



MAGNETOELECTRIC SENSORS OF MAGNETIC FIELD BASED ON LAMINATED STRUCTURES WITH COMPOSITE MAGNETOSTRICTIVE LAYERS

A. P. Nosov^{1*}, I. V. Gribov¹, N. A. Moskvina¹, A. V. Druzhinin¹, V. I. Osotov¹,
V. A. Bernalov², B. A. Loginov²

¹*M.N. Miheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
18, S. Kovalevskoy st., Ekaterinburg, Russian Federation*

²*National Research University of Electronic Technology MIET, Moscow, Zelenograd, Russian Federation*

*Corresponding author. E-mail: nossov@imp.uran.ru; address for correspondence: ul. S. Kovalevskoy 18,
620990, Ekaterinburg, Russia. Tel.: +7 (343) 374 79 22; fax: +7 (343) 374 52 44.

The magnetoelectric effect (ME) in three-layered laminated structures of the “composite magnetostrictive ferromagnetic material / ferroelectric / composite magnetostrictive ferromagnetic material” type is investigated. The composite magnetostrictive ferromagnetic material consists of “Metglas”-type amorphous ribbons on which magnetostrictive Fe_{0.72}Ga_{0.28} or Fe_{0.62}Co_{0.19}Ga_{0.19} thin films are deposited by pulsed laser deposition. The ME is investigated for *dc* and *ac* magnetic fields in the frequency range from 20 Hz to 10 kHz. It is shown experimentally that the deposition of the Fe_{0.72}Ga_{0.28} films increases the maximum value of the ME in laminated structures in the whole frequency range investigated, while the deposition of the Fe_{0.62}Co_{0.19}Ga_{0.19} films decreases this value. The laminated structures with Fe_{0.72}Ga_{0.28} films operating under excitation with the frequency of 110 Hz are the most appropriate for applications in magnetic nondestructive testing.

Keywords: nondestructive testing, magnetic field sensor, magnetoelectric effect, amorphous alloy, thin films, galphenol.

DOI: 10.17804/2410-9908.2016.5.030-038

References

1. Romashev L., Rinkevich A., Yuvchenko A., Burkhanov A. Magnetic field sensors based in Fe/Cr superlattices. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2001, vol. 91, iss. 1–2, pp. 30–33. DOI: 10.1016/S0924-4247(01)00482-4.
2. Naumova L.I., Milyaev M.A., Chernyshova T.A., Proglyado V.V., Kamenskii I.Yu., Ustinov V.V. Hysteresis-free spin valves with a noncollinear configuration of magnetic anisotropy. *Physics of the Solid State*, vol. 56, iss. 6, pp. 1125–1130. DOI: 10.1134/S1063783414060274.
3. Lawes G., Srinivasan G. Introduction to magnetoelectric coupling and multiferroic films. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2011, vol. 44, pp. 243001 (22). DOI:10.1088/0022-3727/44/24/243001.
4. Petrov V.M., Srinivasan G. Enhancement of magnetoelectric coupling in functionally graded ferroelectric and ferromagnetic bilayers. *Phys. Rev. B*, 2008, vol. 78, pp. 184421 (8). DOI: 10.1103/PhysRevB.78.184421.
5. Mandal S.K., Sreenivasulu G., Petrov V.M., Srinivasan G. Flexural deformation in a compositionally stepped ferrite and magnetoelectric effects in a composite with piezoelectrics. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, vol. 96, pp. 192502 (3). DOI: 10.1063/1.3428774.
6. Magnetic Alloy 2605SA1 (iron-based). *Tech. Bulletin*, ref: 2605SA106192009. Metglas Inc., Conway, SC, 2009.
7. Passamani E.C., Larica C., Moscon P.S., Mendoza Zelis P., Sanchez F.H. Out-of-plane anisotropy and low field induced magnetic domain reorientation in Al/Metglas-2605S2/Al trilayer sensors. *J. Appl. Phys.*, 2010, vol. 110, pp. 043906 (7). DOI: 10.1063/1.3622339.
8. *Gammamet®. Research and Production Enterprise.* (In Russian). Available at: <http://www.gammamet.ru/ru/gm440a.htm>



9. Atulasimha Jayasimha, Flatau Alison B. Topical Review. A review of magnetostrictive iron–gallium alloys. *Smart Materials and Structures*, 2011, vol. 20, no. 4, pp. 043001 (15). DOI:10.1088/0964-1726/20/4/043001.
10. Jen S.U., Tsai T.L., Kuo P.C., Chi W.L., Cheng W. C. Magnetostrictive and structural properties of FeCoGa films. *J. Appl. Phys.*, 2010, vol. 107, iss. 1, pp. 013914 (4). DOI: 10.1063/1.3284962.
11. *OptoSystems*. The leading manufacturer of lasers for medicine, science and technology in Russia. (In Russia). Available at: <http://www.optosystems.ru/eng/index.php>.
12. Sreenivasulu G., Petrov V.M., Fetisov L.Y., Fetisov Y.K., Srinivasan G. Magnetoelectric interactions in layered composites of piezoelectric quartz and magnetostrictive alloys. *Physical Review B*, 2012, vol. 86, pp. 214405 (7). DOI: 10.1103/PhysRevB.86.214405.
13. Van der Burgt C.M. Dynamical parameters in the magneto-strictive excitation of extensional and torsional vibrations in ferrites. *Philips Res. Rep.*, 1953, vol. 8, pp. 91–132.
14. Morley N.A., Javed A., Gibbs M.R. Effect of a forming field on the magnetic and structural properties of thin Fe–Ga films. *J. Appl. Phys.*, 2009, vol. 105, pp. 07A912 (4). DOI: 10.1063/1.3059612.
15. Callen Herbert B., Goldberg N. Magnetostriction of Polycrystalline Aggregates. *J. Appl. Phys.*, 1965, vol. 36, pp. 976–977. DOI: 10.1063/1.1714285.
16. Wuttig Manfred, Dai Liyang, Cullen J. Elasticity and magnetoelasticity of Fe–Ga solid solutions. *App. Phys. Lett.*, 2002, vol. 80, pp. 1135 (3). DOI: 10.1063/1.1450045.



Подана в журнал: 11.10.2016
УДК 537.633.9
DOI: 10.17804/2410-9908.2016.5.030-038

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ ЛАМИНАТНЫХ СТРУКТУР С КОМПОЗИТНЫМИ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫМИ СЛОЯМИ

А. П. Носов^{1*}, И. В. Грибов¹, Н. А. Москвина¹, А. В. Дружинин¹, В. И. Осотов¹,
В. А. Беспалов², Б. А. Логинов²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов
имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, 620990, ул. С. Ковалевской 18,
Екатеринбург, Россия

²Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Зеленоград, Россия

*Ответственный автор. Электронная почта: nossov@imp.uran.ru; адрес для переписки: ул. С. Ковалевской, 18,
620990, Екатеринбург, Россия; Телефон: +7 (343) 374-79-22; факс: +7 (343) 374-52-44.

Исследован магнитоэлектрический эффект (МЭ) в трехслойных ламинатных структурах типа композитный магнитострикционный ферромагнетик / сегнетоэлектрик / композитный магнитострикционный ферромагнетик. Композитный магнитострикционный ферромагнетик состоял из ленты аморфного сплава типа «Метглас» на поверхность которой импульсным лазерным осаждением были нанесены тонкие магнитострикционные пленки составов $Fe_{0,72}Ga_{0,28}$ или $Fe_{0,62}Co_{0,19}Ga_{0,19}$. Исследованы зависимости магнитоэлектрического эффекта в ламинатных структурах от статических и переменных магнитных полей в диапазоне частот от 20 Гц до 10 кГц. Экспериментально показано, что нанесение магнитострикционных пленок состава $Fe_{0,72}Ga_{0,28}$ приводит к увеличению, а пленок состава $Fe_{0,62}Co_{0,19}Ga_{0,19}$ – к уменьшению максимальной величины магнитоэлектрического эффекта в ламинатных структурах во всем исследованном интервале частот. Для решения задач магнитного неразрушающего контроля наилучшую чувствительность могут обеспечить ламинатные структуры с магнитострикционными пленками состава $Fe_{0,72}Ga_{0,28}$ в условиях возбуждения переменным полем с частотой 110 Гц.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, датчик магнитного поля, магнитоэлектрический эффект, аморфный сплав, тонкие пленки, галфенол.

1. Введение

Магнитные методы играют важную роль в решении актуальных проблем неразрушающего контроля, прогнозировании ресурса и испытаний современных конструкционных и функциональных материалов. Ключевые параметры приборов магнитного неразрушающего контроля определяются характеристиками используемых датчиков, действие которых основано на различных физических эффектах. В последние годы при регистрации полей рассеяния дефектов активно используют датчики, принцип действия которых основан на эффекте гигантского магнитосопротивления [1], а также спиновые клапаны [2]. Между тем, для этих целей также может быть использован магнитоэлектрический эффект (МЭ) в композитных планарных структурах с механически связанными слоями из магнитострикционного ферромагнитного и сегнетоэлектрического материалов [3]. Если такую структуру поместить в статическое магнитное поле dH_{ac} , то в присутствии переменного магнитного поля dH_{ac} будет наблюдаться прямой МЭ. При воздействии магнитных полей за счет магнитострикции в ферромагнитном слое возникнет механическая деформация, которая приведет к генерации зарядов и возникновению электрического поля dE на поверхности структуры вследствие пьезоэлектрических свойств сегнетоэлектрического слоя. Величина МЭ характеризуется магни-



тоэлектрическим коэффициентом по напряжению (МЭКН), который определяют как $\alpha = dE/H_{ac} = dV / (tdH_{ac})$, где dV – величина возникающего электрического напряжения, t – толщина сегнетоэлектрического слоя. Значение α определяется физическими характеристиками как ферромагнитного слоя, в частности пьезомагнитным коэффициентом $q = d\lambda/dH$, где λ – коэффициент магнитострикции; H – статическое магнитное поле, так и сегнетоэлектрического слоя, в частности пьезомодулем d и относительной диэлектрической проницаемостью ε . При использовании МЭ-структур в качестве датчиков магнитных полей в магнитном неразрушающем контроле важна большая величина МЭКН, которая может быть достигнуто оптимизацией характеристик магнитострикционной подсистемы за счет величины q . Теоретически это было показано в работе [4]. Для композитных объемных структур с ферромагнитными слоями на основе тонких лент эти результаты получили экспериментально подтверждение в работе [5].

В качестве магнитострикционных слоев композитных МЭ-структур очень часто используются аморфные магнитострикционные ленты из сплавов класса «Метглас» (Metglas) [6]. Это класс материалов характеризуется большим значением q , малым коэрцитивным полем, большой начальной магнитной проницаемостью, положительным значением λ . Принципиально возможно улучшение магнитострикционных свойств аморфных лент этого класса нанесением тонких пленок магнитострикционных материалов, имеющих другой знак коэффициента магнитострикции, т.е. получением композитных структур с градиентом q по толщине. Ранее были исследованы возможности изменения магнитных свойств аморфных лент сплавов типа «Метглас» при нанесении на них тонких пленок немагнитных металлов [7].

В настоящей работе изучен МЭКН в трехслойных ламинатных структурах типа композитный магнитострикционный ферромагнетик /сегнетоэлектрик/ композитный магнитострикционный ферромагнетик на основе ферромагнитных магнитострикционных аморфных лент сплава типа «Метглас» с магнитострикционными пленками $Fe_{0,72}Ga_{0,28}$ и $Fe_{0,62}Co_{0,19}Ga_{0,19}$.

2. Материал и методика

В качестве сегнетоэлектрических слоев использовали пластины сегнетоэлектрической керамики PZT (#851, APC International, Pennsylvania, USA) с размерами $5 \times 5 \times 0,3$ мм³. В качестве магнитострикционного сплава класса «Метглас» использовали аморфные ленты состава 440А [8] (компания «Гаммамет», Екатеринбург, Россия) толщиной 34 мкм без термообработки. Статические измерения магнитострикции были проведены с использованием тензодатчика. Измеряли значения коэффициента магнитострикции 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 лент состава 440А было получено значение $q = +0.46 \times 10^{-6}/\text{Э}$.

Композитную структуру магнитострикционного слоя получали нанесением на поверхность аморфной ленты состава 440А тонких пленок $Fe_{0,72}Ga_{0,28}$ или $Fe_{0,62}Co_{0,19}Ga_{0,19}$ методом импульсного лазерного осаждения. Выбор этих составов обусловлен тем, что для объемных материалов системы $Fe_{1-x}Ga_x$ (галфенол) максимальную величину коэффициента магнитострикции имеют сплавы с $X = 0,19$ или $0,28$ [9]. Магнитострикция в сплавах $Fe_{1-x}Ga_x$ отрицательна. Легирование галфенола кобальтом позволяет увеличить значение λ . По данным работы [10] 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 [11]).

Были исследованы трехслойные ламинатные структуры, в которых средним сегнетоэлектрическим слоем являлась пьезокерамика PZT. В качестве верхнего и нижнего слоев использовали либо аморфные магнитострикционные ленты 440А (далее – образцы 440А) либо аморфные магнитострикционные ленты 440А с пленкой $Fe_{0,72}Ga_{0,28}$ (далее – образцы



440A/FeGa), либо аморфные магнитоэлектрические ленты 440A с нанесенной пленкой $\text{Fe}_{0,62}\text{Co}_{0,19}\text{Ga}_{0,19}$ (далее – образцы 440A/FeCoGa). Ламинатную структуру формировали склеиванием слоев клеем на основе цианокрилата. Ранее в [12] было показано, что в трехслойных структурах величина МЭКН больше, чем в двухслойных.

Для исследования морфологии поверхности полученных структур использовался сканирующий зондовый микроскоп СММ-2000 (Завод ПРОТОН, г. Зеленоград, Россия). Измерения проводили методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) в полуконтактном режиме с использованием кантилеверов с типичным радиусом острия менее 10 нм.

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

Все измерения были выполнены при комнатной температуре.

3. Результаты и обсуждение

АСМ исследования поверхности лент 440A до нанесения пленок не выявили явно выраженных элементов рельефа. Среднеквадратичное значение шероховатости Rq составляло 0,07 нм.

На рис. 1 представлено АСМ изображение поверхности образца 440A/FeGa. После нанесения пленки среднеквадратичное значение шероховатости Rq увеличилось до величины 4,80 нм за счет формирования в процессе роста характерных островков (включений) овальной формы.

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 °С) то энергия поверхностной диффузии атомов пленки оказалась недостаточной для послойного роста по механизму Франка–ван дер Мерве (Frank–van der Merve).

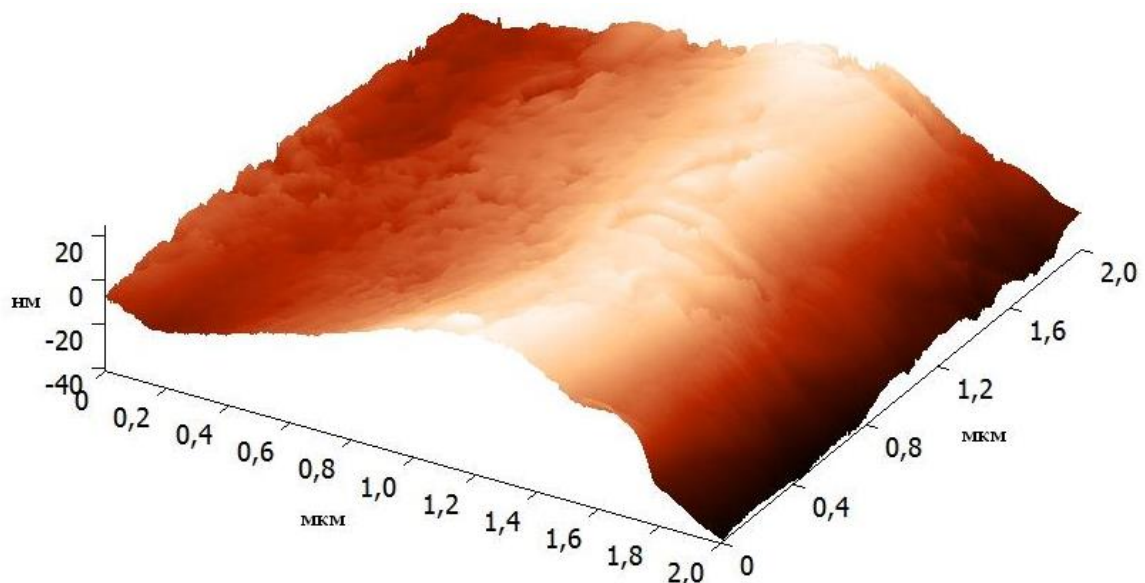


Рис. 1. АСМ изображение поверхности образца 440A/FeGa.



На рис. 2 приведены результаты, полученные для структуры с аморфной лентой 440А на частотах 110, 500 Гц и 10 кГц. На всех зависимостях $\alpha(H)$ имеется максимум при $H \approx 58$ Э, соответствующий максимуму полевой зависимости коэффициента q . Положение максимума практически не зависит от частоты, в то время величина α_{max} при $H \approx 58$ Э сильно изменяется с частотой. С ростом H значения α постепенно уменьшаются и становятся очень малыми при $H > 200$ Э. Ход зависимости $\alpha(H)$ качественно соответствует виду зависимости $q(H)$. Для структур с пленками $Fe_{0,72}Ga_{0,28}$ или $Fe_{0,62}Co_{0,19}Ga_{0,19}$ были получены аналогичные по форме зависимости $\alpha(H)$. Нанесение пленок не изменяло положение максимумов зависимостей $\alpha_{max}(f)$ при $H \approx 58$ Э, однако влияло на величину максимального значения α во всем исследованном частотном диапазоне. Для решения задач магнитного неразрушающего контроля существенно, что величина МЭКН линейно зависит от H в области полей 20–50 Э. Кроме того, зависимости $\alpha(H)$ нечетны по полю, что позволяет по знаку МКЭН судить об ориентации датчика относительно H .

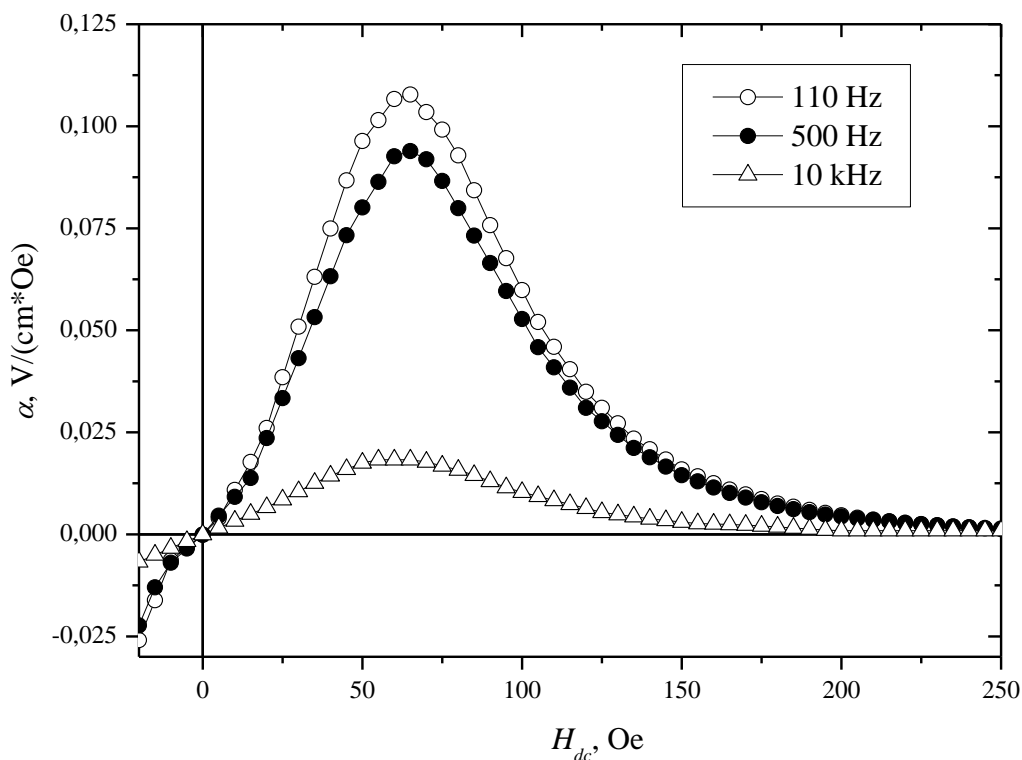


Рис. 2. Зависимости МЭКН от статического магнитного поля для значений частот переменного магнитного поля 110 Гц, 500 Гц и 10 кГц. Данные для структуры с аморфной лентой 440А

Частотные зависимости МЭКН в поле $H = 58$ Э для исследованных образцов приведены на рис. 3, из которого видно, что нанесение пленки состава $Fe_{0,72}Ga_{0,28}$ приводит к небольшому росту $\alpha_{max}(f)$ во всем частотном диапазоне, а нанесение пленки состава $Fe_{0,62}Co_{0,19}Ga_{0,19}$ приводит к существенному уменьшению значений $\alpha_{max}(f)$.

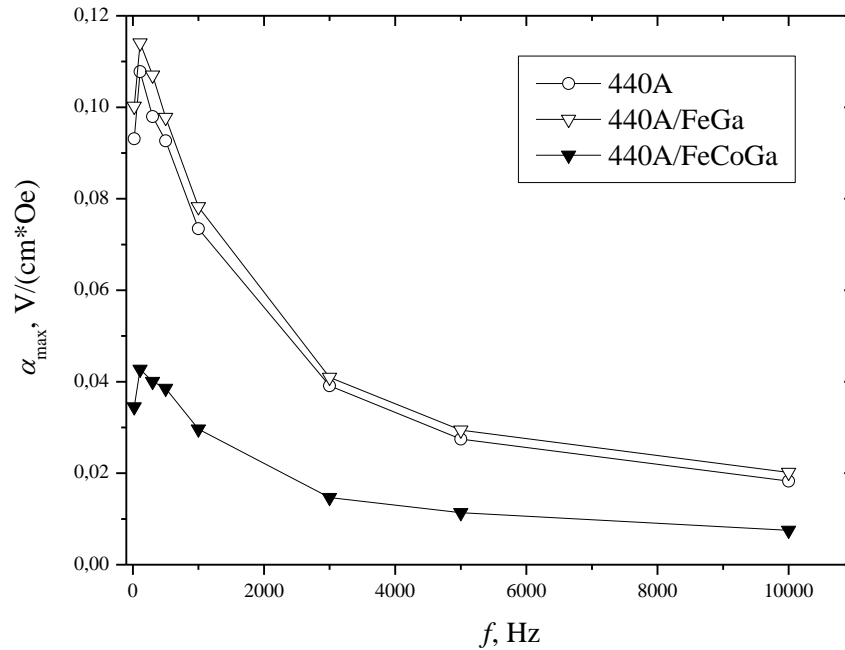


Рис. 3. Сравнение частотных зависимостей максимальной величины МЭКН для структур с магнитострикционными слоями только с аморфной лентой (440А) и аморфными лентами с пленками Fe_{0,72}Ga_{0,28} (440А/FeGa) и Fe_{0,62}Co_{0,19}Ga_{0,19} (440А/FeCoGa). H= 58 Э

Для ламинатных структур величина МЭКН пропорциональна отношению d_{11}/ϵ_{11} . Для пьезокерамики типа PZT относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_{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 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 увеличение максимального значения α 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 λ в аморфном сплаве и пленке.

Сильное уменьшение максимального значения α для структур с пленкой Fe_{0,62}Co_{0,19}Ga_{0,19}, скорее всего, может быть связано с влиянием текстуры. Согласно данным работы [10] в структуре пленок системы Fe-Co-Ga, выращенных на стекле, наблюдается сосуществование объемно-центрированной кубической и объемно-центрированной тетрагональной фаз. При увеличении концентрации Co степень тетрагональных искажений уменьшается и имеет место формирование текстуры типа [110]. Формирование аналогичной текстуры также наблюдалось и в работе [14], в которой исследовали пленки системы Fe-Ga, полученные на кремнии с естественным слоем окисла. В пленках с текстурой типа [110] максимальное значение магнитострикции насыщения λ_S может быть оценено из выражения [15]

$$\lambda_S = \alpha \lambda_{100} + (1 - \alpha) \lambda_{111},$$

где λ_{100} и λ_{111} – соответствующие значения для монокристалла; $\alpha = (2/5) - \ln C/8$, а $C = 2C_{44}/(C_{11} - C_{12})$, где C_{44} , C_{11} и C_{12} – соответствующие упругие модули. По данным [16], значение α для пленок состава Fe-Co-Ga может составлять 0,095. В этом случае первое слагаемое в формуле будет существенно меньше второго и величина λ_S будет в основном определяться λ_{111} и сильно зависеть от текстуры пленки. Для выяснения влияния этих факторов будут проведены дополнительные структурные исследования пленок.



Из данных рис. 2. и 3 можно сделать вывод, что для решения задач неразрушающего контроля предпочтительно использование композитных планарных структурах на основе ферромагнитных магнитоэлектрических аморфных лент сплава типа «Метглас» с пленкой $\text{Fe}_{0,72}\text{Ga}_{0,28}$ в условиях возбуждения переменным полем с частотой 110 Гц.

4. Заключение

Исследован магнитоэлектрический эффект (МЭ) в ламинатных структурах ферромагнетик/сегнетоэлектрик/ферромагнетик с композитными ферромагнитными магнитоэлектрическими слоями, полученными импульсным лазерным осаждением тонких пленок $\text{Fe}_{0,72}\text{Ga}_{0,28}$ и $\text{Fe}_{0,62}\text{Co}_{0,19}\text{Ga}_{0,19}$ с отрицательной магнитоэлектрической на аморфные ленты типа «Метглас» с положительной магнитоэлектрической. Нанесение тонких пленок $\text{Fe}_{0,72}\text{Ga}_{0,28}$ приводит к увеличению максимальной величины МЭН в ламинатных структурах во всем исследованном диапазоне частот, что связано с увеличением коэффициента магнитоэлектрической связи структуры в целом за счет роста пьезомагнитного коэффициента в системе аморфная лента/тонкая пленка. Нанесение тонких пленок $\text{Fe}_{0,62}\text{Co}_{0,19}\text{Ga}_{0,19}$ приводит к уменьшению максимальной величины МЭН в ламинатных структурах. Это, по-видимому, обусловлено влиянием текстуры пленки на пьезомагнитный коэффициент. Для решения задач магнитного неразрушающего контроля наилучшую чувствительность обеспечивают ламинатные структуры с магнитоэлектрической пленкой $\text{Fe}_{0,72}\text{Ga}_{0,28}$ в условиях возбуждения переменным полем с частотой 110 Гц.

Благодарность

Работа выполнена в основном, на средства субсидии, выделенной на финансирование проектов Комплексной программы Уральского отделения РАН (проект № 15-9-2-30), и частично в рамках проекта РФФИ 15-02-01782.

Литература

1. Magnetic field sensors based in Fe/Cr superlattices / L. Romashev, A. Rinkevich, A. Yuvchenko, A. Burkhanov // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2001. – Vol. 91, iss. 1–2. – P. 30–33. – DOI: 10.1016/S0924-4247(01)00482-4.
2. Hysteresis-free spin valves with a noncollinear configuration of magnetic anisotropy / L. I. Naumova, M. A. Milyaev, T. A. Chernyshova, V. V. Proglyado, I. Yu. Kamenskii, V. V. Ustinov // *Physics of the Solid State*. – Vol. 56, iss. 6. – P. 1125–1130. – DOI: 10.1134/S1063783414060274.
3. Lawes G., Srinivasan G. Introduction to magnetoelectric coupling and multiferroic films // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2011. – Vol. 44. – P. 243001 (22). – DOI:10.1088/0022-3727/44/24/243001.
4. Petrov V. M., Srinivasan G. Enhancement of magnetoelectric coupling in functionally graded ferroelectric and ferromagnetic bilayers // *Phys. Rev. B*. – 2008. – Vol. 78. – P. 184421 (8). – DOI: 10.1103/PhysRevB.78.184421.
5. Flexural deformation in a compositionally stepped ferrite and magnetoelectric effects in a composite with piezoelectrics / S. K. Mandal, G. Sreenivasulu, V. M. Petrov, G. Srinivasan // *Appl. Phys. Lett.* – 2010. – Vol. 96. – P. 192502 (3). – DOI: 10.1063/1.3428774.
6. Magnetic Alloy 2605SA1 (iron-based) // *Tech. Bulletin*. Ref: 2605SA106192009. – Metglas Inc., Conway, SC, 2009.
7. Out-of-plane anisotropy and low field induced magnetic domain reorientation in Al/Metglas-2605S2/Al trilayer sensors / E. C. Passamani, C. Larica, P. S. Moscon, P. Mendoza Zelis, F. H. Sanchez // *J. Appl. Phys.* – 2010. – Vol. 110. – P. 043906 (7). – DOI: 10.1063/1.3622339.



8. ГМ440А. Магнитные свойства кольцевых магнитопроводов из аморфных и нанокристаллических сплавов в защитных контейнерах [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.gammamet.ru/ru/gm440a.htm>.
9. Atulasimha Jayasimha, Flatau Alison B. Topical Review. A review of magnetostrictive iron–gallium alloys // *Smart Materials and Structures*. – 2011. – Vol. 20, no. 4. – P. 043001 (15). – DOI:10.1088/0964-1726/20/4/043001.
10. Magnetostrictive and structural properties of FeCoGa films / S. U. Jen, T. L. Tsai, P. C. Kuo, W. L. Chi, W. C. Cheng // *J. Appl. Phys.* – 2010. – Vol. 107, iss. 1. – P. 013914 (4). – DOI: 10.1063/1.3284962.
11. OptoSystems. The leading manufacturer of lasers for medicine, science and technology in Russia. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.optosystems.ru/eng/index.php>.
12. Magnetoelectric interactions in layered composites of piezoelectric quartz and magnetostrictive alloys / G. Sreenivasulu, V. M. Petrov, L. Y. Fetisov, Y. K. Fetisov, G. Srinivasan // *Physical Review B*. – 2012. – Vol. 86. – P. 214405 (7). – DOI: 10.1103/PhysRevB.86.214405.
13. Van der Burgt C. M. Dynamical parameters in the magneto-strictive excitation of extensional and torsional vibrations in ferrites // *Philips Res. Rep.* – 1953. – Vol. 8. – P. 91–132.
14. Morley N. A., Javed A., Gibbs M. R. Effect of a forming field on the magnetic and structural properties of thin Fe–Ga films // *J. Appl. Phys.* – 2009. – Vol. 105. – P. 07A912 (4). – DOI: 10.1063/1.3059612.
15. Callen Herbert B., Goldberg N. Magnetostriction of Polycrystalline Aggregates // *J. Appl. Phys.* – 1965. – Vol. 36. – P. 976–977. – DOI: 10.1063/1.1714285.
16. Wuttig Manfred, Dai Liyang, Cullen J. Elasticity and magnetoelasticity of Fe–Ga solid solutions // *App. Phys. Lett.* – 2002. – Vol. 80. – P. 1135 (3). – DOI: 10.1063/1.1450045.