

Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2026. Т. 34, № 5
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2026;34(5)

Научная статья
УДК 538.955

DOI: 10.18500/0869-6632-003232
EDN: IGFKOP

Магнитоэлектрический эффект в структуре ферромагнетик – электростриктор

Д. В. Савельев[✉], Д. А. Бурдин, Е. В. Болотина, Д. В. Чашин, А. П. Переверзева, Ю. К. Фетисов

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 5.06.2026, принята к публикации 5.08.2026,
опубликована онлайн 12.08.2026, опубликована 30.09.2026

Аннотация. 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-РТ. **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-й и 2-й гармоник генерируемого структурой напряжения при изменении частоты, возбуждающего поля и поля смещения. **Результаты.** Показано, что магнитострикция Metglas и электродеформация PMN-РТ керамики в слабых полях квадратично зависят от магнитного и электрического полей. Обнаружены и исследованы линейный прямой МЭ-эффект и нелинейный МЭ-эффект удвоения частоты в структуре, возникающие из-за нелинейности магнитострикции. Зависимости амплитуд 1-й и 2-й гармоник МЭ-напряжения от магнитного поля и амплитуды возбуждающего поля хорошо описываются теорией. Продemonстрировано 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, магнитострикция, 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. Т. 34, № 5. С. 723–734. 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[✉], D. A. Burdin, E. V. Bolotina, D. V. Chashin, A. P. Pereverzeva, Yu. K. Fetisov

MIREA – 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 5.06.2026, accepted 5.08.2026, available online 12.08.2026, published 30.09.2026

Abstract. 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 DV, Burdin DA, Bolotina EV, Chashin DV, Pereverzeva AP, Fetisov YuK. Magnetoelectric effect in a ferromagnet – electrostrictor structure. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2026;34(5):723–734. 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 элестрострикционные (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 магнионикобата — 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 приблизительно 2 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 $a_m = 25 \text{ мкм}$, магнитоэлектрическую насыщенность $\lambda_s \approx 22 \cdot 10^{-6}$ в поле насыщения $H_s \approx 70 \text{ Э}$. Слои были соединены с помощью цианоакрилатного клея.

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 33210a. Катушка создавала возбуждающее магнитное поле $h \cos(2\pi ft)$ с частотой $f = 30 \dots 300 \text{ кГц}$ и амплитудой до $h = 6 \text{ Э}$. Постоянное магнитное поле $H = 0 \dots 100 \text{ Э}$, 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-PT слоя через развязывающий конденсатор емкостью 1 мкФ подавали постоянное напряжение от источника

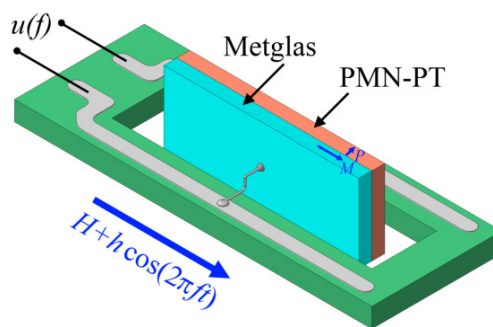


Рис. 1. Схематическое изображение композитной структуры PMN-PT/Metglas

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

GENH 600-1.3 (TDK Lambda, Япония). Измерение электрострикции слоя PMN-РТ керамики и магнитострикции ленты Metglas проводили тензометрическим методом с помощью установки, описанной в [13].

2. Результаты измерений

2.1. Электрострикция и магнитострикция слоев. На рис. 2 приведены измеренные зависимости электрострикции пластины PMN-РТ от электрического поля $s(E)$ и магнитострикции ленты аморфного сплава 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. Магнитострикция ленты 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.

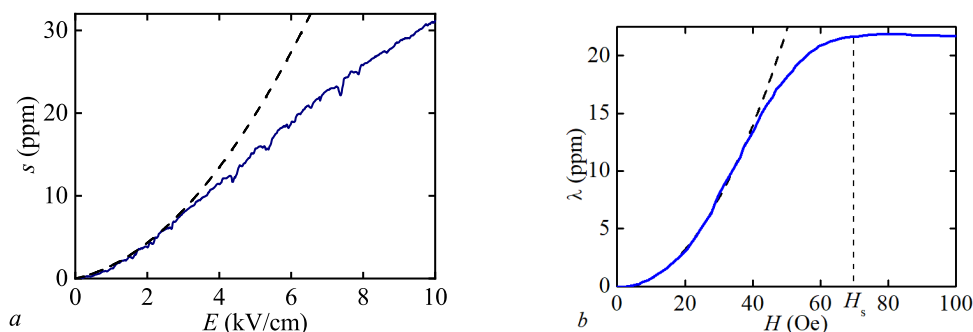


Рис. 2. *a* — Зависимость электрострикции s керамики PMN-РТ от электрического поля E . *b* — Зависимость магнитострикции λ ленты Metglas от магнитного поля H . Штриховыми линиями показаны квадратичные аппроксимации

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

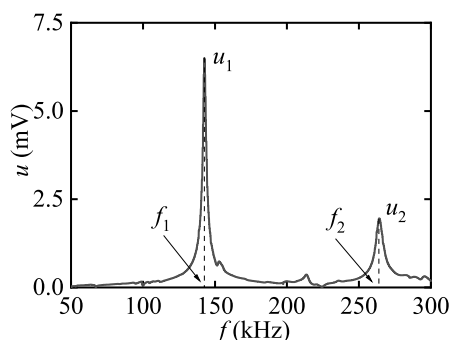


Рис. 3. Зависимость МЭ-напряжения u от частоты f возбуждающего поля при $h = 2.35$ Э и $H = 33$ Э

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

2.2. Прямой линейный МЭ-эффект.

При исследовании линейного МЭ-эффекта структуру возбуждали переменным магнитным полем с частотой f и генерируемое напряжение 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

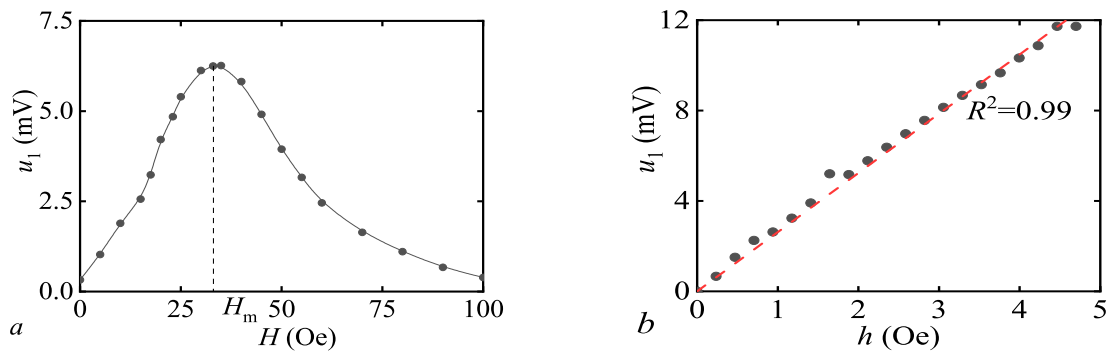


Рис. 4. Зависимость МЭ-напряжения u_1 на частоте резонанса от: a — постоянного магнитного поля H ; b — от амплитуды h возбуждающего магнитного поля. Сплошная линия — направляющая для глаз. Штриховая линия — линейная аппроксимация

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

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.

На рис. 4, a 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 примерно на 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 примерно на 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. 4, b), 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 приблизительно 0.4 мВ. Подчеркнем, что при частоте возбуждающего поля $f_1/2$ частота генерируемого структурой напряжения была равна f_1 , то есть имело место удвоение частоты и усиление напряжения на частоте резонанса структуры. Аналогично пик вблизи

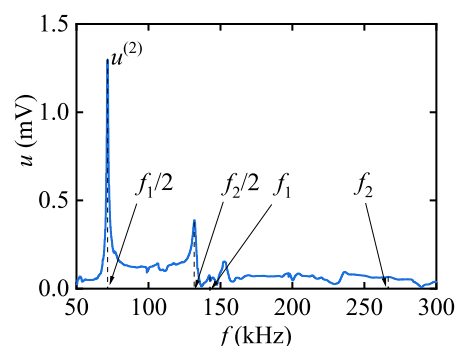


Рис. 5. Зависимость амплитуды второй гармоники МЭ-напряжения u от частоты f возбуждающего поля при $h = 5.9$ Э и $H = 20$ Э

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

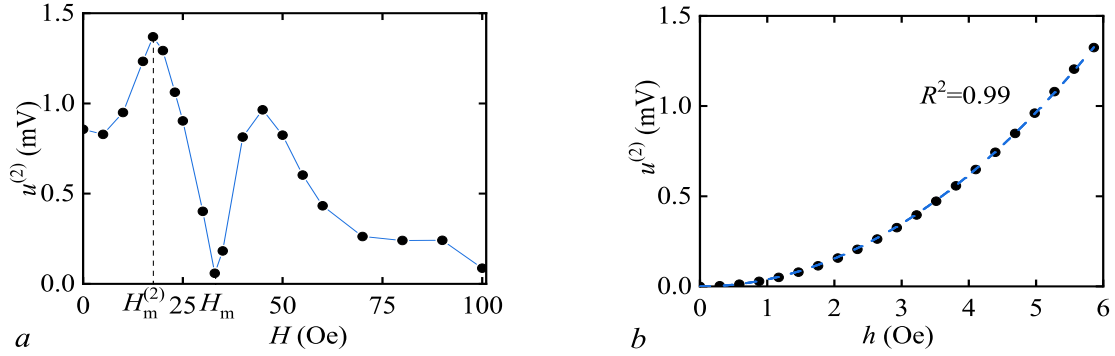


Рис. 6. *a* — Зависимость МЭ-напряжения второй гармоники $u^{(2)}$ от постоянного поля H . *b* — Зависимость напряжения второй гармоники $u^{(2)}$ от амплитуды возбуждающего поля h . Сплошная линия — направляющая для глаз. Штриховая линия — квадратичная аппроксимация

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

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. 6, *a* 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 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. 6, *b*).

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

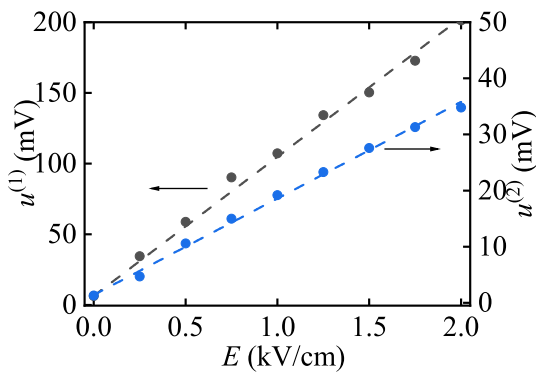


Рис. 7. Зависимость амплитуды первой $u^{(1)}$ и второй $u^{(2)}$ гармоник МЭ-напряжения от электрического поля E

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

$u^{(1)}(E)$ 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 обеих 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 при приложении поля E не изменялись. Электрическое поле E , в отличие от магнитного поля H , никак не влияло на частоты резонансов структуры.

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 «m» 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 представим напряжение в виде суммы компонент с различными частотами [11]:

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

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

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

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, формы зависимости амплитуд первой и второй гармоник МЭ-напряжения от поля H определяются первой и второй производными от магнитострикции Metglas по полю. На рис. 8, а приведены зависимости 1-й и 2-й производных от магнитострикции по полю, полученные методом численного дифференцирования кривой на рис. 2, b. 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. 8, b приведена зависимость нормированного на максимальное значение пьезомодуля от электрического поля E , полученная численным дифференцированием кривой на рис. 2, a. 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. 8, b 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

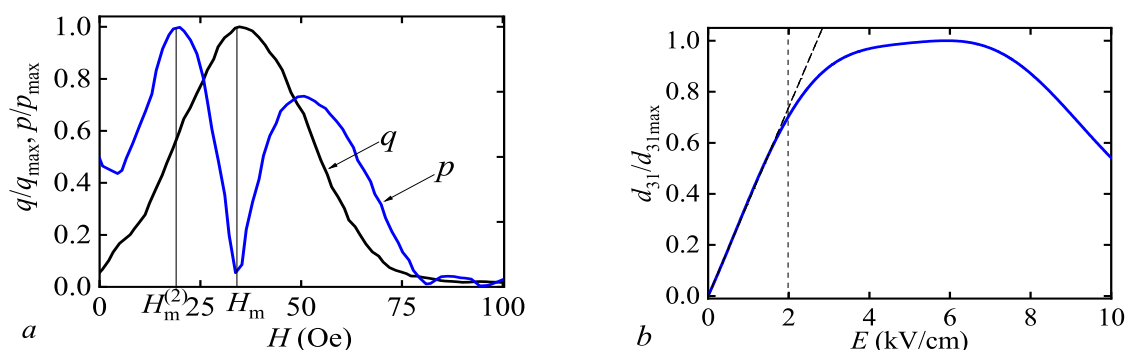


Рис. 8. *a* — Зависимость нормированных линейного $q = \lambda^{(1)}$ и нелинейного $p = \lambda^{(2)}$ пьезомагнитных коэффициентов ФМ-слоя от магнитного поля H . *b* — Зависимость нормированного пьезомодуля d_{31} ЭС-слоя от электрического поля E

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

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-РТ 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.

Заключение

Таким образом, в работе экспериментально исследованы МЭ-эффекты в композитной структуре, содержащей слой аморфного сплава Metglas и слой электрострикционной керамики PMN-РТ. Наблюдали прямой линейный МЭ-эффект и нелинейный эффект удвоения частоты, обусловленный нелинейностью магнитоэлектрики. 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. Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions // J. Appl. Phys. 2008. Vol. 103. P. 031101. DOI: 10.1063/1.2836410.
2. Liang X., Matyushov A., Hayes P., Schell V., Dong C., Chen H., He Y., Will-Cole A., Quandt E., Martins P., McCord J., Medarde M., Lancers-Mendez S., van Dijken S., Sun N.X., Sort J. Roadmap on magnetoelectric materials and devices // IEEE Transactions on Magnetics. 2021. Vol. 57, no. 8. P. 400157. DOI: 10.1109/tmag.2021.3086635.
3. Chu Z., PourhosseiniAsl M.J., Dong S. Review of multi-layered magnetoelectric composite

materials and devices applications // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. Vol. 51, no. 24. P. 243001. DOI: 10.1088/1361-6463/aac29b.

4. *Liang X., Dong C., Chen H., Wang J., Wei Y., Zaeimbashi M., He Y., Matyushov A., Sun C., Sun N.* A review of thin-film magnetoelastic materials for magnetoelectric applications // *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 5. P. 1532. DOI: 10.3390/s20051532.
5. *Uchino K.* 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. *Li F., Jin L., Xu Z., Zhang S.* Electrostrictive effect in ferroelectrics: An alternative approach to improve piezoelectricity // *Appl. Phys. Rev.* 2014. Vol. 1. P. 011103. DOI: 10.1063/1.4861260.
7. *Gridnev S. A., Khakhlenkov M. V., Fetisov L. Y.* 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. *Burdin D., Chashin D., Ekonomov N., Fetisov L., Fetisov Y., Shamonin M.* DC magnetic field sensor based on the nonlinear magnetoelectric effect in magnetic heterostructures // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2016. Vol. 49, no. 37. P. 375002. DOI: 10.1088/0022-3727/49/37/375002.
9. *Hayes P., Salzer S., Reermann J., Yarar E., Robisch V., Piorra A., Meyners D., Hoff M., Knöchel R., Schmidt G., Quandt E.* Electrically modulated magnetoelectric sensors // *Appl. Phys. Lett.* 2016. Vol. 108, no. 18. P. 182902. DOI: 10.1063/1.4948470.
10. *Fedulov F. A., Fetisov L. Y., Chashin D. V., Saveliev D. V., Burdin D. A., Fetisov Y. K.* 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. *Fetisov Y., Burdin D. A., Ekonomov N. A., Chashin D. V., Zhang J., Srinivasan G., Fetisov Y. K.* Nonlinear magnetoelectric effects at high magnetic field amplitudes in composite multiferroics // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2018. Vol. 51, no. 15. P. 154003. DOI: 10.1088/1361-6463/aab384.
12. *Saveliev D. V., Fetisov Y. K., Chashin D. V., Fetisov L. Y., Burdin D. A., Ekonomov N. A.* 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. *Бурдин Д. А.* Измерение магнитострикции тензометрическим мостом с переменным возбуждением // *Russian Technological Journal*. 2025. Т. 13, № 4. С. 37–46. DOI: 10.32362/2500-316X-2025-13-4-37-46.
14. *Burdin D. A., Saveliev D. V., Ekonomov N. A., Shishkin V. I., Fetisov Y. K.* 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. *Timoshenko S.* *Vibration Problems in Engineering*. Toronto: D. van Nostrand Company, 1955. 497 p.
16. *Kumar A., Roy A.* Structural and electromechanical characterization of lead magnesium niobate-lead titanate (PMN-0.3PT) piezoceramic for energy harvesting applications // *arXiv:2205.04313*. *arXiv Preprint*, 2022. 23 p. DOI: 10.48550/ARXIV.2205.04313.
17. *Gojdka B., Jahns R., Meurisch V., Greve H., Adelung R., Quandt E., Knöchel R., Faupel F.* Fully integrable magnetic field sensor based on delta-E effect // *Appl. Phys. Lett.* 2011. Vol. 99, no. 22. P. 223502. DOI: 10.1063/1.3664135.
18. *Филиппов Д. А., Галкина Т. А., Лалетин В. М., Сринивасан Г.* Инверсный магнитоэлектрический эффект в дискообразных образцах из феррит-пьезоэлектрических композитов // *Физика твердого тела*. 2011. Т. 53, № 9. С. 1737–1742.
19. *Kalgin A. V.* 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. Channagoudra G., Saw A. K., Dey K., Xavier D., Venkatesh R., Subramanian V., Shukla D. K., Dayal V. Substantial magnetoelectric response in $2/3[\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3]-1/3[\text{PbTiO}_3]-\text{CoFe}_2\text{O}_4$ composites // *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 863. P. 158504. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.158504.

References

1. Nan C-W, Bichurin MI, Dong S, Viehland D, Srinivasan G. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions. *J. Appl. Phys.* 2008;103:031101. DOI: 10.1063/1.2836410.
2. Liang X, Matyushov A, Hayes P, Schell V, Dong C, Chen H, He Y, Will-Cole A, Quandt E, Martins P, McCord J, Medarde M, Lanceros-Mendez S, van Dijken S, Sun NX, Sort J. Roadmap on magnetoelectric materials and devices. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2021;57(8):400157. DOI: 10.1109/tmag.2021.3086635.
3. Chu Z, PourhosseiniAsl MJ, Dong S. Review of multi-layered magnetoelectric composite materials and devices applications. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2018;51(24):243001. DOI: 10.1088/1361-6463/aac29b.
4. Liang X, Dong C, Chen H, Wang J, Wei Y, Zaeimbashi M, He Y, Matyushov A, Sun C, Sun N. A review of thin-film magnetoelastic materials for magnetoelectric applications. *Sensors*. 2020;20(5):1532. DOI: 10.3390/s20051532.
5. Uchino K. Electrostrictive and piezoelectric effects in relaxor ferroelectrics: Historical background. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2022;69:3013–3036. DOI: 10.1109/TUFFC.2022.3165002.
6. Li F, Jin L, Xu Z, Zhang S. Electrostrictive effect in ferroelectrics: An alternative approach to improve piezoelectricity. *Appl. Phys. Rev.* 2014;1:011103. DOI: 10.1063/1.4861260.
7. Gridnev SA, Khakhlenkov MV, Fetisov LY. The influence of the electric field on the magnetoelectric response of a layered ferromagnet–electrostrictor heterostructure. *Ferroelectrics*. 2020;561(1): 90–99. DOI: 10.1080/00150193.2020.1736920.
8. Burdin D, Chashin D, Ekonomov N, Fetisov L, Fetisov Y, Shamonin M. DC magnetic field sensor based on the nonlinear magnetoelectric effect in magnetic heterostructures. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2016;49(37):375002. DOI: 10.1088/0022-3727/49/37/375002.
9. Hayes P, Salzer S, Reermann J, Yarar E, Robisch V, Piorra A, Meyners D, Hoff M, Knöchel R, Schmidt G, Quandt E. Electrically modulated magnetoelectric sensors. *Appl. Phys. Lett.* 2016; 108(18):182902. DOI: 10.1063/1.4948470.
10. Fedulov FA, Fetisov LY, Chashin DV, Saveliev DV, Burdin DA, Fetisov YK. Magnetic field spectrum analyzer using nonlinear magnetoelectric effect in composite ferromagnet-piezoelectric heterostructure. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2022;346:113844. DOI: 10.1016/j.sna.2022.113844.
11. Fetisov Y, Burdin DA, Ekonomov NA, Chashin DV, Zhang J, Srinivasan G, Fetisov YK. Nonlinear magnetoelectric effects at high magnetic field amplitudes in composite multiferroics. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2018;51(15):154003. DOI: 10.1088/1361-6463/aab384.
12. Saveliev DV, Fetisov YK, Chashin DV, Fetisov LY, Burdin DA, Ekonomov NA. Magnetoelectric effects in a layered ferromagnet-electrostrictor heterostructure. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2018;466:219–224. DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.07.034.
13. Burdin DA. Measurement of magnetostriction using a strain gauge bridge with alternating

- excitation. Russian Technological Journal. 2025;13(4):37–46. DOI: 10.32362/2500-316X-2025-13-4-37-46.
14. Burdin DA, Savelev DV, Ekonomov NA, Shishkin VI, Fetisov YK. Inequivalence of direct and converse nonlinear resonant magnetoelectric effects. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2025;630:173444. DOI: 10.1016/j.jmmm.2025.173444.
 15. Timoshenko S. Vibration Problems in Engineering. Toronto: D. van Nostrand Company; 1955. 497 p.
 16. Kumar A, Roy A. Structural and electromechanical characterization of lead magnesium niobate-lead titanate (PMN-0.3PT) piezoceramic for energy harvesting applications. arXiv:2205.04313. arXiv Preprint; 2022. 23 p. DOI: 10.48550/ARXIV.2205.04313.
 17. Gojdka B, Jahns R, Meurisch V, Greve H, Adelung R, Quandt E, Knöchel R, Faupel F. Fully integrable magnetic field sensor based on delta-E effect. Appl. Phys. Lett. 2011;99(22):223502. DOI: 10.1063/1.3664135.
 18. Filippov DA, Galkina TA, Laletin VM, Srinivasan G. Inverse magnetoelectric effect in disk-shaped samples of ferrite piezoelectric composites. Physics of Solid State. 2011;53:1832–1838. DOI: 10.1134/S1063783411090113.
 19. Kalgin AV. 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;1017:179154. DOI: 10.1016/j.jallcom.2025.179154.
 20. Channagoudra G, Saw AK, Dey K, Xavier D, Venkatesh R, Subramanian V, Shukla DK, Dayal V. 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;863:158504. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.158504.



Савельев Дмитрий Владимирович — окончил бакалавриат МИРЭА — Российского технологического университета по направлению «Нанотехнологии и микросистемная техника» (2016) и магистратуру по специальности «Электроника и наноэлектроника» (2018). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (2023). В настоящее время работает научным сотрудником в НОЦ «Магнитоэлектрические материалы и устройства» РТУ МИРЭА и в должности доцента на кафедре наноэлектроники в РТУ МИРЭА (с 2025 года). Область научных интересов: магнитоэлектрические эффекты в композитных структурах и устройства микросистемной техники и электроники на их основе, магнитоактивные эластомеры, магнитные и сегнетоэлектрические материалы. Имеет более 40 статей в рецензируемых научных журналах, 4 патента и более 20 выступлений на всероссийских и международных конференциях.

Россия, 119454, Москва, проспект Вернадского, 78
 МИРЭА — Российский технологический университет
 E-mail: dimsav94@gmail.com
 ORCID: 0000-0001-7762-9198
 AuthorID (eLibrary.Ru): 1023277



Бурдин Дмитрий Алексеевич — окончил Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики (2007, МИРЭА). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (2012, МИРЭА). В настоящее время работает в должности старшего научного сотрудника в Российском технологическом университете (ранее МИРЭА) в Научно-образовательном центре «Магнитоэлектрические материалы и устройства». Занимается исследованием линейных и нелинейных магнитоэлектрических эффектов в композитных гетероструктурах, разработкой на их основе датчиков магнитных полей, устройств микросистемной техники и электроники. Имеет более 40 статей в реферируемых журналах, 8 патентов, доклады на конференциях.

Россия, 119454, Москва, проспект Вернадского, 78
 МИРЭА — Российский технологический университет
 E-mail: phantastic@mail.ru
 AuthorID (eLibrary.Ru): 753703



Болотина Екатерина Витальевна — окончила бакалавриат в МИРЭА — Российском технологическом университете (2024) и магистратуру в Национальном исследовательском технологическом университете МИСИС (2026). В настоящее время работает в РТУ МИРЭА в Научно-образовательном центре «Магнитоэлектрические материалы и устройства» в должности стажера-исследователя, занимается исследованием магнитоэлектрических эффектов в композитных гетероструктурах и разработкой на их основе высокочувствительных датчиков магнитных полей. Автор 7 статей в рецензируемых журналах, 1 патента и 15 докладов на конференциях.

Россия, 119454, Москва, проспект Вернадского, 78
МИРЭА — Российский технологический университет
E-mail: ekaterina.bolotina1@mail.ru
ORCID: 0000-0003-1004-2821
AuthorID (eLibrary.Ru): 1219586



Чашин Дмитрий Владимирович — окончил Московский институт радиотехники, электроники и автоматики (1974, МИРЭА). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук (2015, МИРЭА). В настоящее время работает в Российском технологическом университете (ранее МИРЭА) в Научно-образовательном центре «Магнитоэлектрические материалы и устройства» в должности ведущего инженера, занимается исследованием магнитоэлектрических эффектов в композитных гетероструктурах, разработкой на их основе высокочувствительных датчиков магнитных полей, различных устройств микросистемной техники и электроники. Имеет более 70 статей в реферируемых журналах, 15 патентов, более 30 докладов на конференциях.

Россия, 119454, Москва, проспект Вернадского, 78
МИРЭА — Российский технологический университет
E-mail: chashin@mirea.ru
ORCID: 0000-0002-1031-6696
AuthorID (eLibrary.Ru): 601897



Переверзева Александра Павловна — окончила МИРЭА Российский технологический университет (2023, РТУ МИРЭА). В 2025 году работала в должности лаборанта в РТУ МИРЭА в Научно-образовательном центре «Магнитоэлектрические материалы и устройства» и занималась исследованием электрострикторов. В настоящее время работает в должности старшего специалиста во Всероссийском научно-исследовательском институте радиозлектроники (ФГБУ «ВНИИР»). Занимается сопровождением опытно-конструкторских работ, связанных с интегральными микросхемами и полупроводниковыми приборами. Является призёром Всероссийского инженерного конкурса (ВИК 2024/25). Имеет 1 статью в реферируемых журналах, 3 доклада на конференциях.

Россия, 119454, Москва, проспект Вернадского, 78
МИРЭА — Российский технологический университет
E-mail: alex.pe.p@yandex.ru



Фетисов Юрий Константинович — окончил МИФИ (1978), затем аспирантуру МИФИ. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности физика твердого тела (1981, МИФИ) и доктора физико-математических наук (1993, ИРЭ РАН). С 1982 года работает в Московском институте радиотехники, электроники и автоматики (МИРЭА), в разные годы — в должности, доцента, профессора кафедры физики, директора НИИ информатики, декана факультета электроники. С 2015 года по настоящее время работает в Российском технологическом университете (ранее МИРЭА) в должности директора Научно-образовательного центра «Магнитоэлектрические материалы и устройства». Область научных интересов — спиновые волны в магнитных пленках и гетероструктурах, магнитоэлектрические явления в мультиферроиках и композитных гетероструктурах и их применение в микросистемной технике и электронике. Действительный член РАЕН. Имеет более 200 статей в реферируемых журналах, 12 патентов и несколько монографий.

Россия, 119454, Москва, проспект Вернадского, 78
МИРЭА — Российский технологический университет
E-mail: fetisov@mirea.ru
ORCID: 0000-0002-8627-2730
AuthorID (eLibrary.Ru): 19490