

Рис. 1. Рентгенограммы (а) порошка, (б) керамики  $\text{BaTiO}_3$  и характерный участок с расщепленными рефлексами (002)/(200)

3 МПа в форме таблеток. Образцы отжигали на воздухе при 1350 °С в течение 3 ч.

Средний размер частиц порошка находится в диапазоне от 100 до 350 нм, а зерен керамики – в пределах от 5 до 10 мкм.

Результаты рентгенофазового анализа (рисунок 1) свидетельствуют о преимущественном образовании тетрагональной фазы  $\text{BaTiO}_3$ .

Поляризацию проводили при 6 кВ/мм в силиконовом масле при температуре 115 °С в течение 30 мин. Значения пьезоэлектрической постоянной  $d_{33}$  были измерены спустя сутки после поляризации при комнатной температуре.

Среднее значение пьезомодуля  $d_{33}$ , полученной керамики составляет  $140 \pm 3$  пКл/Н при комнатной температуре. Значение относительной диэлектрической проницаемости при комнатной температуре достигает значения  $\epsilon = 4991$ . Петля диэлектрического гистерезиса не достигает насыщения при напряженности электрического поля 13,53 кВ/см из-за большого влияния токов утечки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-588 от 1.06.2021).

### Список литературы

1. Markovska I., Georgiev D., Yovkova F. // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 2021. – V. 56. – № 1. – P. 161–166.
2. Fernández, C., Rivera, E., Rodríguez-Páez J. E. // *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 2010. – V. 49. – № 6. – P. 399–404.
3. Wu Y. T., Wang X. F., Yu C. L., Li E. Y. // *Materials and Manufacturing Processes*, 2011. – V. 27. № 12. P. 1329–1333.

## МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТАХ $\text{MnFe}_2\text{O}_4/(\text{Ba}_{0,85}\text{Ca}_{0,15})(\text{Zr}_{0,1}\text{Ti}_{0,9})\text{O}_3$

А. А. Прач, А. Ю. Рыбаченко, А. А. Волон

Научный руководитель – д.т.н., профессор Р. А. Сурменев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30, nastya.prach@mail.ru

При помещении слоистой структуры, состоящей из пьезоэлектрического и магнитоэлектрического слоя, в переменное магнитное поле  $H$  наблюдается прямой магнитоэлектрический эффект (МЭ) за счет деформации магнитного слоя (эффект магнитоэлектрики), которая вследствие

микронапряжений в сегнетоэлектрическом слое приводит к формированию зарядов и возникновению электрического поля на поверхности композита [1]. Механическое взаимодействие между пьезоэлектрическими и магнитоэлектрическими слоями, сильно зависит от выбора материала

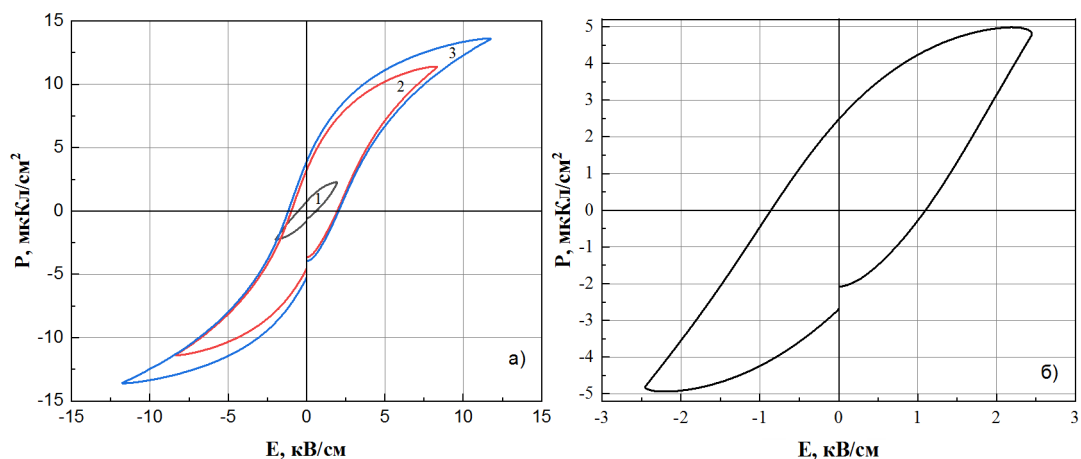


Рис. 1. Петля гистерезиса (а) поляризованной керамики при напряжении 1) 0,4, 2) 1,7, 3) 2,4 кВ, (б) керамики до поляризации

композита. В качестве магнитоэлектрического материала с большими значениями магнитоэлектричества и низкими значениями магнитной анизотропии распространены металлические сплавы (пермендюр, пермаллой) и различные виды ферритов ( $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ ).

Целью данной работы является исследование магнитоэлектрического эффекта в слоистой структуре магнитоэлектрического материала феррита марганца и пьезоэлектрического цирконата-титаната бария-кальция (BCZT).

Наноразмерный порошок феррита марганца (MFO) был получен гидротермальным синтезом с использованием хлоридов железа и марганца при  $200\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 3 ч. Конечный продукт промывали деионизированной водой и этанолом до нейтрального pH, смешивали со связующим, прессовали и отжигали при  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 2 ч.

Порошок BCZT получали механохимическим синтезом в планерной шаровой мельнице. Помол осуществлялся в течение 12 ч. при скорости 250 об/мин. Полученную смесь прокаливали при  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 5 часов и смешивали со связующим, прессовали и отжигали при температуре  $1450\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 3 часов.

После поляризации пьезокерамический слой BCZT склеивали с MFO при помощи проводящего серебряного клея.

Распределение частиц порошка BCZT по размеру является бимодальным с максимумами по размерам частиц в диапазонах 200 и 800 нм. Средний размер зерен керамики находится в ди-

апазоне от 10 до 12 мкм. Полученные наночастицы MFO имели сферическую форму и средний диаметр  $74 \pm 16$  нм.

Среднее значение пьезомодуля  $d_{33}$  при комнатной температуре, полученной керамики, составляет  $342 \pm 11$  пКл/Н. Петля диэлектрического гистерезиса керамики BCZT выходит на насыщение при напряженности электрического поля ( $E$ )  $11,82\text{ кВ/см}$ , со значением коэрцитивной силы  $2,06\text{ кВ/см}$ . Поляризация насыщения ( $P_{\text{нас}}$ ) изменяется от  $2,24$  до  $13,61\text{ мкКл/см}^2$ , остаточная поляризация ( $P_{\text{ост}}$ ) от  $0,72$  до  $3,87\text{ мкКл/см}^2$ . Производилось измерение относительной диэлектрической проницаемости в диапазоне температур от  $30$  до  $120\text{ }^\circ\text{C}$ , максимальное значение  $\epsilon_m = 15451$  установлено при температуре  $110\text{ }^\circ\text{C}$ . Значение максимальной запасенной электрической энергии равно  $J_{\text{запас}} = 115,13\text{ мДж/см}^3$  при КПД = 72 %.

Значения магнитоэлектрического коэффициента ( $\alpha$ ) в плоскости образца и по нормали к плоскости образца соответственно равны  $0,05$  и  $0,07\text{ В/Э} \cdot \text{см}$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-588 от 1.06.2021).

Авторы выражают благодарность за помощь в проведении исследований директору НОЦ «Магнитоэлектрические материалы и устройства» МИРЭА за помощь в проведении исследований Фетисову Ю. К.

## Список литературы

1. Носов А. П. и др. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. Магнитоэлектрический эффект в ламинатных структурах с композитными магнитоэлектрическими слоями на основе структур аморфная лента/тонкая пленка Fe-Co-Ga //*. – 2016. № 4 часть 5. – С. 880–883.

# ПОЛУЧЕНИЕ МАГНИТОАКТИВНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ БИОСОВМЕСТИМЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИОКСИБУТИРАТА ДЛЯ ТКАНЕВОЙ ИНЖЕНЕРИИ

А. Прядко

Научный руководитель – д.т.н., доцент Р. А. Сурменев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, Россия, г. Томск пр. Ленина, 30, vilajer@gmail.com

Магниточувствительные биоматериалы представляют собой класс материалов, позволяющих проводить неинвазивную целенаправленную и контролируемую стимуляцию клеток и тканей после имплантации с помощью внешнего магнитного поля. Магниточувствительные биоматериалы, представляют собой биосовместимые материалы, называемые матриксами, связанные физически и/или химически с магнитными частицами (МЧ), внедренными в материал или осажденными на него. Среди различных МЧ широко используются суперпарамагнитный магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) и маггемит ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) благодаря их сильному магнетизму, химической стабильности в физиологических условиях и биосовместимости [1]. В качестве матриксов для

внедрения МЧ используются природные и синтетические биосовместимые полимеры. Полиоксидбутират (ПОБ) представляет собой пьезоэлектрический, термопластичный, биосовместимый и биоразлагаемый полимер, продуцируемый различными видами бактерий. Электроформование является эффективным методом синтеза изделий из полимеров с подходящими для биомедицинского применения свойствами, такими как высокое отношение площади поверхности к объему, малый размер межволоконных пор с высокой пористостью. Целью работы является получение магнитоактивных композитных скэффолдов на основе ПОБ с добавлением частиц магнетита (ЧМ) различного размера и химией

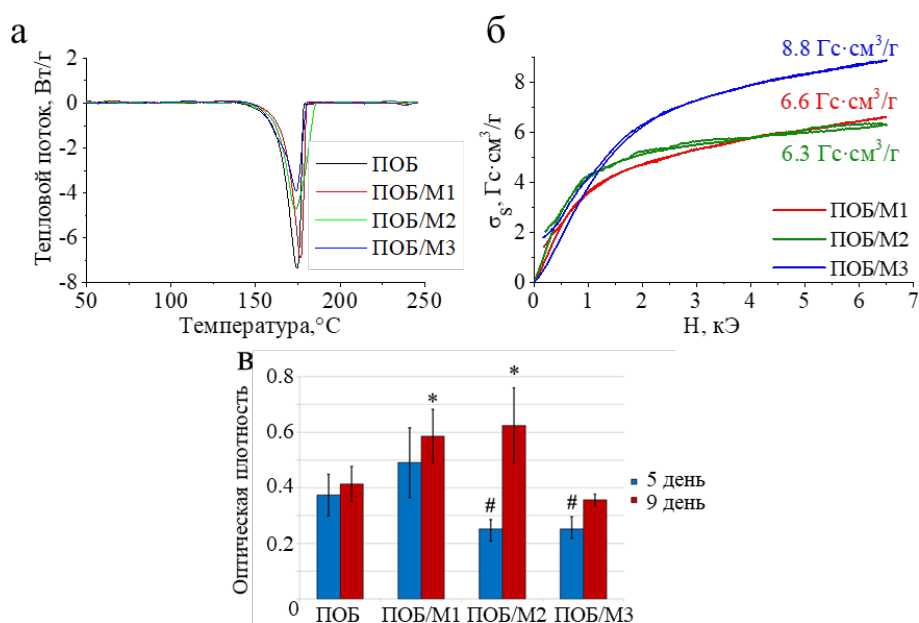


Рис. 1. ДСК-кривые (а), кривые намагниченности насыщения (б) и результаты цитотоксичности (в) композитных скэффолдов