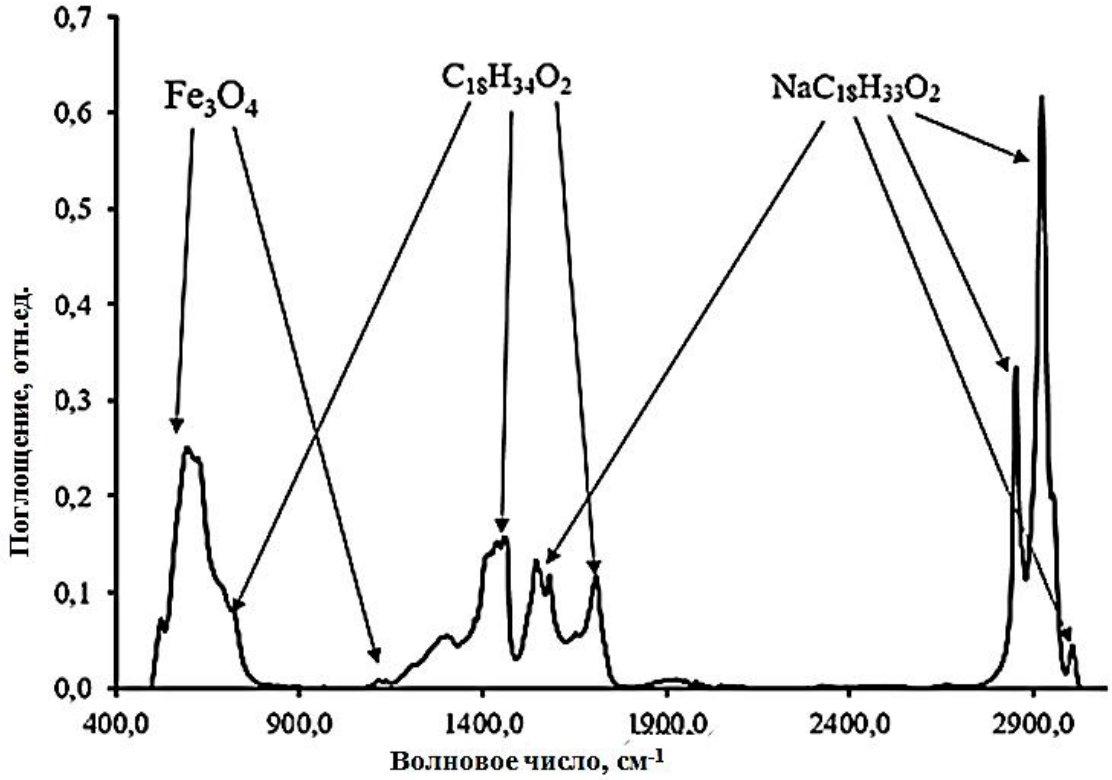


Рис. 2. ИК-Фурье-спектр пленок ST Fe_3O_4

Fig. 2. FT-IR spectr of ST Fe_3O_4 films

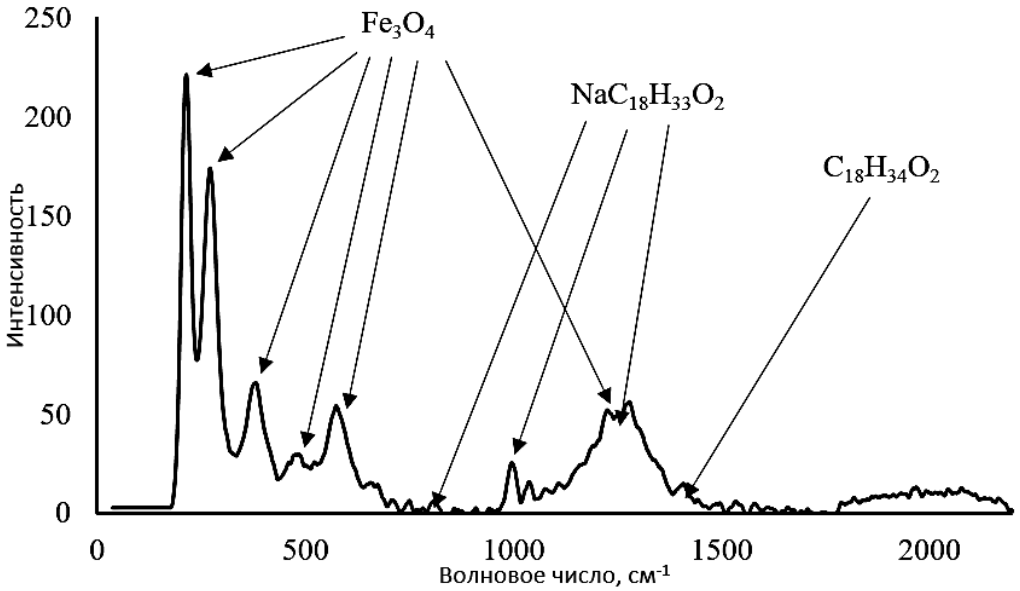


Рис. 3. КРС спектр пленок ST Fe_3O_4

Fig. 2. Raman spectr of ST Fe_3O_4 films

Энергодисперсионный анализ выявил в пленках Fe, O, Na и C, соответствующие магнетиту, олеиновой кислоте и олеату натрия (рис. 4). Были обнаружены в совсем малых количествах остатки прекурсоров S и Cl, используемых в реакции химической конденсации.

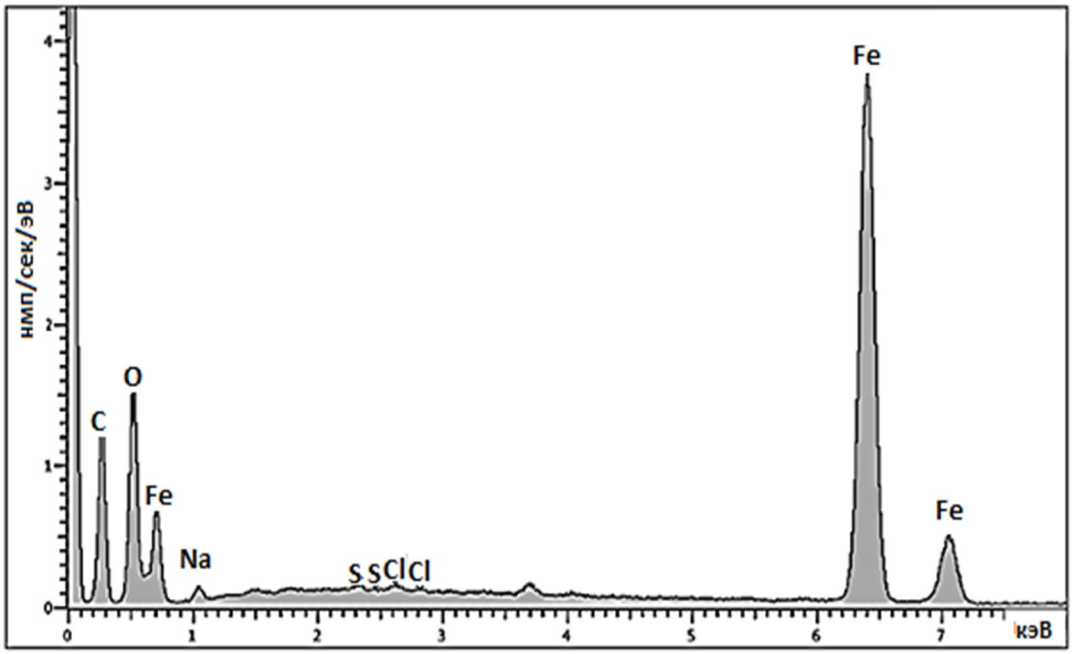


Рис. 4. Энергодисперсионный анализ пленки ST Fe_3O_4

Fig. 4. Energy dispersive analysis of ST Fe_3O_4 film

В полученных пленках ST Fe_3O_4 преобладает текстурированная фаза магнетита, ориентированная по нормали к подложке, о чем свидетельствует пик (рис. 5) с характерной кристаллографической плоскостью (311). Кристаллическая структура железа и маггемита присутствуют в незначительном количестве. Отклонения 2θ для остальных рефлексов от их базовых значений также указывает на это. Кристаллическая решетка наночастиц магнетита принадлежит кубической сингонии с периодом 8,3566 Å, что отличается на 0,4% от табличного значения (8,3883 Å).

На рисунке 6 представлены композитные структуры из чередующихся пленок ST BaTiO3 и ST Fe3O4 с одинаковым количеством слоев.

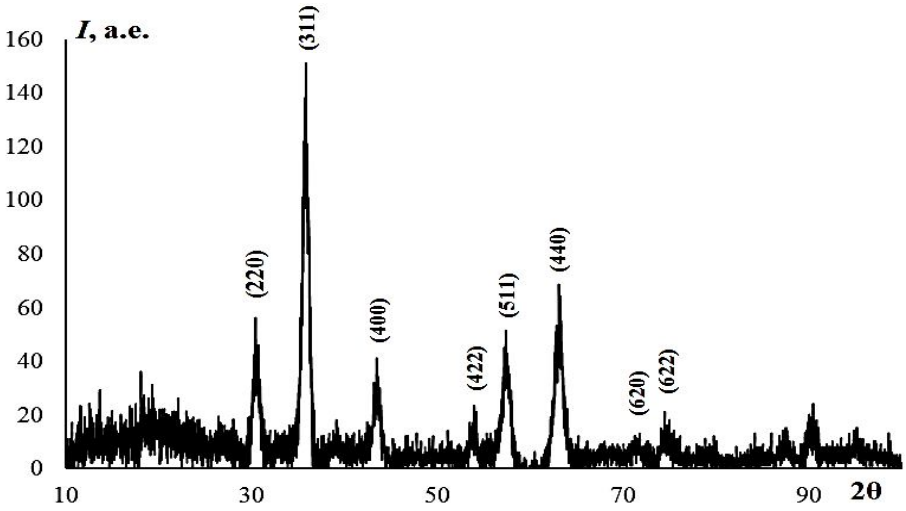


Рис. 5. Рентгенограмма наночастиц ST Fe_3O_4

Fig. 5. X-Ray diffraction patterns of nanoparticles ST Fe_3O_4

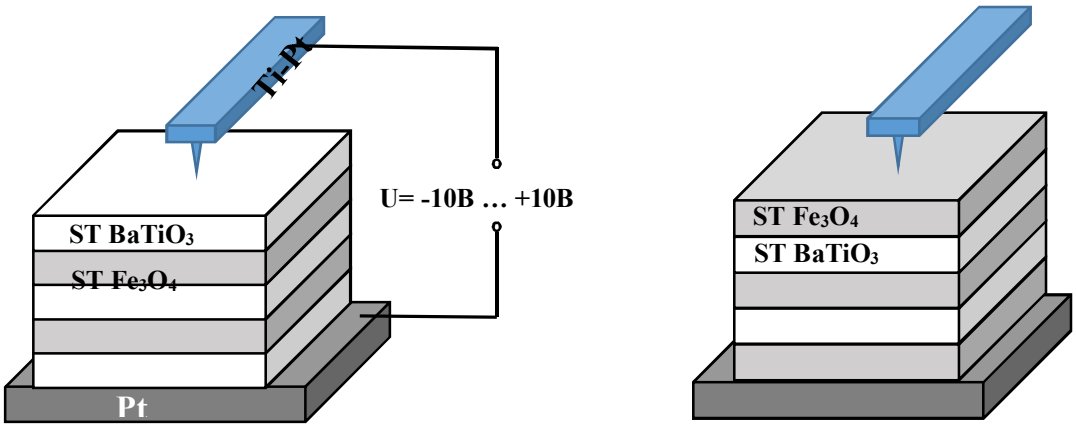


Рис. 6. Схематическая иллюстрация композитных структур мультиферроика

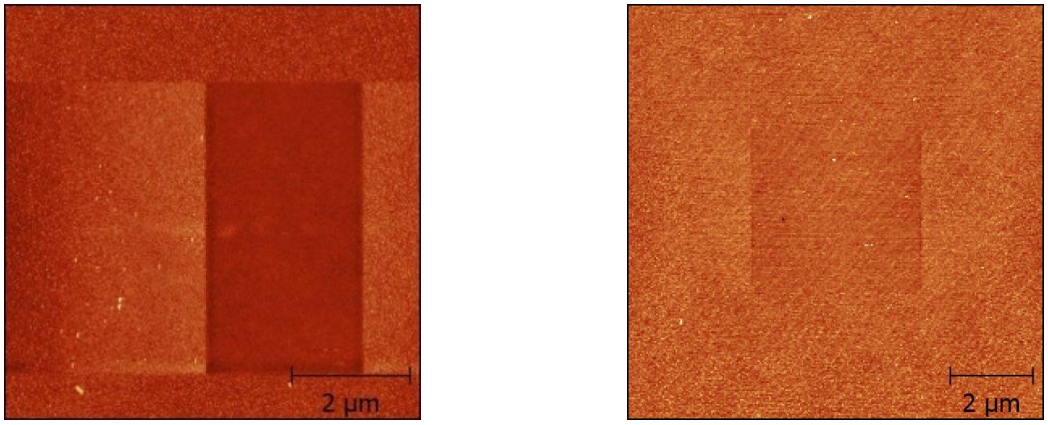
Fig. 6 Schematic illustration of composite multiferroic structures

Для изучения возможности управления пьезоэлектрическими свойствами полученной слоистой структуры использовалась схема, изображенная на рисунке 6, а. С помощью сканирующего зондового микроскопа измерялся пьезоотклик слоя титаната бария как в монопленке [19], так и в представленной гетероструктуре. Данные исследования производились во внешнем магнитном поле, которое создавалось постоянными неодимовыми магнитами. Конструкция предусматривала возможность изменения их расстояния до образца для изменения величины индукции магнитного поля. Данная геометрия эксперимента использовалась для проведения измерений в латеральном внешнем магнитном поле. Нормальное направление вектора магнитной индукции также обеспечивалось двумя неодимовыми магнитами, но без изменения расстояния, что обеспечивало постоянную величину внешнего поля. Основа кантилевера выполнена из монокристаллического кремния, а его напыление из Pt и Ti определяло электропроводность и являлось немагнитным, т. е. внешнее магнитное поле не оказывало никого влияния на точность производимых измерений.

Тяжелая ось, намагничивась в наночастицах магнетита, совпадает с кристаллографической осью [001]. Однако анизотропии исследуемых свойств не обнаружено. Данное обстоятельство объясняется тем, что осаждение магнитных слоев производилось в отсутствие внешнего магнитного поля. В результате этого кристаллографические направления стабилизированных наночастиц магнетита равновероятны и какое-либо преимущественное направление отсутствует.

Для управления магнитными свойствами с помощью внешних электрических полей применялась схема, изображенная на рисунке 6, б. Создание внешнего электрического поля выполнялось с помощью пластин плоского конденсатора. Пластины были жестко закреплены в микроскопе (d = 10 см), а управление напряженностью производилось изменением прикладываемого к обкладкам напряжения, варьируемого от 0 до 100 В. Напряженность внешнего электрического поля достигала 1 кВ/м. В этом случае использовался зонд с магнитным напылением (Co-Cr), которое не взаимодействует с электрическим полем и тем самым, как и в первом случае, какие-либо искажения в полученных экспериментальных данных отсутствовали.

В связи с тем, что в осажденной пленке все кристаллографические направления равновероятны, в исходном состоянии не наблюдалось какой-либо доменной структуры, ни магнитной, ни сегнетоэлектрической. Однако такую структуру удалось создать с помощью соответствующего взаимодействия кантилевера с поверхностью гетероструктур (рис. 7).



а б

Рис. 7. Изображение индуцированной доменной структуры: а – сегнетоэлектрическая; б – магнитная

Fig. 7. Image of the induced domain structure: a - ferroelectric; б - magnetic

В обоих случаях наблюдается 180° доменная стенка. Необходимо отметить, что с увеличением толщины однородных слоев в исследуемых композитных гетероструктурах величина поляризации и намагниченности в искусственных доменах возрастает. Очевидно, что в таком случае должна наблюдаться некоторая критическая толщина, по достижении которой данный эффект достигнет своего насыщения либо начнет уменьшаться. Однако для толщин, исследуемых в данной работе, эта величина не была обнаружена.

При исследовании полученных гетероструктур по стандартной методике было изучено магнитосопротивление: $\Delta\rho/\rho = [\rho(B) - \rho(0)]/\rho(0)$. Как видно из рисунка 8, величина эффекта составила около 6%. Столь невысокое $\Delta\rho/\rho$ объясняется значительным различием кристаллических решёток для ST Fe3O4 – 8,3566 Å и ST BaTiO3 3,992 Å [18]. Было обнаружено, что магнитосопротивление с увеличением температуры линейно падает.

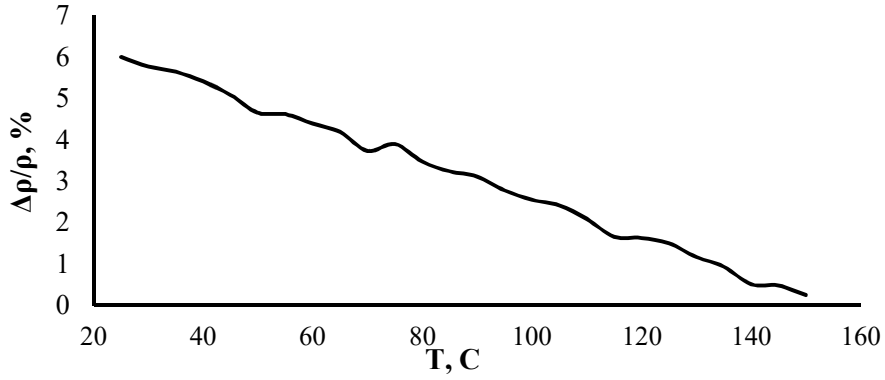


Рис. 8. Температурная зависимость магнитосопротивления

Fig. 8. Temperature dependence of magnetoresistance

На кривой магнитосопротивления отмечен четко выраженный скачок при температуре 75°C, соответствующий температуре структурного перехода для пленок $BaTiO_3$ ST из тетрагональной фазы в кубическую, который ранее наблюдался и был рассчитан нами для пленок различных толщин в [18]. Такие же скачки структурных переходов наблюдались и для композитных нанопленочных структур порошков $BaTiO_3$ / Fe_3O_4 в [20].

Выводы

Получены методом Ленгмюра – Блоджетт однородные по структуре и составу нанопленки ST Fe_3O_4 с характерным размером наночастиц ~25 нм. Установлена кристаллическая структура, соответствующая кубической сингонии с периодом решетки 8,3566 Å, и химическая структура, подтверждающая наличие магнетита и стабилизирующих оболочек осажденных нанопленок. Получены мультиферроидальные композитные слоистые структуры на основе стабилизированных наночастиц титаната бария и магнетита. Обнаружен магнитоэлектрический эффект в данных структурах. Методом пьезоотклика записаны искусственно индуцированные магнитная и сегнетоэлектрическая структуры с 1800 доменной стенкой. Величина магнитосопротивления составила 6%, которая с увеличением температуры линейно уменьшается.

Список литературы

1. Прямой и обратный магнитоэлектрический эффект в орторомбических монокристаллах $Dy_{1-x}HO_xMnO_3$ / А. Л. Фрейдман, И. Н. Хороший, М. И. Колков, К. Ю. Терентьев // Физика твердого тела. 2021. Т. 63, № 12. С. 2119–2125. https://doi/org/10.21883/FTT.2021.12.51673.185

2. The direct magnetoelectric effect in ferroelectric-ferromagnetic epitaxial heterostructures / I. Fina, N. Dix, J.-M. Rebled [et al.] // Nanoscale. 2013. Vol. 5, no. 17. P. 8037–8044. https://doi.org/10.1039/c3nr01011b

3. The direct and the converse magnetoelectric effect in multiferroic cobalt ferrite–barium titanate ceramic composites / M. Etier, V. Shvartsman, S. Salomon [et al.] // Journal of the American Ceramic Society. 2016. Vol. 99, no. 11. P. 3623–3631. https://doi.org/10.1111/JACE.14362

4. Switching of perpendicular exchange bias in Pt/Co/Pt/α-Cr_2O_3/Pt layered structure using magneto-electric effect / K. Toyoki, Y. Shiratsuchi, Atsushi Kobane [et al.] // Journal of Applied Physics. 2015. Vol. 117, no. 17. P. 17D902. https://doi.org/10.1063/1.4906322

5. Electric polarization reversal and memory in a multiferroic material induced by magnetic fields / N. Hur, S. Park, P. Sharma, J. Ahn, S. Guha, S. Cheong // Nature. 2004. Vol. 429. P. 392–395.

6. Kleemann, W. Multiferroic and magnetoelectric materials – Developments and perspectives / W. Kleemann, P. Borisov, V. V. Shvartsman, S. Bedanta // The European Physical Journal Conferences. 2012. Vol. 29. P. 00046

7. Стрейнтроника – новое направление микро- и наноэлектроники и науки о материалах / А. А. Бухараев, А. К. Звездин, А. П. Пятаков, Ю. К. Фетисов // Успехи физических наук. 2018. Т. 188. С. 1288–1330. https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.01.038273

8. Spaldin N. A., Ramesh R. Advances in magnetoelectric multiferroics // Nature materials. 2019. Vol. 18, no. 3. P. 203–212.

9. Калгин А. В. Прямой магнитоэлектрический эффект в двухслойных керамических композитах на основе ферримагнетика $Mn_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$ и сегнетоэлектрика $PbZr_{0.53}Ti_{0.47}O_3$ // Физика твердого тела. 2021. Т. 63, № 7. С. 888–893.

10. Magnetoelectric effect in $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$/PZT thin film heterostructures / Peng Zhou, Zhigiand Zheng, Yajun Qi [et al.] // Physics Letters A. 2022. Vol. 426. P. 127897. https://doi.org/10.21016/j.physleta.2021.127837

11. Филиппов Д. А., Лалетин В. М., Galichyan T. A. Магнитоэлектрический эффект в двухслойной магнитострикционно-пьезоэлектрической структуре // Физика твердого тела. 2013. Т. 55, № 9. С. 1728–1733.

12. Низкочастотный магнитоэлектрический эффект в двухслойной магнитострикционно-пьезоэлектрической структуре / Д. А. Филиппов, В. М. Лалетин, Н. Н. Поддубная [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 3-1 (105). С. 6–12. https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.1053.001

13. Material constants of barium titanate thin films / V. B. Shirokov, V. Kalinchuk, R. A. Shakhovoi, Yu. I. Yuryuk // Physics of the solid state. 2015. Vol. 57, no. 8. P. 1535–1540. https://doi.org/10.1134/S106378341508.0302

14. Budiawanti S., Soegijono B., Mudzakir I. Influence of layer number and sintering on ferroelectric behaviour of barium titanate films prepared with solgel method // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2018. Vol. 985, no. 1. P. 012034.

15. Structural and electrical properties of barium titanate ($BaTiO_3$) thin films obtained by spray pyrolysis method / S. S. Kumbhar, M. Mahadik, P. K. Chougule [et al.] // Materials Science Poland. 2015. Vol. 33, no. 4. P. 852–861. https://doi.org/10.1515/msp-2015-0107

16. Эволюция структурных и магнитотранспортных свойств пленок магнетита в зависимости от температуры их синтеза на поверхности SiO 2/Si (001) / В. В. Балашев, В. А. Викулов, А. А. Дмитров [и др.] // Физика металлов и металловедение. 2017. Т. 118, № 7. С. 679–685. https://doi.org/10.7868/S0015323017050023

17. Epitaxial Fe_3O_4 films grown on R-plane sapphire by pulsed laser deposition / I. V. Malikov, V. A. Bererin, L. Fomin, A. V. Chernykh // Inorganic Materials. 2020. Vol. 56, no. 2. P. 164–171. https://doi.org/10.1134/S0020168520020120

18. Kuzmenko A. P., Chukhaeva I. V., Abakumov P. V. Features of the formation and structure of barium titanate langmuir films // Technical Physics. 2019. Vol. 64, no. 8. P. 1168–1177.

19. Кузьменко А. П., Чухаева И. В., Абакумов П. В. Электрические свойства пленок Ленгмюра – Блоджетт стабилизированного титаната бария // Научные тенденции: Вопросы точных и технических наук: сборник научных трудов по материалам XI Международной научной конференции. СПб.: Общественная наука, 2017. С. 9–12.

20. Stain-induced magnetoelectric coupling in $BaTiO_3/Fe_3O_4$ core/shell nanoparticles / Y. S. Koo, K. M. Song, N. Hur, J. Y. Jung // Applied Physics Letters. 2009. Vol. 94. P. 032903–1 – 032903-3. https://doi.org/10.1063/1.3073751

References

1. Freidman A. L., Horoshii I. N., Kolkov M. I., Terentyev K. Yu. Pryamoi i obratnyi magnitoelektricheskii effekt v ortorombicheskikh monokristallakh $Dy_{1-x}HO_xMnO_3$ [Direct and inverse magnetoelectric effects in orthorhombic single crystals $Dy_{1-x}Ho_xMnO_3$]. *Fizika tverdogo tela = Physics of the Solid State*, 2021, vol. 63, no. 12, pp. 2119–2125. https://doi.org/10.21883/FTT.2021.12.5163.185

2. Fina I., Dix N., Rebled J.-M., eds. Direct magnetoelectric effect in ferroelectric-ferromagnetic epitaxial heterostructures. *Nanoscale*, 2013, vol. 5, no. 17, pp. 8037–8044. https://doi.org/10.1039/c3nr01011b

3. Ethier M., Shvartsman V., Salomon S., eds. The direct and the converse magnetoelectric effect in multiferroic cobalt ferrite–barium titanate ceramic composites. *Journal of the American Ceramic Society*, 2016, vol. 99, no. 11, pp. 3623–3631. https://doi.org/10.1111/JACE.14362

4. Toyoki K., Shiratsuchi Y., Kobane Atsushi, eds. Switching of the perpendicular exchange displacement in the layered structure of $Pt/Co/Pt/\alpha\text{-}Cr_2O_3/Pt$ using the magnetoelectric effect. *Journal of Applied Physics*, 2015, vol. 117, no. 17, pp. 17D902. https://doi.org/10.1063/1.4906322

5. Hur N., Park S., Sharma P., An J., Guha S., Chong S. Electric polarization reversal and memory in a multiferroic material induced by magnetic fields. *Nature*, 2004, vol. 429, pp. 392–395.

6. Kleeman V., Borisov P., Shvartsman V. V., Bedanta S. Multiferroic and magnetoelectric materials – developments and prospects. *The European Physical Journal Conferences*, 2012, vol. 29, p. 00046.

7. Bukharaev A. A., Zvezdin A. K., Pyatakov A. P., Fetisov Yu. K. Streintronika – novoe napravlenie mikro- i nanoelektroniki i nauki o materialakh [Straintronics: a new trend in micro- and nanoelectronics and materials science]. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Physics-Uspekhi,* 2018, vol. 188, pp. 1288–1330. https://doi.org/10.3367/UFNr.2018. 01.038279

8. Spaldin N. A., Ramesh R. Achievements in the field of magnetoelectric multiferroics. *Natural materials*, 2019, vol. 18, no. 3, pp. 203–212.

9. Kalgin A. V. Pryamoi magnitoelektricheskii effekt v dvukhsloinykh keramicheskikh kompozitakh na osnove ferrimagnetika $Mn_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$ i segnetoelektrika $PbZr_{0.53}Ti_{0.47}O_3$ [Direct magnetoelectric effect in bilayered ceramic composites based on $Mn_{0.4Zn0.6}Fe_2O_4$ ferrimagnet and $PbZr_{0.53}Ti_{0.47}O_3$ ferroelectric]. *Fizika tverdogo tela = Physics of the Solid State*, 2021, vol. 63, no. 7, pp. 888–893.

10. Peng Zhou, Zhigiand Zheng, Yajun Qi, eds. Magnetoelectric effect $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$/PZT in thinfilm heterostructures. *Physics Letters A.*, 2022, vol. 426, p. 127897. https://doi.org/10.21016/j.phusleta.2021.127897

11. Filippov D. A., Laletin V. M., Galichyan T. A. Magnitoelektricheskii effekt v dvukhsloinoi magnitostriktsionno-p'ezoelektricheskoi strukture [Magnetoelectric effect in a magnetostrictive-piezoelectric bilayer structure]. *Fizika tverdogo tela = Physics of the Solid State*, 2013, vol. 55, no. 9, pp. 1728–1733.

12. Filippov D. A., Laletin V. M., Poddubnaya N. N. Nizkochastotnyi magnitoelektricheskii effekt v dvukhsloinoi magnitostriktsionno-p'ezoelektricheskoi strukture [Low-frequency magnetoelectric effect in a two-layer magnetostrictive piezoelectric structure]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Scientific Research Journal,* 2021, no. 3-1 (105), pp. 6-12. https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.1053.001

13. Shirokov V. B., Kalinchuk V., Shakhovoy R. A., Yuryuk Yu. I. Material constants of barium titanate thin films. *Physics of the Solid State*, 2015, vol. 57, no. 8, pp. 1535–1540. https://doi.org/10.1134/S106378341508.0302

14. Budiavanti S., Soejijono B., Mudzakir I. Influence of layer number and sintering on ferroelectric behaviour of barium titanate films prepared with sol-gel method. *Physical Journal: A series of conferences. IOP Publishing*, 2018, vol. 985, no. 1, p. 012034.

15. Kumbhar S. S., Mahadik M., Chugule P. K., eds. Structural and electrical properties of barium titanate ($BaTiO_3$) thin films obtained by spray pyrolysis method. *Materials Science-Poland*, 2015, vol. 33, no. 4, pp. 852–861. https://doi.org/10.1515/msp-2015-0107

16. Balashev V. V., Vikulov V. A., Dmitrov A. A., eds. Evolyutsiya strukturnykh i magnitotransportnykh svoistv plenok magnetita v zavisimosti ot temperatury ikh sinteza na poverkhnosti SiO_2/Si (001) [Evolution and structural magnetotransport properties of magnetite films depending on the temperature of their synthesis on the surface of SiO_2/Si (001)]. *Fizika metallov i metallovedenie = Physics of Metals and Metallology*, 2017, vol. 118, no. 7, pp. 679–685. https://doi.org/10.7868/S0015323017050023

17. Malikov I. V., Bererin V. A., Fomin L., Chernykh A. V. Epitaxial Fe_3O_4 films grown on R-plane sapphire by pulsed laser deposition. *Inorganic materials*, 2020, vol. 56, no. 2, pp. 164–171. https://doi.org/10.1134/S0020168520020120

18. Kuzmenko A. P., Chukhaeva I. V., Abakumov P. V. Features of the formation and Structure of Barium Titanate Langmuir Films [Features of the formation and structure of Barium titanate langmuir films]. *Technical Physics = Technical physics*, 2019, vol. 64, no. 8, pp. 1168–1177.

19. Kuzmenko A. P., Chukhaeva I. V., Abakumov P. V. [Electrical properties of Langmuir – Blodgett films of stabilized barium titanate]. *Nauchnye tendentsii: Voprosy tochnykh i tekhnicheskikh nauk. Sbornik nauchnykh trudov po materialam XI Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* [Scientific trends: Issues of exact and technical sciences. Collection of scientific papers based on the materials of the XI International Scientific Conference]. St. Petersburg, Obshchestvennaya nauka Publ., 2017, pp. 9–12. (In Russ.)

20. Koo Yu. S., K. M. Song, Hur N., Jung J. Y. Stain-induced magnetoelectric coupling in $BaTiO_3/Fe_3O_4$ core/shell nanoparticles. *Applied Physics Letters*, 2009, vol. 94, pp. 032903-1 – 032903-3. https://doi.org/10.1063/1.3073751

Информация об авторах / Information about the Authors

Кузьменко Александр Павлович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: apk3527@mail.ru,
ORCID: 0000-0001-7089-0692

Alexander P. Kuzmenko, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Chief Researcher of the Regional Center for Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: apk3527@mail.ru,
ORCID: 0000-0001-7089-0692

Локтионова Инна Владимировна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: ms.chuhaeva@mail.ru

Inna V. Loktionova, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: ms.chuhaeva@mail.ru

Абакумов Павел Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: abakumovpavel18@gmail.com

Pavel V. Abakumov, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Regional Center for Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: abakumovpavel18@gmail.com

Булгакова Анастасия Александровна,
студент кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: bulgakova.0@mail.ru

Сизов Александр Семёнович, доктор физико-математических наук, профессор,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: sizov@mail.ru

Anastasia A. Bulgakova, Student of Department of Nanotechnology, General and Applied Physics,
Southwest State University, Kursk,
Russian Federation,
e-mail: bulgakova.0@mail.ru

Alexander S. Sizov, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: sizov@mail.ru