

05,06

## Особенности обратного магнитоэлектрического эффекта в двухслойных композитах $Tb_{0.12}Dy_{0.2}Fe_{0.68}-PbZr_{0.53}Ti_{0.47}O_3$

© А.В. Калгин<sup>1</sup>, С.А. Гриднев<sup>1</sup>, З.Н. Грибе<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

<sup>2</sup> Университет Дияла, Дияла, Ирак

E-mail: kalgin\_alexandr@mail.ru

(Поступила в Редакцию 14 октября 2013 г.)

Нанесением ферромагнитных слоев разной толщины из тщательно перемешанного ферромагнитного порошка  $Tb_{0.12}Dy_{0.2}Fe_{0.68}$  и эпоксидного клея на предварительно поляризованные пьезоэлектрические слои  $PbZr_{0.53}Ti_{0.47}O_3$  получены двухслойные магнитоэлектрические композиты  $Tb_{0.12}Dy_{0.2}Fe_{0.68}-PbZr_{0.53}Ti_{0.47}O_3$ . Установлены зависимости обратного магнитоэлектрического эффекта от частоты и напряженности электрического поля, напряженности постоянного магнитного поля, толщины ферромагнитного слоя, среднего размера гранул  $Tb_{0.12}Dy_{0.2}Fe_{0.68}$  в ферромагнитном слое и температуры. Проанализированы условия для получения максимального МЭ-отклика.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по гранту № 13-02-00663.

### 1. Введение

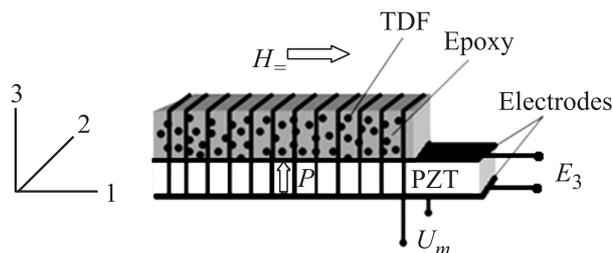
Существующая тенденция современной электроники, направленная на уменьшение размеров устройств и расширение их функциональных возможностей, привела к созданию композитов. Из всего многообразия композитов можно выделить композиты ферромагнетик-пьезоэлектрик благодаря наличию в них магнитоэлектрического (МЭ) эффекта. Различают прямой и обратный МЭ-эффекты. Прямой МЭ-эффект заключается в изменении поляризации композита под действием магнитного поля, а обратный МЭ-эффект состоит в изменении намагниченности композита под действием электрического поля. В связи с этим композиты ферромагнетик-пьезоэлектрик могут найти применение в высокочувствительных датчиках магнитных полей [1,2], твердотельных генераторах [1], преобразователях электрического напряжения [1], СВЧ-аттенуаторах [3], МЭ-памяти [4] и др. Среди различных типов композитов ферромагнетик-пьезоэлектрик наиболее перспективными в практическом применении представляются слоистые композиты из-за их высокой эффективности МЭ-преобразования и простоты в изготовлении. Между тем, в большинстве опубликованных работ исследовался прямой МЭ-эффект, в то время как изучению обратного МЭ-эффекта посвящено сравнительно небольшое количество экспериментальных работ. По этой причине в данной работе изучается обратный МЭ-эффект в слоистых композитах ферромагнетик-пьезоэлектрик.

Поскольку для практических применений представляют интерес слоистые композиты ферромагнетик-пьезоэлектрик с высокой эффективностью обратного МЭ-преобразования, а эффективность обратного МЭ-преобразования таких композитов зависит от усло-

вий проведения эксперимента [5–7], то целью настоящей работы является выявление условий, при которых эффективность обратного МЭ-преобразования двухслойных композитов  $Tb_{0.12}Dy_{0.2}Fe_{0.68}-PbZr_{0.53}Ti_{0.47}O_3$  (TDF–PZT) принимает максимальные значения. Использование в качестве компонент композитов ферромагнетика  $Tb_{0.12}Dy_{0.2}Fe_{0.68}$  (TDF) обусловлено его рекордно высокой магнитострикцией насыщения ( $\lambda_s \sim 10^{-3}$ ), а пьезоэлектрика  $PbZr_{0.53}Ti_{0.47}O_3$  (PZT) — большими пьезоэлектрическими коэффициентами (например,  $d_{33} \sim 289$  pC/N). Более того, TDF и PZT имеют высокие температуры фазовых переходов (650 и 320°C соответственно). Все это дает возможность ожидать высокой эффективности обратного МЭ-преобразования в композитах TDF–PZT при температурах вплоть до 320°C.

### 2. Методика измерений и образцы

Образцы двухслойного композита TDF–PZT были изготовлены нанесением ферромагнитных слоев из тщательно перемешанного ферромагнитного порошка TDF со средним размером гранул  $\sim 54 \mu m$  и массой 1.66 г и эпоксидного клея массой 0.36 г на предварительно поляризованные в промышленных условиях пьезоэлектрические слои PZT. Затвердевание ферромагнитных слоев происходило при комнатной температуре в течение 24 h. В экспериментах также использовались композиты со средними размерами гранул TDF в ферромагнитных слоях  $\sim 340, 440, 500$  и  $660 \mu m$ . Применение эпоксидного клея в ферромагнитных слоях обусловлено хрупкостью TDF и трудностью получения из него сплошных слоев достаточного большого размера. Геометрические размеры ферромагнитных слоев составляли  $6 \times 6 \times A$  mm



**Рис. 1.** Схема образца композита TDF–PZT и ориентация в нем постоянного магнитного поля  $H_0$  и поляризации  $P$ .

( $A = 0.3; 0.6; 0.9; 1.2$  и  $1.5$ ), а геометрические размеры пьезоэлектрических слоев —  $8 \times 6 \times 0.3$  mm. При этом пьезоэлектрические слои были поляризованы по толщине, а ферромагнитные слои намагничены по длине. Схема образца двухслойного композита TDF–PZT представлена на рис. 1.

Обратный МЭ-эффект изучали по методике, описанной в [8–10]. Образец слоистого композита TDF–PZT подвергался воздействию переменного электрического поля  $E_3$  для того, чтобы в результате обратного пьезоэффекта вызвать деформации пьезопластины  $x_3 = d_{33}E_3$ , которые из-за механической связи между слоями композита передаются ферромагнитному слою TDF и приводят вследствие магнитоупругого эффекта  $M_1 = \lambda_{13}x_3$  к изменению намагниченности композита  $M_1$ . Состояние намагниченности композита обнаруживалось путем измерения амплитуды индуцируемого напряжения  $U_m$  на катушке индуктивности длиной 5 mm и числом витков 200, внутрь которой помещался образец композита. Для характеристики величины обратного МЭ-эффекта использовался коэффициент обратного МЭ-преобразования [11].

$$\alpha_B = B_m/E = U_m/(ENS2\pi f) \text{ [G} \cdot \text{cm/V]}, \quad (1)$$

$$E_3 = U/h_{PZT}, \quad (2)$$

где  $B_m$  — амплитудная величина магнитной индукции в ферромагнитном слое образца композита;  $N$  — число витков в катушке индуктивности;  $S$  — площадь поперечного сечения ферромагнитного слоя композита TDF–PZT;  $f$  — частота переменного электрического поля;  $U$  — напряжение, прикладываемое к обкладкам пьезоэлектрического слоя и  $h_{PZT}$  — толщина пьезоэлектрического слоя.

### 3. Результаты и обсуждение

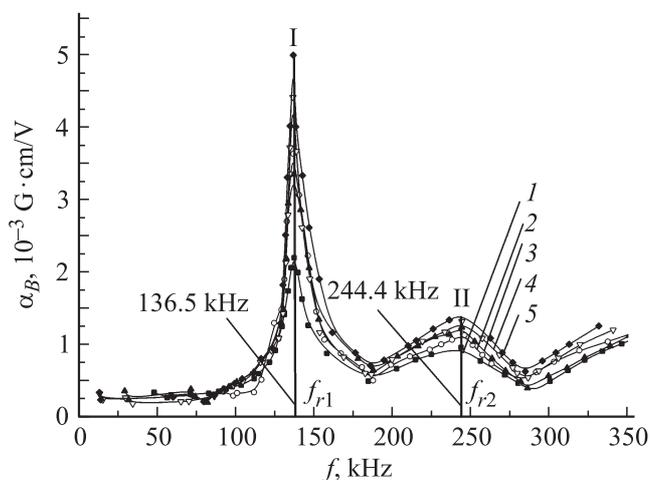
Поскольку обратный МЭ-эффект в образцах композитов ферромагнетик-пьезоэлектрик возникает благодаря механическому взаимодействию ферромагнитной и пьезоэлектрической подсистем, то в области электро-механического резонанса образца композита величина МЭ-отклика должна резко возрастать. Об этом свидетельствуют зависимости коэффициента  $\alpha_B$  от частоты  $f$

при разных величинах  $H_0$  и комнатной температуре, полученные для образца двухслойного композита с ферромагнитным слоем толщиной 0.6 mm и пьезоэлектрическим слоем толщиной 0.3 mm (далее 0.6TDF–0.3PZT) (рис. 2).

Видно, что на зависимостях  $\alpha_B(f)$  имеют место два пика на частотах  $f_{r1}$  и  $f_{r2}$ , соответствующих электро-механическим резонансным частотам 1-й гармоники продольных колебаний по длине образца и 3-й гармоники изгибных колебаний по длине образца соответственно. На частотах  $f_{r1}$  и  $f_{r2}$  происходит существенное увеличение величины  $\alpha_B$ , так как связано с резким увеличением деформаций в образце композита при возбуждении в нем резонансных колебаний. Кроме того, можно видеть рост величины  $\alpha_B$ , когда  $H_0$  возрастает. Причиной роста величины  $\alpha_B$  в зависимости от  $H_0$  служит перестройка доменной структуры в ферромагнитном слое, так как при увеличении  $H_0$  все большее число доменов в ферромагнитном слое выстраивается по направлению магнитного поля. При этом увеличивается намагниченность ферромагнитного слоя, а значит, возрастает  $B_m$ , что сопровождается возрастанием  $U_m$  в катушке индуктивности.

Зависимости  $\alpha_B(f)$ , аналогичные зависимостям на рис. 2, были выявлены для всех изученных образцов композитов: 0.3TDF–0.3PZT; 0.9TDF–0.3PZT; 1.2TDF–0.3PZT и 1.5TDF–0.3PZT. Величины  $f_{r1}$  и  $f_{r2}$  и соответствующие им значения  $\alpha_{B1}$  и  $\alpha_{B2}$  для всех образцов композитов приведены в таблице.

Из таблицы видно, что на частотах  $f_{r1}$  и  $f_{r2}$  коэффициент  $\alpha_B$  в зависимости от толщины ферромагнитного слоя  $h_{TDF}$  проходит через пик, причем максимальное значение  $\alpha_B$  соответствует образцу композита 0.9TDF–0.3PZT. Наличие пиков на зависимостях  $\alpha_B(h_{TDF})$  при различных резонансных частотах можно объяснить в рамках модели, описанной в рабо-



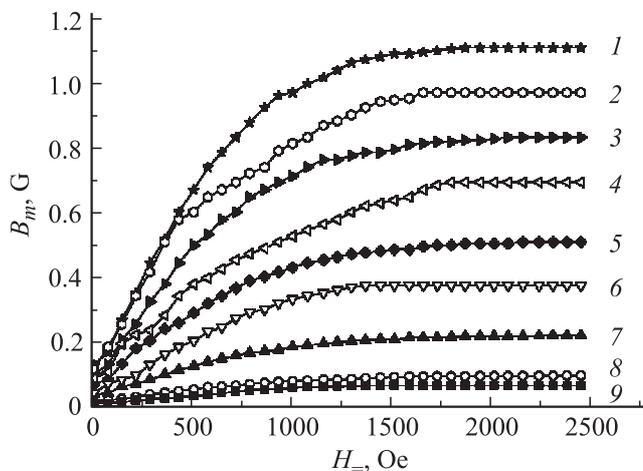
**Рис. 2.** Зависимости  $\alpha_B(f)$  для образца композита 0.6TDF–0.3PZT в электрическом поле напряженностью 133.3 V/cm и постоянном магнитном поле различной напряженности: 1 — 0; 2 — 1; 3 — 1.5; 4 — 2 и 5 — 2.5 кОе.

Резонансные частоты и соответствующие им величины коэффициента обратного МЭ-преобразования для различных образцов композита TDF–PZT

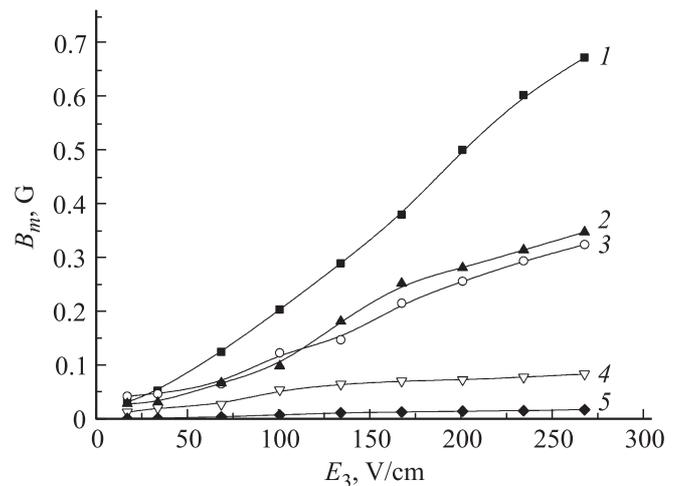
Образец композита	$f_{r1}$ , kHz	$\alpha_{B1}$ , $10^{-3} \text{ G} \cdot \text{cm/V}$ при $H_{\pm} = 2.5 \text{ Oe}$	$f_{r2}$ , kHz	$\alpha_{B2}$ , $10^{-3} \text{ G} \cdot \text{cm/V}$ при $H_{\pm} = 2.5 \text{ Oe}$
0.3TDF–0.3PZT	133.3	4.6	289.1	1.2
0.6TDF–0.3PZT	136.5	5.0	244.4	1.4
0.9TDF–0.3PZT	124.4	10.6	213.0	2.2
1.2TDF–0.3PZT	130.4	3.4	303.1	2.1
1.5TDF–0.3PZT	135.6	2.2	303.9	1.5

те [12]. Чтобы получить МЭ-коэффициенты для двухслойных композитов ферромагнетик-пьезоэлектрик на резонансных частотах, в [12] решалось уравнение движения среды, принимая во внимание магнитостатические и электростатические уравнения, уравнения состояния, закон Гука и граничные условия. Магнитоэлектрические коэффициенты оцениваются с использованием начальных параметров материалов компонентов композита (пьезомагнитный и пьезоэлектрический коэффициенты, упругие константы и пр.). Согласно модели, коэффициент  $\alpha_B$  зависит от величин объемной доли составляющих композит компонент  $\nu$ , упругих констант  $s_{33}$  и плотности  $\rho$  ферромагнетика и пьезоэлектрика, пьезомагнитного коэффициента  $q_{13} \sim d\lambda_{13}/dH_{\pm}$  и пьезоэлектрического коэффициента  $d_{33}$ . С увеличением  $h_{\text{TDF}}$  величины  $q_{13}$ ,  $d_{33}$ ,  $s$  и  $\rho$  практически не изменяются, а величина объемной доли ферромагнетика в композите  $\nu_{\text{TDF}} = h_{\text{TDF}} / (h_{\text{TDF}} + h_{\text{PZT}})$  проходит через максимум в соответствии с выражением  $\nu_{\text{TDF}}(1 - \nu_{\text{TDF}})$ .

Электрическим полем разной напряженности  $E_m$  вследствие обратного пьезоэффекта в образцах композита TDF–PZT можно управлять величиной деформации слоя PZT, которая растет с напряженностью электриче-



**Рис. 3.** Зависимости  $B_m(H_{\pm})$  при резонансной частоте 136.5 kHz и комнатной температуре для образца 0.3TDF–0.3PZT при различных  $E_3$ : 1 — 266.7; 2 — 233.3; 3 — 200; 4 — 166.7; 5 — 133.3; 6 — 99.9; 7 — 66.7; 8 — 33.3 и 9 — 16.7 V/cm.



**Рис. 4.** Зависимости  $B_m(E_3)$  при 510 Oe и комнатной температуре для образцов с разной толщиной TDF: 1 — 0.3; 2 — 0.6; 3 — 0.9; 4 — 1.2 и 5 — 1.5 mm.

ского поля. Большие деформации слоя PZT в силу механической связи между пьезоэлектрическими и ферромагнитными слоями создают большие деформации ферромагнитного слоя, которые благодаря магнитоупругому эффекту вызывают большие изменения намагниченности и, следовательно, величины  $B_m$  ферромагнитного слоя (рис. 3).

Зависимости, подобные зависимостям на рис. 3, были обнаружены также для образцов композитов 0.6TDF–0.3PZT; 0.9TDF–0.3PZT; 1.2TDF–0.3PZT и 1.5TDF–0.3PZT. Для всех изученных образцов с ростом  $E_m$  наблюдается увеличение  $B_m$ , причем тем большее, чем меньше толщина ферромагнитного слоя образца композита (рис. 4).

По всей вероятности это обусловлено тем, что в тонком ферромагнитном слое общая площадь поверхности гранул TDF меньше, чем в толстом слое, тогда на поверхности гранул будет меньше дефектов, которые являются стопорами при движении магнитных доменных стенок. В таком случае при одной величине  $E_m$  изменения намагниченности и соответственно величины  $B_m$  в тонком ферромагнитном слое должны быть больше, чем в толстом ферромагнитном слое.

В пользу этого предположения говорит эксперимент по измерению магнитных петель гистерезиса образцов ферромагнитного слоя композитов TDF–PZT различной толщины (рис. 5). Выявлено, что с толщиной ферромагнитных образцов величина коэрцитивного поля возрастает, свидетельствуя о росте числа дефектов, которые затрудняют движение магнитных доменных границ под действием приложенного магнитного поля (вставка на рис. 5).

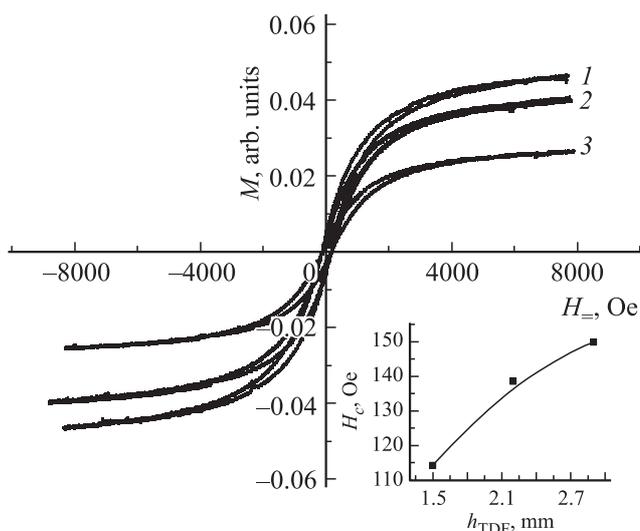
Для доказательства того, что в эксперименте изучался обратный МЭ-эффект, были построены зависимости первых производных индуцированного напряжения  $U_m$  по напряженности электрического поля  $E_3$  и коэффициента магнитострикции  $\lambda_{13}$  по постоянному магнитному полю  $H_+$  соответственно от  $E_3$  (рис. 6) и  $H_+$  (рис. 7).

Видно, что зависимости  $dU_m/dE_3(E_3)$  и  $d\lambda_{13}/dH_+(H_+)$  проходят через пики, что согласуется с уравнением магнитоупругого эффекта для ферромагнетиков [13], лежащим в основе обратного МЭ-эффекта для композитов ферромагнетик-пьезоэлектрик

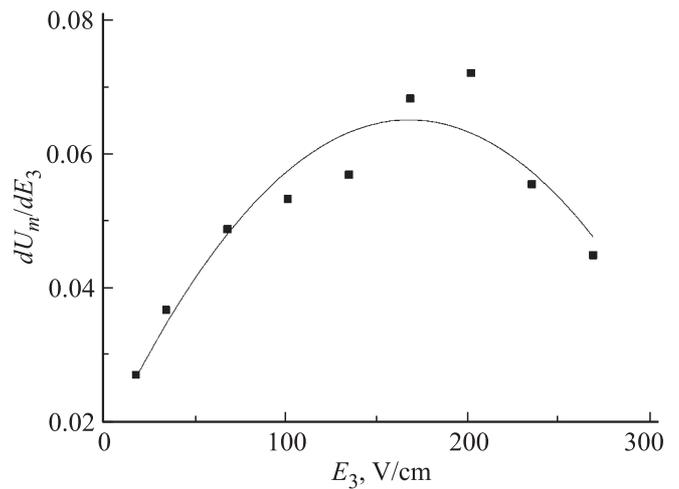
$$\left(\frac{dM}{d\sigma}\right)_{H,T} = \left(\frac{d\lambda}{dH}\right)_{\sigma,T},$$

где  $M \sim U_m$  — намагниченность ферромагнитного слоя TDF;  $\sigma_3 = k_{33}x_3 \sim k_{33}d_{33}E_3$  — механические напряжения, создаваемые пьезопластиной PZT, и  $k_{33}$  — коэффициент упругости пьезопластины PZT.

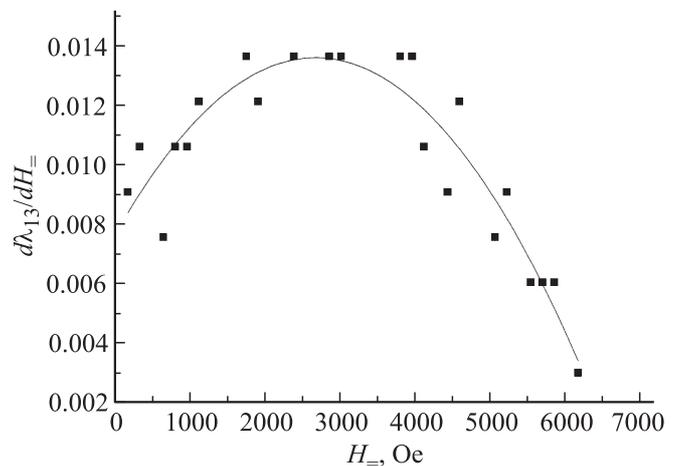
Так как обратный МЭ-эффект в слоистых композитах TDF–PZT возникает благодаря передаче деформаций от пьезоэлектрического слоя к ферромагнитному слою, а эффективность передачи деформаций зависит от размеров гранул в ферромагнитных и пьезоэлектрических



**Рис. 5.** Магнитные петли гистерезиса для образцов ферромагнитной составляющей композитов TDF–PZT, имеющих толщины 2.9 (1), 2.2 (2) и 1.5 мм (3). Длина и ширина ферромагнитных образцов имеют размеры 10 и 4 мм соответственно.



**Рис. 6.** Зависимость  $dU_m/dE_3$  от  $E_3$  для образца композита 0.3TDF–0.3PZT.

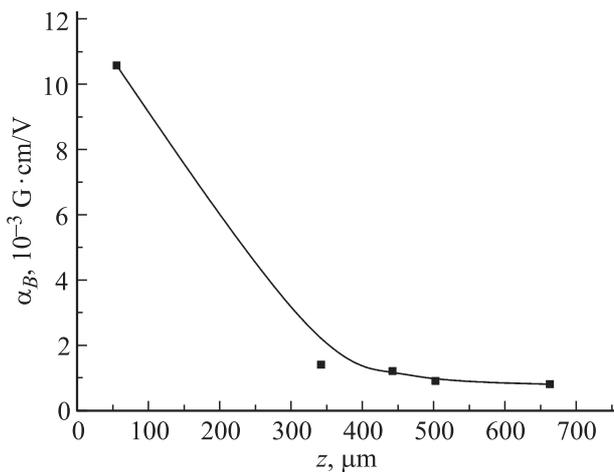


**Рис. 7.** Зависимость  $d\lambda_{13}/dH_+$  от  $H_+$  для образца ферромагнетика TDF.

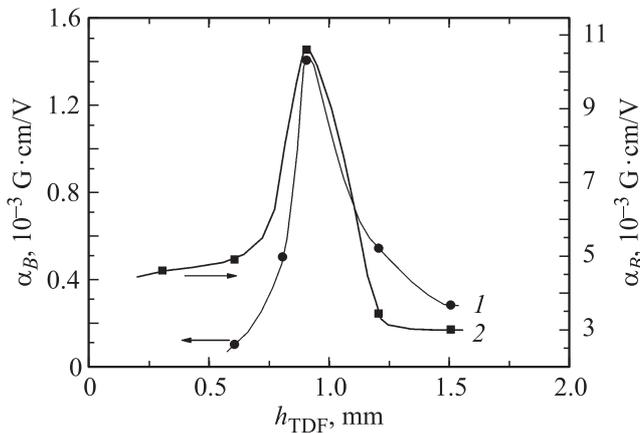
слоях, следовательно, размеры гранул в ферромагнитных слоях могут сказываться на величине параметра  $\alpha_B$ . Такое предположение подтверждается проведенными экспериментами (рис. 8).

Увеличение  $\alpha_B$  при уменьшении среднего размера гранул  $z$  в ферромагнитном слое от 660 до 54  $\mu\text{m}$  (рис. 8) обусловлено увеличением общей площади соприкосновения между гранулами и соответственно более эффективной передачей деформаций в ферромагнитном слое. Максимальная величина  $\alpha_B = 10.6 \cdot 10^{-3} \text{ G} \cdot \text{cm/V}$  обнаружена для образца композита 0.9TDF–0.3PZT с  $z = 54 \mu\text{m}$ . Отметим, что максимум на зависимости  $\alpha_B(h_{\text{TDF}})$  не смещается по шкале  $h_{\text{TDF}}$ , когда средний размер гранул в ферромагнитном слое изменяется (рис. 9). По-видимому, это связано с тем, что объемная доля фаз композитов с различным средним размером гранул в ферромагнитных слоях одинаковая.

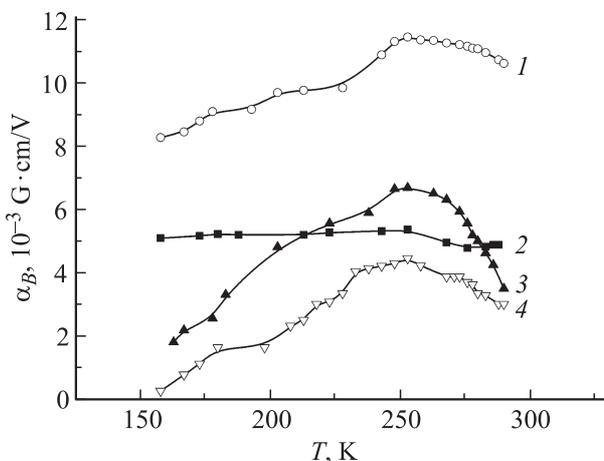
Ввиду того что величина  $\alpha_B$  в композитах TDF–PZT определяется цепочкой связей пьезоэлектрический



**Рис. 8.** Зависимость коэффициента  $\alpha_B$  от среднего размера гранул в ферромагнитном слое при  $H_{\pm} = 2.5$  кОе и частоте  $f_{r1}$  для образца 0.9 TDF–0.3PZT.



**Рис. 9.** Зависимости  $\alpha_B$  от  $h_{TDF}$  при напряженности  $H_{\pm} = 2.5$  кОе, частоте  $f_{r1}$  и комнатной температуре для образцов с различным средним размером гранул в ферромагнитном слое: 1 — 340 и 2 — 54  $\mu\text{m}$ .



**Рис. 10.** Температурные зависимости  $\alpha_B$  при постоянном магнитном поле 2.5 кОе, электрическом поле 133.3 В/см на резонансной частоте  $f_{r1}$  для образцов с разной толщиной TDF: 1 — 0.9; 2 — 0.6; 3 — 1.2 и 4 — 1.5 мм.

эффект—упругая деформация—магнитострикция, а пьезоэлектрический эффект в PZT [14] и магнитострикционные коэффициенты TDF [15] зависят от температуры  $T$ , то температура должна влиять на коэффициент  $\alpha_B$ . В этой связи, в работе были проведены эксперименты по установлению зависимости  $\alpha_B(T)$  для выбранных для исследования образцов (рис. 10).

Как видно на рисунке, в интервале температур 158–290 К для всех образцов коэффициент  $\alpha_B$  при 253 К проходит через пик. Наибольшая величина  $\alpha_B$  достигнута для образца композита 0.9TDF–0.3PZT и составляет  $11.4 \cdot 10^{-3} \text{ G} \cdot \text{cm/V}$ . Кривые  $\alpha_B(T)$  качественно повторяют кривую продольной магнитострикции как функции температуры [15], что дает возможность связать природу обнаруженных пиков с особенностями изменения с температурой магнитострикционных свойств ферромагнитной компоненты композитов.

Таким образом, среди всех образцов композитов TDF–PZT наибольший коэффициент  $\alpha_B = 11.4 \cdot 10^{-3} \text{ G} \cdot \text{cm/V}$  имеет образец композита 0.9TDF–0.3PZT со средним размером гранул TDF в ферромагнитном слое 54  $\mu\text{m}$  в постоянном магнитном поле напряженностью 2.5 кОе, электрическом поле напряженностью 133.3 В/см, на резонансной частоте 124.4 кГц и при температуре 253 К.

#### 4. Заключение

Подводя итог данной работы, выделим следующие условия для получения максимального МЭ-отклика в образцах композитов TDF–PZT.

1. Максимальное увеличение коэффициента  $\alpha_B$  в интервале частот 0–350 кГц для всех образцов композитов TDF–PZT наблюдается на частотах их электромеханического резонанса  $f_{r1}$  и  $f_{r2}$ .

2. Коэффициент  $\alpha_B$  зависит от толщины ферромагнитного слоя образцов композитов TDF–PZT и принимает максимальные значения на частотах  $f_{r1}$  и  $f_{r2}$  для образца композита 0.9TDF–0.3PZT. При  $E_m = 133.3 \text{ V/cm}$  и  $H_{\pm} = 2.5 \text{ кОе}$  величины  $\alpha_B$  составляют  $10.6 \cdot 10^{-3} \text{ G} \cdot \text{cm/V}$  и  $2.2 \text{ G} \cdot \text{cm/V}$  на частотах  $f_{r1}$  и  $f_{r2}$  соответственно. Установленные закономерности обсуждаются в рамках модели эффективных параметров гетерогенной среды.

3. Для всех образцов композитов TDF–PZT при различных величинах  $E_m$  магнитоэлектрический отклик достигает максимальных значений при значениях  $H_{\pm}$ , превышающих величину магнитного поля насыщения. Вместе с этим, величина МЭ-отклика тем больше, чем больше величина  $E_m$ . Полученные результаты объясняются на основе представлений о взаимодействиях механических деформаций, создаваемых слоем PZT, с доменной структурой ферромагнитного слоя. Величина МЭ-отклика при различных величинах  $E_m$  увеличивается с уменьшением толщины ферромагнитного слоя образцов композитов, что предположительно связывается с

ростом числа дефектов на поверхностях гранул TDF в ферромагнитном слое.

4. Величина  $\alpha_B$  максимальна для образца композита 0.9TDF–0.3PZT с самым маленьким средним размером гранул TDF в ферромагнитном слое в диапазоне 54–660  $\mu\text{m}$  и имеет значение  $10.6 \cdot 10^{-3} \text{ G} \cdot \text{cm/V}$  при  $H_{\perp} = 2.5 \text{ kOe}$  и частоте  $f_{r1} = 124.4 \text{ kHz}$ . Это обстоятельство связано с более эффективной передачей механических деформаций в ферромагнитном слое, так как общая площадь соприкосновения гранул меньших размеров больше, чем у гранул больших размеров. Средний размер гранул TDF не оказывает влияния на положение пика на зависимости  $\alpha_B(h_{\text{TDF}})$ .

5. Максимальные величины  $\alpha_B$  в интервале температур от 158 до 290 К для всех образцов композитов TDF–PZT обнаружены при температуре 253 К, соответствующей максимуму на температурной зависимости продольной магнитострикции TDF. Наилучшим образом обратный МЭ-эффект проявляется при 253 К с  $\alpha_B = 11.4 \cdot 10^{-3} \text{ G} \cdot \text{cm/V}$  для образца композита 0.9TDF–0.3PZT в постоянном магнитном поле напряженностью 2.5 кОе, электрическом поле напряженностью 133.3 В/см и на резонансной частоте 124.4 kHz.

## Список литературы

- [1] Ю.К. Фетисов. Изв. РАН. Сер. физ. **71**, 1667 (2007).
- [2] И.М. Крыканов, А.Б. Коплик, Ю.К. Фетисов, Д.В. Чашин. Письма в ЖТФ **36**, 19 (2010).
- [3] О.В. Антоненков, Д.А. Филиппов. Письма в ЖТФ **33**, 77 (2007).
- [4] M. Bibes, A. Barthelemy. Nature Mater. **7**, 425 (2008).
- [5] M. Fiebig. J. Phys. D **38**, 123 (2005).
- [6] Д.А. Филиппов, В.М. Лалетин, G. Srinivasan. ЖТФ **82**, 47 (2012).
- [7] S.A. Gridnev, A.V. Kalgin. Ferroelectrics **397**, 128 (2010).
- [8] X.W. Dong, Y.J. Wu, J.G. Wan, T. Wei, Z.H. Zhang, S. Chen, H. Yu, J.-M. Liu. J. Phys. D: Appl. Phys. **41**, 035 003 (2008).
- [9] Y.-M. Jia, H.-S. Luo, S.W. Or, Y.-J. Wang, H.L.W. Chan. Chin. Sci. Bull. **53**, 2129 (2008).
- [10] Y.K. Fetisov, V.M. Petrov, G. Srinivasan. J. Mater. Res. **22**, 2074 (2007).
- [11] А.А. Буш, К.Е. Каменцев, В.Ф. Мещеряков, Ю.К. Фетисов, Д.В. Чашин, Л.Ю. Фетисов. ЖТФ **79**, 71 (2009).
- [12] M.I. Bichurin, V.M. Petrov, R.V. Petrov. J. Magn. Magn. Mater. **324**, 3548 (2012).
- [13] Энциклопедический словарь: Физика твердого тела / Под ред. В.Г. Барьяхтара. Наук. думка, Киев. Т. 1. (1996). 656 с.
- [14] Е.Г. Смажеская, Н.Б. Фельдман. Пьезоэлектрическая керамика. Сов. радио, М. (1971). 200 с.
- [15] Г.А. Политова, И.С. Терешина, С.А. Никитин, Т.Г. Соченкова, В.Н. Вербецкий, А.А. Саламова, М.В. Макарова. ФТТ **47**, 1834 (2005).