УДК 537.636

DOI: 10.21779/2542-0321-2018-33-4-67-71

Д.М. Юсупов¹, А.А. Амиров^{1, 2}

**Магнитоэлектрический эффект в слоистых композитах
пьезоэлектрик-магнетик-пьезоэлектрик**

¹ Институт физики им. Х.И. Амирханова ДНЦ РАН; Россия, 367015, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, 94;

² Балтийский федеральный университет им. И. Канта; Россия, 236016, г. Калининград, ул. А. Невского, 14; dibir.usupov@mail.ru

Для трехслойной структуры пьезоэлектрик-магнетик-пьезоэлектрик выполнены измерения прямого магнитоэлектрического коэффициента по напряжению. Проведенные исследования магнитоэлектрического коэффициента от частоты модуляционного магнитного поля показали, что в области 86 кГц наблюдается аномальное увеличение магнитоэлектрического эффекта, соответствующего электромеханическому резонансу, характерному для магнитоэлектрических композитов. Максимальное значение эффекта составило 45 мВ/см×Э, при этом подмагничивающее поле было равно нулю.

Ключевые слова: мультиферроики, магнитоэлектрический коэффициент, резонансная частота.

Введение

Мультиферроики-композиты исследуются в последнее время достаточно активно в связи с перспективой их использования в датчиках магнитных полей, генераторах и преобразователях напряжения, с применением в устройствах по преобразованию магнитного поля в электрическое и, наоборот, благодаря высоким значениям магнитоэлектрического эффекта [1–3]. Магнитоэлектрический эффект в таких структурах возникает в результате взаимодействия магнитострикционных и пьезоэлектрических фаз, а в случае использования переменных полей наблюдается резонансное усиление на частоте электромеханического резонанса [4–8]. В слоистых композитах наблюдаются высокие значения магнитоэлектрического эффекта по сравнению со смесевыми композитами. Соединения на основе цирконата-титаната свинца (ЦТС) являются одними из наиболее простых и удобных материалов, которые используют в качестве пьезоэлектрической компоненты в мультиферроиках-композитах. ЦТС достаточно хорошо изучен, прост в получении и демонстрирует хорошие диэлектрические и пьезоэлектрические свойства. В качестве магнитной компоненты в основном используют материалы с высокими магнитострикционными характеристиками. В данной работе в качестве магнитной компоненты были использованы аморфные микропровода в стеклянной оболочке, которые чувствительны к слабым магнитным полям. Аморфные магнитные микропровода были открыты более пятидесяти лет назад, интерес к исследованию их структурных, магнитных и кинетических свойств не ослабевает и в настоящее время [9–11].

Оборудование и методика эксперимента

Для изучения магнитоэлектрического эффекта проведены измерения переменного напряжения, возникающего на концах образца при его внесении в переменное магнитное и постоянное подмагничивающее поле, по методике, описанной в работе [12, 13]. В нашем случае постоянное подмагничивающее поле было равно нулю. Амплитуда переменного магнитного поля составляла 10 Ое и создавалась катушками Гельмгольца, куда помещались исследуемые образцы. Модулированное переменным полем напряжение образца измеряется селективным нановольтметром SR830, который является источником переменного тока для модуляционной катушки. Прибор SR830 позволяет проводить измерения сигнала на частоте генерации колебаний генератора низких частот. Магнитная компонента была заменена микропроводами $\text{Ni}_{45}\text{Mn}_{36.5}\text{In}_{13.5}\text{Co}_5$ толщиной 50 мкм, которые были уложены и заклеены между двумя дисками ЦТС толщиной $d = 0,5$ мм и диаметром 10 мм. Методом получения аморфных микропроводов является метод Улитовского–Тейлора, который заключается в вытягивании с расплавленным металлом размягченного стеклянного волокна и одновременном их охлаждении на воде или на масле [14, 15].

Величина поперечного магнитоэлектрического эффекта оценивалась исходя из выражения для магнитоэлектрического коэффициента по напряжению согласно формуле

$$\alpha = \frac{dU}{h \cdot dH},$$

где dU – переменное напряжение, генерируемое на концах образца; h – толщина пьезоэлектрического слоя образца; dH – напряженность переменного магнитного поля.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведена зависимость магнитоэлектрического коэффициента от частоты модуляции магнитного поля композитной структуры ЦТС-микропровод-ЦТС.

Рис. 1. Зависимость магнитоэлектрического коэффициента от частоты модуляции магнитного поля композитной структуры ЦТС-микропровод-ЦТС

Как видно из рисунка, при частоте 86 кГц наблюдается резонансное увеличение магнитоэлектрического эффекта, что характерно для слоистых мультиферроиков-композитов. Величина эффекта сопоставима с аналогичными данными для схожих структур в нулевом внешнем подмагничивающем поле, согласно которым магнитоэлектрический коэффициент по напряжению пропорционален произведению эффективного пьезомагнитного коэффициента и эффективного пьезоэлектрического коэффициента и обратно пропорционален произведению эффективной диэлектрической проницаемости и эффективной упругой податливости композита. Отсутствие острого пика может быть связано с плохой адгезией и неоднородностью магнитострикционного слоя, которые могут повлиять на упругую податливость и диэлектрическую проницаемость композита.

На рис. 2 показана зависимость магнитоэлектрического коэффициента от квадрата напряжённости переменного поля. Эта зависимость имеет вид параболы в отличие от результатов работы [6], что указывает на зависимость магнитоэлектрического коэффициента от амплитуды переменного магнитного поля и в данном случае имеет линейный характер.

Рис. 2. Зависимость магнитоэлектрического коэффициента композита ЦТС-микропровод-ЦТС от квадрата напряженности переменного магнитного поля на резонансной частоте

На зависимость магнитоэлектрического коэффициента от квадрата напряженности переменного магнитного поля не влияет толщина магнитострикционного слоя. Результаты по частотной зависимости довольно хорошо согласуются с аналогичными моделями трехслойных структур пьезоэлектрик-магнетик-пьезоэлектрик [16].

Заключение

Установлено, что на частоте около 86 кГц наблюдается резонансное увеличение величины магнитоэлектрического эффекта. Максимальное значение магнитоэлектрического коэффициента, наблюдаемого в эксперименте, составляет 45 мВ/см×Э. Проведенные измерения показали, что зависимость магнитоэлектрического коэффициента от амплитуды переменного магнитного поля для исследованного композита имеет линейный характер.

Работа выполнена в рамках государственного задания № АААА-А17-117021310366-5.

Литература

1. Bichurin M.I., Filippov D.A. Theory of low-frequency magnetoelectric coupling in magnetostrictive-piezoelectric bilayers // *Phys. Rev. B.* – 2003. – Vol. 68, № 5. – P. 054402.
2. Burdin D.A., Chashin D.V., Ekonomov N.A., Fetisov Y.K., Stashkevich A.A. High-sensitivity dc field magnetometer using nonlinear resonance magnetoelectric effect // *JMMM.* – 2016. – Vol. 405. – P. 244–248.
3. Bichurin M.I., Petrov V.M., Srinivasan G. Theory of low-frequency magnetoelectric effects in ferromagnetic-ferroelectric layered composites // *J. Appl. Phys.* – 2002. – Vol. 92, № 12. – P. 7681–7683.
4. Лалетин В.М., Филиппов Д.А., Фирсова Т.О. Нелинейный резонансный магнитоэлектрический эффект в магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах // *Письма в ЖТФ.* – 2014. – Т. 40. – С. 11–18.
5. Лалетин В.М., Филиппов Д.А., Фирсова Т.О. Нелинейный магнитоэлектрический эффект в композиционных мультиферроиках // *Физика твердого тела.* – 2014. – Т. 56. – С. 944–948.
6. Filippov D.A., Galichyan T.A., Laletin V.M. Influence of an interlayer bonding on the magnetoelectric effect in the layered magnetostrictivepiezoelectric structure // *Appl. Phys. A.* – 2014. – Vol. 116. – P. 2167–2171.
7. Бурдин Д.А., Фетисов Ю.К., Чащин Д.В., Экономов Н.А. Температурные характеристики магнитоэлектрического взаимодействия в дисковых резонаторах цирконат-титанат свинца-никель // *ЖТФ.* – 2013. – Т. 83, вып. 3. – С. 107–112.
8. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы: пер. с японского / под ред. Ц. Масумото. – М.: Металлургия, 1987. – 328 с.
9. Хандрих К., Кобе С. Аморфные ферро- и ферримангнетики / пер. с нем. Потапова Н.Н. – М.: Мир, 1982. – 296 с.
10. Cobeno A.F., Zhukov A.P., Pina E., Blanco J.M., Gonzalez J., Barandiaran J.M. Sensitive magnetoelastic properties of amorphous ribbon for magnetoelastic sensors // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2000. – Vol. 215. – P. 743–745.
11. Амиров А.А., Камиллов И.К., Батдалов А.Б. и др. Магнитоэлектрическое взаимодействие в мультиферроиках BiFeO_3 , $\text{Bi}_{0.95}\text{Nd}_{0.05}\text{FeO}_3$ и $\text{Bi}_{0.95}\text{La}_{0.05}\text{FeO}_3$ // *Письма в ЖТФ.* – 2008. – Т. 34, вып. 17. – P. 72–77.
12. Gridnev S.A., Kalgin A.V., Amirov A.A., Kamilov I.K. Magnetic and Magnetoelectric Properties of Particulate $(x)\text{PbZr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47}\text{O}_3-(1-x)\text{Mn}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Composites // *Ferroelectrics.* – 2014. – Vol. 397 (1). – P. 142–150.
13. Vazquez M., Gomez-Polo C., Chen D.-X., Hernando A. Magnetic bistability of amorphous wires and sensor applications // *J. Magn. Magn. Mater.* – 1994. – Vol. 130. – P. 907.
14. Squire P.T., Atkinson D., Gibbs M.R.J., Atalay S. Amorphous wires and their applications // *J. Magn. Magn. Mater.* – 1994. – Vol. 132. – P. 10.
15. Амиров А.А., Юсупов Д.М., Исмаилов А.М., Абдулкадырова Н.З. Прямой магнитоэлектрический эффект в слоистых мультиферроиках-композитах // *Поверхность.* – 2018. – Т. 4. – С. 47–50.
16. Van Suchtelen J. Product properties: a new application of composite materials // *Philips Res. Repts.* – 1972. – V. 27. – P. 28–37.

Поступила в редакцию 12 июля 2018 г.

UDC 537.636

DOI: 10.21779/2542-0321-2018-33-4-67-71

Magnetoelectric effect in layered piezoelectric-magnetic-piezoelectric composites

D.M. Yusupov¹, A.A. Amirov^{1, 2}

¹ *Amirkhanov Institute of Physics Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences; Russia, 367015, Makhachkala, M. Yaragsky st., 94;*

² *Center for Functionalized Magnetic Materials (FunMagMa) & Institute of Physics Mathematics and Informational Technologies, Immanuel Kant Baltic Federal University; Russia, 236016, Kaliningrad, A. Nevskiy st., 14; dibir.usupov@mail.ru*

Voltage measurements of the direct magnetoelectric coefficient on the voltage are carried out for a three-layer piezoelectric-magnetic-piezoelectric structure. The research of the magnetoelectric coefficient on the frequency of the modulation magnetic field has shown that in the 86 kHz region, an anomalous increase in the magnetoelectric effect corresponding to the electromechanical resonance characteristic of magnetoelectric composites is observed. The maximum value of the effect is 45 mV/cm×Oe, in zero bias magnetic field.

Keywords: *multiferroics, magnetoelectric coefficient, resonant frequency.*

Received 12 July, 2018