

05 Магнитострикция через магнитоэлектричество: использование магнитоэлектрического отклика для определения магнитострикционных характеристик композиционных мультиферроиков

© Д.А. Филиппов¹, В.М. Лалетин², Н.Н. Поддубная², V.V. Shvartsman³, D.C. Lupascu³, J. Zhang⁴, G. Srinivasan⁵

¹ Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, Великий Новгород, Россия

² Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь

³ Institute for Materials Science and Center for Nanointegration Duisburg-Essen (CENIDE), University of Duisburg-Essen, Essen, Germany

⁴ College of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, China

⁵ Physics Department, Oakland University, Rochester, Michigan, USA

E-mail: dmitry.filippov@novsu.ru

Поступило в Редакцию 17 июля 2019 г.

В окончательной редакции 17 июля 2019 г.

Принято к публикации 6 августа 2019 г.

Предложен новый способ определения магнитострикционных характеристик композита с использованием магнитоэлектрического отклика структуры. Показано, что интегральная характеристика магнитоэлектрического коэффициента с точностью до множителя совпадает с магнитострикционной кривой. Представлены результаты экспериментального исследования физических свойств объемных композитов на основе цирконата-титаната свинца и феррит-никелевой шпинели. На основе полевой зависимости магнитоэлектрического коэффициента по напряжению получены магнитострикционные кривые композиционных структур с содержанием феррошпинели 10–70 wt.%.

Ключевые слова: магнитострикция, пьезоэлектричество, магнитоэлектрический эффект, мультиферроики, композиты.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.22.48647.17986

Композиционные мультиферроики являются перспективными материалами для использования в устройствах стрейнтроники — нового направления электроники [1]. Потенциальные возможности применения таких материалов связаны с тем, что на их основе возможно создание устройств, в которых управление осуществляется одновременно как электрическим, так и магнитным полем [2,3]. Такое управление возможно благодаря наличию в мультиферроиках магнитоэлектрического (МЭ) эффекта, который заключается в изменении поляризации вещества под действием магнитного поля (прямой МЭ-эффект) и, наоборот, в изменении намагниченности под действием электрического поля (обратный, или инверсный, МЭ-эффект). Механизмом возникновения МЭ-эффекта в слоистых магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах является механическое взаимодействие магнитострикционной и пьезоэлектрической компонент, вследствие чего величина эффекта определяется значениями пьезоэлектрического коэффициента и магнитострикции. Если величина пьезоэлектрического модуля определяется довольно точно (например, методом резонанса-антирезонанса), то при измерении магнитострикции возникают некоторые трудности вследствие малости эффекта в области малых полей. Область малых полей особенно интересна тем,

что в ней проявляется нелинейный МЭ-эффект, на основе которого возможно создание целого ряда датчиков магнитного поля с чувствительностью, значительно превышающей чувствительность датчиков Холла [4,5]. Для измерения магнитострикции, как правило, используются тензодатчики, которые вносят дополнительную погрешность в величину деформации, возникающей под действием магнитного поля. Особенно сильно трудности определения величины магнитострикции проявляются при измерении магнитострикции тонких пленок, выращенных на пьезоэлектрической подложке, которые хорошо зарекомендовали себя в устройствах, основанных на электрическом управлении магнитным резонансом [6,7]. В настоящей работе предложен новый способ определения магнитострикции композиционных мультиферроиков, основанный на измерении МЭ-отклика системы.

В качестве параметра, численно определяющего МЭ-отклик системы, используют МЭ-коэффициент по напряжению (MEVC) α_E , представляющий собой отношение средней напряженности электрического поля в образце $\langle E \rangle$ к величине напряженности магнитного поля H , его вызвавшей, т.е. $\alpha_E = \langle E \rangle / H$. Для его определения измеряют напряжение U , возникающее на обкладках при помещении образца в переменное магнитное по-

ле H и постоянное подмагничивающее поле H_{bias} , а среднее значение поля вычисляются с помощью соотношения $\langle E \rangle = U/t$, где t — толщина образца. Поскольку механизм возникновения МЭ-эффекта непосредственно связан с распространением колебаний в системе, в области электромеханического резонанса наблюдается пиковое увеличение МЭ-коэффициента по напряжению. Значение частоты электромеханического резонанса зависит не только от физических параметров материала, но и от геометрических размеров образца. Для типичных размеров образцов порядка нескольких миллиметров частота электромеханического резонанса составляет порядка сотен кГц. В низкочастотной области спектра, вдали от резонанса, в диапазоне нескольких кГц на частотной зависимости имеется плато, и величина MEVC не зависит от частоты, а определяется только значениями физических параметров материала. В этой области частот величина MEVC при продольной ориентации полей, т.е. когда направления переменного и подмагничивающего полей совпадают с направлением поляризации образца, определяется соотношением [8]:

$$\alpha_E = \frac{Y d_{33} q_{33}}{\epsilon_{33} \epsilon_0}, \quad (1)$$

где Y , d_{33} , q_{33} и ϵ_{33} — эффективные значения модуля Юнга, пьезоэлектрического, пьезомагнитоэлектрического коэффициентов и диэлектрической проницаемости композита, ϵ_0 — диэлектрическая постоянная. Пьезомагнитоэлектрический коэффициент q_{33} , входящий в выражение (1), определяется соотношением

$$q_{33} = \left. \frac{d\lambda_{||}}{dH} \right|_{H=H_{bias}},$$

где $\lambda_{||}$ — продольная магнитоэлектрическая стрижка. Поскольку магнитоэлектрическая стрижка, а следовательно, и пьезомагнитоэлектрический коэффициент зависят от магнитного поля, наблюдается зависимость МЭ-отклика системы от напряженности поля подмагничивания — так называемая полевая зависимость MEVC [9]. Используя уравнение (1), для определения магнитоэлектрической стрижки по МЭ-отклику системы получим выражение

$$\lambda_{||} = C \int_0^{H_{bias}} \alpha_E(H) dH, \quad (2)$$

где $C = \epsilon_{33} \epsilon_0 / Y d_{33}$ — постоянный для данного состава композита множитель. Таким образом, интегральная характеристика MEVC с точностью до множителя совпадает с зависимостью магнитоэлектрической стрижки композита от магнитного поля. Это позволяет по полевой зависимости MEVC с помощью соотношения (2) восстановить зависимость магнитоэлектрической стрижки от магнитного поля. Для определения такой зависимости были изготовлены объемные композиты феррит-пьезоэлектрик, полученные путем спекания смесей однофазных компонентов. С этой целью были приготовлены образцы системы

Зависимость параметров композиционного материала от состава

Содержание феррита, wt.%	Модуль Юнга Y , GPa	Пьезомодуль d_{33} , pC/N	Диэлектрическая проницаемость ϵ
10	93	198	660
20	106	138	460
30	115	79	340
40	125	42	220
50	134	22	140
60	140	9.2	90
70	147	3.1	60

$(1-x)\text{PZT850} - x(\text{NiFe}_{1.9}\text{Co}_{0.02}\text{O}_4)$, в которой значение x представляет весовую долю феррита и изменяется в диапазоне от 0.1 до 0.7 с шагом 0.1. Образцы спекались в тиглях со свинецсодержащей засыпкой в течение 2 ч при температуре 1180°C. Скорость охлаждения образцов не превышала 50°C/h. Электроды были нанесены вжиганием серебряной пасты при температуре 650°C в течение 20 min. Образцы имели форму дисков диаметром 8.7–8.8 mm и толщиной 0.8–0.9 mm. Поляризация материалов осуществлялась при температуре 60–100°C в течение 2 h в электрическом поле 4 kV/mm с последующим охлаждением в этом поле до комнатной температуры в течение 0.5 h.

Пьезоэлектрический модуль d_{33} измерялся прибором UE2730A d_{33} METER. Для нахождения модуля Юнга использовался метод резонанса-антирезонанса. Измерение емкости проводилось на частоте 1 kHz. Результаты измерений представлены в таблице.

Линейный МЭ-эффект исследовался путем измерения напряжения, возникающего на образце при помещении его в переменное магнитное поле и поле подмагничивания. Амплитуда переменного поля составила 1 Oe при частоте, равной 1 kHz. Величина поля подмагничивания изменялась в пределах от 0 до 5000 Oe. Исследовался продольный МЭ-эффект, когда направления электрической поляризации образца и магнитных полей были параллельны друг другу. На рис. 1 представлены полевые зависимости MEVC, а на рис. 2 — полученные путем их интегрирования зависимости магнитоэлектрической стрижки для различного содержания феррита (в wt.%) в составе композита. Как видно из рис. 2, кривая магнитоэлектрической стрижки, полученная путем интегрирования полевой зависимости MEVC, имеет типичный вид. С увеличением процентного содержания феррита в составе композита наблюдается рост значения магнитоэлектрической стрижки насыщения λ_s . На рис. 3 представлены зависимости λ_s , характеризующей магнитоэлектрические свойства композита, и для сравнения зависимости величины пьезомодуля, характеризующего пьезоэлектрические свойства композита, от состава композита. Видно, что при малых содержаниях феррита наблюдается линейный рост величины λ_s с увеличением процентного содержания феррита. По мере

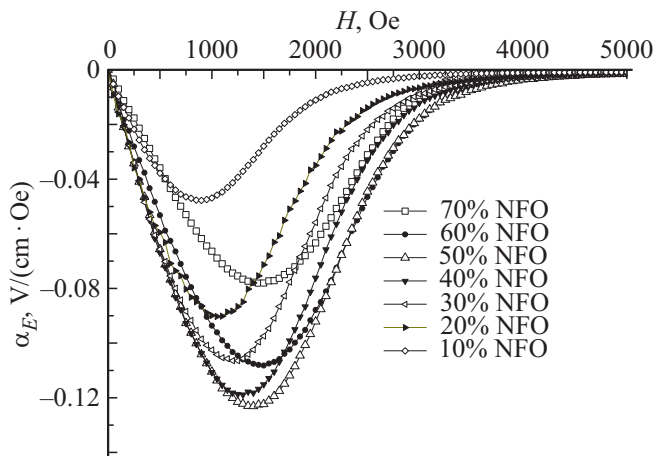


Рис. 1. Полевая зависимость низкочастотного значения MEVC при различных значениях содержания феррита в составе композита.

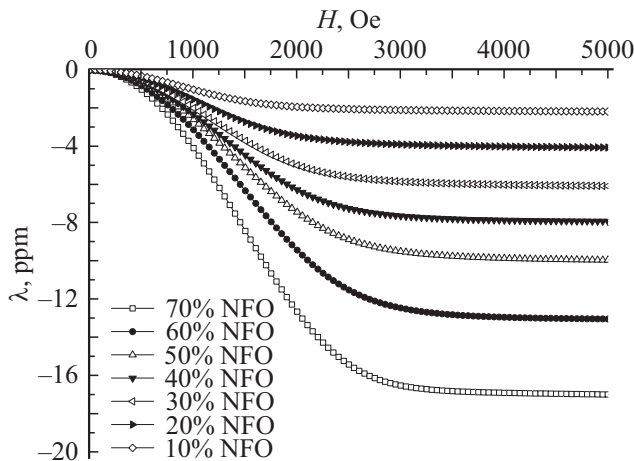


Рис. 2. Зависимость магнитострикции композиционного материала при различных значениях содержания феррита.

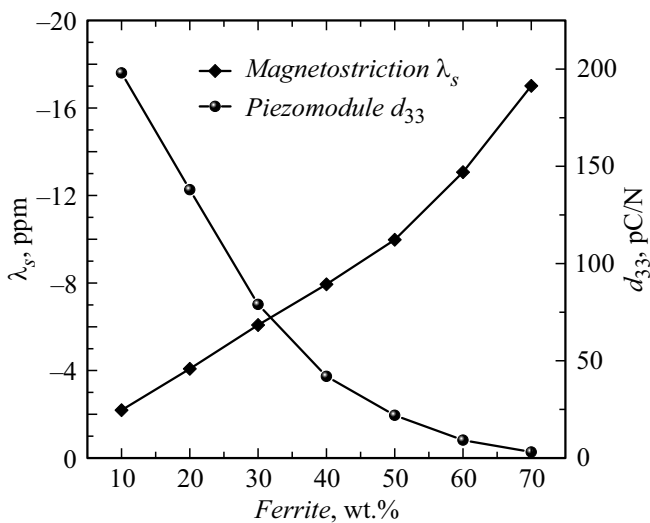


Рис. 3. Зависимости магнитострикции насыщения и пьезоэлектрического модуля от состава композита.

увеличения содержания феррита рост становится нелинейным и величина λ_s приближается к значениям, соответствующим значению модуля магнитострикции насыщения $\lambda_s = -26$ ppm для поликристаллического феррита никеля. Как видно из рис. 3, представленная зависимость в предельном переходе стремится к этому значению, что позволяет судить о применимости данного способа.

Таким образом, полевая зависимость MEVC позволяет получить зависимость магнитострикции композиционного мультиферроика в широком диапазоне магнитных полей.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта совместного конкурса РФФИ–БРФФИ (российский проект № 18-52-00021 и белорусский проект № Ф18Р-300).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Бухараев А.А., Звездин А.К., Пятаков А.П., Фетисов Ю.К. // УФН. 2018. Т. 188. № 12. С. 1288–1330.
- [2] Sadovnikov A.V., Grachev A.A., Beginin E.N., Sheshukova S.E., Sharaevskii Yu.P., Nikitov S.A. // Phys. Rev. Appl. 2017. V. 7. P. 014013.
- [3] Song C., Cui B., Li F., Zhou X., Pan F. // Prog. Mater. Sci. 2017. V. 87. P. 33–82.
- [4] Burdin D., Chashin D., Economov N., Fetisov L., Fetisov Y., Shamonin M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. V. 49. P. 375002.
- [5] Zhang J., Fang C., Weng G.J. // Proc. Roy. Soc. A. 2019. V. 475. N 2225. P. 20190002. <http://doi.org/10.1098/rspa.2019.0002>
- [6] Wang X., Chen Y., Chen H., Gao Y., He Y., Li M., Lin H., Sun N., Sun N. // Appl. Phys. Lett. 2018. V. 112. P. 192903.
- [7] Zhou P., Singh A.V., Li Z., Popov M.A., Liu Y., Filippov D.A., Zhang T., Zhang W., Shah P.J., Howe B.M., McConney M.E., Srinivasan G., Page M.R., Gupta A. // Phys. Rev. Appl. 2019. V. 11. P. 054045.
- [8] Филиппов Д.А., Бичурин М.И., Петров В.М., Лалетин В.М., Поддубная Н.Н., Srinivasan G. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 1. С. 15–20.
- [9] Филиппов Д.А., Лалетин В.М., Srinivasan G. // ЖТФ. 2012. Т. 82. В. 1. С. 47–51.