

Магнитоэлектрический эффект в структуре ферромагнетик/электростриктор

Д. В. Савельев¹✉, Д. А. Бурдин¹, Е. В. Болотина¹, Д. В. Чашин¹, А. П. Переверзева¹,
Ю. К. Фетисов¹

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

E-mail: ✉dimsav94@gmail.com, phantastic@mail.ru, ekaterina.bolotina1@mail.ru, chashindv@yandex.ru,
alex.pe.p@yandex.ru, fetisov@mirea.ru

Поступила в редакцию 05.06.2026, принята к публикации 05.08.2026,
опубликована онлайн 12.08.2026

Аннотация. Цель. Цель работы состояла в исследовании характеристик линейного и нелинейного магнитоэлектрических (МЭ) эффектов в структуре, содержащей механически связанные слой аморфного сплава Metglas и слой электрострикционной керамики PMN-PT. Методы. Структуру помещали в возбуждающее магнитное поле с частотой 5-300 кГц и амплитудой до 6 Э и параллельное ему постоянное магнитное поле смещения 0-100 Э. Синхронным детектором измеряли амплитуду 1-ой и 2-ой гармоник генерируемой структурой напряженности при изменении частоты, возбуждающего поля и поля смещения. Результаты. Показано, что магнитоэлектрическая PMN-PT керамика в слабых полях квадратично зависит от магнитного и электрического полей. Обнаружены и исследованы линейный прямой МЭ эффект и нелинейный МЭ эффект удвоения частоты в структуре, возникающий из-за нелинейности магнитоэлектрической. Зависимости амплитуд 1-ой и 2-ой гармоник МЭ напряженности от магнитного поля и амплитуды возбуждающего поля хорошо описываются теорией. Продемонстрировано линейное увеличение амплитуд гармоник более, чем в 25 раз при приложении к слою керамики электрического поля напряженностью до 2 кВ/см. В описанной структуре величина МЭ коэффициента составляла 1.7 В/(Э·см) для линейного эффекта и 20 мВ/(Э²·см) для нелинейного эффекта. Заключение. Результаты могут быть использованы для создания датчиков магнитных полей и удвоителей частоты.

Ключевые слова: магнитоэлектрический эффект, генерация гармоник, магнитоэлектрическая, аморфный магнитный сплав, электрострикционная керамика.

Благодарности. Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 25-22-00233, <https://rscf.ru/project/25-22-00233/>).

Для цитирования: Савельев Д. В., Бурдин Д. А., Болотина Е. В., Чашин Д. В., Переверзева А. П., Фетисов Ю. К. Магнитоэлектрический эффект в структуре ферромагнетик/электростриктор // Известия вузов. ПНД. 2026. DOI: 10.18500/0869-6632-003232. EDN: IGFKOP

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Magnetoelectric effect in a ferromagnet/electrostrictor structure

*D. V. Savelev*¹✉, *D. A. Burdin*¹, *E. V. Bolotina*¹, *D. V. Chashin*¹, *A. P. Pereverzeva*¹,
*Yu. K. Fetisov*¹

¹MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

E-mail: ✉dimsav94@gmail.com, phantastic@mail.ru, ekaterina.bolotina1@mail.ru, chashindv@yandex.ru,
alex.pe.p@yandex.ru, fetisov@mirea.ru

Received 05.06.2026, accepted 05.08.2026, available online 12.08.2026

Abstract. *Purpose.* The purpose of this work was to investigate the characteristics of linear and nonlinear magnetoelectric (ME) effects in a structure containing a mechanically coupled layer of Metglas amorphous alloy and a layer of PMN-PT electrostrictive ceramics. *Methods.* The structure was placed in an excitation magnetic field with a frequency of 5–300 kHz and an amplitude of up to 6 Oe, and a parallel DC bias magnetic field of 0–100 Oe. The amplitudes of the 1st and 2nd harmonics of the voltage generated by the structure were measured using a lock-in amplifier as a function of frequency, excitation field, and bias field. *Results.* It is shown that the magnetostriction of Metglas and the electrostrain of PMN-PT ceramics in weak fields quadratically depend on the magnetic and electric fields. The linear direct ME effect and the nonlinear ME effect of frequency doubling in the structure, arising due to the nonlinearity of magnetostriction, were discovered and investigated. The dependences of the 1st and 2nd harmonic amplitudes of the ME voltage on the magnetic field and the amplitude of the excitation field are well described by theory. A linear increase in the harmonic amplitudes by more than 25 times was demonstrated when an electric field of up to 2 kV/cm was applied to the ceramic layer. In the described structure, the ME coefficient was 1.7 V/(Oe·cm) for the linear effect and 20 mV/(Oe²·cm) for the nonlinear effect. *Conclusion.* The results can be used to create magnetic field sensors and frequency doublers.

Keywords: magnetoelectric effect, harmonic generation, magnetostriction, amorphous magnetic alloy, electrostrictive ceramics.

Acknowledgements. This work was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 25-22-00233, <https://rscf.ru/project/25-22-00233/>).

For citation: Savelev D. V., Burdin D. A., Bolotina E. V., Chashin D. V., Pereverzeva A. P., Fetisov Yu. K. Magnetoelectric effect in a ferromagnet/electrostrictor structure. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2026. DOI: 10.18500/0869-6632-003232

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Введение

Магнитоэлектрический (МЭ) эффект в твердых телах проявляется во взаимном преобразовании магнитных и электрических полей. В мультиферроидных структурах, содержащих механически связанные ферромагнитные (ФМ) и пьезоэлектрические (ПЭ) слои, эффект возникает в результате комбинации магнитострикции и пьезоэлектричества слоев из-за передачи деформаций между ними. При помещении структуры во внешнее магнитное поле структура генерирует электрическое напряжение между электродами ПЭ слоя (прямой МЭ эффект). При приложении к ПЭ слою электрического напряжения изменяется намагниченность ФМ слоя (обратный МЭ эффект) [1]. ПЭ слои структур обычно изготавливают из керамик и монокристаллов на основе свинца [2, 3], имеющих высокие пьезомодули. В качестве ФМ материалов часто используют ленты аморфных сплавов на основе железа, обладающие высокой магнитострикцией в слабых полях [3, 4].

Важным направлением в исследовании МЭ эффектов является поиск новых материалов, которые могли бы использоваться в качестве функциональных слоев. Перспективными

являются электрострикционные (ЭС) керамики и кристаллы, обладающие высокими значениями пьезомодулей, большими ЭС деформациями и малым гистерезисом [5, 6]. Под действием электрического поля в таких материалах происходит изменение пьезомодулей, что может повлиять на величину МЭ эффектов [7]. Представляет интерес также исследование нелинейных МЭ эффектов в композитных структурах, которые позволяют создавать высокочувствительные датчики магнитных полей, умножители частоты и анализаторы спектра [8–10]. Эффект генерации гармоник МЭ напряжения с частотами, кратно большими частоты возбуждения, ранее наблюдали в структурах со слоями из различных ПЭ материалов [11]. В структуре с ЭС керамикой был обнаружен и исследован обратный нелинейный МЭ эффект генерации гармоник, обусловленный нелинейностью электростриктора [12].

В данной работе впервые исследованы характеристики линейного и нелинейного прямых МЭ эффектов в композитной структуре со слоем электрострикционной керамики магнитообата - титаната свинца (PMN-PT) и продемонстрировано эффективное влияние постоянного электрического поля на величину эффектов. В первой части статьи описана композитная структура и методики измерений. Далее приведены результаты экспериментальных исследований прямого линейного и нелинейного МЭ эффектов. В заключительной части статьи обсуждаются полученные результаты.

1. Материалы и методики исследования

Композитная структура, содержащая пластину электрострикционной керамики состава $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.85}\text{Ti}_{0.15}\text{O}_3$ (PMN-PT) (НКТБ «Пьезоприбор», Россия) и ленту аморфного магнитного сплава Metglas 2605SA1 (Metglas Inc, США), схематически изображена на рис. 1. Пластина PMN-PT имела размеры в плоскости $10 \text{ мм} \times 6 \text{ мм}$ и толщину $a_p = 500 \text{ мкм}$. На ее поверхности методом вжигания были нанесены серебряные электроды толщиной $\sim 2 \text{ мкм}$. Диэлектрическая проницаемость керамики на частоте 10 кГц составляла $\epsilon \approx 6600$, тангенс диэлектрических потерь $\text{tg}\delta \approx 0.04$. Лента Metglas имела размеры $10 \text{ мм} \times 6 \text{ мм}$, толщину $a_m = 25 \text{ мкм}$, магнитоэлектрический коэффициент насыщения $\lambda_s \approx 22 \cdot 10^{-6}$ в поле насыщения $H_s \approx 70 \text{ Э}$. Слои были соединены с помощью цианоакрилатного клея.

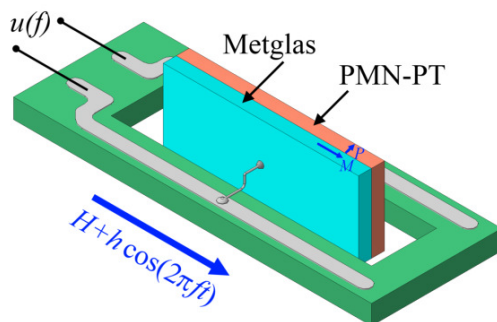


Рис. 1. Схематическое изображение композитной структуры PMN-PT/Metglas.

Fig. 1. Schematic diagram of the PMN-PT/Metglas composite structure.

Структуру подвешивали на тонких проводах, припаянных в центре электродов, и помещали в катушку с индуктивностью $L = 29 \text{ мкГн}$, содержащую $N = 60$ витков провода диаметром 0.15 мм , подключенную к генератору сигналов произвольной формы Agilent

33210а. Катушка создавала возбуждающее магнитное поле $h \cos(2\pi ft)$ с частотой $f = 30$ - 300 кГц и амплитудой до $h = 6$ Э. Постоянное магнитное поле $H = 0$ - 100 Э, коллинеарное переменному, создавали с помощью катушек Гельмгольца, подключенных к источнику питания Keysight3634A (Keysight Techn., US). Поле H измеряли гауссметром Lakeshore 2401 (Lake Shore Cryotronics, US).

Измерение амплитуды гармоник МЭ напряжения проводили синхронным детектором SR844 (Stanford Research, US). Для каждого значения полей H и h были измерены зависимости МЭ напряжения от частоты. При исследовании влияния на МЭ эффект постоянного электрического поля E величиной до 2 кВ/см на электроды PMN-РТ слоя через развязывающий конденсатор емкостью 1 мкФ подавали постоянное напряжение от источника GENH 600-1.3 (TDK Lambda, Япония). Измерение электрострикции слоя PMN-РТ керамики и магнитоэлектрической ленты Metglas проводили тензометрическим методом с помощью установки, описанной в [13].

2. Результаты измерений

2.1. Электрострикция и магнитоэлектрическая ленточная структура. На рис. 2 приведены измеренные зависимости электрострикции пластины PMN-РТ от электрического поля $s(E)$ и магнитоэлектрической ленточной структуры Metglas от магнитного поля $\lambda(H)$. Время измерения одной точки составляло 0.5 секунды. Электрострикция нелинейно росла с увеличением E и достигала значения $s \approx 30 \cdot 10^{-6}$ в поле $E = 10$ кВ/см. Насыщения электрострикции не наблюдали. На начальном участке до $E \leq 3$ кВ/см зависимость можно аппроксимировать функцией $s = d_{31}E + M_{31}E^2$, показанной на рисунке штриховой линией, где $d_{31} \approx 1$ пм/В – пьезомодуль, $M_{31} \approx 0.07$ фм²/В² – электрострикционный коэффициент. Магнитоэлектрической ленточной структуры Metglas нелинейно росла с увеличением H и достигала насыщения $\lambda_s \approx 22 \cdot 10^{-6}$ в поле $H_s \approx 75$ Э. На начальном участке кривой $H < 40$ Э зависимость хорошо описывалась квадратичной функцией $\lambda \cdot 10^{-6} \approx -0.03 \cdot H + 0.01 \cdot H^2$, где H имеет размерность Эрстед.

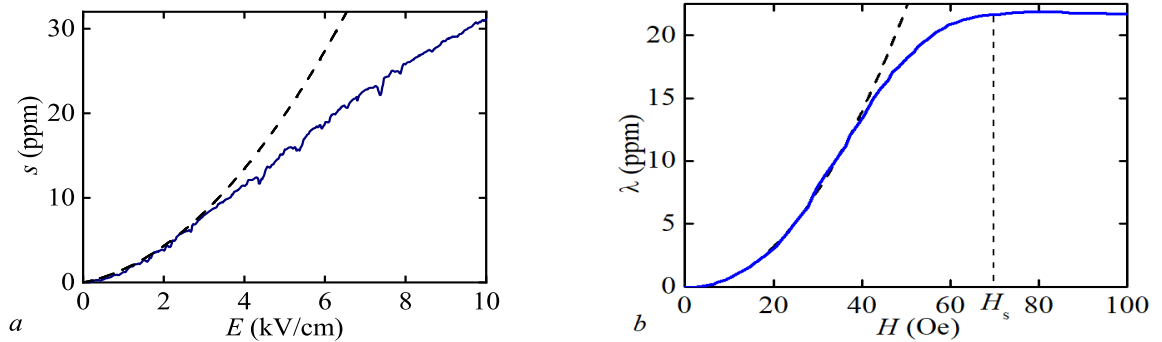


Рис. 2. *a* — Зависимость электрострикции s керамики PMN-РТ от электрического поля E . *b* — Зависимость магнитоэлектрической ленточной структуры Metglas от магнитного поля H . Штриховыми линиями показаны квадратичные аппроксимации.

Fig. 2. *a* — Dependence of the electrostrain s of PMN-PT ceramics on the electric field E . *b* — Dependence of the magnetostriction λ of the Metglas ribbon on the magnetic field H . The dashed lines show quadratic approximations.

2.2. Прямой линейный МЭ эффект. При исследовании линейного МЭ эффекта структуру возбуждали переменным магнитным полем с частотой f и генерируемое напря-

жение измеряли на той же частоте. Перед началом измерений ЭС слой структуры был деполяризован. На рис. 3 приведена зависимость амплитуды первой гармоники МЭ напряжения u от частоты f возбуждающего поля при $h \approx 2.35$ Э и $H = 33$ Э. Пик с частотой $f_1 \approx 142.3$ кГц, амплитудой $u_1 \approx 6.5$ мВ и добротностью $Q = f/\Delta f \approx 80$, (где Δf – ширина резонансной линии на высоте 0.71) соответствовал первой моде акустических колебаний структуры по длине. Пик с частотой $f_2 \approx 264$ кГц, амплитудой $u_2 \approx 2$ мВ и добротностью $Q_2 \approx 60$ – первой моде колебаний по ширине структуры. Поскольку характеристики разных мод колебаний качественно не отличались, будем далее рассматривать только пик с частотой f_1 и большей амплитудой.

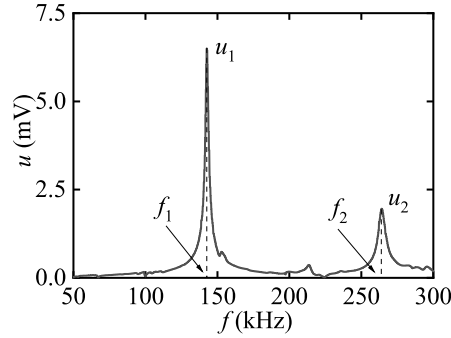


Рис. 3. Зависимость МЭ напряжения u от частоты f возбуждающего поля при $h = 2.35$ Э и $H = 33$ Э.

Fig. 3. Dependence of the ME voltage u on the frequency f of the excitation field at $h = 2.35$ Oe and $H = 33$ Oe.

На рис. 4а приведена зависимость амплитуды пика МЭ напряжения u_1 от поля H , при $h = 2.35$ Э. С увеличением магнитного поля МЭ напряжение увеличивалось, достигло максимального значения $u \approx 6.3$ мВ в поле $H_m = 33$ Э, после чего монотонно убывало по мере насыщения ФМ слоя. Отметим, что при увеличении поля резонансная частота f_1 выросла на $\sim 1\%$ от $f_1 = 141.7$ кГц при $H = 0$ до $f_1 = 143.08$ кГц при $H = 100$ Э. Добротность резонанса Q_1 при этом увеличилась на $\sim 63\%$ от $Q_1 \approx 70$ при $H = 0$ до $Q_1 \approx 115$ при $H = 100$ Э, что выражалось в уменьшении ширины резонансной линии Δf . Зависимость МЭ напряжения u_1 от амплитуды поля h , измеренная при $H_m = 33$ Э (рис. 4б), имела линейный вид во всем диапазоне возбуждающих полей.

2.3. Нелинейный МЭ эффект удвоения частоты. При исследовании нелинейного МЭ эффекта структуру возбуждали переменным магнитным полем с частотой f , а генерируемое напряжение измеряли на удвоенной частоте. На рис. 5 приведена зависимость амплитуды второй гармоники МЭ напряжения u от частоты возбуждающего поля f при $h = 5.9$ Э и $H = 20$ Э. На зависимости видны пик вблизи частоты $f_1/2 \approx 71.2$ кГц с амплитудой 1.3 мВ и пик вблизи частоты $f_2/2 \approx 132$ кГц с амплитудой ~ 0.4 мВ. Подчеркнем, что при частоте возбуждающего поля $f_1/2$, частота генерируемого структурой напряжения была равна f_1 , т.е. имело место удвоение частоты и усиление напряжения на частоте резонанса структуры. Аналогично, пик вблизи частоты $f_2/2$ соответствовал возбуждению колебаний на частоте f_2 . Ширины этих пиков были вдвое меньше, чем ширины пиков на частотах f_1 и f_2 для линейного МЭ эффекта (рис. 3), что согласуется с [14]. Пиков вблизи частот f_1 и f_2 на рис. 5 не наблюдали.

На рис. 6а приведена зависимость амплитуды второй гармоники МЭ напряжения $u^{(2)}$ от постоянного поля H при возбуждении полем $h = 5.9$ Э на частоте, вдвое меньше резонансной. На зависимости присутствуют два максимума: в поле $H_m^{(2)} \approx 20$ Э напряжение

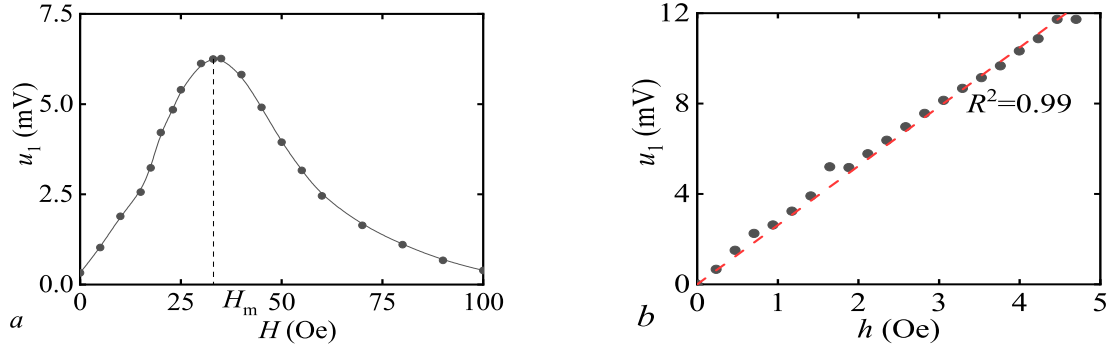


Рис. 4. Зависимость МЭ напряжения u_1 на частоте резонанса от: a — постоянного магнитного поля H ; b — от амплитуды h возбуждающего магнитного поля. Сплошная линия - направляющая для глаз. Штриховая линия - линейная аппроксимация.

Fig. 4. Dependence of the ME voltage u_1 at the resonance frequency on: a — the DC magnetic field H ; b — the amplitude h of the excitation magnetic field. The solid line is a guide for the eyes. The dashed line is a linear approximation.

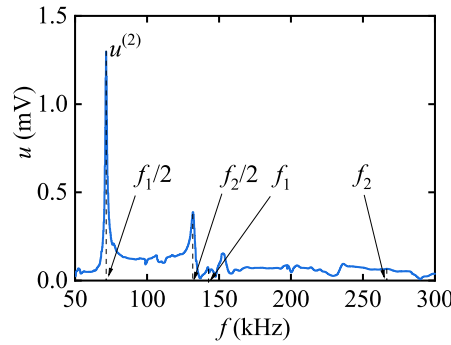


Рис. 5. Зависимость амплитуды второй гармоники МЭ напряжения u от частоты f возбуждающего поля при $h = 5.9$ Э и $H = 20$ Э.

Fig. 5. Dependence of the second-harmonic amplitude of the ME voltage u on the frequency f of the excitation field at $h = 5.9$ Oe and $H = 20$ Oe.

достигало $u^{(2)} \approx 1.4$ мВ, в поле $H \approx 45$ Э — $u^{(2)} \approx 0.96$ мВ, и минимум в поле $H_m = 33$ Э, где напряжение падало до нуля. Амплитуда гармоники $u^{(2)}$ при поле $H_m^{(2)}$, была пропорциональна h^2 во всем диапазоне переменных магнитных полей (рис. 6b).

2.4. Влияние электрического поля на МЭ эффект. На рис. 7 приведены измеренные зависимости амплитуды МЭ напряжения для линейного и нелинейного эффектов от напряженности электрического поля E . Зависимость $u^{(1)}(E)$ измеряли при поле $H = 32$ Э и $h = 2.35$ Э, а зависимости $u^{(2)}(E)$ — при поле $H = 20$ Э и $h = 5.9$ Э. Видно, что амплитуды обоих гармоник росли линейно с увеличением E . Напряжение $u^{(1)}$ при линейном МЭ эффекте возрастало примерно в 32 раза от ~ 6.3 мВ при $E = 0$ до ~ 201 мВ при $E = 2$ кВ/см. Напряжение второй гармоники $u^{(2)}$ возрастало примерно в 25 раз от ~ 1.4 мВ при $E = 0$ до ~ 35 мВ при $E = 2$ кВ/см. Формы полевых зависимостей амплитуд гармоник для линейного и нелинейного МЭ эффектов при приложении поля E не изменялись. Электрическое поле E , в отличие от магнитного поля, никак не влияло на частоты резонансов структуры.

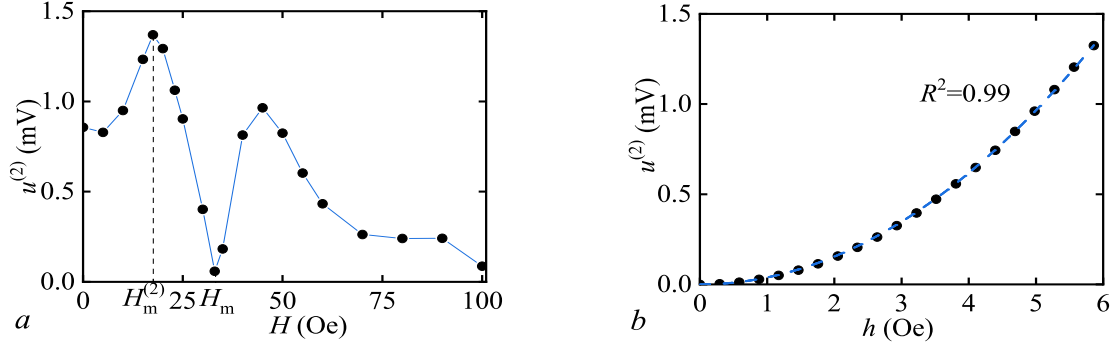


Рис. 6. *a* — Зависимость МЭ напряжения второй гармоники $u^{(2)}$ от постоянного поля H . *b* — Зависимость напряжения второй гармоники $u^{(2)}$ от амплитуды возбуждающего поля h . Сплошная линия - направляющая для глаз. Штриховая линия - квадратичная аппроксимация.

Fig. 6. *a* — Dependence of the second-harmonic ME voltage $u^{(2)}$ on the DC magnetic field H . *b* — Dependence of the second-harmonic voltage $u^{(2)}$ on the amplitude h of the excitation field. The solid line is a guide for the eyes. The dashed line is a quadratic approximation.

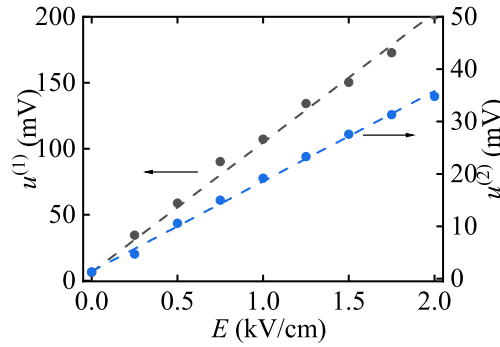


Рис. 7. Зависимость амплитуды первой $u^{(1)}$ и второй $u^{(2)}$ гармоник МЭ напряжения от электрического поля E .

Fig. 7. Dependence of the first-harmonic $u^{(1)}$ and second-harmonic $u^{(2)}$ amplitudes of the ME voltage on the electric field E .

3. Обсуждение

Оценим резонансную частоту планарных колебаний структуры по формуле [15]:

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{Y}{\rho}}, \quad (1)$$

где l - длина образца, $Y = (a_p Y_p + a_m Y_m) / (a_p + a_m)$ и $\rho = (a_p \rho_p + a_m \rho_m) / (a_p + a_m)$ - эффективные модуль Юнга и плотность структуры, соответственно. Индексы «р» и «м» соответствуют ПЭ и ФМ слою. Подставляя в (1) значения параметров $Y_p = 76$ ГПа, $Y_m = 100$ ГПа, $\rho_p = 8000$ кг/м³, $\rho_m = 7180$ кг/м³ [3, 16], получаем для первой моды колебаний по длине структуры $f_1 \approx 152.7$ кГц и для первой моды колебаний по ширине $f_2 \approx 254.5$ кГц. Оценки по (1) хорошо совпадают с экспериментом. Из (1) также следует, что зависимость частоты резонанса от поля H обусловлена изменением модуля Юнга магнитного слоя [17].

Для объяснения полевых зависимостей гармоник МЭ напряжения от поля H пред-

ставим напряжение в виде суммы компонент с различными частотами [11]:

$$u = u^{(0)} + u^{(1)} \cos(2\pi ft) + u^{(2)} \cos(4\pi ft) + \dots \quad (2)$$

Здесь $u^{(0)}$ – постоянное напряжение ($f = 0$), $u^{(1)}$ – амплитуда напряжения с частотой возбуждающего поля и $u^{(2)}$ – амплитуда второй гармоники. При прямом МЭ эффекте амплитуды гармоник даются выражением

$$u^{(n)} = Ad_{31}\lambda^{(n)}h^n, \quad (3)$$

где A – константа, зависящая от размеров и механических свойств слоев, d_{31} – пьезомодуль ПЭ слоя, $\lambda^{(n)}$ – n -я производная магнитострикции ФМ слоя по магнитному полю, $n = 1, 2, 3 \dots$ – номер гармоники, h – амплитуда возбуждающего поля. В случае линейного МЭ эффекта $n = 1$ используют обозначение $\lambda^{(1)} = q$ – пьезомагнитный коэффициент, при $n = 2$ – $\lambda^{(2)} = p$ – нелинейный пьезомагнитный коэффициент. Таким образом, форма зависимости амплитуд первой и второй гармоник МЭ напряжения от поля H определяются первой и второй производными от магнитострикции Metglas по полю. На рис. 8а приведены зависимости 1-ой и 2-ой производных от магнитострикции по полю, полученные методом численного дифференцирования кривой на рис. 2b. Видно, что результаты измерений, представленные на рис. 4 и рис. 6, хорошо согласуются с теорией.

Для объяснения зависимости амплитуд гармоник МЭ напряжения от электрического поля E также используем (3). Форма зависимости МЭ напряжения от поля E может определяться только зависимостью пьезомодуля d_{31} от E . У пьезоэлектриков величина пьезомодуля при малых E постоянна и поэтому в структурах с ПЭ слоями поле E слабо влияет на величину МЭ эффекта. Совсем другая ситуация для структур со слоем электростриктора. На рис. 8b приведена зависимость нормированного на максимальное значение пьезомодуля от электрического поля E , полученная численным дифференцированием кривой на рис. 2a. В диапазоне слабых полей до $E \approx 2$ кВ/см пьезомодуль растет линейно с полем, $d_{31} \approx 2M_{31}E$, затем достигает максимума в некотором поле и монотонно убывает. Вертикальная линия на рис. 8b показывает диапазон, в котором были проведены исследования в данной работе. Видно, что линейная форма зависимостей, приведенных на рис. 7, хорошо согласуется с предсказанием теории.

Оценим величины МЭ коэффициентов для структуры Metglas/PMN-PT. В отсутствие электрического поля ($E = 0$), используя данные рис. 3 и рис. 5, для линейного МЭ эффекта получаем коэффициент $\alpha_E^{(1)} = u_1/(a_p h) \approx 54$ мВ/(Э·см), для нелинейного МЭ эффекта – $\alpha_E^{(2)} = u_1^{(2)}/(a_p h^2) \approx 0.8$ мВ/(Э²·см). Величины МЭ коэффициентов оказались много меньше таковых в структурах с ПЭ керамическими слоями [12, 18, 19], что обусловлено малой величиной пьезомодуля d_{31} использованной керамики. Однако, при приложении к структуре поля $E = 2$ кВ/см МЭ коэффициенты существенно выросли: до $\alpha_E^{(1)} \approx 1.7$ В/(Э·см) для линейного МЭ эффекта и до $\alpha_E^{(2)} \approx 20$ мВ/(Э²·см) для нелинейного МЭ эффекта. Полученные МЭ коэффициенты сравнимы с лучшими результатами для структур со слоями PMN-PT керамик [20] и намного превосходят коэффициенты для структуры с электрострикционной керамикой PMN-PZT [7]. Высокая эффективность удвоения частоты в исследованной структуре может быть использована для создания управляемых датчиков магнитных полей с линейной характеристикой.

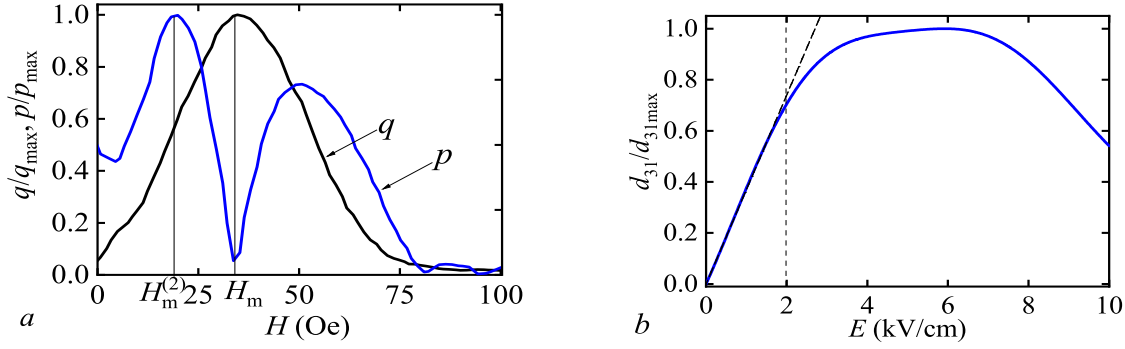


Рис. 8. *a* — Зависимость нормированных линейного $q = \lambda^{(1)}$ и нелинейного $p = \lambda^{(2)}$ пьезомагнитных коэффициентов ФМ слоя от магнитного поля H . *b* — Зависимость нормированного пьезомодуля d_{31} ЭС слоя от электрического поля E .

Fig. 8. *a* — Dependence of the normalized linear $q = \lambda^{(1)}$ and nonlinear $p = \lambda^{(2)}$ piezomagnetic coefficients of the FM layer on the magnetic field H . *b* — Dependence of the normalized piezoelectric coefficient d_{31} of the ES layer on the electric field E .

Закключение

Таким образом, в работе экспериментально исследованы МЭ эффекты в композитной структуре, содержащей слой аморфного сплава Metglas и слой электрострикционной керамики PMN-PT. Наблюдали прямой линейный МЭ эффект и нелинейный эффект удвоения частоты, обусловленный нелинейностью магнитострикции. Показано, что приложение к структуре электрического поля E напряженностью до 2 кВ/см приводит к увеличению эффектов более, чем в 25 раз. Величины МЭ коэффициентов составили $\alpha_E \approx 1.7$ В/(Э·см) для линейного эффекта и $\alpha_E^{(2)} \approx 20$ мВ/(Э²·см) для нелинейного эффекта. Формы частотных и полевых зависимостей гармоник МЭ напряжения хорошо описываются теорией. Результаты могут быть использованы для создания датчиков магнитных полей и удвоителей частоты на основе композитных структур с ЭС керамикой.

Список литературы

1. C.-W. Nan, M. I. Bichurin, S. Dong, D. Viehland, G. Srinivasan Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions // Journal of Physics D: Applied Physics. 2008. Vol. 103. P. 031101. DOI: 10.1063/1.2836410.
2. X. Liang, A. Matyushov, P. Hayes, V. Schell, C. Dong, H. Chen, Y. He, A. Will-Cole, E. Quandt, P. Martins, J. McCord, M. Medarde, S. Lanceros-Mendez, S. van Dijken, N. X. Sun, J. Sort Roadmap on Magnetoelectric Materials and Devices // IEEE Transactions on Magnetics. 2021. Vol. 12. P. 100149. DOI: 10.1016/j.mtbio.2021.100149.
3. Z. Chu, M. J. PourhosseiniAsl, S. Dong Review of multi-layered magnetoelectric composite materials and devices applications // Journal of Physics D: Applied Physics. 2018. Vol. 51, no. 24. P. 243001. DOI: 10.1088/1361-6463/aac29b.
4. X. Liang, C. Dong, H. Chen, J. Wang, Y. Wei, M. Zaeimbashi, Y. He, A. Matyushov, C. Sun, N. Sun A review of thin-film magnetoelastic materials for magnetoelectric applications // Sensors. 2020. Vol. 20, no. 5. P. 1532. DOI: 10.3390/s20051532.
5. K. Uchino Electrostrictive and Piezoelectric Effects in Relaxor Ferroelectrics: Historical Background // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2022. Vol. 69. P. 3013–3036. DOI: 10.1109/TUFFC.2022.3165002.

6. *F. Li, L. Jin, Z. Xu, S. Zhang* Electrostrictive effect in ferroelectrics: An alternative approach to improve piezoelectricity // *Applied Physics Reviews*. 2014. Vol. 1. P. 011103. DOI: 10.1063/1.4861260.
7. *S. A. Gridnev, M. V. Khakhlenkov, L. Y. Fetisov* The influence of the electric field on the magnetoelectric response of a layered ferromagnet – electrostrictor heterostructure // *Ferroelectrics*. 2020. Vol. 561, no. 1. P. 90–99. DOI: 10.1080/00150193.2020.1736920.
8. *D. Burdin, D. Chashin, N. Ekonomov, L. Fetisov, Y. Fetisov, M. Shamonin* DC magnetic field sensor based on the nonlinear magnetoelectric effect in magnetic heterostructures // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2016. Vol. 49, no. 37. P. 375002. DOI: 10.1088/0022-3727/49/37/375002.
9. *P. Hayes, S. Salzer, J. Reermann, E. Yarar, V. Robisch, A. Piorra, D. Meyners, M. Hoff, R. Knöchel, G. Schmidt, E. Quandt* Electrically modulated magnetoelectric sensors // *Applied Physics Letters*. 2016. Vol. 108, no. 18. P. 182902. DOI: 10.1063/1.4948470.
10. *F. A. Fedulov, L. Y. Fetisov, D. V. Chashin, D. V. Saveliev, D. A. Burdin, Y. K. Fetisov* Magnetic field spectrum analyzer using nonlinear magnetoelectric effect in composite ferromagnet-piezoelectric heterostructure // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2022. Vol. 346. P. 113844. DOI: 10.1016/j.sna.2022.113844.
11. *Y. Fetisov, D. A. Burdin, N. A. Ekonomov, D. V. Chashin, J. Zhang, G. Srinivasan, Y. K. Fetisov* Nonlinear magnetoelectric effects at high magnetic field amplitudes in composite multiferroics // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2018. Vol. 51, no. 15. P. 154003. DOI: 10.1088/1361-6463/aab384.
12. *D. V. Saveliev, Y. K. Fetisov, D. V. Chashin, L. Y. Fetisov, D. A. Burdin, N. A. Ekonomov* Magnetoelectric effects in a layered ferromagnet-electrostrictor heterostructure // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2018. Vol. 466. P. 219–224. DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.07.034.
13. *D. A. Burdin* Measurement of magnetostriction using a strain gauge bridge with alternating excitation // *Russian Technological Journal*. 2025. Vol. 13. P. 37–46. DOI: 10.32362/2500-316X-2025-13-4-37-46.
14. *D. A. Burdin, D. V. Saveliev, N. A. Ekonomov, V. I. Shishkin, Y. K. Fetisov* Inequivalence of direct and converse nonlinear resonant magnetoelectric effects // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2025. Vol. 630. P. 173444. DOI: 10.1016/j.jmmm.2025.173444.
15. *S. Timoshenko* *Vibration Problems in Engineering*. 2nd ed. Toronto, ON, Canada: D. van Nostrand Company, 1955.
16. *A. Kumar, A. Roy* Structural and electromechanical characterization of lead magnesium niobate-lead titanate (PMN-0.3PT) piezoceramic for energy harvesting applications // *arXiv*. 2022. P. 1–23. DOI: 10.48550/ARXIV.2205.04313.
17. *B. Gojdka, R. Jahns, V. Meurisch, H. Greve, R. Adelung, E. Quandt, R. Knöchel, F. Faupel* Fully integrable magnetic field sensor based on delta-E effect // *Applied Physics Letters*. 2011. Vol. 99, no. 22. P. 223502. DOI: 10.1063/1.3664135.
18. *D. A. Filippov, T. A. Galkina, V. M. Laletin, G. Srinivasan* Inverse magnetoelectric effect in disk-shaped samples of ferrite piezoelectric composites // *Physics of Solid State*. 2011. Vol. 53. P. 1832–1838. DOI: 10.1134/S1063783411090113.
19. *A. V. Kalgin* Converse magnetoelectric effect in three-layered composites based on amorphous ferromagnetic $\text{Fe}_{0.45}\text{Co}_{0.45}\text{Zr}_{0.1}$ alloy and relaxor $(1-x)\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ - $x\text{PbZr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47}\text{O}_3$ ceramics // *Journal of Alloys and Compounds*. 2025. Vol. 1017. P. 179154. DOI: 10.1016/j.jallcom.2025.179154.
20. *G. Channagoudra, A. K. Saw, K. Dey, D. Xavier, R. Venkatesh, V. Subramanian, D. K. Shukla, V. Dayal* Substantial magnetoelectric response in $2/3[\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3]$ - $1/3[\text{PbTiO}_3]$ - CoFe_2O_4 composites // *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 863. P. 158504. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.158504.

References

1. C.-W. Nan, M. I. Bichurin, S. Dong, D. Viehland, G. Srinivasan Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions // Journal of Physics D: Applied Physics. 2008. Vol. 103. P. 031101. DOI: 10.1063/1.2836410.
2. X. Liang, A. Matyushov, P. Hayes, V. Schell, C. Dong, H. Chen, Y. He, A. Will-Cole, E. Quandt, P. Martins, J. McCord, M. Medarde, S. Lanceros-Mendez, S. van Dijken, N. X. Sun, J. Sort Roadmap on Magnetoelectric Materials and Devices // IEEE Transactions on Magnetics. 2021. Vol. 12. P. 100149. DOI: 10.1016/j.mtbio.2021.100149.
3. Z. Chu, M. J. PourhosseiniAsl, S. Dong Review of multi-layered magnetoelectric composite materials and devices applications // Journal of Physics D: Applied Physics. 2018. Vol. 51, no. 24. P. 243001. DOI: 10.1088/1361-6463/aac29b.
4. X. Liang, C. Dong, H. Chen, J. Wang, Y. Wei, M. Zaeimbashi, Y. He, A. Matyushov, C. Sun, N. Sun A review of thin-film magnetoelastic materials for magnetoelectric applications // Sensors. 2020. Vol. 20, no. 5. P. 1532. DOI: 10.3390/s20051532.
5. K. Uchino Electrostrictive and Piezoelectric Effects in Relaxor Ferroelectrics: Historical Background // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2022. Vol. 69. P. 3013–3036. DOI: 10.1109/TUFFC.2022.3165002.
6. F. Li, L. Jin, Z. Xu, S. Zhang Electrostrictive effect in ferroelectrics: An alternative approach to improve piezoelectricity // Applied Physics Reviews. 2014. Vol. 1. P. 011103. DOI: 10.1063/1.4861260.
7. S. A. Gridnev, M. V. Khakhlenkov, L. Y. Fetisov The influence of the electric field on the magnetoelectric response of a layered ferromagnet – electrostrictor heterostructure // Ferroelectrics. 2020. Vol. 561, no. 1. P. 90–99. DOI: 10.1080/00150193.2020.1736920.
8. D. Burdin, D. Chashin, N. Ekonomov, L. Fetisov, Y. Fetisov, M. Shamonin DC magnetic field sensor based on the nonlinear magnetoelectric effect in magnetic heterostructures // Journal of Physics D: Applied Physics. 2016. Vol. 49, no. 37. P. 375002. DOI: 10.1088/0022-3727/49/37/375002.
9. P. Hayes, S. Salzer, J. Reermann, E. Yarar, V. Robisch, A. Piorra, D. Meyners, M. Hoff, R. Knöchel, G. Schmidt, E. Quandt Electrically modulated magnetoelectric sensors // Applied Physics Letters. 2016. Vol. 108, no. 18. P. 182902. DOI: 10.1063/1.4948470.
10. F. A. Fedulov, L. Y. Fetisov, D. V. Chashin, D. V. Saveliev, D. A. Burdin, Y. K. Fetisov Magnetic field spectrum analyzer using nonlinear magnetoelectric effect in composite ferromagnet-piezoelectric heterostructure // Sensors and Actuators A: Physical. 2022. Vol. 346. P. 113844. DOI: 10.1016/j.sna.2022.113844.
11. Y. Fetisov, D. A. Burdin, N. A. Ekonomov, D. V. Chashin, J. Zhang, G. Srinivasan, Y. K. Fetisov Nonlinear magnetoelectric effects at high magnetic field amplitudes in composite multiferroics // Journal of Physics D: Applied Physics. 2018. Vol. 51, no. 15. P. 154003. DOI: 10.1088/1361-6463/aab384.
12. D. V. Saveliev, Y. K. Fetisov, D. V. Chashin, L. Y. Fetisov, D. A. Burdin, N. A. Ekonomov Magnetoelectric effects in a layered ferromagnet-electrostrictor heterostructure // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2018. Vol. 466. P. 219–224. DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.07.034.
13. D. A. Burdin Measurement of magnetostriction using a strain gauge bridge with alternating excitation // Russian Technological Journal. 2025. Vol. 13. P. 37–46. DOI: 10.32362/2500-316X-2025-13-4-37-46.
14. D. A. Burdin, D. V. Saveliev, N. A. Ekonomov, V. I. Shishkin, Y. K. Fetisov Inequivalence of direct and converse nonlinear resonant magnetoelectric effects // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2025. Vol. 630. P. 173444. DOI: 10.1016/j.jmmm.2025.173444.
15. S. Timoshenko Vibration Problems in Engineering. 2nd ed. Toronto, ON, Canada: D. van

Nostrand Company, 1955.

16. *A. Kumar, A. Roy* Structural and electromechanical characterization of lead magnesium niobate-lead titanate (PMN-0.3PT) piezoceramic for energy harvesting applications // arXiv. 2022. P. 1–23. DOI: 10.48550/ARXIV.2205.04313.
17. *B. Gojdka, R. Jahns, V. Meurisch, H. Greve, R. Adelung, E. Quandt, R. Knöchel, F. Faupel* Fully integrable magnetic field sensor based on delta-E effect // Applied Physics Letters. 2011. Vol. 99, no. 22. P. 223502. DOI: 10.1063/1.3664135.
18. *D. A. Filippov, T. A. Galkina, V. M. Laletin, G. Srinivasan* Inverse magnetoelectric effect in disk-shaped samples of ferrite piezoelectric composites // Physics of Solid State. 2011. Vol. 53. P. 1832–1838. DOI: 10.1134/S1063783411090113.
19. *A. V. Kalgin* Converse magnetoelectric effect in three-layered composites based on amorphous ferromagnetic $\text{Fe}_{0.45}\text{Co}_{0.45}\text{Zr}_{0.1}$ alloy and relaxor $(1-x)\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ - $x\text{PbZr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47}\text{O}_3$ ceramics // Journal of Alloys and Compounds. 2025. Vol. 1017. P. 179154. DOI: 10.1016/j.jallcom.2025.1
20. *G. Channagoudra, A. K. Saw, K. Dey, D. Xavier, R. Venkatesh, V. Subramanian, D. K. Shukla, V. Dayal* Substantial magnetoelectric response in $2/3[\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3]$ - $1/3[\text{PbTiO}_3]$ - CoFe_2O_4 composites // Journal of Alloys and Compounds. 2021. Vol. 863. P. 158504. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.158504.