

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАТНОГО МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В КОМПОЗИТАХ НА ОСНОВЕ FeVO_3 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

М. Е. АДАМОВА, Е. А. ЖУКОВ, А. В. КАМИНСКИЙ

Тихоокеанский государственный университет, 680035, Хабаровск, Россия

E-mail: e_a_zhukov@mail.ru

Рассмотрена модель двухслойного мультиферроидного композита FeVO_3 -PZT. С помощью магнитооптического эффекта Фарадея „на просвет“ и „на отражение“ обнаружены вынужденные колебания доменных границ в кристаллах FeVO_3 в поле упругой волны различной поляризации. Установлена зависимость величины смещения доменной границы от амплитуды напряжения, приложенного к композиту. Проведена оценка скорости и смещения доменной границы в поле упругой волны.

Ключевые слова: магнитоэлектрический эффект, композит, доменная граница, упругие колебания, борат железа

Совершенствование технологий в таких областях, как микроэлектроника, информационные системы, сенсорная техника и т.п., непосредственно связано с преобразованием электрического поля в магнитное и обратно. Одно из практических приложений магнитоэлектрического (МЭ) эффекта — управляемое движение магнитных доменных границ под действием электрического поля. Это явление может найти применение в запоминающих устройствах памяти, запись информации в которых осуществляется не перемагничиванием элемента памяти, а смещением доменной границы (ДГ). Однако управление движением доменных границ посредством импульсов магнитного поля или спинового тока [1, 2] связано с большими плотностями тока, что приводит к значительным потерям энергии. В качестве альтернативного метода управления перемещением доменных границ можно рассматривать МЭ-эффект в мультиферроидных композитах.

Мультиферроидные композиты — многокомпонентные структуры, в которых реализован МЭ-эффект, открыли новые перспективы создания высокоэффективных устройств микроэлектроники [3—5]. Комбинация ферромагнитной и пьезоэлектрической фаз дает многообразие эффектов, возникающих как в отдельных фазах, так и в результате их взаимодействия: например, индуцирование электрической поляризации магнитным полем (прямой МЭ-эффект) и индуцирование намагниченности электрическим полем (обратный МЭ-эффект). Основные преимущества композиционных мультиферроиков по сравнению с однофазными заключаются в том, что МЭ-эффект более значителен [6] и температурные ограничения отсутствуют.

В качестве ферромагнитного компонента обычно применяют материалы с высокой магнитострикцией, поскольку именно магнитострикция вызывает индуцирование поляризации пьезоэлектрической фазы за счет пьезоэффекта. Тем не менее помимо магнитострикции возможен и другой механизм возникновения упругих смещений в ферромагнитной фазе — генерация упругих колебаний движущейся доменной границей [7—9]. Кроме того, исследование свойств мультиферроидных композитов с учетом их доменной структуры позволяет исследовать МЭ-эффект на уровне отдельных доменов и доменных границ [10], что невозможно при анализе только усредненного сигнала.

Для наблюдения обратного МЭ-эффекта в динамическом режиме к композитной структуре обычно прикладывают переменное напряжение $U(t)$ и регистрируют изменение

напряженности магнитного поля $H(t)$ [11]. МЭ-эффект характеризуется коэффициентом обратного МЭ-взаимодействия $\alpha_H = H/E$, где $E = U/d$ — напряженность электрического поля, d — толщина структуры. В настоящей статье экспериментально исследуется обратный МЭ-эффект в двухслойной структуре FeBO_3 -PZT. Выбор пьезоэлектрического компонента обусловлен большим пьезомодулем цирконат-титаната свинца. Использование FeBO_3 в качестве ферромагнитной фазы обусловлено совокупностью его свойств [12]: сверхбыстрой динамикой доменных границ (до 14 км/с), сильной магнитоупругой связью и прозрачностью в видимой области спектра, что позволило использовать для исследования магнитооптический эффект Фарадея.

В ходе эксперимента реализованы две модели МЭ-композита с различными типами упругих напряжений, передаваемых из пьезоэлектрического компонента в ферромагнитный. На пьезокерамический элемент подавалось синусоидальное напряжение U с частотами до 100 кГц и амплитудой сигнала до 16 В. Наблюдение за доменной структурой кристалла бора-та железа производилось с помощью эффекта Фарадея: на поверхность исследуемого образца было направлено поляризованное излучение полупроводникового лазера с длиной волны 532 нм. При прохождении излучения сквозь образец (или отражении от образца) происходит поворот плоскости поляризации света, что позволяет получить на экране фотоаппарата изображение доменной структуры образца.

Для исследования продольных по толщине колебаний образец FeBO_3 толщиной 40,5 мкм наклеен на пьезокерамическую пластину. В этом случае наблюдение доменной структуры с помощью эффекта Фарадея возможно только в отраженном свете, при этом угол φ поворота образца относительно лазерного луча регулируется для достижения наилучшего контраста; схема наблюдения МЭ-эффекта показана на рис. 1, где 1 — лазер, 2 — поляризатор, 3 — образец FeBO_3 , 4 — пьезокерамическая пластина, 5 — микроскоп, 6 — анализатор, 7 — фотоаппарат.

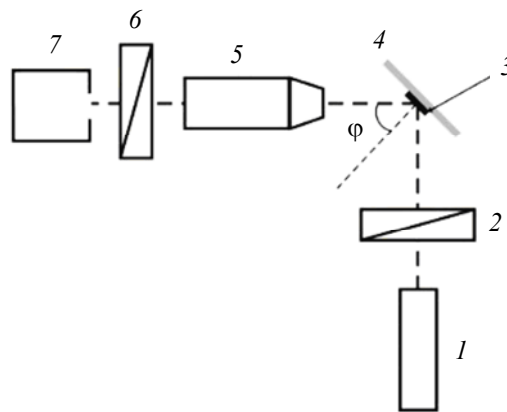


Рис. 1

Визуально движение доменной границы наблюдается как „расплывание“ доменной структуры. Контрастность полученного изображения доменной структуры намного ниже, чем в проходящем свете, что не позволяет в условиях данного эксперимента исследовать изменение доменной границы в динамике. Пьезокерамическая пластина размещается, благодаря ее размерам, внутри системы из двух катушек, создающих переменное магнитное поле, что позволяет в дальнейшем исследовать влияние упругих деформаций на динамическую доменную границу.

Для исследования влияния изгибных колебаний на доменную структуру FeBO_3 образец наклеивался одним краем на пьезоэлемент, так чтобы свободный край образца мог совершать изгибные колебания. Для эксперимента использовались пьезоэлемент с собственными резонансными частотами (f) 34,3 и 100 кГц и образец FeBO_3 толщиной 37,5 мкм и размером

1,5×0,5 мм. Предварительно найденные значения f для образца: 49—52, 58, 68, 94—96 кГц. Исследование резонансных частот пьезокерамической пластины и образца проводилось по методике, принятой в работе [13]. В силу небольших размеров образца, сравнимых с размером пятна лазерного луча (диаметр ~ 1 мм), зависимостью резонансной частоты от геометрических размеров свободной части пластины образца можно пренебречь.

Доменную структуру при такой конфигурации можно визуализировать с помощью эффекта Фарадея „на просвет“; схема наблюдения представлена на рис. 2, где 1 — лазер, 2 — поляризатор, 3 — собирающая линза, 4 — образец FeVO₃, 5 — пьезокерамическая пластина, 6 — микроскоп, 7 — анализатор, 8 — приемник (фотодиод или фотоаппарат). Для получения наилучшего контраста образец повернут относительно лазерного луча на некоторый угол.

Доменная структура для образца FeVO₃ в ненапряженном состоянии и в отсутствие градиентных полей представляет собой совокупность доменов в нескольких слоях, параллельных плоскости пластины (рис. 3, а, здесь 1 и 2 — границы доменов в разных слоях).

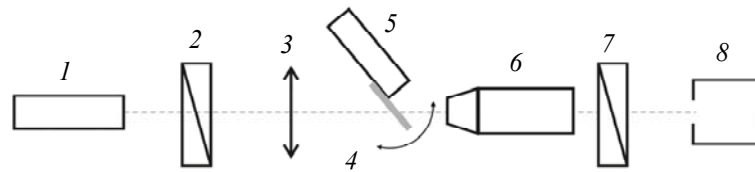


Рис. 2

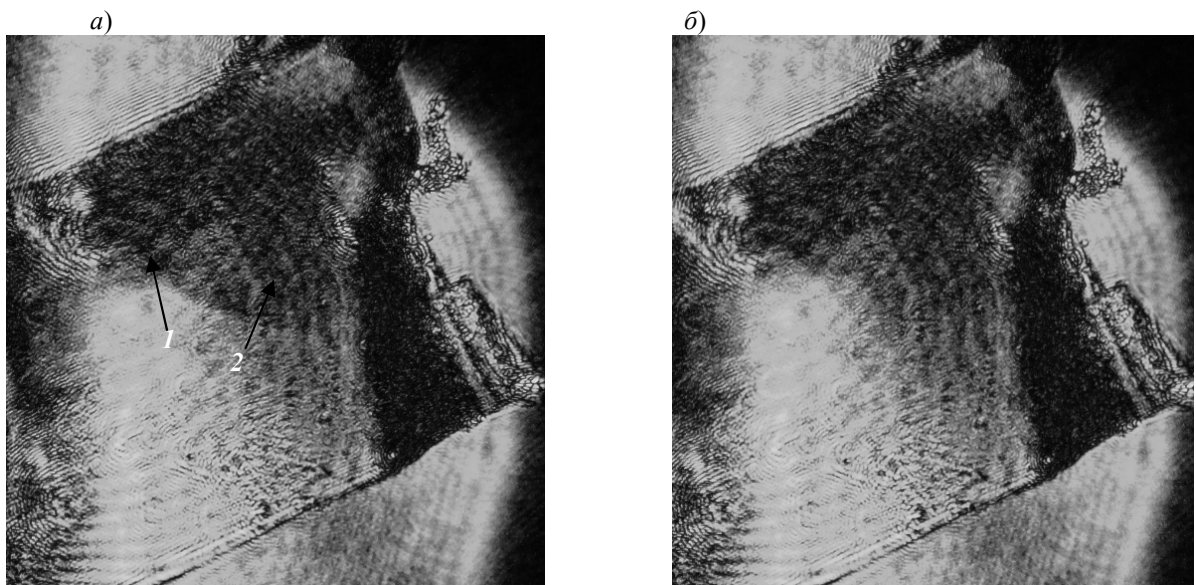


Рис. 3

При колебании образца на резонансной частоте $f = 34,3$ кГц наблюдается некоторое „размывание“ доменной структуры (рис. 3, б). Наибольшая амплитуда изгибных колебаний образца, как и наибольшее смещение доменной структуры, наблюдается на резонансных частотах пьезокерамической пластины. На собственных резонансных частотах образца смещение происходит с меньшей амплитудой. При $f = 34,3$ кГц смещение ДГ составило 0,03 мм, что соответствует скорости ее движения около 6,5 м/с [8].

Слабый контраст не всегда позволяет с достаточной точностью визуально оценить амплитуду смещения ДГ, однако ее колебания вызывают изменение интенсивности светового потока, проходящего через образец, что можно регистрировать с помощью фотодиода. Исследование положения ДГ также подтверждает, что ее движение происходит только на резонансных частотах. Считая, что амплитуда колебаний ДГ пропорциональна амплитуде сигнала фотодиода, можно установить зависимость $A_{ДГ}$ от U при разных значениях f (рис. 4).

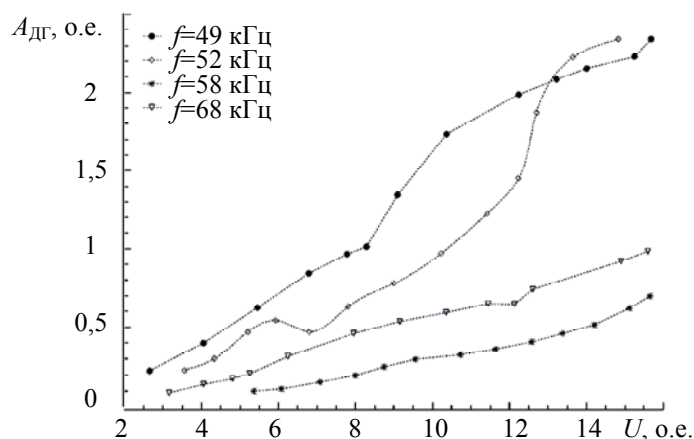


Рис. 4

Итак, в ходе экспериментального исследования обратного магнитоэлектрического эффекта в двухслойной структуре $\text{FeVO}_3\text{-PZT}$ установлено, что наибольшая амплитуда изгибных колебаний образца, так же как и наибольшая амплитуда смещения доменных границ, достигается на частотах, совпадающих с резонансными частотами пьезокерамической фазы двухслойной структуры. Низкое энергопотребление позволяет считать перспективным использование магнитоэлектрического эффекта в устройствах обработки информации, запись информации в которых осуществляется посредством смещения доменных границ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. You C. Y. Concept of the field-driven domain wall motion memory // J. of Magnetism and Magnetic Materials. 2009. Vol. 321, N 7. P. 888—890.
2. Сизов А. Д. и др. Управляемое электрическим полем движение магнитных доменных границ для применения в устройствах спинтроники // Ученые зап. физ. факультета Моск. ун-та. 2013. № 6. С. 6—12.
3. Nan C. W. et al. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions // J. of Appl. Physics. 2008. Vol. 103. N 3.
4. Бичурин М. И. Магнитоэлектрические материалы и их применение в технике СВЧ // Вестн. НовГУ. Серия: Естественные и технические науки. 2001. № 19. С. 7—12.
5. Ma J. et al. Recent progress in multiferroic magnetoelectric composites: from bulk to thin films // Advanced Materials. 2011. Vol. 23, N 9. P. 1062—1087.
6. Van Den Boomgaard J., Van Run A., Suchtelen J. V. Magnetoelectricity in piezoelectric-magnetostrictive composites // Ferroelectrics. 1976. Vol. 10, N 1. P. 295—298.
7. Bar'yakhtar V. G. et al. Dynamics of Topological Magnetic Solitons: Experiment and Theory. Springer, 2006.
8. Zhukov E. A. et al. Interaction of lamb waves with domain walls in an iron borate plate // J. of Nano-And Electronic Physics. 2015. Vol. 7, N 4. P. 4092.
9. Kuz'menko A. P. et al. Study of the structural and dimensional features of the magnetization reversal in transparent weak ferromagnets // The Physics of Metals and Metallography. 2008. Vol. 106, N 2. P. 164—172.
10. Пятаков А. П. и др. Микромагнетизм и топологические дефекты в магнитоэлектрических средах // Успехи физ. наук. 2015. Т. 185, № 10. С. 1077—1088.
11. Буш А. А. и др. Низкочастотный магнитоэлектрический эффект в композитной планарной структуре галфенол-цирконат-титанат свинца // ЖТФ. 2009. Т. 79, № 9. С. 71—77.
12. Bar'yakhtar V. G., Ivanov B. A., Chetkin M. V. Dynamics of domain walls in weak ferromagnets // Physics-Uspekhi. 1985. Vol. 28. N 7. P. 563—588.
13. Адамова М. Е., Жуков Е. А., Каминский А. В. Исследование резонансных изгибных пластин кремния // Ученые заметки ТОГУ. 2014. Т. 5, № 1. С. 214—221. (Электронное науч. издание: Тихоокеанский гос. ун-т).

- Сведения об авторах**
- Мария Евгеньевна Адамова** — Тихоокеанский государственный университет, кафедра физики; ст. преподаватель; E-mail: admaria@yandex.ru
- Евгений Александрович Жуков** — д-р физ.-мат. наук, доцент; Тихоокеанский государственный университет, кафедра автоматики и системотехники; E-mail: e_a_zhukov@mail.ru
- Александр Викторович Каминский** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Тихоокеанский государственный университет, кафедра автоматики и системотехники; E-mail: Ak13636@mail.ru

Поступила в редакцию
18.10.18 г.

Ссылка для цитирования: Адамова М. Е., Жуков Е. А., Каминский А. В. Исследование обратного магнитоэлектрического эффекта в композитах на основе FeBO_3 с использованием оптических методов // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 3. С. 261—265.

STUDY OF INVERSE MAGNETOELECTRIC EFFECT IN FeBO_3 -BASED COMPOSITES USING OPTICAL METHODS

M. E. Adamova, E. A. Zhukov, A. V. Kaminsky

Pacific National University, 680035, Khabarovsk, Russia

E-mail: e_a_zhukov@mail.ru

A model of two-layered multiferroic composite is applied to FeBO_3 -PZT structure. Forced oscillations of domain boundaries in FeBO_3 crystals in the field of elastic wave of various polarization are revealed with the use of magneto-optical Faraday effect for transmitted and reflected light. The dependence of the domain wall displacement on the voltage amplitude applied to the composite. The velocity and displacement of the domain boundary in the elastic wave field are estimated.

Keywords: magnetoelectric effect, composite, domain wall, elastic vibrations, iron borate

REFERENCES

- 1 You C.Y. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2009, no. 7(321), pp. 888–890.
- 2 Sizov A.D. et al. *Memoirs of the Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University*, 2013, no. 6, pp. 6–12. (in Russ.)
- 3 Nan C.W. et al. *Journal of Applied Physics*, 2008, no. 3(103), pp. 1.
- 4 Bichurin M.I. *Vestnik of Yaroslav the Wise Novgorod State University*, 2001, no. 19, pp. 7–12. (in Russ.)
- 5 Ma J. et al. *Advanced Materials*, 2011, no. 9(23), pp. 1062–1087.
- 6 Van Den Boomgaard J., Van Run A., Suchtelen J.V. *Ferroelectrics*, 1976, no. 1(10), pp. 295–298.
- 7 Bar'yakhtar V.G. et al. *Dynamics of Topological Magnetic Solitons: Experiment and Theory*, Springer, 2006, vol. 129.
- 8 Zhukov E.A. et al. *Journal of Nano-And Electronic Physics*, 2015, no. 4(7), pp. 4092–1.
- 9 Kuz'menko A.P. et al. *The Physics of Metals and Metallography*, 2008, no. 2(106), pp. 164–172.
- 10 Pyatakov A.P., Sergeev A.S., Nikolaeva E.P., Kosykh T.B., Nikolaev A.V., Zvezdin K.A., Zvezdin A.K. *Physics-Uspekhi*, 2015, no. 10(58), pp. 981–992.
- 11 Bush A.A., Kamentsev K.E., Meshcheryakov V.F., Fetisov Y.K., Chashin D.V., Fetisov L.Y. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2009, no. 9(54), pp. 1314–1320.
- 12 Bar'yakhtar V.G., Ivanov B.A., Chetkin M.V. *Physics-Uspekhi*, 1985, no. 7(28), pp. 563–588.
- 13 Adamova M.E., Zhukov E.A., Kaminsky A.V. *Scientists notes PNU*, 2014, no. 1(5), pp. 214–221. (in Russ.)

Data on authors

- Maria E. Adamova** — Pacific National University, Department of Physics; Senior Lecturer; E-mail: admaria@yandex.ru
- Evgeny A. Zhukov** — Dr. Sci., Associate Professor; Pacific National University, Department of Automation and System Engineering; E-mail: e_a_zhukov@mail.ru
- Alexander V. Kaminsky** — PhD, Associate Professor; Pacific National University, Department of Automation and System Engineering; E-mail: Ak13636@mail.ru

For citation: Adamova M. E., Zhukov E. A., Kaminsky A. V. Study of inverse magnetoelectric effect in FeBO_3 -based composites using optical methods. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 3. P. 261—265 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-3-261-265