УДК 537.633.9

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ЛАМИНАТНЫХ СТРУКТУРАХ С КОМПОЗИТНЫМИ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫМИ СЛОЯМИ НА ОСНОВЕ СТРУКТУР АМОРФНАЯ ЛЕНТА/ТОНКАЯ ПЛЕНКА FE-CO-GA

[1]Носов А.П., [1]Грибов И.В., [1]Москвина Н.А., [1]Дружинин А.В., [1]Осотов В.И., [2]Логинов Б.А.

[1]ФГБУН Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, e-mail: nossov@imp.uran.ru;
[2]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Зеленоград,

Исследован магнитоэлектрический эффект (МЭ) в ламинатных структурах типа композитный магнитострикционный ферромагнетик /сегнетоэлектрик/ композитный магнитострикционный ферромагнетик. Композитные слои получены импульсным лазерным осаждением тонких магнитострикционных пленок состава $Fe_{0.62}Co_{0.19}Ga_{0.19}$ на аморфные ленты. Исследована морфология полученных слоев, зависимости величины магнитоэлектрического эффекта от статических и переменных магнитных полей в диапазоне от 20 Гц до 10 кГц. Экспериментально показано, что нанесение магнитострикционной пленки приводит к уменьшению максимальной величины магнитоэлектрического эффекта во всем исследованном интервале частот.

Ключевые слова: магнитоэлектрический эффект, магнитострикция, аморфные сплавы, сплавы Fe-Co-Ga, тонкие пленки

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

[1]Nosov A.P., [1]Gribov I.V., [1]Moskvina N.A., [1]Druzhinin A.V., [1]Osotov V.I., [2]Loginov B.A.

[1]M.N. Miheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, e-mail: nossov@imp.uran.ru;
[2]National Research University of Electronic Technology MIET, Moscow, Zelenograd

The magnetoelectric effect (ME) in laminated structures of the type graded composite magnetostrictive ferromagnet / ferroelectric / composite magnetostrictive ferromagnet were investigated. Grading of composite layers was carried out by pulsed laser deposition of thin film layers of the $Fe_{0.62}Co_{0.19}Ga_{0.19}$ magnetostrictive material. The morphology of thus obtained layers and magnitude of ME on the *dc* and *ac* magnetic fields were studied in the frequency range from 20 Hz to 10 kHz. It is shown experimentally that grading with the magnetostrictive film lowers the maximum value of ME in the whole frequency range investigated.

Keywords: magnetoelectric effect, magnetostriction, amorphous alloys, Fe-Co-Ga alloys, thin films

В последние годы активно ведутся интенсивные исследования новых физических эффектов для создания устройств магнитоэлектроники нового поколения с улучшенными эксплуатационными характеристиками. В связи с этим большое внимание привлекает магнитоэлектрический эффект (МЭ) в ламинатных структурах типа композитный магнитострикционный ферромагнетик /сегнетоэлектрик/ композитный магнитострикционный ферромагнетик с механически связанными слоями. При помещении такой структуры в переменное магнитное поле H_{ac} наблюдается прямой МЭ за счет магнитострикционной деформации ферромагнитных слоев, которая вследствие пьезоэффекта в сегнетоэлектрическом слое приводит 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. Для всей структуры значение α зависит от пьезомагнитного коэффициента $q = d\lambda/dH_{dc}$, где λ – коэффициент магнитострикции ферромагнитного слоя, H_{dc} – статическое магнитное поле, а также от пьезомодуля d и относительной диэлектрической проницаемости ε сегнетоэлектрического слоя.

Поиск путей повышения величины α является достаточно сложной задачей, поскольку необходимо оптимизовывать характеристики как ферромагнитной, так и сегнетоэлектрической подсистем. При этом, как теоретически показано в [2], использование в МЭ структурах композитных слоев с градиентом свойств по толщине дает возможность увеличить значения α как за счет величины d сегнетоэлектрических слоев, так и за счет величины q ферромагнитных слоев. Экспериментально легче реализовать изменение свойств ферромагнитных

слоев, что было продемонстрировано в [3] для объемных материалов.

Аморфные магнитострикционные сплавы типа «Метглас» (Metglas) [4] очень часто используются в качестве ферромагнитных слоев ламинатных МЭ структур. Достоинством этих сплавов являются большое значение q, малое коэрцитивное поле, большая начальная магнитная проницаемость, положительное значение λ. Для этих сплавов были исследованы изменения свойств при нанесении на них тонких пленок немагнитных металлов [5] и сегнетоэлектриков [6]. Принципиально возможно получение композитных слоев с градиентом свойств по толщине путем нанесения на поверхность сплавов типа «Метглас» пленок магнитострикционных материалов других составов. При этом можно подобрать состав магнитострикционного слоя с отрицательной магнитострикцией, что может привести к увеличению величины q композитного слоя в целом.

В настоящей работе исследован магнитоэлектрический эффект в композитных структурах типа композитный магнитострикционный ферромагнетик /сегнетоэлектрик/ композитный магнитострикционный ферромагнетик с магнитострикционными слоями из аморфных лент сплава типа «Метглас» с пленками $Fe_{0.62}Co_{0.19}Ga_{0.19}$.

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^3. В качестве магнитострикционного сплава типа «Метглас» были использованы аморфные ленты состава 440A [7] (компания «Гаммамет», Екатеринбург, Россия) толщиной 34 мкм без термообработок. Статические измерения магнитострикции были выполнены с использованием тензодатчика. Значения коэффициента магнитострикции насыщения были измерены при двух ориентациях статического магнитного поля H_{dc}: вдоль ($\lambda_{11} = +20\times10^{-6}$/Э) и поперек ($\lambda_{12} = -15\times10^{-6}$/Э) направления прокатки. Из этих данных было получено значение пьезомагнитного коэффициента $q = q_{11} + q_{12} = d\lambda_{11}/dH_{dc} + d\lambda_{12}/dH_{dc} = +0.46\times10^{-6}$/Э.

Композитную структуру магнитострикционного слоя получали нанесением на поверхность аморфной ленты состава 440A тонких пленок $Fe_{0.62}Co_{0.19}Ga_{0.19}$ методом импульсного лазерного осаждения. Объемные сплавы системы Fe-Ga (галфенол) характеризуются большими величинами отрицательного коэффициента магнитострикции. Легирование эти сплавов кобальтом позволяет еще более увеличить значение λ. По данным работы [8] для тонких пленок сплавов Fe-Co-Ga максимальное значение λ имел состав $Fe_{0.62}Co_{0.19}Ga_{0.19}$. Пленки толщиной 25 нм наносили с использованием эксимерного лазера CL 7050 (компания «Оптисистемы», г. Троицк, Московская область, Россия [9]) при температуре аморфной ленты 200 °C.

Для получения изображения морфологии поверхности подложек и нанесенных на них пленок использовался сканирующий зондовый микроскоп СММ-2000 в высоковакуумной системе «Plasmoscope-2M» ЦКП МСТиЭКБ МИЭТ (г. Зеленоград, Россия). Использовался полуконтактный режим атомно-силовой микроскопии (АСМ) и кантилеверы с радиусом острия менее 10 нм.

Были исследованы трехслойные ламинатные структуры, в которых средним сегнетоэлектрическим слоем являлась пьезоекрамика PZT. В качестве верхнего и нижнего слоев использовали либо аморфные магнитострикционные ленты состава 440A (далее – образцы 440A) либо аморфные магнитострикционные ленты состава 440A с нанесенной пленкой $Fe_{0.62}Co_{0.19}Ga_{0.19}$ (далее – образцы 440A/FeCoGa). Структуру формировали склеиванием слоев клеем на основе цианокрилата. В работе [10] было показано, что в трехслойных структурах величина МЭ больше, чем в двухслойных.

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

Все измерения были выполнены при комнатной температуре.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 представлено изображение поверхности аморфной ленты 440A без пленки. На исследованной поверхности отсутствуют явно выраженные элементы рельефа, а среднеквадратическое значение шероховатости Rq равно 0,07 нм.

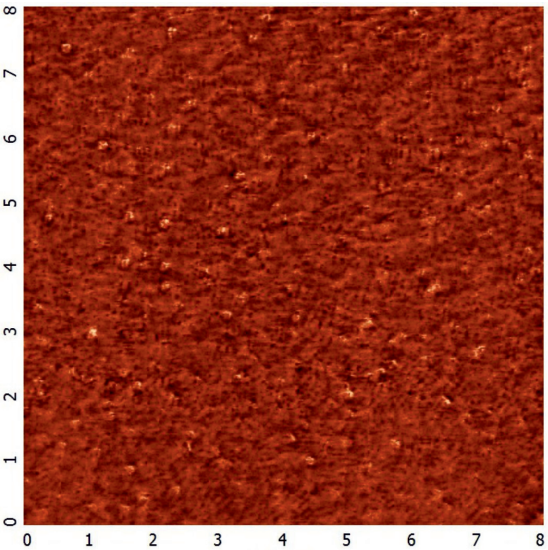

Рис. 1. АСМ изображение поверхности аморфной ленты 440A без пленки. Цифры вдоль горизонтальной и вертикальной осей – расстояние в микронах

На рис. 2 представлено АСМ изображение поверхности образца 440А/FeCoGa. После нанесения пленки среднеквадратичное значение шероховатости Rq увеличилось до величины 4,80 нм за счет формирования в процессе роста характерных островков (включений) овальной формы.

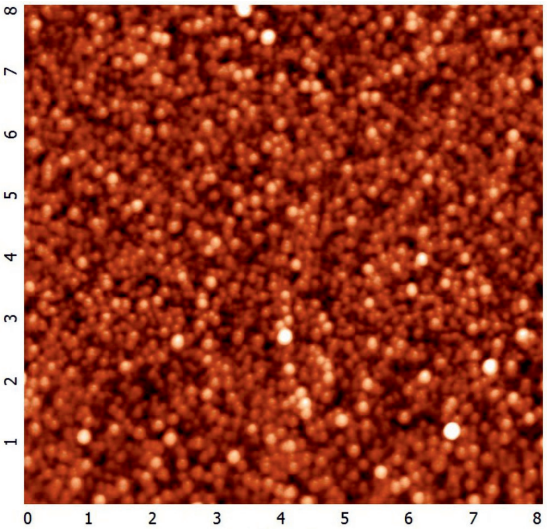

Рис. 2. АСМ изображение поверхности образца 440А/FeCoGa. Цифры вдоль горизонтальной и вертикальной осей – расстояние в микронах

Типичные характеристики включений: высота – порядка 20-25 нм, ширина у основания – порядка 0,2 мкм, расстояние между включениями – порядка 0,4-0,5 мкм. Формирование островковой структуры связано с механизмом роста пленки типа Странски-Крастанов (Stranski–Krastanov). Поскольку температура роста была достаточно низкой (200 °C) то энергия поверхностной диффузии атомов пленки оказалась недостаточной для послойного роста по механизму Франкван дер Мерве (Frank–van der Merve).

На рис. 3 приведены результаты, полученные для структуры с аморфной лентой 440А на частотах 110, 500 Гц и 10 кГц. На всех зависимостях $\alpha(H_{dc})$ имеется максимум при $H_{dc} \sim 60$ Э, соответствующий максимуму полевой зависимости коэффициента q.

Положение максимума не зависит от частоты, в то время величина α в максимуме сильно изменяется с частотой. С ростом H_{dc} значения α постепенно уменьшаются и становятся очень малыми при $H > 250$Э. Ход зависимости $\alpha(H)$ качественно соответствует виду зависимости $q(H)$.

Качественно подобные зависимости $\alpha(H)$ были получены и для структур с аморфной лентой с пленкой $Fe_{0.62}Co_{0.19}Ga_{0.19}$. Нанесение пленки не изменяло положение максимумов при $H \sim 60$ Э на зависимостях $\alpha(H)$, однако влияло на величину максимального значения α. Сравнительные данные для частотных зависимостей максимальной величины α приведены на рис. 4 из которого следует, что нанесение пленки приводит к уменьшению максимального значения α для всего исследованного диапазона частот.

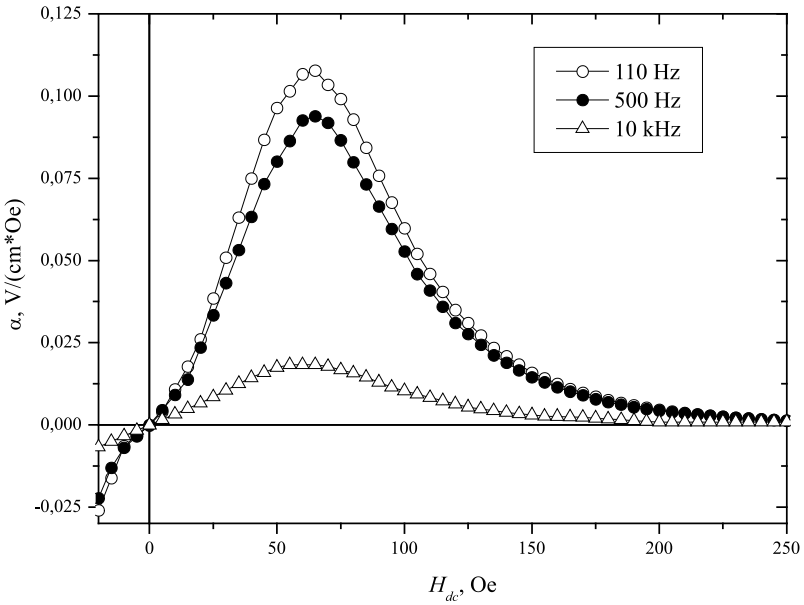

Рис. 3. Зависимости МЭКН от статического магнитного поля для значений частот переменного магнитного поля 110 Гц, 500 Гц и 10 кГц. Результаты для структуры с аморфной лентой 440А

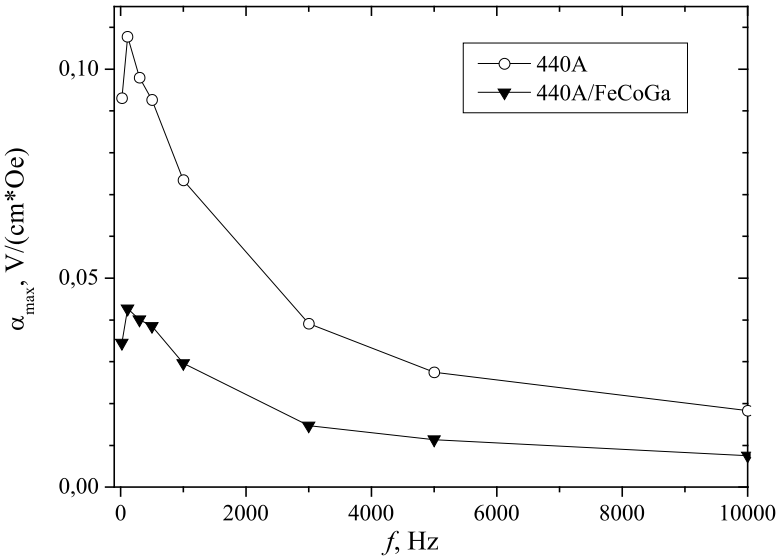

Рис. 4. Сравнение частотных зависимостей максимальной величины МЭКН для структур с магнитострикционными слоями столько с аморфной лентой (440A) и аморфной лентой с пленкой $Fe_{0.62}Co_{0.19}Ga_{0.19}$ (440A/FeCoGa)

Для ламинатных структур величина МЭКН пропорциональна отношению d_{11}/ε_{11}. В случае пьезокерамики типа PZT относительная диэлектрическая проницаемость ε_{11} слабо зависит от частоты в диапазоне десятков герц до 10 кГц. Поэтому наблюдающиеся для наших образцов изменения МЭКН с частотой качественно могут быть объяснены частотными изменениями характеристик ферромагнитных слоев. Коэффициент магнитомеханической связи определяется как $k_m = (4\pi\lambda'\mu_r'/E)^{1/2}$, где λ' – коэффициент магнитострикции в переменном магнитном поле, который, в свою очередь, пропорционален q, μ_r' – действительная часть относительной магнитной проницаемости, E – модуль Юнга [13]. Наблюдаемое уменьшение максимального значения α для всего исследованного диапазона частот для структур с пленкой $Fe_{0.62}Co_{0.19}Ga_{0.19}$, по-видимому, связано с уменьшением k_m за счет μ_r' из-за возникновения механических напряжений в системе аморфная лента/пленка.

Заключение

Исследован магнитоэлектрический эффект в ламинатных структурах типа композитный магнитострикционный ферромагнетик /сегнетоэлектрик/ композитный магнитострикционный ферромагнетик с композитными магнитострикционными слоями, полученными импульсным лазерным осаждением тонких пленок $Fe_{0.62}Co_{0.19}Ga_{0.19}$ с отрицательным коэффициентом магнитострикции на аморфные ленты с положительным коэффициентом магнитострикции. Для всего диапазона частот от 20 Гц до 10 кГц нанесение тонких пленок приводит к уменьшению максимальной величины МЭКН. Результаты могут представлять интерес для разработки магнитоэлектрических датчиков статических и переменных магнитных полей на основе ламинатных структур.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Спин», № 01201463330). Исследования морфологии поверхности образцов методом АСМ выполнены в рамках проекта РФФИ № 15-02-01782-2015.

Список литературы

1. Petrov V.M., Srinivasan G., and T.A. Galkina. // J. Appl. Phys. v.104 (2008), P. 113910.

2. Petrov V.M. and G. Srinivasan. // Phys. Rev. B. v. 78 (2008) P. 184421.

3. Yang S., Park C., Cho K., and S. Priya. // J. Appl. Phys. v.108 (2010) P.093706.

4. Tech. Bulletin ref:2605SA106192009 (Metglas Inc., Conway, SC), 2009.

5. Passamani E.C., Larica C., P.S. Moscon, P. Mendoza Zelis, and F. H. Sanchez. // J. Appl. Phys. v.110 (2010) P. 043906.

6. Hu B., Chen Y., Yang A., 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.

7. http://www.gammamet.ru/ru/gm440a.htm

8. Jen S.U., Tsai T.L., Kuo P.C., W.L. Chi, and W.C. Cheng. // J.Appl.Phys. v.107 (2010) P.013914.

9. http://www.optosystems.ru/eng/index.php

10. Sreenivasulu G., Petrov V.M., L.Y. Fetisov, Y.K. Fetisov, and G. Srinivasan. // Physical Review B. v. 86 (2012) P. 214405.