

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 537.63: 538.955: 538.956
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-63-70>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Нелинейный магнитоэлектрический эффект в кольцевой композитной гетероструктуре

В.И. Мусатов[®],
Ф.А. Федулов,
Д.В. Савельев,
Е.В. Болотина,
Л.Ю. Фетисов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: musatov.v.i@mail.ru

Резюме

Цели. Актуальность исследования магнитоэлектрических (МЭ) характеристик кольцевых гетероструктур «ферромагнетик-пьезоэлектрик» обусловлена созданием на их основе МЭ-устройств с улучшенными характеристиками. Целью настоящей работы является детальное исследование нелинейного МЭ-эффекта в кольцевой композитной гетероструктуре на основе пьезокерамики цирконата-титаната свинца (ЦТС) и аморфного ферромагнитного (ФМ) сплава Metglas[®] при ее циркулярном намагничивании.

Методы. МЭ-эффект исследован методом низкочастотной модуляции магнитного поля. Возбуждающее переменное и постоянное магнитные поля смещения были созданы при помощи тороидальной катушки, намотанной на гетероструктуру, для циркулярного намагничивания ферромагнитного слоя.

Результаты. Обнаружен нелинейный МЭ-эффект, заключающийся в генерации высших гармоник МЭ-напряжения при возбуждении структуры циркулярными магнитными полями в нерезонансном режиме. Исследованы полевые и амплитудные зависимости первых трех гармоник МЭ-напряжения. Получены МЭ-коэффициенты для линейного МЭ-эффекта $\alpha^{(1)} = 5.2 \text{ мВ}/(\text{Э}\cdot\text{см})$ и для нелинейного МЭ-эффекта $\alpha^{(2)} = 6 \text{ мВ}/(\text{Э}^2\cdot\text{см})$ и $\alpha^{(3)} = 0.15 \text{ мВ}/(\text{Э}^3\cdot\text{см})$ при частоте переменного магнитного поля $f = 1 \text{ кГц}$. Максимумы амплитуд 1-й и 3-й гармоник наблюдались при постоянном магнитном поле $H \sim 7 \text{ Э}$, что почти в два раза меньше, чем в планарных гетероструктурах ЦТС–Metglas[®].

Выводы. Обнаружен и исследован нелинейный МЭ-эффект в кольцевой структуре на основе пьезокерамики ЦТС и аморфного ФМ-сплава Metglas[®]. Вследствие отсутствия размагничивания при циркулярном намагничивании замкнутого ФМ-слоя нелинейные МЭ-эффекты проявляются при значительно меньших амплитудах возбуждающего переменного и управляющего постоянного магнитных полей по сравнению с планарными гетероструктурами. Исследуемые кольцевые структуры могут быть использованы для создания на их основе умножителей частоты.

Ключевые слова: нелинейный магнитоэлектрический эффект, композитная гетероструктура, магнито-стрикция, ферромагнетик, пьезоэлектрический эффект

• Поступила: 23.03.2023 • Доработана: 27.04.2023 • Принята к опубликованию: 11.07.2023

Для цитирования: Мусатов В.И., Федулов Ф.А., Савельев Д.В., Болотина Е.В., Фетисов Л.Ю. Нелинейный магнитоэлектрический эффект в кольцевой композитной гетероструктуре. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):63–70. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-63-70>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Nonlinear magnetoelectric effect in a ring composite heterostructure

Vladimir I. Musatov[®],
Fedor A. Fedulov,
Dmitrii V. Savelev,
Ekaterina V. Bolotina,
Leonid Y. Fetisov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: musatov.v.i@mail.ru

Abstract

Objectives. The relevance of the study of magnetoelectric (ME) effect in ring ferromagnetic–piezoelectric heterostructures is due to the possibility of creating various ME devices having improved characteristics. A detailed investigation of the nonlinear ME effect in a ring composite heterostructure based on lead zirconate titanate (PZT) piezoceramics and Metglas[®] amorphous ferromagnetic (FM) alloy under circular magnetization is presented.

Methods. The ME effect was measured by the low-frequency magnetic field modulation method. Excitation alternating- and constant magnetic bias fields were created using toroidal coils wound on a ring heterostructure for circular magnetization of the FM layer.

Results. When excited with circular magnetic fields in a non-resonant mode, the ME ring heterostructure generates a nonlinear ME voltage of higher harmonics. The field and amplitude dependencies of the first three ME voltage harmonics were investigated. ME coefficients were obtained for the linear ME effect $\alpha^{(1)} = 5.2 \text{ mV}/(\text{Oe}\cdot\text{cm})$, the nonlinear ME effect $\alpha^{(2)} = 6 \text{ mV}/(\text{Oe}^2\cdot\text{cm})$, and $\alpha^{(3)} = 0.15 \text{ mV}/(\text{Oe}^3\cdot\text{cm})$ at an excitation magnetic field frequency $f = 1 \text{ kHz}$. The maximum amplitudes of the 1st and 3rd harmonics were observed at a constant bias magnetic field $H \sim 7 \text{ Oe}$, which is almost two times smaller than in planar PZT–Metglas[®] heterostructures.

Conclusions. A nonlinear ME effect was observed and investigated in a ring heterostructure based on PZT piezoceramics and Metglas[®] amorphous FM alloy. Due to the absence of demagnetization during circular magnetization of the closed FM layer, nonlinear ME effects are detected at significantly lower amplitudes of the exciting alternating and constant bias magnetic fields as compared to planar heterostructures. The investigated ring heterostructures are of potential use in the creation of frequency multipliers.

Keywords: nonlinear magnetoelectric effect, composite heterostructure, magnetostriction, ferromagnet, piezoelectric effect

• Submitted: 23.03.2023 • Revised: 27.04.2023 • Accepted: 11.07.2023

For citation: Musatov V.I., Fedulov F.A., Savelev D.V., Bolotina E.V., Fetisov L.Y. Nonlinear magnetoelectric effect in a ring composite heterostructure. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):63–70. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-63-70>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитоэлектрические (МЭ) эффекты в композитных мультиферроидных гетероструктурах, содержащих механически связанные пьезоэлектрические (ПЭ) и ферромагнитные (ФМ) слои, заключаются в возникновении поляризации образца при помещении структуры во внешнее магнитное поле вследствие комбинации магнитострикции ФМ-слоя и пьезоэлектрического эффекта в ПЭ-слое [1]. Такие структуры представляют большой интерес ввиду их практического применения для создания высокочувствительных датчиков переменных и постоянных магнитных полей, актюаторов, устройств обработки радиосигналов, трансформаторов и т.д. [2–5].

В последнее время возрастает интерес к исследованию кольцевых композитных гетероструктур, состоящих из ПЭ- и ФМ-слоев. В подобных гетероструктурах на основе пьезокерамики цирконата-титаната свинца (ЦТС) и ФМ-слоев на основе Ni и аморфного ФМ-сплава Metglas® наблюдали линейный МЭ-эффект и исследовали его характеристики при намагничивании внешним полем в плоскости или вдоль оси кольца [6–8]. На основе МЭ кольцевых композитных гетероструктур были изготовлены трансформаторы с перестраиваемым коэффициентом трансформации [9] и индукторы [10], в которых индуктивность перестраивается на 1000% под действием постоянных магнитных и электрических полей. Помимо этого, были предложены различные конструкции датчиков тока на основе кольцевых МЭ-структур [11].

Широкий интерес вызывает исследование нелинейных эффектов в МЭ-гетероструктурах, таких как генерация гармоник и комбинационных частот, бистабильность, подавление гистерезиса [12], на основе которых возможно создание устройств умножения частоты и анализа спектра переменных магнитных полей. Исследование подобных эффектов в планарных гетероструктурах требует постоянных и переменных магнитных полей порядка единиц – десятков эрстед вследствие значительного влияния эффектов размагничивания в ФМ-слое.

В то же время, перспективным представляется циркулярное намагничивание кольцевых гетероструктур [13]. В этом случае, ввиду кольцевой формы ФМ-слоя, магнитный поток в нем замкнут,

что должно приводить к значительному снижению эффектов размагничивания и увеличению эффективности МЭ-преобразования за счет уменьшения управляющих магнитных полей. В связи с вышеизложенным изучение нелинейных МЭ-эффектов в кольцевых структурах при циркулярном намагничивании представляет большой интерес. Насколько известно авторам, исследования нелинейных МЭ-эффектов в кольцевых структурах, возбуждаемых циркулярно направленными магнитными полями, ранее не проводились.

В настоящей работе обнаружен и изучен нелинейный МЭ-эффект генерации гармоник напряжения в двухслойной кольцевой гетероструктуре, состоящей из пьезокерамики ЦТС-19, и ленты аморфного магнитного сплава Metglas®, при циркулярном намагничивании переменным и постоянным магнитным полем.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Схематическое изображение и внешний вид исследованной двухслойной гетероструктуры представлены на рис. 1. Исследуемая гетероструктура представляла собой двухслойное кольцо с внешним слоем из пьезокерамики ЦТС-19 (производитель – НИИ ЭЛПА, Россия) и внутренним слоем из аморфного магнитного сплава Metglas® 2605SA1 (Metglas Inc., США), концы которого были соединены между собой внахлест. Соединение слоев обеспечивалось за счет цианоакрилатного клея толщиной ~3 мкм (Weiss, CA-500.200, Германия). Перекрытие противоположных концов аморфной ленты составляло менее 1 мм. Лента аморфного ФМ-сплава имела длину $L_m = 50.2$ мм, толщину $a_m \approx 27$ мкм и ширину $w_m = 5$ мм. Магнитострикция насыщения Metglas® $\lambda_s \approx 25 \cdot 10^{-6}$ и магнитная проницаемость $\mu \approx 10^4$. Радиально поляризованное кольцо из пьезокерамики состава $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ (ЦТС) имело внутренний диаметр 16 мм, толщину $a_p = 1$ мм и ширину $w_p = 5$ мм. На внешнюю и внутреннюю поверхности ЦТС-кольца нанесены Ag-электроды. Пьезокерамика ЦТС-19 характеризуется значениями пьезомодуля $d_{31} = 175$ пКл/Н и относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon = 1750$.

На кольцо намотаны две тороидальные катушки медного провода диаметром 0.2 мм с числом витков

$N = 90$. Витки катушек равномерно распределены по длине кольца. Одна катушка создает управляющее циркулярное постоянное магнитное поле $H = 0\text{--}115$ Э при пропускании через нее тока величиной $I_{dc} = 0\text{--}5$ А от источника питания АКТАКОМ APS-7305 (АКТАКОМ, Россия). Циркулярное переменное магнитное поле $h\cos(2\pi ft)$ амплитудой до $h = 3.45$ Э и частотой $f = 0\text{--}100$ кГц создавали второй катушкой, подключенной к генератору сигналов Agilent 33210A (Agilent Technologies Inc., США). Величину магнитного поля определяли аналитически с помощью формулы $H = \frac{NI}{2\pi r}$, где r – средняя линия тороидальной катушки, N – число витков и I – сила тока, протекающего в катушке. Частотные спектры МЭ-напряжения регистрировали при помощи цифрового осциллографа Tektronix TDS3032B (Tektronix Inc., США).

В процессе исследования были получены осциллограммы напряжения u и Фурье-спектры при различных амплитудах возбуждающего h и постоянного H магнитных полей, на основе которых были построены полевые и амплитудные зависимости 1-й, 2-й и 3-й гармоник выходного МЭ-напряжения гетероструктуры.

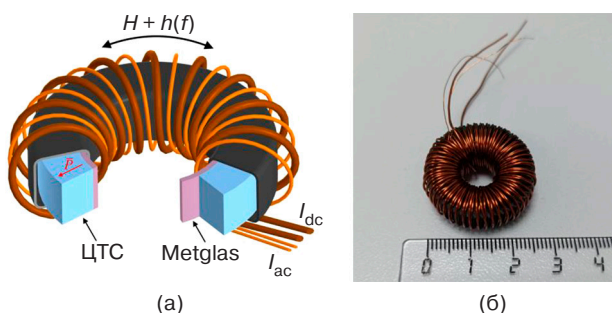


Рис. 1. Схематическое изображение (а) и внешний вид (б) кольцевой гетероструктуры ЦТС–Metglas® с тороидальными катушками

РЕЗУЛЬТАТЫ

При возбуждении структуры переменным магнитным полем амплитудой $h = 0\text{--}3.45$ Э с частотой $f_1 = 1$ кГц в циркулярном постоянном поле $H = 0\text{--}115$ Э обнаружен нелинейный МЭ-эффект возбуждения гармоник МЭ-напряжения. Измерения проводили вдали от резонансной частоты структуры $f_0 \approx 54.2$ кГц. В спектре, измеренном при $H = 0.45$ Э и $h = 3.45$ Э (рис. 2), наблюдается 16 пиков, соответствующих гармоникам МЭ-напряжения с частотами $f_n = f_1 \cdot n$, где n – целое число. Амплитуды первых трех пиков составляли $u^{(1)} = 1.8$ мВ, $u^{(2)} = 7.15$ мВ и $u^{(3)} = 0.6$ мВ.

Величины МЭ-коэффициентов 1-й, 2-й и 3-й гармоник можно оценить, как $\alpha^{(n)} = u^{(n)} / (h^n a_p)$.

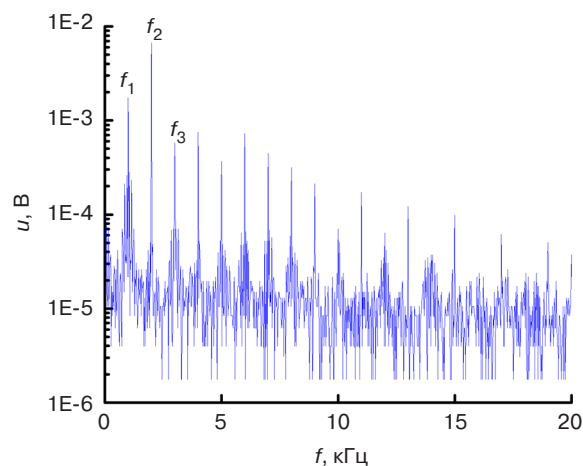


Рис. 2. Фурье-спектр МЭ-напряжения кольцевой гетероструктуры при $h = 3.45$ Э с частотой $f_1 = 1$ кГц и $H = 0.45$ Э

Отсюда $\alpha^{(1)} = 5.2$ мВ/(Э·см), $\alpha^{(2)} = 6$ мВ/(Э²·см) и $\alpha^{(3)} = 0.15$ мВ/(Э³·см) соответственно. При отсутствии постоянного магнитного поля наблюдалась генерация только четных гармоник. Возникновение гармоник обусловлено нелинейной зависимостью магнитострикции $\lambda(H)$ ФМ-слоя от постоянного магнитного поля [13].

На рис. 3 приведены зависимости амплитуд 1-й, 2-й и 3-й гармоник от постоянного магнитного поля H при $h = 3.45$ Э, построенные на основе полученных Фурье-спектров МЭ-напряжения. Форма зависимости $u^{(1)}(H)$ для первой гармоники, приведенная на рис. 3а, имеет типичный вид, характерный для линейного МЭ-эффекта. Максимум амплитуды $u_{\max}^{(1)} = 13.4$ мВ достигается в поле $H_m^{(1)} \approx 6.8$ Э с последующим монотонным спадом при увеличении постоянного магнитного поля до $H = 115$ Э. Максимум МЭ-напряжения соответствует наибольшему значению пьезомагнитного коэффициента ФМ-слоя структуры $\lambda^{(1)}(H) = \partial\lambda / \partial H|_H$, где $\lambda(H)$ – зависимость магнитострикции ФМ-слоя от поля H .

На рис. 3б приведены зависимости амплитуд второй $u^{(2)}(H)$ и третьей $u^{(3)}(H)$ гармоник от постоянного магнитного поля H . Амплитуда второй гармоники $u_{\max}^{(2)} = 7.15$ мВ максимальна при $H_m^{(2)} = 0$, а затем монотонно спадает с увеличением поля и достигает минимума $u_{\min}^{(2)} = 0.1$ мВ при $H = H_m^{(2)} \approx 5.6$ Э. Отметим, что на графике $u^{(2)}(H)$ отсутствует локальный минимум и последующий локальный максимум, который характерен для полевой зависимости 2-й гармоники в планарных гетероструктурах [14, 15].

Амплитуда 3-й гармоники при $H = 0$ имеет значение $u^{(3)} \approx 0.4$ мВ. При увеличении магнитного поля наблюдаются два локальных максимума $u_{1\max}^{(3)} = 1.2$ мВ и $u_{2\max}^{(3)} = 1.4$ мВ в полях $H_{1m}^{(3)} \approx 0.9$ Э и $H_{2m}^{(3)} \approx 1.4$ Э

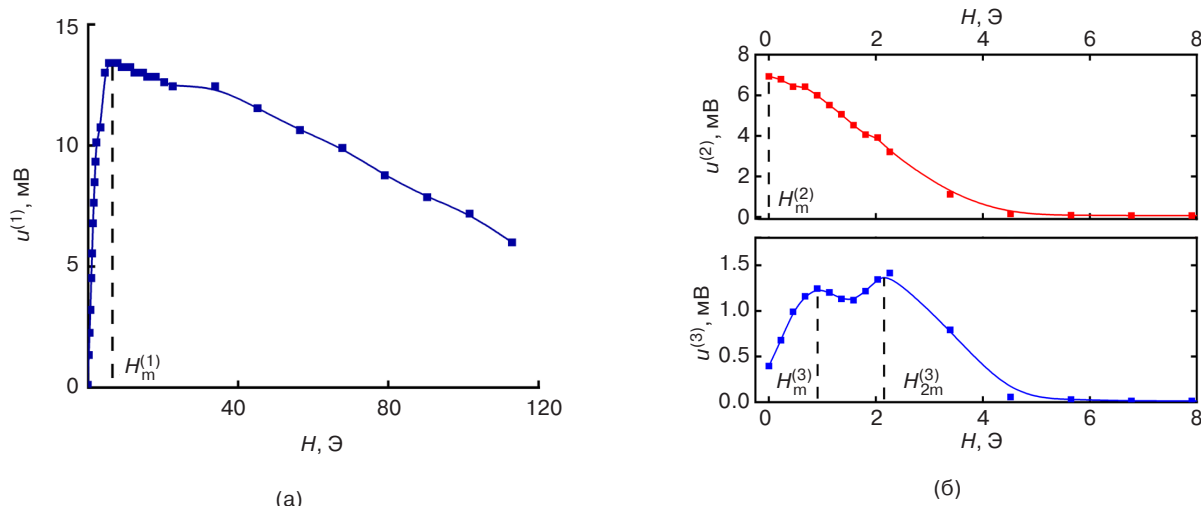


Рис. 3. Зависимости амплитуд 1-й (а), 2-й и 3-й (б) гармоник МЭ-напряжения кольцевой гетероструктуры от постоянного магнитного поля H

соответственно. Затем амплитуда 3-й гармоники монотонно уменьшается до нуля при $H \sim 5.6$ Э.

На рис. 4 показаны зависимости амплитуд 1-й, 2-й и 3-й гармоник от амплитуды возбуждающего переменного магнитного поля h . Измерения проводили в оптимальных магнитных полях H_m , полученных из кривых, приведенных на рис. 3: $H_m^{(1)} \approx 6.8$ Э, $H_m^{(2)} = 0$ Э и $H_m^{(3)} = 1.4$ Э соответственно.

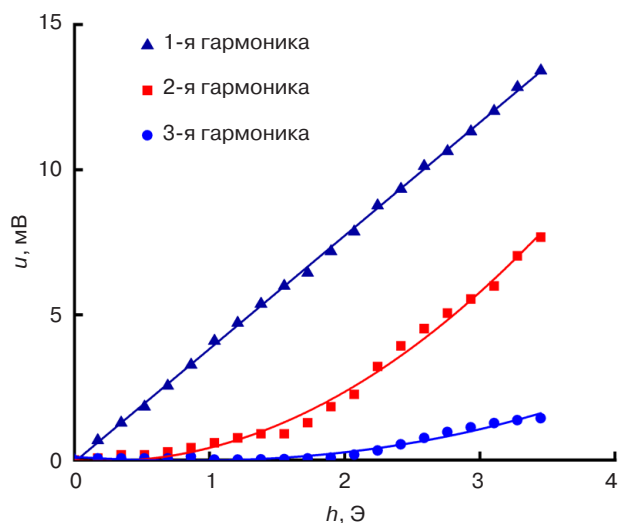


Рис. 4. Зависимости амплитуд 1-й, 2-й и 3-й гармоник МЭ-напряжения от амплитуды поля h при $H_m^{(1)} = 6.8$ Э, $H_m^{(2)} = 0$ Э и $H_m^{(3)} = 1.4$ Э соответственно. Сплошные линии – степенная аппроксимация

Видно, что амплитуда 1-й гармоники линейно зависит от величины h во всем диапазоне амплитуд переменных магнитных полей $h = 0-3.45$ Э. Амплитуда 2-й гармоники росла пропорционально h^2 во всем диапазоне. Амплитуда 3-й гармоники пропорциональна h^3 . Такой вид зависимостей соответствует теоретическим расчетам МЭ-напряжения $u^{(n)} \sim h^n$ [14],

где n – порядковый номер гармоники, h – амплитуда переменного магнитного поля.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Возникновение гармоник МЭ-напряжения обусловлено нелинейной зависимостью магнитострикции ФМ-слоя от магнитного поля. Раскладывая функцию, описывающую магнитострикцию $\lambda(H)$, в ряд Тейлора в окрестности поля H при $H \ll h$, получим выражение:

$$\lambda(H) = \lambda(H_0) + qh + \frac{ph^2}{2} + \frac{mh^3}{4} \dots, \quad (1)$$

где q, p и m – 1-я, 2-я и 3-я производные магнитострикции по магнитному полю соответственно. Выражение для МЭ-напряжения можно записать в виде

$$u(H) = Ad\lambda(H), \quad (2)$$

где A – коэффициент, зависящий от параметров слоев композитной гетероструктуры и метода ее закрепления, d – пьезомодуль ПЭ-слоя.

Подставив в (2) выражение (1) и учитывая, что переменное магнитное поле задается как $h = h_0 \cos(2\pi ft)$, получим:

$$u(H) = u_0(H_0) + u_1 \cos(2\pi ft) + u_2 \cos(4\pi ft) + u_3 \cos(6\pi ft) \dots \quad (3)$$

Первое слагаемое в (3) обозначает постоянную составляющую МЭ-напряжения, второе – генерируемое МЭ-напряжение на частоте возбуждающего поля, третье и четвертое – описывают генерацию 2-й и 3-й гармоник МЭ-напряжения соответственно [16].

Насколько известно авторам, на данный момент нет опубликованных работ, в которых наблюдали множество гармоник высших порядков в плоской структуре аналогичного состава. Однако ранее в структуре лантанат–Metglas® [17] наблюдали ~100 гармоник, но при большей амплитуде накачки $h = 20\text{--}25$ Э переменного поля.

Результаты исследования нелинейного МЭ-эффекта в кольцевой структуре ФМ–ПЭ позволяют отметить некоторые особенности. В отличие от кольцевых структур, в планарных структурах магнитное поле внутри ФМ-слоя H_{in} связано с внешним полем H соотношением $H_{\text{in}} = \frac{H}{1 + N\mu}$, где N – размагничивающий фактор, μ – магнитная проницаемость ферромагнетика [18]. Отсюда следует, что размагничивание уменьшает как постоянное, так и возбуждающее переменное поле внутри ФМ-слоя в планарной гетероструктуре. В кольцевой гетероструктуре при циркулярном намагничивании магнитный поток в ФМ-слое замкнут, $N \approx 0$. Поэтому внутри ФМ-слоя $H_{\text{in}} \approx H$ и $h_{\text{in}} \approx h$, что приводит к изменению формы зависимости магнитострикции от внешнего поля $\lambda(H)$, в частности, к уменьшению поля насыщения магнитострикции.

В исследованной структуре, как следует из рис. 3, максимум 1-й гармоники наблюдали в поле $H_{\text{m}}^{(1)} \approx 6.8$ Э. Амплитуда $u^{(1)}$ достигала 90% от максимума в поле ~4 Э, что в несколько раз меньше, чем в планарных гетероструктурах ЦТС–Metglas® [19, 20].

Из-за отсутствия размагничивания в кольцевой гетероструктуре нелинейные МЭ-эффекты проявляются при меньших амплитудах внешнего возбуждающего поля h . По-видимому, это связано с изменением формы зависимости $\lambda(H)$ в кольцевой структуре. На графике зависимости амплитуды 2-й гармоники исчез локальный максимум, в то время как на графике зависимости 3-й гармоники – нет [17].

Величины МЭ-коэффициентов 2-й и 3-й гармоник можно оценить как $\alpha^{(2)} = u^{(2)}/(h^2 a_p) = 6 \text{ мВ}/(\text{Э}^2 \cdot \text{см})$ и $\alpha^{(3)} = u^{(3)}/(h^3 a_p) = 0.34 \text{ мВ}/(\text{Э}^3 \cdot \text{см})$ соответственно. Полученные значения МЭ-коэффициентов сравнимы с МЭ-коэффициентами в планарной структуре ЦТС–Metglas® аналогичного состава $\alpha^{(2)} = 9.6 \text{ мВ}/(\text{Э}^2 \cdot \text{см})$ и $\alpha^{(3)} = 0.4 \text{ мВ}/(\text{Э}^3 \cdot \text{см})$, измеренными при той же частоте возбуждающего поля [16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе обнаружен нелинейный МЭ-эффект генерации высших гармоник МЭ-напряжения при возбуждении кольцевой двухслойной гетероструктуры ЦТС–Metglas® циркулярными магнитными полями в нерезонансном режиме. В ходе исследования наблюдали 16 гармоник МЭ-напряжения в нелинейном режиме при возбуждении

структуры переменным магнитным полем с частотой 1 кГц. Нелинейные МЭ-эффекты в кольцевой гетероструктуре обнаружены в меньших по сравнению с планарными структурами магнитных полях, что связано с практически отсутствующим эффектом размагничивания ФМ-слоя. В частности, максимальные амплитуды 1-й и 3-й гармоник наблюдали при $H \sim 7$ Э, что почти вдвое меньше, чем в планарных гетероструктурах ЦТС–Metglas®.

Полученные результаты показывают возможность создания на основе исследованных кольцевых МЭ-гетероструктур эффективных твердотельных умножителей частоты, возбуждаемых переменными магнитными полями порядка единиц эрстед.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 19-79-10128-П. Изготовление образцов выполнено при финансовой поддержке гранта «Для молодых ученых 2022–2023 РТУ МИРЭА» (НИЧ-57). Измерения Фурье-спектров выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования РТУ МИРЭА (ЦКП РТУ МИРЭА).

Acknowledgments

This work was financially supported by the Russian Science Foundation, grant No. 19-79-10128-P. The samples were made with the financial support of grant “For young scientists 2022–2023 RTU MIREA” (NICH-57). Measurements of Fourier spectra were performed using equipment of the RTU MIREA Center for Collective Use.

Вклад авторов

В.И. Мусатов – подготовка исследуемых образцов и установок, проведение исследований, хранение данных, подготовка графической информации, написание текста статьи.

Ф.А. Федулов – подготовка исследуемых образцов и установок, проверка данных, написание текста статьи.

Д.В. Савельев – проведение исследований, хранение данных, описание методики исследования.

Е.В. Болотина – проведение исследований, подготовка графической информации.

Л.Ю. Фетисов – проверка данных, написание текста статьи.

Authors' contributions

V.I. Musatov – preparing test samples and experimental setup, conducting research, data curation, preparing graphic information, and writing the text of the article.

F.A. Fedulov – preparing test samples and experimental setup, data checking, and writing the text of the article.

D.V. Savelev – conducting research, data curation, description of the research methodology.

E.V. Bolotina – conducting research, preparing graphic information.

L.Y. Fetisov – data checking and writing the text of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Kopyl S., Surmenev R., Surmeneva M., Fetisov Y., Kholkin A. Magnetolectric effect: principles and applications in biology and medicine – a review. *Materials Today Bio.* 2021;12:100149. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2021.100149>
2. Azam T., Bukhari S.H., Liaqat U., Miran W. Emerging Methods in Biosensing of Immunoglobulin G – A Review. *Sensors.* 2023;23(2):676. <https://doi.org/10.3390/s23020676>
3. Herrera D.L., Kruk R., Leistner K., Sort J. Magnetolectric materials, phenomena, and devices. *APL Materials.* 2021;9(5):050401. <https://doi.org/10.1063/5.0053631>
4. Fetisov Y.K., Chashin D.V. Magnetolectric coil-free voltage transformer based on monolithic ferrite-piezoelectric heterostructure. *Sensors and Actuators A: Physical.* 2022;344:113737. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113737>
5. Tu C., Chu Z.Q., Spetzler B., Hayes P., et al. Mechanical-resonance-enhanced thin-film magnetolectric heterostructures for magnetometers, mechanical antennas, tunable RF inductors, and filters. *Materials.* 2019;12(14):2259. <https://doi.org/10.3390/ma12142259>
6. Xu L., Yan Y., Qiao L., Wang J., Pan D., Yang S., Volinsky A.A. Layer thickness and sequence effects on resonant magnetolectric coupling in Ni/Pb(Zr,Ti)O₃ cylindrical composites. *Materials Lett.* 2016;185:13–16. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.08.042>
7. Yakubov V., Xu L., Volinsky A.A., Qiao L., Pan D. Edge geometry effects on resonance response of electroplated cylindrical Ni/PZT/Ni magnetolectric composites. *AIP Advances.* 2017;7(8):085305. <https://doi.org/10.1063/1.4998947>
8. Giang D.T.H., Tam H.A., Khanh V.T.N., Vinh N.T., Tuan P.A., Van Tuan N.V., et al. Magnetolectric vortex magnetic field sensors based on the metglas/PZT laminates. *Sensors.* 2020;20(10):2810. <https://doi.org/10.3390/s20102810>
9. Zhang S., Leung C.M., Kuang W., Or S.W., Ho S.L. Concurrent operational modes and enhanced current sensitivity in heterostructure of magnetolectric ring and piezoelectric transformer. *J. Appl. Phys.* 2013;113(17):17C733. <https://doi.org/10.1063/1.4801390>
10. Fetisov L.Y., Saveliev D.V., Chashin D.V., Gladyshev I.V., Fetisov Y.K. Circular Magnetolectric Heterostructure Based Inductor Tuned with Magnetic and Electric Fields. *J. Commun. Technol. Electron.* 2021;66(12):1402–1412. <https://doi.org/10.1134/S1064226922020036>
11. Ge B., Zhang J., Zhang Q., Filippov D.A., Wu J., Tao J., et al. Ultra-low anisotropy magnetolectric sensor in Ferrite/piezoelectric toroidal composites. *J. Magn. Magn. Mater.* 2022;564(Part 2):170115. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.170115>
12. Burdin D.A., Chashin D.V., Ekonomov N.A., Fetisov Y.K., Stashkevich A.A. High-sensitivity dc field magnetometer using nonlinear resonance magnetolectric effect. *J. Magn. Magn. Mater.* 2016;405(52):244–248. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.12.079>
13. Wu G., Zhang R. Giant circumferential magnetolectric effect in Pb(Zr,Ti)O₃/Mn-Zn-ferrite cylindrical composite. *Sensors and Actuators A: Physical.* 2021;330(14):112845. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112845>
14. Fetisov L.Y., Baraban I.A., Fetisov Y.K., Burdin D.A., Vopson M.M. Nonlinear magnetolectric effects in flexible composite ferromagnetic–Piezopolymer structures. *J. Magn. Magn. Mater.* 2017;441:628–634. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.06.013>
15. Burdin D., Chashin D., Ekonomov N., Gordeev S., Fetisov Y. Nonlinear magnetolectric effect in a layered ferromagnetic-piezoelectric heterostructure excited by transverse magnetic field. *Appl. Phys. Lett.* 2020;116(7):072901. <https://doi.org/10.1063/1.5136088>
16. Burdin D., Chashin D., Ekonomov N., Fetisov L., Fetisov Y., Shamonin M. DC magnetic field sensing based on the nonlinear magnetolectric effect in magnetic heterostructures. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2016;49(37):375002. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/37/375002>
17. Fetisov L.Y., Burdin D.A., Ekonomov N.A., Chashin D.V., Zhang J., Srinivasan G., et al. Nonlinear magnetolectric effects at high magnetic field amplitudes in composite multiferroics. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2018;51(15):154003. <http://doi.org/10.1088/1361-6463/aab384>
18. Joseph R.I., Schlömann E. Demagnetizing field in nonellipsoidal bodies. *J. Appl. Phys.* 1965;36(5):1579–1593. <https://doi.org/10.1063/1.1703091>
19. Fang F., Zhao C.P., Yang W. Thickness effects on magnetolectric coupling for Metglas/PZT/Metglas laminates. *Science China: Physics, Mechanics and Astronomy.* 2011;54(4):581–585. <https://doi.org/10.1007/s11433-011-4268-2>
20. Li M., Wang Y., Hasanyan D., Li J., Viehland D. Giant Converse magnetolectric effect in multi-push-pull mode Metglas/Pb(Zr,Ti)O₃/metglas laminates. *Appl. Phys. Lett.* 2012;100(13):132904. <https://doi.org/10.1063/1.3698114>

Об авторах

Мусатов Владимир Иванович, аспирант, кафедра наноэлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: musatov.v.i@mail.ru. Scopus Author ID 57416814900, <https://orcid.org/0000-0002-2995-8824>

Федулов Федор Александрович, к.т.н., научный сотрудник, Научно-образовательный центр «Магнитоэлектрические материалы и устройства», ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ostsilograf@yandex.ru. Scopus Author ID 57194284263, <https://orcid.org/0000-0003-2188-0011>

Савельев Дмитрий Владимирович, инженер-исследователь, Научно-образовательный центр «Магнитоэлектрические материалы и устройства», ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: dimsav94@gmail.com. Scopus Author ID 57196479660, ResearcherID D-8952-2019, SPIN-код РИНЦ 3273-4160, <https://orcid.org/0000-0001-7762-9198>

Болотина Екатерина Витальевна, студент, кафедра наноэлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ekaterina.bolotina1@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-1004-2821>

Фетисов Леонид Юрьевич, д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры наноэлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: fetisovl@yandex.ru. Scopus Author ID 26431336600, ResearcherID D-1163-2013, SPIN-код РИНЦ 9788-0680, <https://orcid.org/0000-0002-3699-4321>

About the authors

Vladimir I. Musatov, Postgraduate Student, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: musatov.v.i@mail.ru. Scopus Author ID 57416814900, <https://orcid.org/0000-0002-2995-8824>

Fedor A. Fedulov, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Scientific and Educational Center “Magnetoelectric materials and devices,” MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ostsilograf@yandex.ru. Scopus Author ID 57194284263, <https://orcid.org/0000-0003-2188-0011>

Dmitrii V. Savelev, Research Engineer, Scientific and Educational Center “Magnetoelectric materials and devices,” MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: dimsav94@gmail.com. Scopus Author ID 57196479660, ResearcherID D-8952-2019, RSCI SPIN-code 3273-4160, <https://orcid.org/0000-0001-7762-9198>

Ekaterina V. Bolotina, Student, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ekaterina.bolotina1@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-1004-2821>

Leonid Y. Fetisov, Dr. Sci., Professor, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: fetisovl@yandex.ru. Scopus Author ID 26431336600, ResearcherID D-1163-2013, RSCI SPIN-code 9788-0680, <https://orcid.org/0000-0002-3699-4321>