

**Received:** 21.10.2019

**Revised:** 21.11.2019

**Accepted:** 20.12.2019





**DOI:** 10.17804/2410-9908.2019.6.077-086

## SENSORS OF LOW-FREQUENCY MAGNETIC FIELDS BASED ON FeGa-FeCoGa/METGLAS/QUARTZ STRUCTURES

A. P. Nosov<sup>1, 2, a)\*</sup>, I. V. Gribov<sup>1, b)</sup>, N. A. Moskvina<sup>1, c)</sup>,  
A. V. Druzhinin<sup>1, d)</sup>, and S. S. Dubinin<sup>1, e)</sup>

<sup>1</sup>*M. N. Miheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
18 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg, 620108, Russia*

<sup>2</sup>*B. N. Yeltsin Ural Federal University,  
19 Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russia*

- a)  <https://orcid.org/0000-0003-1475-0059>  nossov@imp.uran.ru;  
b)  <https://orcid.org/0000-0002-5067-2281>  gri@imp.uran.ru;  
c)  <https://orcid.org/0000-0003-4285-0399>  nat@imp.uran.ru;  
d)  <https://orcid.org/0000-0001-9944-096X>  druzhinin@imp.uran.ru;  
e)  Dubinin\_S\_S@imp.uran.ru

\*Corresponding author. E-mail: nossov@imp.uran.ru

Address for correspondence: ul. S. Kovalevskoi, 18, 620108, Ekaterinburg, Russian Federation  
Tel.: +7 (343) 374 79 22; fax: +7 (343) 374 52 44

The paper experimentally demonstrates the possibility of recording low-frequency (20 Hz to 10 kHz) magnetic fields in laminated structures of the *composite magnetostrictive thin-film ferromagnet / piezoelectric / magnetostrictive ferromagnet* type. Quartz single crystals are used as the piezoelectric material. The composite thin-film-based magnetostrictive ferromagnet is obtained by pulsed laser deposition of magnetostrictive Fe<sub>0.72</sub>Ga<sub>0.28</sub> or Fe<sub>0.62</sub>Co<sub>0.19</sub>Ga<sub>0.19</sub> thin-film layers on the surface of Metglas-type amorphous ribbons. The possibility of detecting both *dc* and *ac* magnetic fields in the frequency range from 20 Hz to 10 kHz by measuring the magnetoelectric voltage coefficient (MEVC) in laminated structures is demonstrated experimentally. The influence of the composition of the thin film layer on magnetic noise in the frequency range of 0.5 to 14 Hz is studied. It is shown that the deposition of thin films improves neither the maximum value of MEVC nor the coefficient of linearity at “high” (20 to 50 Oe) magnetic fields in the whole frequency range under study. However, the deposition of Fe<sub>0.62</sub>Co<sub>0.19</sub>Ga<sub>0.19</sub> films enables us to achieve higher coefficients of linearity in the region of zero magnetic fields. Besides, the deposition of thin films increases magnetic noise. The obtained results can be useful in the development of sensors of both *dc* and *ac* magnetic fields for nondestructive systems and devices operated at elevated temperatures.

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

### Acknowledgment

*The work was performed under the state assignment from the Ministry of Education and Science of Russia, theme Function No. AAAA-A19-119012990095-0.*

### References

1. Srinivasan G. Magnetolectric composites. *Ann. Rev. Mater. Sci.*, 2010, vol. 40, pp. 153–178. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070909-104459.

2. Petrov V.M. and Srinivasan G. Enhancement of magnetoelectric coupling in functionally graded ferroelectric and ferromagnetic bilayers. *Phys. Rev. B.*, 2008, vol. 78, pp. 184421 (8 pp.). DOI: 10.1103/PhysRevB.78.184421.
3. Laletin U., Sreenivasulu G., Petrov V.M., Garg T., Kulkarni A.R., Venkataramani N., and Srinivasan G. Hysteresis and remanence in magnetoelectric effects in functionally graded magnetostrictive-piezoelectric layered composites. *Phys. Rev. B.*, 2012, vol. 85, pp. 104404 (8 pp.). DOI: 10.1103/PhysRevB.85.104404.
4. Tech. Bulletin, ref: 2605SA106192009, Metglas Inc., Conway, SC, 2009.
5. Gribov I.V., Osotov V.I., Nosov A.P., Petrov V.M., Sreenivasulu G., Srinivasan G. Magneto-electric effects in functionally stepped magnetic nanobilayers on ferroelectric substrates: Observation and theory on the influence of interlayer exchange coupling. *Journal of Applied Physics*, 2014, vol. 115, pp. 193909–193908. DOI: 10.1063/1.4878458.
6. More-Chevalier J., Liders U., Cibert C., Nosov A., B. Domengus B., Bouregba R., Poullain G. Magnetoelectric coupling in Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub>–Galferol thin film heterostructures. *Applied Physics Letters*, 2015, vol. 107, pp. 252903–252906. DOI: 10.1063/1.4938218.
7. Sreenivasulu G., Fetisov L.Y., Fetisov Y.K., Srinivasan G. Piezoelectric single crystal lanthanum and ferromagnetic composites: Studies on low-frequency and resonance magnetoelectric effects. *Applied Physics Letters*, 2012, vol. 100, pp. 052901 (4 pages). DOI: 10.1063/1.3679661.
8. Sreenivasulu G., Qu P., Piskulich E., Petrov V.M., Fetisov Y.K., Nosov A.P., Qu H., Srinivasan G. Shear strain mediated magneto-electric effects in composites of piezoelectric lanthanum gallium silicate or tantalate and ferromagnetic alloys. *Applied Physics Letters*, 2014, vol. 105, pp. 32409–32408. DOI: 10.1063/1.4891536.
9. Sreenivasulu G., Petrov V.M., Fetisov L.Y., Fetisov Y.K., and Srinivasan G. Magnetoelectric interactions in layered composites of piezoelectric quartz and magnetostrictive alloys. *Phys. Rev. B*, 2012, vol. 86, pp. 214405 (8 pp.). DOI: 10.1103/PhysRevB.86.214405.
10. Available at :<http://www.gammamet.ru/ru/gm440a.htm>
11. Atulasimha J. and Flatau A.B. A review of magnetostrictive iron–gallium alloys. *Smart Mater.Struct.*, 2011, vol. 20, pp. 043001 (15 pp.). DOI: 10.1088/0964-1726/20/4/043001.
12. Jen S.U., Tsai T.L., Kuo P.C., Chi W.L., and Cheng W.C. Magnetostrictive and structural properties of FeCoGa films. *J. Appl. Phys.*, 2010, vol.107, pp. 013914 (4 pp.). DOI: 10.1063/1.3284962.
13. Availabe at: <http://www.optosystems.ru/ru/excimer-lasers/cl-7000/>
14. Shen L., Li M., Gao J., Shen Y., Li J.F., Viehland D., Zhuang X., Lam Chok Sing M., Cordier C., Saez S., and Dolabdjian C. Magnetoelectric nonlinearity in magnetoelectric laminate sensors. *J. Appl. Phys.*, 2011, vol.110, pp. 114510 (6 pp.). DOI: 10.1063/1.3665130.
15. Nosov A.P., Gribov I.V., Moskvina N.A., Druzhinin A.V., Osotov V.I. Thin film FeGa-FeCoGa/Metglas/LGT structures for magnetoelectric magnetic field sensors. *Diagnosics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*, 2018, iss. 6, pp. 117–125. DOI: 10.17804/2410-9908.2018.6.117-125.

Подана в журнал: 21.10.2019

УДК 537.633.9










DOI: 10.17804/2410-9908.2019.6.077-086

## СЕНСОРЫ НИЗКОЧАСТОТНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ СТРУКТУР FeGa-FeCoGa/METGLAS/КВАРЦ

А. П. Носов<sup>1, 2, а)\*</sup>, И. В. Грибов<sup>1, б)</sup>, Н. А. Москвина<sup>1, в)</sup>, А. В. Дружинин<sup>1, г)</sup>, С. С. Дубинин<sup>1, д)</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,  
ул. С. Ковалевской 18, Екатеринбург, 620108, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
ул. Мира 19, Екатеринбург, 62002, Россия

- а)  <https://orcid.org/0000-0003-1475-0059>  [nossov@imp.uran.ru](mailto:nossov@imp.uran.ru);  
б)  <https://orcid.org/0000-0002-5067-2281>  [gri@imp.uran.ru](mailto:gri@imp.uran.ru);  
в)  <https://orcid.org/0000-0003-4285-0399>  [nat@imp.uran.ru](mailto:nat@imp.uran.ru);  
г)  <https://orcid.org/0000-0001-9944-096X>  [druzhinin@imp.uran.ru](mailto:druzhinin@imp.uran.ru);  
д)  [Dubinin\\_S\\_S@imp.uran.ru](mailto:Dubinin_S_S@imp.uran.ru)

\* Ответственный автор. Электронная почта: [nossov@imp.uran.ru](mailto:nossov@imp.uran.ru)

Адрес для переписки: ул. С. Ковалевской 18, Екатеринбург, 620108, Российская Федерация

Тел.: +7 (343) 374-79-22; факс: +7 (343) 374-52-44

Экспериментально продемонстрирована возможность детектирования низкочастотных (в диапазоне частот 20–10 кГц) магнитных полей в трехслойных ламинатных структурах типа *тонкопленочный композитный магнитострикционный ферромагнетик /пьезоэлектрик/ тонкопленочный композитный магнитострикционный ферромагнетик*. В качестве пьезоэлектрика использованы пластины монокристаллического кварца. Композитный магнитострикционный ферромагнетик получали нанесением тонких магнитострикционных пленок составов Fe<sub>0,72</sub>Ga<sub>0,28</sub> или Fe<sub>0,62</sub>Co<sub>0,19</sub>Ga<sub>0,19</sub> на поверхность аморфных лент типа «Метглас». Тонкие пленки наносили методом импульсного лазерного осаждения. Представлены результаты экспериментальных исследований возможности регистрации статических и низкочастотных переменных магнитных полей в диапазоне частот от 20–10 кГц путем измерений величины магнитоэлектрического коэффициента по напряжению (МКЭН) ламинатных структур. Исследовано влияние состава композитного магнитострикционного ферромагнетика на магнитные шумы в области частот 0,5–14 Гц. Из полученных данных следует, что нанесение слоев тонкопленочных композитных магнитострикционных ферромагнетиков не улучшает как максимальную величину МКЭН, так и коэффициентов линейности в области «больших» (20–50 Э) во всем исследованном диапазоне частот. Однако нанесение магнитострикционных пленок состава Fe<sub>0,62</sub>Co<sub>0,19</sub>Ga<sub>0,19</sub> позволяет достигнуть более высоких значений коэффициентов линейности в области нулевых полей. Нанесение слоев тонкопленочных композитных магнитострикционных ферромагнетиков также приводит к росту магнитных шумов. Полученные результаты могут представлять интерес при создании датчиков статических и низкочастотных магнитных полей для приборов и устройствах неразрушающего контроля деталей и изделий, эксплуатируемых при повышенных температурах.

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

## 1. Введение

Актуальной задачей магнитного неразрушающего контроля является создание высокочувствительных датчиков статических и переменных магнитных полей нового поколения, эксплуатация которых возможна в условиях повышенных температур. Использование таких датчиков позволит на новом уровне решать актуальные проблемы неразрушающего контроля и прогнозирования ресурса перспективных функциональных материалов и изготовленных из них узлов и деталей. Одним из перспективных физических принципов является использование магнитоэлектрического эффекта (МЭ) в трехслойных ламинатных структурах типа *тонкопленочный композитный магнитострикционный ферромагнетик /пьезоэлектрик/ тонкопленочный композитный магнитострикционный ферромагнетик* [1]. При помещении такой структуры в статическое магнитное поле  $H$  и приложении изменяющегося со временем магнитного поля  $dH_{ac}$  в ней можно регистрировать прямой МЭ: при приложении переменного магнитного поля из-за магнитострикции ферромагнитного слоя в структуре возникнет механическая деформация, под действием которой в пьезоэлектрическом слое возникнет электрическое поле  $dE$ . Величину МЭ можно характеризовать магнитоэлектрическим коэффициентом по напряжению (МЭКН или MEVC)  $\alpha = dE/H_{ac} = dV/(tdH_{ac})$ , где  $dV$  – величина возникающего электрического напряжения;  $t$  – толщина пьезоэлектрического слоя. Помимо характеристик пьезоэлектрического слоя (пьезомодуля  $d$  и относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$ ) значение  $\alpha$  определяется также и свойствами ферромагнитного слоя, а именно пьезомагнитным коэффициентом, который определяют как  $q = d\lambda/dH$ , где  $\lambda$  – коэффициент магнитострикции;  $H$  – статическое магнитное поле.

Для решения задач детектирования статических и переменных магнитных полей в системах и установках неразрушающего контроля необходимы МЭ-структуры с возможно большей величиной МЭКН. Поскольку значение  $\alpha$  зависит как от  $d$  и  $\varepsilon$  (характеристики пьезоэлектрической подсистемы), так и от  $q$  (характеристика магнитострикционной подсистемы), то задачу оптимизации величины МЭКН можно решать применительно к каждой из подсистем отдельно. В случае потенциальных применений при повышенных температурах выбор материалов для пьезоэлектрической подсистемы существенно ограничен. Поэтому актуальной задачей является оптимизация величины МЭКН путем повышения величины  $q$  магнитострикционной подсистемы [2].

Оригинальным подходом является использование многослойных магнитострикционных структур, состоящих из слоев материалов, имеющих разные знаки коэффициента магнитострикции, или композитных слоев с градиентом коэффициента магнитострикции по толщине, как было продемонстрировано в работе [3].

Очень часто в композитных МЭ-структурах в качестве слоев магнитострикционной подсистемы используют аморфные ленты сплавов класса «Метглас» (Metglas) [4]. Аморфные магнитные материалы этого состава имеют большое значение  $q$ , малую коэрцитивную силу, большую начальную магнитную проницаемость. Их коэффициент магнитострикции  $\lambda$  положительны. Если на поверхность такой ленты нанести тонкую пленку магнитострикционного материала с отрицательным коэффициентом магнитострикции, сформировав тем самым композитную структуру с градиентом  $q$  по толщине, то в такой структуре можно ожидать улучшения магнитострикционных свойств.

С целью повышения величины МЭКН в МЭ-структурах в настоящее время используются различные типы пьезокерамик с большой величиной  $d$  на основе свинца, такие как  $PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3-PbTiO_3$  (PMN-PT) [5] или  $Pb(Zr,Ti)O_3$  (PZT) [6]. Однако для пьезокерамик этих составов температура Кюри не превышает 350 °С. Поэтому при исследованиях МЭ-структур в качестве пьезоэлектрических слоев все более интенсивно используют материалы, не содержащие свинец, такие как  $La_3Ga_{5,5}Ta_{0,5}O_{14}$  (лантангаллиевый танталат, LGT)

[7, 8] или кварц [9]. В качестве материалов магнитострикционных слоев использовали пластины из объемного сплава Fe-Co-V («пермендюр»).

В работе продемонстрирована возможность детектирования низкочастотных (в диапазоне частот 20 Гц – 10 кГц) магнитных полей за счет регистрации МКЭН в трехслойных ламинатных структурах *типа тонкопленочный композитный магнитострикционный ферромагнетик /пьезоэлектрик/ тонкопленочный композитный магнитострикционный ферромагнетик*. Композитный магнитострикционный ферромагнетик с градиентом пьезомагнитного коэффициента по толщине получали нанесением тонких пленок составов  $\text{Fe}_{0,72}\text{Ga}_{0,28}$  или  $\text{Fe}_{0,62}\text{Co}_{0,19}\text{Ga}_{0,19}$  на поверхность аморфных лент типа «Метглас». В качестве материала пьезоэлектрического слоя использованы монокристаллические пластины кварца.

## 2. Материал и методика

В качестве материала пьезоэлектрического слоя в ламинатных структурах были использованы пластины монокристаллического кварца ( $X$ -срез) с типичными размерами  $5 \times 5 \times 0,3$  мм<sup>3</sup>. Аморфные ленты состава 440А [10] производства компании «Гаммамет» (г. Екатеринбург, Россия) толщиной 34 мкм использовали в качестве магнитострикционного слоя с положительным коэффициентом магнитострикции. Аморфные ленты не подвергали дополнительным термообработкам. Измерения магнитострикции при приложении статических магнитных полей были выполнены с использованием тензодатчика. Величину коэффициента магнитострикции насыщения измеряли при 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 аморфных лент. Величину пьезомагнитного коэффициента определяли как  $q = q_{11} + q_{12} = d\lambda_{11}/dH + d\lambda_{12}/dH$ . Для аморфных лент состава 440А было получено значение  $q = +0,46 \times 10^{-6}/\text{Э}$ .

Композитные ферромагнитные слои с градиентом коэффициента магнитострикции по толщине получали нанесением на поверхность аморфных лент тонких пленок составов  $\text{Fe}_{0,72}\text{Ga}_{0,28}$  или  $\text{Fe}_{0,62}\text{Co}_{0,19}\text{Ga}_{0,19}$  методом импульсного лазерного осаждения. Объемные сплавы системы  $\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x$  («галфенол») характеризуются большими отрицательными значениями коэффициента магнитострикции, величина которого максимальна для концентраций галлия 0,19 или 0,28 [11]. Дополнительное легирование сплавов Fe-Ga кобальтом приводит к росту значений  $\lambda$ . Согласно данным [12] для тонких пленок сплавов системы Fe-Co-Ga значение  $\lambda$  максимально у состава  $\text{Fe}_{0,62}\text{Co}_{0,19}\text{Ga}_{0,19}$ . Тонкие пленки наносили с использованием эксимерного лазера CL 7050 (компания «Оптисистемы», г. Троицк, Московская область, Россия [13]). Толщина пленок составляла 25 нм. Измерения толщины и шероховатости поверхности выполняли с использованием оптического профилометра ZYGO.

Объектами исследований были выбраны трехслойные ламинатные структуры, в которых средним пьезоэлектрическим слоем были пластины монокристаллического кварца, а в качестве верхнего и нижнего слоев использовали аморфные магнитострикционные ленты 440А (далее – образцы 440А), либо аморфные магнитострикционные ленты 440А с пленкой  $\text{Fe}_{0,72}\text{Ga}_{0,28}$  (далее – образцы 440А/FeGa), либо аморфные магнитострикционные ленты 440А с пленкой  $\text{Fe}_{0,62}\text{Co}_{0,19}\text{Ga}_{0,19}$  (далее – образцы 440А/FeCoGa). Ламинатную структуру получали склеиванием отдельных слоев клеем на основе цианокрилата. Использование этого типа клея позволяет получать прочное соединение при минимальной толщине собственно клеевого слоя [7–9]. По данным работы [9] использование трехслойных структур вместо двухслойных позволяет увеличить величину МЭКН.

Измерения МЭКН проводили путем помещения ламинатных структур в статические  $H$  и низкочастотные  $H_{ac}$  магнитные поля. Синхронным детектором измеряли напряжение в пьезоэлектрическом слое  $dV$ . Измерения  $dV$  выполняли на частоте  $H_{ac}$ . Значения МЭКН вычисляли по формуле  $\alpha = dE/H_{ac} = dV/(t dH_{ac})$ , где  $t$  – толщина пьезоэлектрического слоя. Были исследованы изменения  $b$  в зависимости от величины статического магнитного поля  $H$  вплоть до 10 кЭ и частоты  $f$  низкочастотного магнитного поля до 10 кГц.

Магнитные шумы измеряли в камере с трехслойным магнитным экраном при приложении к образцу статического магнитного поля 60 Э и переменного магнитного поля напряженностью 100–900 микроэрстед, усиления напряжения с образца предусилителем с большим импедансом и низким уровнем собственных шумов (типа SRS SR560) и регистрации сигнала анализатором спектра SRS SR780.

Все измерения были выполнены при комнатной температуре.

### 3. Результаты и обсуждение

Типичные зависимости МКЭН от величины приложенного статического поля  $\alpha(H_{dc}, f)$ , снятые при фиксированных частотах  $f = 20, 110$  и  $10$  кГц для структур с аморфной лентой 440А, представлены на рис. 1. Для всех частот зависимости имеют подобную форму с максимумом при  $H_{dc} \approx 65$  Э. Положение этого максимума соответствует максимуму зависимости  $q(H_{dc})$  и практически не зависит от частоты [5]. Однако наибольшие значения  $\alpha_{max}(H_{dc} \approx 65 \text{ Э})$  существенно изменяются с ростом частоты. При фиксированной частоте значения  $\alpha$  постепенно уменьшаются с ростом  $H_{dc}$  и становятся очень малыми при  $H_{dc} > 200$  Э. Форма зависимостей  $\alpha(H_{dc})$  качественно подобна виду зависимости  $q(H_{dc})$ . Для ламинатных структур с пленками  $\text{Fe}_{0,72}\text{Ga}_{0,28}$  и  $\text{Fe}_{0,62}\text{Co}_{0,19}\text{Ga}_{0,19}$  форма зависимостей  $\alpha(H_{dc}, f)$  при фиксированных соответствующих значениях  $f$  была подобна таковой для структур с аморфной лентой без пленок.

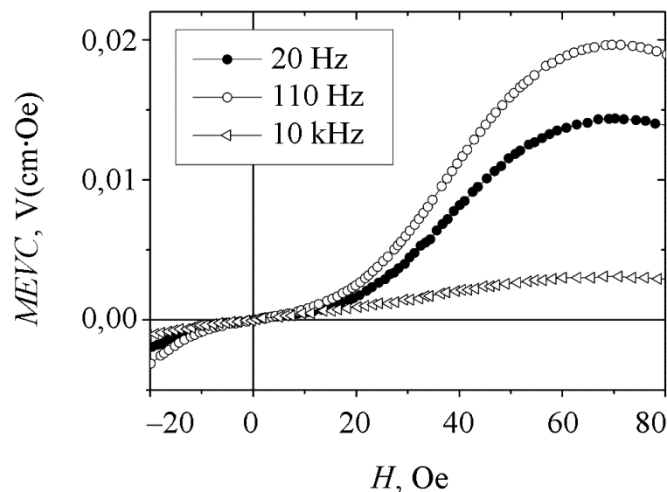


Рис. 1. Частотные зависимости МЭКН для  $f = 20, 110$  и  $10$  кГц. Данные для структуры с аморфной лентой 440А

Нанесение на аморфную ленту 440А тонких пленок ферромагнетиков с отрицательными значениями коэффициента магнитострикции не изменяло положения максимумов зависимостей  $\alpha_{max}(f)$  при  $H_{dc} \approx 65$  Э, однако влияло на величину максимального значения  $\alpha_{max}(H_{dc} \approx 65 \text{ Э})$  во всем исследованном частотном диапазоне (рис. 2). Нанесение тонких пленок приводит к уменьшению величин максимального значения  $\alpha_{max}(H_{dc} \approx 65 \text{ Э})$ , которое более существенно для пленок состава  $\text{Fe}_{0,72}\text{Ga}_{0,28}$ .

Для решения задач детектирования магнитных полей и магнитного неразрушающего контроля существенно, что зависимости  $\alpha(H_{dc}, f)$  линейны по  $H_{dc}$  в области полей 20–50 Э и нечетны по полю [14]. Это позволяет по знаку МКЭН судить об ориентации датчика относительно  $H_{dc}$ .

В общем случае на зависимостях  $\alpha(H_{dc}, f)$  можно выделить две области линейности, в области нулевых полей и в области «больших» (20–50 Э) полей (рис. 3). Для количественной характеристики степени линейности могут быть введены коэффициенты  $dMEVC/dH_{lowH}$

и  $dMEVC/dH_{highH}$  соответственно. Линейность МКЭН в области нулевых полей важна, например для разработки датчиков систем неразрушающего контроля, предназначенных для регистрации полей рассеяния дефектов. Коэффициент линейности в области «больших» (20–50 Э) полей может представлять интерес для создания сенсоров статических и низкочастотных магнитных полей, работающих в схемах с полями смещения в зоне контроля.

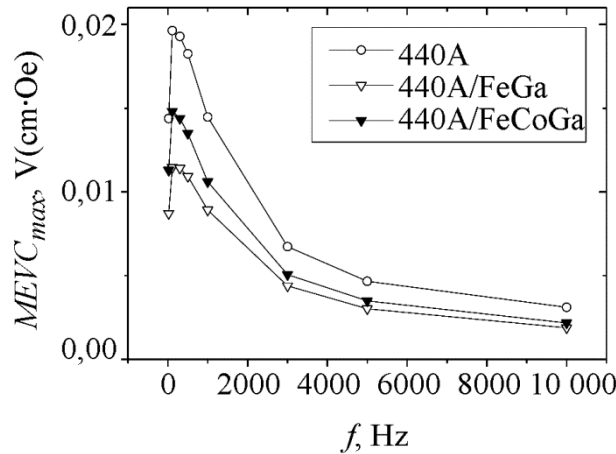


Рис. 2. Сравнение зависимостей  $\alpha_{max}(H_{dc} \approx 65 \text{ Э}, f)$  для ламинатных структур с магнитоэлектрическими слоями только с аморфной лентой (440А) и аморфной лентой с пленками  $\text{Fe}_{0,72}\text{Ga}_{0,28}$  (440А/FeGa) и  $\text{Fe}_{0,62}\text{Co}_{0,19}\text{Ga}_{0,19}$  (440А/FeCoGa)

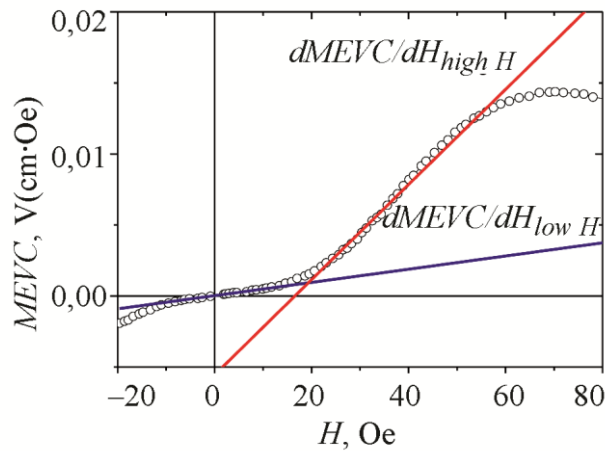


Рис. 3. Определения коэффициентов линейности МЭКН в области нулевых ( $dMEVC/dH_{lowH}$ ) и «больших» ( $dMEVC/dH_{highH}$ ) полей

Частотные зависимости коэффициентов линейности МКЭН исследованных ламинатных структур представлены на рис. 4. Величины обоих коэффициентов максимальны в области низких (от 300 до 1000 Гц) частот для всех составов магнитоэлектрических ферромагнетиков. Нанесение тонких пленок по-разному влияет на коэффициенты линейности: если в области «больших» полей значения  $dMEVC/dH_{highH}$  практически не зависят от состава пленок и для слоев с пленками меньше, чем для аморфной ленты без пленок, то в области нулевых полей нанесение пленки состава  $\text{Fe}_{0,62}\text{Co}_{0,19}\text{Ga}_{0,19}$  увеличивает значения  $dMEVC/dH_{lowH}$ , в то время как нанесение пленки состава  $\text{Fe}_{0,72}\text{Ga}_{0,28}$  их уменьшает.

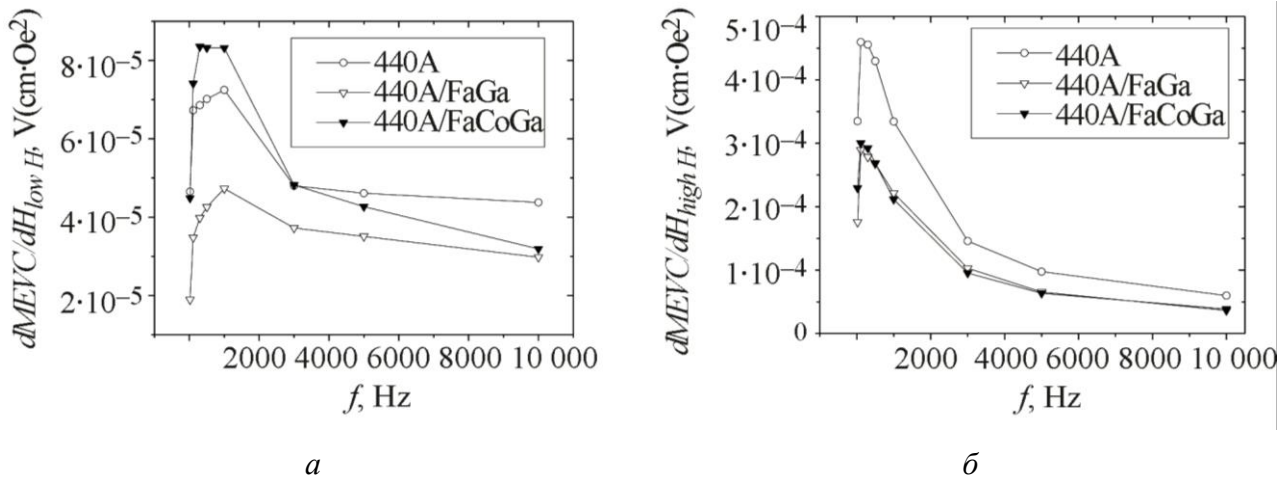


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициентов линейности в области нулевых (а) и «больших» (20–50 Э) полей (б) для ламинатных структур с магнитострикционными слоями только с аморфной лентой (440А), аморфными лентами с пленками  $Fe_{0,72}Ga_{0,28}$  (440А/FeGa) и  $Fe_{0,62}Co_{0,19}Ga_{0,19}$  (440А/FeCoGa)

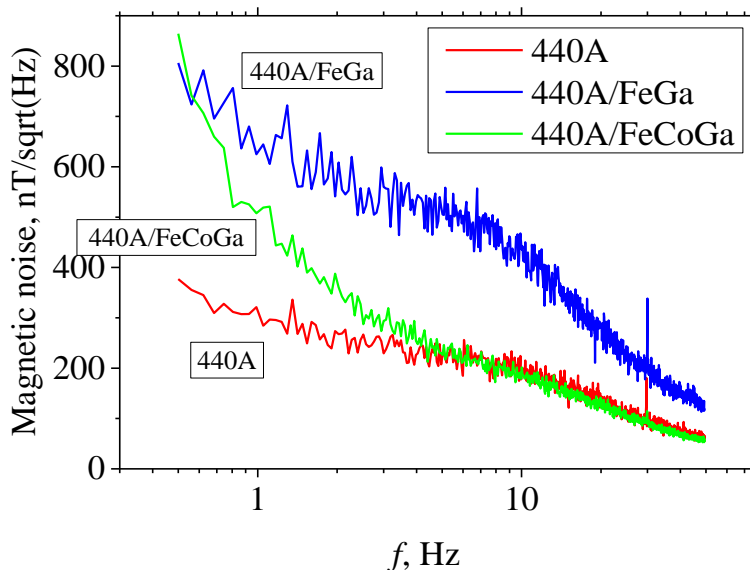


Рис. 5. Сравнение частотных зависимостей магнитных шумов для структур с магнитострикционными слоями только с аморфной лентой (440А), аморфными лентами с пленками  $Fe_{0,72}Ga_{0,28}$  (440А/FeGa) и  $Fe_{0,62}Co_{0,19}Ga_{0,19}$  (440А/FeCoGa)

Наблюдаемые закономерности можно качественно объяснить, принимая во внимание то обстоятельство, что для ламинатных структур величина МЭКН пропорциональна отношению  $d_{11}/\epsilon_{11}$ . Для монокристалла кварца характерна слабая зависимость относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{11}$  от частоты вплоть до 10 кГц. В связи с этим частотные зависимости МЭКН качественно могут быть интерпретированы как связанные только с частотными изменениями характеристик слоев магнитострикционных ферромагнетиков. Для систем типа *тонкопленочный композитный магнитострикционный ферромагнетик /пьезоэлектрик/ тонкопленочный композитный магнитострикционный ферромагнетик* можно определить коэффициент магнитомеханической связи  $k_m = (4\rho\lambda\mu_r\tau/E)^{1/2}$ , где  $\lambda\tau$  – коэффициент магнитострикции в изменяющемся со временем магнитном поле, который пропорционален  $q$ ;  $\mu_r\tau$  – действительная часть относительной магнитной проницаемости;



$E$  – модуль Юнга. Наблюдаемое снижение максимального значения  $\alpha_{max}(H_{dc} \approx 65 \text{ Э}, f)$  для всего исследованного диапазона частот для ламинатных структур с тонкими пленками может быть обусловлено уменьшением  $k_m$  за счет плавного снижения величины  $\mu_r(f)$  с ростом частоты [15], значений  $q$  из-за разных знаков  $l$  аморфного сплава и пленок. Кроме того, важную роль может играть текстура тонкопленочных слоев.

На рис. 5 приведены результаты измерений магнитных шумов в области частот 0,5–14 Гц. Как видно из представленных данных, градиент коэффициента магнитострикции в ферромагнитных слоях существенно повышает уровень шумов ламинатных структур. Наиболее сильно это проявляется в области низких (менее 1 Гц) частот. В то же время следует отметить, что для частот выше 5 Гц нанесение слоя  $\text{Fe}_{0,62}\text{Co}_{0,19}\text{Ga}_{0,19}$  почти не влияет на уровень шумов в структуре.

В целом следует отметить, что для трехслойных ламинатных структур типа *тонкопленочный композитный магнитострикционный ферромагнетик /пьезоэлектрик/ тонкопленочный композитный магнитострикционный ферромагнетик* с монокристаллическим кварцем в качестве материала пьезоэлектрического слоя создание градиента коэффициента магнитострикции по толщине ферромагнитного слоя за счет нанесения на поверхность аморфных лент 440А тонких пленок  $\text{Fe}_{0,72}\text{Ga}_{0,28}$  и  $\text{Fe}_{0,62}\text{Co}_{0,19}\text{Ga}_{0,19}$  не позволяет, в отличие от структур на лантангаллиевом танталате  $\text{La}_3\text{Ga}_{5,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_{14}$  [16], существенно улучшить характеристики МЭКН за исключением величины коэффициента линейности в области нулевых полей и магнитных шумов в области частот 5–4 Гц (состав  $\text{Fe}_{0,62}\text{Co}_{0,19}\text{Ga}_{0,19}$ ). Для ламинатных структур со слоями из аморфных лент типа «Метглас» величины МЭКН существенно ниже, чем для структур с магнитострикционными слоями из объемного сплава Fe-Co-V («пермендюр») [9].

#### 4. Заключение

Исследованы полевые и частотные характеристики магнитоэлектрического эффекта по напряжению в ламинатных структурах типа *тонкопленочный композитный магнитострикционный ферромагнетик /кварц/ тонкопленочный композитный магнитострикционный ферромагнетик*. В слое композитного магнитострикционного ферромагнетика за счет лазерного осаждения тонких пленок  $\text{Fe}_{0,72}\text{Ga}_{0,28}$  и  $\text{Fe}_{0,62}\text{Co}_{0,19}\text{Ga}_{0,19}$  с отрицательным коэффициентом магнитострикции на аморфные ленты типа «Метглас» с положительным коэффициентом магнитострикции слой реализован градиент коэффициента магнитострикции по толщине. Экспериментально показано, что в структурах с градиентом коэффициента магнитострикции максимальная величина МЭКН меньше, чем в структурах только с аморфной лентой 440А. Структуры с тонкими пленками  $\text{Fe}_{0,62}\text{Co}_{0,19}\text{Ga}_{0,19}$  характеризуются лучшей линейностью в области нулевых полей и малыми магнитными шумами в области частот 5–4 Гц. Трехслойные ламинатные структуры на основе монокристаллического кварца могут представлять интерес для разработки датчиков статических и низкочастотных магнитных полей, используемых в том числе для задач магнитного неразрушающего контроля, при повышенных температурах.

#### Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Функция», № АААА-А19-119012990095-0).

#### Литература

1. Srinivasan G. Magnetolectric composites // Ann. Rev. Mater. Sci. – 2010. – Vol. 40. – P. 153–178. – DOI: 10.1146/annurev-matsci-070909-104459.

2. Petrov V. M. and Srinivasan G. Enhancement of magnetoelectric coupling in functionally graded ferroelectric and ferromagnetic bilayers // *Phys. Rev. B.* – 2008. – Vol. 78. – P. 184421 (8 pp.). – DOI: 10.1103/PhysRevB.78.184421.
3. Hysteresis and remanence in magnetoelectric effects in functionally graded magnetostrictive-piezoelectric layered composites / U. Laletin, G. Sreenivasulu, V. M. Petrov, T. Garg, A. R. Kulkarni, N. Venkataramani, and G. Srinivasan // *Phys. Rev. B.* – 2012. – Vol. 85. – P. 104404 (8 pp.). – DOI: 10.1103/PhysRevB.85.104404.
4. Tech. Bulletin : ref. 2605SA106192009. – Metglas Inc., Conway, SC, 2009.
5. Magneto-electric effects in functionally stepped magnetic nanobilayers on ferroelectric substrates: Observation and theory on the influence of interlayer exchange coupling / I. V. Gribov, V. I. Osotov, A. P. Nosov, V. M. Petrov, G. Sreenivasulu, G. Srinivasan // *Journal of Applied Physics* – 2014. – Vol. 115. – P. 193909–193908. –DOI.org/10.1063/1.4878458.
6. Magnetoelectric coupling in Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub>—Galferol thin film heterostructures / J. More-Chevalier, U. Lüders, C. Cibert, A. Nosov, B. B. Domengus, R. Bouregba, G. Poullain // *Applied Physics Letters.* – 2015. – Vol. 107. – P. 252903–252906. – DOI: 10.1063/1.4938218.
7. Piezoelectric single crystal langatate and ferromagnetic composites: Studies on low-frequency and resonance magnetoelectric effects / G. Sreenivasulu, L. Y. Fetisov, Y. K. Fetisov, G. Srinivasan // *Applied Physics Letters.* – 2012. – Vol. 100. – P. 052901 (4 pages). – DOI: 10.1063/1.3679661.
8. Shear strain mediated magneto-electric effects in composites of piezoelectric lanthanum gallium silicate or tantalate and ferromagnetic alloys / G. Sreenivasulu, P. Qu, E. Piskulich, V. M. Petrov, Y. K. Fetisov, A. P. Nosov, H. Qu, G. Srinivasan // *Applied Physics Letters.* – 2014. – Vol. 105. – P. 32409–32408. – DOI: 10.1063/1.4891536.
9. Magnetoelectric interactions in layered composites of piezoelectric quartz and magnetostrictive alloys / G. Sreenivasulu, V. M. Petrov, L. Y. Fetisov, Y. K. Fetisov, and G. Srinivasan // *Phys. Rev. B.* – 2012. – Vol. 86. – P. 214405 (8 pp.). – DOI: 10.1103/PhysRevB.86.214405.
10. URL: <http://www.gammamet.ru/ru/gm440a.htm>
11. Atulasimha J. and Flatau A. B. A review of magnetostrictive iron–gallium alloys // *Smart Mater.Struct.* – 2011. – Vol. 20. – P. 043001 (15 pp.). – DOI: 10.1088/0964-1726/20/4/043001.
12. Jen S. U., Tsai T. L., Kuo P. C., Chi W. L., and Cheng W. C. Magnetostrictive and structural properties of FeCoGa films // *J. Appl. Phys.* – 2010. – Vol. 107. – P. 013914 (4 pp.). – DOI: 10.1063/1.3284962.
13. URL: <http://www.optosystems.ru/ru/excimer-lasers/cl-7000/>
14. Magnetoelectric nonlinearity in magnetoelectric laminate sensors / L. Shen, M. Li, J. Gao, Y. Shen, J. F. Li, D. Viehland, X. Zhuang, M. Lam Chok Sing, C. Cordier, S. Saez, and C. Dolabdjian // *J. Appl. Phys.* – 2011. – Vol. 110. – P. 114510 (6 pp.). – DOI: 10.1063/1.3665130.
15. Thin film FeGa-FeCoGa/Metglas/LGT structures for magnetoelectric magnetic field sensors / A. P. Nosov, I. V. Gribov, N. A. Moskvina, A. V. Druzhinin, V. I. Osotov // *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures.* – 2018. – Iss. 6. – P. 117–125. – DOI: 10.17804/2410-9908.2018.6.117-125.