

УДК 537.633.9

## МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ЛАМИНАТНЫХ СТРУКТУРАХ С КОМПОЗИТНЫМИ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫМИ СЛОЯМИ НА ОСНОВЕ СТРУКТУР АМОРФНАЯ ЛЕНТА/ТОНКАЯ ПЛЕНКА Fe-Ga

Носов А.П., Грибов И.В., Москвина Н.А., Дружинин А.В., Осотов В.И.

ФГБУН Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, e-mail: nossov@imp.uran.ru

Исследован магнитоэлектрический эффект (МЭ) в ламинатных структурах типа композитный магнито-стрикционный слой /сегнетоэлектрик/ композитный магнито-стрикционный слой. Композитные слои получены импульсным лазерным осаждением тонких магнито-стрикционных пленок состава  $Fe_{0.72}Ga_{0.28}$  на аморфные ленты. Исследованы зависимости магнитоэлектрического коэффициента по напряжению (МЭКН) от величины статического магнитного поля, и частоты переменного магнитного поля в диапазоне от 20 Гц до 10 кГц. Показано, что нанесение пленок  $Fe_{0.72}Ga_{0.28}$  увеличивает максимальное значение МЭКН.

**Ключевые слова:** магнитоэлектрический эффект, магнитострикция, аморфные сплавы, сплавы Fe-Ga

## MAGNETOELECTRIC EFFECT IN LAMINATED STRUCTURES WITH COMPOSITE AMORPHOUS ALLOY/THIN FE-GA FILM MAGNETOSTRICTIVE STRUCTURES

Nosov A.P., Gribov I.V., Moskvina N.A., Druzhinin A.V., Osotov V.I.

M.N. Miheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, e-mail: nossov@imp.uran.ru

The magnetoelectric (ME) properties of graded amorphous alloy/PZT/graded amorphous alloy laminated trilayers were investigated. Grading of amorphous alloy ribbons was carried out by pulsed laser deposition of 25 nm thin film layers of magnetostrictive  $Fe_{0.72}Ga_{0.28}$  material. The frequency and *dc* biasing magnetic field dependences of the magnetoelectric voltage coefficient (MEVC) were studied in the frequency range from 20 Hz to 10 kHz. Grading with  $Fe_{0.72}Ga_{0.28}$  increases the maximum value of MEVC.

**Keywords:** magnetoelectric effect, magnetostriction, amorphous alloys, Fe-Ga alloys

В последние годы ведутся интенсивные исследования магнитоэлектрического эффекта (МЭ) в композитных планарных структурах с механически связанными слоями из ферромагнитных магнито-стрикционных и сегнетоэлектрических материалов [1]. При помещении такой структуры в переменное магнитное поле  $dH_{ac}$  наблюдается прямой МЭ: поле  $dH_{ac}$  вызывает магнито-стрикционную деформацию ферромагнитных слоев, которая передается сегнетоэлектрическим слоям и приводит, вследствие пьезоэффекта, к генерации зарядов и возникновению электрического поля  $dE$  на поверхности структуры. Величину МЭ характеризуют магнитоэлектрическим коэффициентом по напряжению (МЭКН), который определяют как  $\alpha = dE/H_{ac} = dV/(tdH_{ac})$ , где  $dV$  – величина возникающего электрического напряжения,  $t$  – толщина сегнетоэлектрического слоя. В свою очередь, значение  $\alpha$  определяется физическими характеристиками как ферромагнитных слоев, в частности пьезомагнитным коэффициентом  $q = d\lambda/dH$ , где  $\lambda$  – коэффициент магнито-стрикции,  $H$  – статическое магнитное поле, так и сегнетоэлектрических слоев, в частности пьезомодулем  $d$  и относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ .

В работах [2, 3] теоретически показано, что при использовании в МЭ структурах композитных слоев с градиентом свойств по толщине возможно увеличение значения  $\alpha$  как за счет величины  $d$  сегнетоэлектрических слоев, так и за счет величины  $q$  ферромагнитных слоев. Экспериментально такое увеличение наблюдали в работах [4, 5] для композитных объемных структур с ферромагнитными слоями на основе тонких лент.

В качестве ферромагнитных слоев МЭ структур очень часто используются аморфные магнито-стрикционные сплавы типа «Метглас» (Metglas) [6], достоинствами которых являются большое значение  $q$ , малое коэрцитивное поле, большая начальная магнитная проницаемость, положительное значение  $\lambda$ . Для сплавов типа «Метглас» были исследованы изменения их свойств при нанесении на них тонких пленок немагнитных металлов [7] и сегнетоэлектриков [8]. Насколько известно авторам, исследований изменений свойств сплавов типа «Метглас» при нанесении на их поверхность магнито-стрикционных пленок не проводилось.

В настоящей работе исследовано изменение МЭКН в композитных планарных структурах на основе ферромагнитных маг-

ниотстрикционных аморфных лент сплава типа «Метглас» с магнитоотрикционной пленкой и сегнетоэлектрических слоев.

**Материалы и методы исследования**

В качестве сегнетоэлектрических слоев были использованы пластины пьезокерамики PZT (#851, APC International, Pennsylvania, USA) с типичными размерами 5×5×0.3 мм<sup>3</sup>. В качестве магнитоотрикционного сплава типа «Метглас» были использованы аморфные ленты состава 440А [9] (компания «Гаммамет», Екатеринбург, Россия) толщиной 34 мкм без термообработки. Статические измерения магнитоотрикции были выполнены с использованием тензодатчика. Были измерены значения коэффициента магнитоотрикции насыщения при двух ориентациях магнитного поля  $H$ : вдоль ( $\lambda_{11} = +20 \times 10^{-6}/\text{Э}$ ) и поперек ( $\lambda_{12} = -15 \times 10^{-6}/\text{Э}$ ) направления прокатки. Из этих данных была определена величина пьезомагнитного коэффициента  $q = q_{11} + q_{12} = d\lambda_{11}/dH + d\lambda_{12}/dH$ . Для состава 440А было получено значение  $q = +0,46 \times 10^{-6}/\text{Э}$ .

Композитную структуру магнитоотрикционного слоя получали нанесением на поверхность аморфной ленты состава 440А тонких пленок Fe<sub>0,72</sub>Ga<sub>0,28</sub> методом импульсного лазерного осаждения. Известно, что для объемных материалов системы Fe<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub> (галфенол) максимальную величину коэффициента магнитоотрикции имеют сплавы с  $x = 0,19$  или  $0,28$  [10]. Магнитоотрикция в сплавах Fe<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub> отрицательна. Пленки толщиной 25 нм наносили с использованием эксимерного лазера CL 7050 (компания «Оптисистем», г. Троицк, Московская область, Россия [11]).

Были исследованы трехслойные ламинатные структуры, в которых средним сегнетоэлектрическим слоем являлась пьезокерамика PZT. В качестве верхнего и нижнего слоев использовали либо аморфные магнитоотрикционные ленты состава 440А (далее – образцы 440А) либо аморфные магнитоотрикционные ленты состава 440А с пленкой Fe<sub>0,72</sub>Ga<sub>0,28</sub> ((далее – образцы 440А/FeGa). Структуру формировали склеиванием слоев клеем на основе цианокри-

лата. Как показано в [12] в трехслойных структурах величина МЭКН больше, чем в двухслойных.

МЭ исследовали при приложении статического  $H$  и переменного  $H_{ac}$  магнитных полей. Напряжение  $dV$ , возникающее в сегнетоэлектрическом слое, измеряли синхронным детектором. МЭКН вычисляли по формуле  $\alpha = dE/H_{ac} = dV/(tdH_{ac})$ , где  $t$  – толщина сегнетоэлектрического слоя. Измерения проводили  $\alpha$  при изменении величины статического магнитного поля  $H$  и частоты  $f$  переменного магнитного поля.

Все измерения выполнены при комнатной температуре.

**Результаты исследования и их обсуждение**

На рис. 1 приведены результаты, полученные для структуры с аморфной лентой 440А на частотах 20, 110 Гц и 10 кГц. На всех зависимостях  $\alpha(H)$  имеется максимум при  $H \sim 60$  Э, соответствующий максимуму полевой зависимости коэффициента  $q$ . Положение максимума не зависит от частоты, в то время величина  $\alpha$  в максимуме сильно изменяется с частотой. С ростом  $H$  значения  $\alpha$  постепенно уменьшаются и становятся очень малыми при  $H > 250$  Э. Ход зависимости  $\alpha(H)$  качественно соответствует виду зависимости  $q(H)$ .

Сходные результаты были получены и для структуры с аморфной лентой с пленкой Fe<sub>0,72</sub>Ga<sub>0,28</sub>. Нанесение пленки не изменяло положение максимумов при  $H \sim 60$  Э на зависимостях  $\alpha(H)$ , однако влияло на величину максимального значения  $\alpha$ . Сравнительные данные для частотных зависимостей максимальной величины  $\alpha$  приведены на рис. 2 из которого следует, что нанесение пленки приводит к увеличению максимального значения  $\alpha$  для всего исследованного диапазона частот.

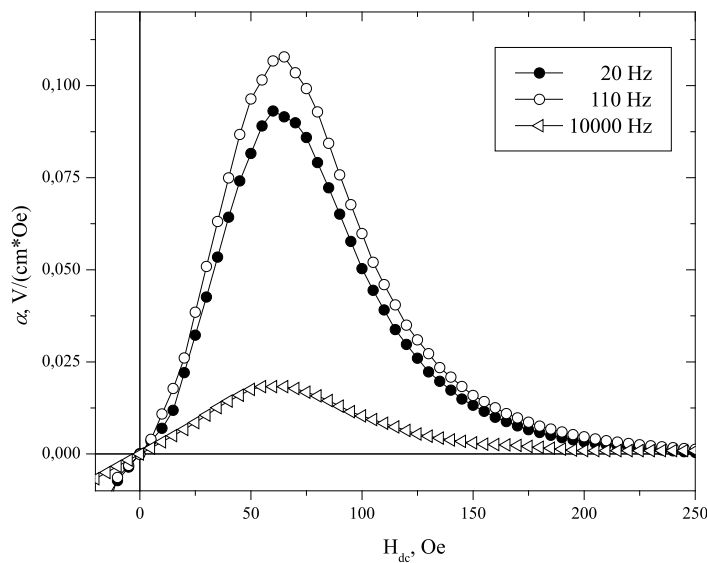


Рис. 1. Зависимости МЭКН от статического магнитного поля для значений частот переменного магнитного поля 20 Гц, 110 Гц и 10 кГц. Результаты для структуры с аморфной лентой 440А

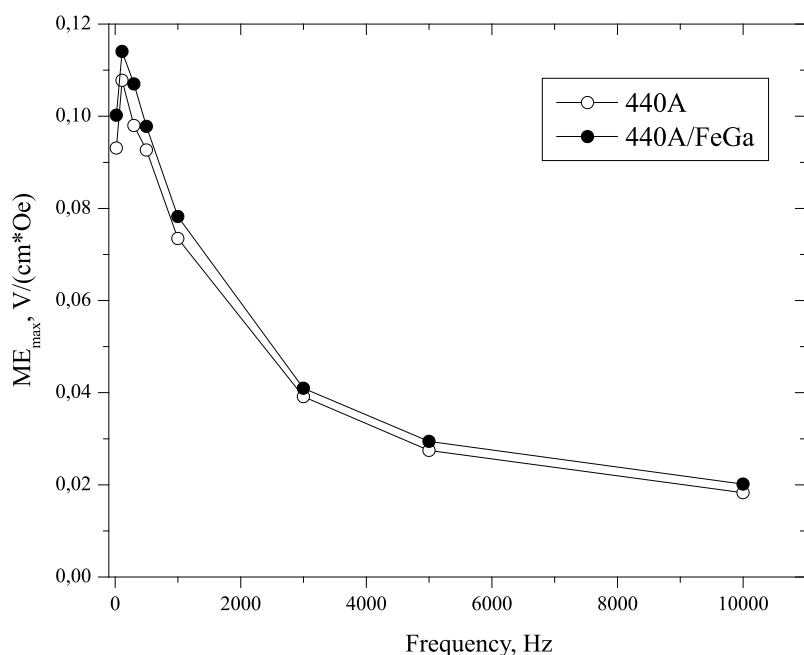


Рис. 2. Сравнение частотных зависимостей максимальной величины МЭКН для структур с магнитоэлектрическими слоями только с аморфной лентой (440A) и аморфной лентой с пленкой  $Fe_{0.72}Ga_{0.28}$  (440A/FeGa)

Известно, что для ламинатных структур величина МЭКН пропорциональна  $d_{11}/\epsilon_{11}$ . Для пьезокерамики типа относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_{11}$  слабо зависит от частоты в диапазоне до 10 кГц. Поэтому наблюдающиеся изменения МЭКН с частотой качественно могут быть объяснены частотными изменениями характеристик ферромагнитных слоев. Коэффициент магнитоэлектрической связи определяется как  $k_m = (4\pi\lambda'\mu_r'/E)^{1/2}$ , где  $\lambda'$  – коэффициент магнитоэлектрики в переменном магнитном поле, который, в свою очередь, пропорционален  $q$ ,  $\mu_r'$  – действительная часть относительной магнитной проницаемости,  $E$  – модуль Юнга [13]. Наблюдаемое увеличение максимального значения  $\alpha$  для всего исследованного диапазона частот для структур с пленкой  $Fe_{0.72}Ga_{0.28}$  по-видимому связано с увеличением  $k_m$  за счет  $q$  из-за разных знаков  $\lambda$  в аморфном сплаве и пленке.

### Закключение

Исследован магнитоэлектрический эффект (МЭ) в ламинатных структурах ферромагнетик/сегнетоэлектрик/ферромагнетик с композитными ферромагнитными магнитоэлектрическими слоями, полученными импульсным лазерным осаждением тонких пленок  $Fe_{0.72}Ga_{0.28}$  с отрицательной магнитоэлектрикой на аморфные ленты с положительной магнитоэлектрикой. Для всего

исследованного диапазона частот от 20 Гц до 10 кГц нанесение тонких пленок приводит к увеличению максимальной величины МЭКН. Результаты могут представлять интерес для разработки магнитоэлектрических датчиков статических и переменных магнитных полей.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Спин», № 01201463330) при частичной поддержке УрО РАН (проект № 15-9-2-30).*

### Список литературы

1. G. Lawes and G. Srinivasan. // J. Phys. D: Appl. Phys. v. 44 (2011), P. 243001.
2. V.M. Petrov, G. Srinivasan, and T. A. Galkina. // J. Appl. Phys. v.104 (2008), P. 113910.
3. V.M. Petrov and G. Srinivasan. // Phys. Rev. B. v.78 (2008) P. 184421.
4. S.K. Mandal, G. Sreenivasulu, V.M. Petrov, and G. Srinivasan. // Appl. Phys. Lett. v.96 (2010) P. 192502.
5. S. Yang, C. Park, K. Cho, and S. Priya. // J. Appl. Phys. v.108 (2010) P.09370.
6. Tech. Bulletin ref:2605SA106192009 (Metglas Inc., Conway, SC), 2009.
7. E.C. Passamani, C. Larica, P. S. Moscon, P. Mendoza Zelis, and F. H. Sanchez. // J. Appl. Phys. v.110 (2010) P. 043906.
8. B. Hu, Y. Chen, A. Yang, S. Gillete, T. Fitchorov, A. Geiler, A. Daigle, X. D. Su, Z. Wang, D. Viehland, C. Vittoria, and V. G Harris. // J. Appl. Phys. v.111(2012) P. 07D916.
9. <http://www.gammamet.ru/ru/gm440a.htm>
10. Jayasimha Atulasimha and Alison B Flatau. // Smart Mater.Struct. v.20 (2010) P. 043001.
11. <http://www.optosystems.ru/eng/index.php>
12. G. Sreenivasulu, V.M. Petrov, L.Y. Fetisov, Y.K. Fetisov, and G. Srinivasan. // Physical Review B. v.86 (2012) P. 214405.
13. C.M. Van der Burgt. // Philips Res. Rep. v.8 (1953) P. 91.