

„Ты считаешь меня много-учёным? — спросил как-то Конфуций ученика.

— А разве нет? — ответил тот.

— Нет, — сказал Конфуций, — я лишь связываю всё воедино.“



Сюй Бэйхун «Скачущие лошади» (1930-е)

Секция 11. Магнитоэлектрические явления

УДК 538.9

Частотно-зависимая температурная активация проводимости и диэлектрической проницаемости магнитоэлектрика BiFeO_3

Кузенко Д.В.

к.ф.-м.н., научный сотрудник, Научно-исследовательский институт «Реактивэлектрон»

Аннотация. Работа посвящена исследованию частотно-зависимой температурной активации проводимости и диэлектрической проницаемости монокристаллического магнитоэлектрика феррит висмута BiFeO_3 , перспективного устройства оперативной памяти. Определены энергии активации низкотемпературных (110-300 К) процессов движения заряженных элементов структуры мультиферроика и логарифмическая зависимость температур перехода между этими процессами от частоты внешнего электрического поля.

Ключевые слова: феррит висмута, диэлектрическая проницаемость, проводимость, энергия активации

Frequency-dependent temperature activation of conductivity and dielectric constant of magnetoelectric BiFeO_3

Kuzenko D.V.

Cand. Sc., researcher, Research Institute «Reactivelectron»

Annotation. The work is devoted to the study of frequency-dependent temperature activation of conductivity and dielectric constant of single-crystal magnetoelectric bismuth ferrite BiFeO_3 , a promising RAM device. The activation energies of low-temperature (110-300 K) processes of motion of charged elements of the multiferroic structure and the logarithmic dependence of the transition temperatures between these processes on the frequency of the external electric field are determined.

Keywords: bismuth ferrite, dielectric constant, conductivity, activation energy

Наличие одновременного магнитного и сегнетоэлектрического упорядочения в магнитоэлектрических мультиферроиках обусловило значительный интерес среди исследователей ввиду перспективы создания новых устройств многоуровневой памяти, объединяющей достоинства магнитной (MRAM) и сегнетоэлектрической оперативной памяти (FeRAM) [1]. Одним из наиболее интенсивно исследуемых мультиферроиков в настоящее время является феррит висмута BiFeO_3 (BFO) [2, 3], т.к. имеет простую химическую формулу с кристаллической структурой перовскит, высокие температуру Кюри 1123 К и температуру Нееля 650 К [4].

В связи с этим актуальными представляются исследования влияния внешних воздействий на поведение сегнетоэлектрической подрешетки магнитоэлектрика, обладающей постоянным дипольным моментом. Для определения энергий активации процессов движения заряженных элементов структуры монокристалла BiFeO_3 в работе проведено исследование частотной зависимости температурной зависимости его проводимости и диэлектрической проницаемости в интервале температур 110–300 К и частот электрического поля от 1 Гц до 1 МГц.

Известно, что действительная часть ϵ' комплексной диэлектрической проницаемости

материала характеризует его способность к поляризации, а именно к смещению связанных зарядов под действием внешнего электрического поля. Исходя из этого, ранее в работе [5] на примере сегнетоэлектрика $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ был предложен температурно-активационный механизм температурной зависимости диэлектрической проницаемости, согласно которому эта зависимость имеет экспоненциальный вид:

$$\varepsilon'(T) = a_\varepsilon \exp\left(-\frac{U_\varepsilon}{kT}\right) \quad (1)$$

где a_ε – коэффициент; U_ε – энергия активации диэлектрической проницаемости, эВ; k – постоянная Больцмана, эВ/К; T – температура, К. При замене $b_\varepsilon = \ln(a_\varepsilon)$ зависимость (1) можно представить в виде:

$$\ln(\varepsilon') = -\frac{U_\varepsilon}{kT} + b_\varepsilon \quad (2)$$

Исходя из этого, по полученным в работе [6] экспериментальным данным температурной зависимости действительной части комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon'(T)$ монокристалла BiFeO_3 в интервале температур 110–300 К при частотах измерительного электрического поля 1 Гц, 10 Гц, 100 Гц, 1 кГц, 10 кГц, 100 кГц, 1 МГц была построена и проанализирована зависимость $\ln(\varepsilon')(1/kT)$. Для каждой из зависимостей можно выделить участки, которые аппроксимируются линейным уравнением, а для примера отмечены линейные участки при частоте $f = 1$ Гц с указанием температуры перехода зависимости с одного участка на другой $T_{1 \rightarrow 2}$ и $T_{2 \rightarrow 3}$ (рис. 1).

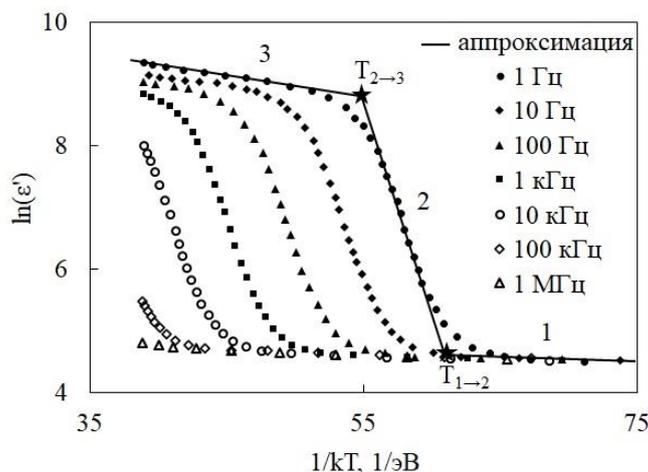


Рис. 1. Зависимость логарифма действительной части комплексной диэлектрической проницаемости, измеренной в диапазоне температур 110–300 К и частот 1 Гц–1 МГц, от обратной температуры для монокристалла BiFeO_3 . 1, 2, 3 – участки зависимости, аппроксимированные линейной функцией. $T_{1 \rightarrow 2}$, $T_{2 \rightarrow 3}$ – температуры перехода зависимости на участках 1–2 и 2–3 соответственно. На основе данных статьи [6]

Также по полученным в работе [6] экспериментальным данным температурной зависимости действительной части электрической проводимости $\sigma'(T)$ монокристалла BiFeO_3 при тех же условиях была построена и проанализирована зависимость $\ln(\sigma')(1/kT)$ (рис. 2):

$$\ln(\sigma') = -\frac{U_\sigma}{kT} + b_\sigma \quad (3)$$

где b_σ – коэффициент; U_σ – энергия активации проводимости, эВ; k – постоянная Больцмана, эВ/К; T – температура, К.

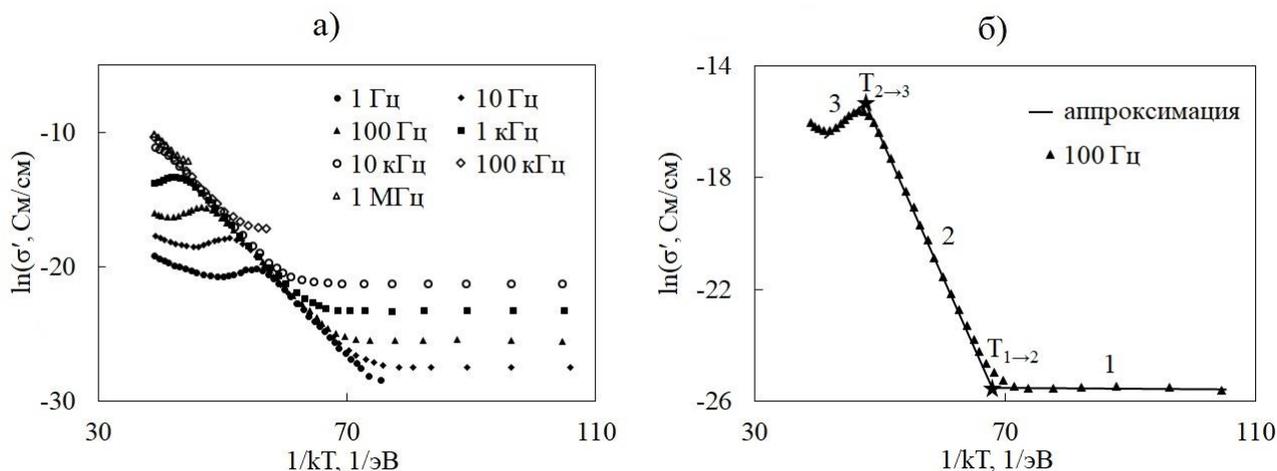


Рис. 2. Зависимость логарифма действительной части проводимости, измеренной в диапазоне температур 110–300 K и частот 1 Гц–1 МГц, от обратной температуры для монокристалла BiFeO_3 (а). 1, 2, 3 – участки зависимости, аппроксимированные линейной функцией. $T_{1 \rightarrow 2}$, $T_{2 \rightarrow 3}$ – температуры перехода зависимости на участках 1–2 и 2–3 (б). На основе данных статьи [6]

Это позволило выделить три линейных участка зависимостей $\ln(\epsilon')(1/kT)$ и $\ln(\sigma')(1/kT)$ (1, 2, 3) и определить по ним параметры активации (предэкспоненциальные множители a_ϵ , a_σ и энергии активации диэлектрической проницаемости U_ϵ и проводимости U_σ) (табл. 1).

Таблица 1. Значения энергии активации U и коэффициента b уравнений (2) и (3) для BiFeO_3

Участок	U_ϵ , эВ	b_ϵ	U_σ , эВ	b_σ
1	$6,678 \cdot 10^{-3}$	4,944	$1,018 \cdot 10^{-3}$	2,545
2	0,664	45,194	0,506	8,836
3	0,036	10,712	0,197	-24,760

Анализ данных на рис. 2 позволил также найти температуры переходов между соответствующими активационными процессами $T_{i \rightarrow j}$ (1→2, 2→3) и построить зависимости этих температур от частоты измерительного электрического поля f (рис. 3).

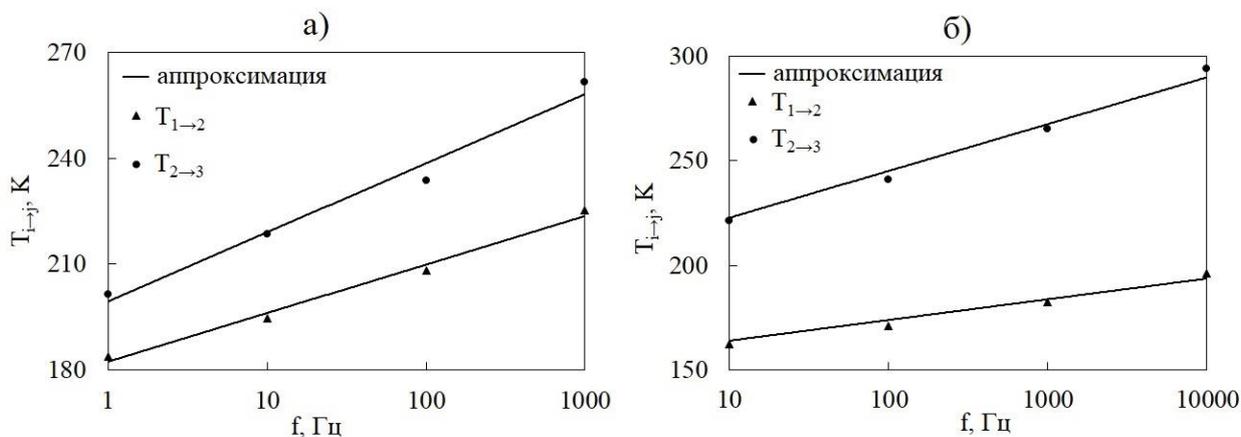


Рис. 3. Зависимость температуры $T_{i \rightarrow j}$ перехода с i -го участка на j -й участок зависимостей $\ln(\epsilon')(1/kT)$ на рис. 1 (а) и $\ln(\sigma')(1/kT)$ на рис. 2 (б) от частоты измерительного поля f (в логарифмическом масштабе) для монокристалла BiFeO_3

Зависимость $T_{i \rightarrow j}(f)$ удовлетворительно аппроксимируется уравнением:

$$T_{i \rightarrow j} = -\ln(f) + d \quad (4)$$

где i, j – аппроксимированные линейные участки зависимостей $\ln(\epsilon')(1/kT)$ и $\ln(\sigma')(1/kT)$; f – частота, Гц; c, d – коэффициенты, К (табл. 2). Такая зависимость может являться проявлением релаксационного поведения электрически активных элементов структуры BiFeO_3 .

Таблица 2. Значения коэффициентов c и d уравнения (4) перехода с i -го на j -й участок рис. 2

$i \rightarrow j$	c_ϵ, K	d_ϵ, K	c_σ, K	d_σ, K
1 \rightarrow 2	5,98	182,38	4,31	153,93
2 \rightarrow 3	8,50	199,43	9,74	200,30

Разделение температурной зависимости диэлектрической проницаемости и проводимости на частотно-независимую и частотно-зависимую части позволяет выделить два вида проводимости (в постоянном и переменном электрическом поле соответственно). Причиной термоактивационной электрической проводимости является наличие в образце феррита висмута ионов железа различной валентности: Fe^{3+} и Fe^{2+} , а также изменение степени валентности с ростом температуры, что было отмечено для керамического образца BiFeO_3 при температурах 300–800 К в работе [7]. При температурах 110–300 К, проанализированных в нашей работе, возможен только первый механизм, обусловленный наличием постоянных электрических диполей, имеющих частотную зависимость, свойственную классическому осциллятору, и температурную зависимость, обусловленную ангармонизмом колебаний электрического диполя.

Работа выполнена в рамках фундаментальной НИР «Активационные механизмы фазовых переходов в сегнетоэлектрических материалах» Минобрнауки РФ.

Список использованных источников:

1. Yakout S.M. Spintronics and Innovative Memory Devices: a Review on Advances in Magnetoelectric BiFeO_3 // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2021. – V. 34. – P. 317–338.
2. Wang N. et al. Structure, Performance, and Application of BiFeO_3 // Nanomaterials. Nano-Micro Letters. – 2020. – 12:81.
3. Амиров А.А. Особенности тепловых, магнитных и диэлектрических свойств мультиферроиков BiFeO_3 и $\text{Bi}_{0,95}\text{La}_{0,05}\text{FeO}_3$ // Физика твердого тела. – 2009. – Т. 51. – № 6. – С. 1123–1126.
4. Смоленский Г.А., Чупис И.Е. Сегнетомагнетики // Успехи физических наук. – 1982. – Т. 137. – № 3. С. 415–448.
5. Kuzenko D.V. Temperature-activation mechanism of the temperature dependence of the dielectric constant of ferroelectric ceramics PZT // Journal of Advanced Dielectrics. – 2022. – Vol. 12. – No. 3. – Art. No. 2250010.
6. Lu J. et al. On the room temperature multiferroic BiFeO_3 : magnetic, dielectric and thermal properties // The European Physical Journal B. – 2010. – No. 75. – P. 451–460.
7. Greičius S., Banys J., Szafraniak-Wiza I. Dielectric investigations of BiFeO_3 ceramics // Processing and Application of Ceramics. – 2009. – V. 3[1-2] – P. 85–87.

УДК 537.632

**Структура и магнитные свойства ферроборатов $\text{SmFe}_{3-x}\text{Al}_x(\text{BO}_3)_4$
($x = 0, 0.07, 0.15, 0.25, 0.28$)**

Фролов К.В.

к.ф.-м. н., ведущий научный сотрудник, Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова, КККиФ НИЦ Курчатовский институт

Смирнова Е.С.

к.ф.-м. н., научный сотрудник доцент, Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова, КККиФ НИЦ Курчатовский институт

Алексеева О.А.

д.ф.-м. н., ведущий научный сотрудник, Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова, КККиФ НИЦ Курчатовский институт

Гудим И.А.

к.ф.-м. н., ведущий технолог, Институт физики им Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН

***Аннотация.** Редкоземельные оксобораты $\text{RM}_3(\text{BO}_3)_4$ ($R = \text{Y, La, Ce-Er}$; $M = \text{Al, Cr, Fe, Sc, Ga}$) демонстрируют широкое разнообразие оптических, пьезо и сегнетоэлектрических, магнитных свойств. Редкоземельные ферробораты $\text{RFe}_3(\text{BO}_3)_4$ содержат две магнитные подсистемы и демонстрируют мультиферроидные свойства. В этих соединениях при температурах ниже 40 К наблюдаются магнитные фазовые переходы и эффекты спиновой переориентации, динамика которых, а также тип и размерность магнитного упорядочения определяются сложными обменными взаимодействиями между магнитными подсистемами. Частичное замещение ионов железа ионами немагнитных элементов в соединениях $\text{RFe}_{3-x}\text{M}_x(\text{BO}_3)_4$ ($M = \text{Al, Sc, Ga}$) позволяет исследовать возможность направленного изменения мультиферроидных свойств.*

***Ключевые слова:** мультиферроики, ферробораты, мёссбаэуэровская спектроскопия, монокристалльный рентгеноструктурный анализ, фазовые переходы, магнитное упорядочение*

**Structure and magnetic properties of ferrobates $\text{SmFe}_{3-x}\text{Al}_x(\text{BO}_3)_4$
($x = 0, 0.07, 0.15, 0.25, 0.28$)**

Frolov K.V.,

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, leading researcher, Shubnikov Institute of Crystallography, KCC&Ph NRC Kurchatov Institute

Smirnova E.S.,

Candidate of physical and mathematical Sciences, researcher, Shubnikov Institute of Crystallography, KCC&Ph NRC Kurchatov Institute

Alekseeva O.A.,

Doctor of physical and mathematical Sciences, leading researcher, Shubnikov Institute of Crystallography, KCC&Ph NRC Kurchatov Institute

Gudim I.A.,

Candidate of physical and mathematical Sciences, leading technologist, Kirensky Institute of Physic, FRC KSC SB RAS

Annotation. Rare earth oxoborates $RM_3(BO_3)_4$ ($R = Y, La, Ce-Er$; $M = Al, Cr, Fe, Sc, Ga$) demonstrate a wide variety of optical, piezo, ferroelectric, and magnetic properties. Rare-earth ferrobates $RFe_3(BO_3)_4$ contain two magnetic subsystems and exhibit multiferroic properties. In these compounds, at temperatures below 40 K, magnetic phase transitions and spin reorientation effects are observed, the dynamics of which, as well as the type and dimension of magnetic ordering, are determined by complex exchange interactions between magnetic subsystems. Partial substitution of iron ions with ions of non-magnetic elements in compounds $RFe_{3-x}M_x(BO_3)_4$ ($M = Al, Sc, Ga$) allows to study the possibility of directed changes in multiferroic properties..

Keywords: multiferroics, ferrobates, Mössbauer spectroscopy, single crystal X-ray diffraction analysis, phase transitions, magnetic ordering

Редкоземельные оксобораты $RM_3(BO_3)_4$ ($R = Y, La, Ce-Er$; $M = Al, Cr, Fe, Sc, Ga$) демонстрируют широкое разнообразие оптических, пьезо и сегнетоэлектрических, магнитных свойств и активно исследуются последние 20 лет [1–7]. В редкоземельных ферроборатах $RFe_3(BO_3)_4$ в зависимости от присутствия в составе конкретного иона R в этих соединениях может наблюдаться структурный фазовый переход, а при температурах ниже 40 К наблюдается магнитный фазовый переход и за счёт сложных обменных взаимодействий между железной и редкоземельной магнитными подсистемами реализуются различные типы магнитных структур, эффекты спиновой переориентации и магнитоэлектрические эффекты.

Отдельный интерес представляют соединения с частичным замещением ионов магнитных подсистем немагнитными ионами с целью изучения возможности направленного изменения мультиферроидных свойств.

В данной работе методами мёсбауэровской спектроскопии на ядрах ^{57}Fe и монокристалльной рентгеновской дифракции в диапазоне температур 5 – 295 К исследованы монокристаллы соединения $SmFe_{3-x}Al_x(BO_3)_4$ ($x = 0, 0.07, 0.15, 0.25, 0.28$). Исследовано влияние примесного алюминия на кристаллическую структуру и магнитные свойства, определены типы и размерности магнитного порядка. Показано, что увеличение концентрации примесного алюминия уменьшает температуру Нееля T_N магнитного фазового

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение № 23-22-00286).

Список использованной литературы:

1. V.S. Kurazhkovskaya, E.Yu. Borovikova, N.I. Leonyuk et al // Infrared spectroscopy and the structure of polytypic modifications of $RM_3(BO_3)_4$ borates ($R = Nd, Gd, Y$; $M = Al, Ga, Cr, Fe$). J. Struct. Chem. – 2008. – 49. – 1035.
2. A.M. Kadomtseva, Y.F. Popov, G.P. Vorob'ev et al // Magnetoelectric and Magnetoelastic Properties of Rare-Earth Ferrobates. Low Temp. Phys. – 2010. – 36. – 511.
3. A.M. Kuz'menko, A.A. Mukhin, V.Y. Ivanov et al // Effects of the Interaction between R and Fe Modes of the Magnetic Resonance in $RFe_3(BO_3)_4$ Rare-Earth Iron Borates. JETP Lett. – 2011. – 94. – 294.

4. A.M. Kuzmenko, A.A. Mukhin, V.Y. Ivanov et al // Coupled R and Fe Magnetic Excitations in $RFe_3(BO_3)_4$ Multiferroics. Solid State Phenom. – 2012. – 190. – 269.
5. G.M. Kuz'micheva, I.A. Kaurova, V.B. Rybakov et al // Crystallochemical Design of Huntite-Family Compounds. Crystals. – 2019. – 9. – 100.
6. H. Zhang, S. Liu, C.S. Nelson et al // Structural features associated with multiferroic behavior in the $RX_3(BO_3)_4$ system. – 2019. – 31. – 505704.
7. E.S. Smirnova, O.A. Alekseeva, V.V. Artemov et al // Crystal Structure of Bismuth-Containing Samarium Iron–Aluminium Borates $Sm_{1-x}Bi_xFe_{3-y}Al_y(BO_3)_4$ ($x = 0.05 - 0.07$, $y = 0 - 0.28$) in the Temperature Range of 25–500 K. Crystals. 2023. 13. 1128.

УДК 539.21:537.86

Магнитоимпеданс в тулий марганцевом селениде

Харьков А.М.

к.ф.-м.н., доцент кафедры физики СибГУ имени М.Ф. Решетнева

Ситников М.Н.

к.ф.-м.н., доцент кафедры физики СибГУ имени М.Ф. Решетнева

***Аннотация.** Исследуется импеданс и его компоненты в тулий марганцевом селениде в интервале частот 10^2 – 10^6 Гц и температур 100–500 К. Найдена область температур с преобладающим вкладом реактивной и активной частей импеданса. Компоненты импеданса описываются в модели Дебая. Найден активационный характер времени релаксации, энергия активации. Установлено увеличение импеданса в магнитном поле в области малых концентраций и смена знака импеданса по температуре для больших концентраций. Положительное значение магнитоимпеданса описывается в модели электрически неоднородной среды.*

Ключевые слова: магнитоимпеданс, импеданс, селениды, модель Дебая

MAGNETOIMPEDANCE IN THULIUM MANGANESE SELENIDES

Kharkov A.M.

Ph.D., associate professor, department of physics, Reshetnev Siberian State University

Sitnikov M.N.

Ph.D., associate professor, department of physics, Reshetnev Siberian State University

***Annotation.** The impedance and its components in thulium manganese selenide are studied in the frequency range 10^2 – 10^6 Hz and temperatures 100–500 K. A temperature range with a predominant contribution of the reactive and active parts of the impedance is found. The components of impedance are described in the Debye model. The activation nature of the relaxation time and the activation energy were found. An increase in impedance in a magnetic field in the region of low concentrations*

and a change in the sign of impedance with temperature for high concentrations have been established. The positive value of magnetoimpedance is described in the model of an electrically inhomogeneous medium.

Keywords: *magnetoimpedance, impedance, selenides, Debye model*

В полупроводниках с неоднородным распределением электрического заряда транспортные характеристики зависят от степени неоднородности [1]. В спектре электронных возбуждений в запрещенной зоне образуется конечная электронная плотность на уровне химпотенциала в результате локализации заряда. При слабом легировании волновая функция электрона остается локализованной. С ростом концентрации замещения в центре зоны формируются делокализованные состояния и при некотором критическом значении возникает бесконечный кластер, при котором волновые функции электрона расплываются по всему кристаллу [2].

Регулировать электрическую неоднородность можно за счет флуктуации валентности, концентрации и температуры. Например, ион тулия обнаруживает состояние промежуточной валентности в TmSe. Электронная конфигурация иона $Tm^{2+\delta}$ зависит от халькогена, поэтому замещение иона марганца в селенидах MnSe ионами тулия приведет к разной энергии делокализации электронов. Введение в систему TmSe нестехиометрии способствует увеличению валентности ионов тулия до Tm^{3+} [3].

Цель работы выявить влияние ионов в тулий марганцевом селениде на время релаксации носителей тока, импедансные характеристики и их изменение в магнитном поле.

Образцы $Tm_xMn_{1-x}Se$ получены методом твердофазной реакции в вакуумированных кварцевых ампулах в однозонной печи сопротивления. Подробно методика синтеза описана в [4].

Релаксация носителей тока на частотах выше 1 кГц проявляется при температурах выше комнатной, поэтому зависимость импеданса от частоты без поля и в магнитном поле измерим при температурах выше комнатной.

Были измерены частотные зависимости импеданса $Z(\omega)$ и $Im(Z(\omega))$ для селенидов $Tm_{0.04}Mn_{0.95}Se$ и $Tm_{0.08}Mn_{0.9}Se$. При замещении марганца ионами тулия частоты максимумов $Im(Z(\omega))$ смещаются в сторону высоких частот в селениде на два порядка. Независимо от концентрации время релаксации резко меняется в окрестности 400 К. Ниже $T = 400$ К в системе существует одно время релаксации в области частот 10^2 – 10^6 Гц и компоненты импеданса описываются в модели Дебая:

$$Im Z(\omega) = \frac{B\omega\tau}{1+(\omega\tau)^2} \quad (1)$$

где τ – время релаксации носителей тока, B – параметр. Выше 420 К в системе появляется спектр времен релаксации. Время релаксации от температуры зависит экспоненциально $\tau = \tau_0 \exp(E_g/T)$ с энергией активации $E_g = 0.47$ eV в $Tm_{0.04}Mn_{0.95}Se$.

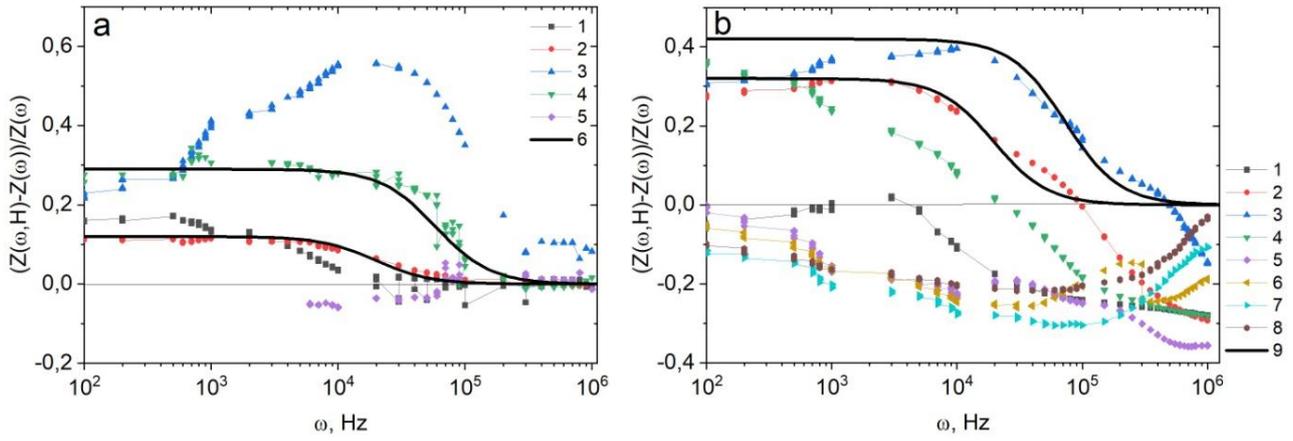


Рис. 1. Магнитоимпеданс в магнитном поле $H = 8 \text{ кЭ}$ при температурах $T = 300 \text{ К}$ (1), 330 К (2), 360 К (3), 390 К (4), 420 К (5) для $Tm_{0.04}Mn_{0.95}Se$ (a); при температурах $T = 300 \text{ К}$ (1), 310 К (2), 320 К (3), 330 К (4), 360 К (5), 390 К (6), 420 К (7), 450 К (8) для $Tm_{0.08}Mn_{0.9}Se$ (b). Результаты эксперимента описаны формулой (5) (сплошные линии б и 9).

В $Tm_{0.08}Mn_{0.9}Se$ $Im(Z(\omega))$ хорошо описывается в модели Дебая:

$$Im Z(\omega) = \frac{A\omega\tau_1}{1+(\omega\tau_1)^2} + \frac{B\omega\tau_2}{1+(\omega\tau_2)^2} \quad (2)$$

с двумя временами релаксации и с энергией активации $E_g = 0.6 \text{ eV}$.

Импеданс зависит от магнитного поля, на рис. 1 приведены изменения импеданса в магнитном поле, вычисленные по формуле:

$$\Delta Z = \frac{(Z(\omega, H) - Z(\omega, H=0))}{Z(\omega, H=0)} \quad (3)$$

где $Z(\omega, H)$ – импеданс в магнитном поле и $Z(\omega, H=0)$ – без поля. Для концентраций замещения $x < 0.05$ импеданс увеличивается в магнитном поле и магнитоимпеданс достигает максимума $\Delta Z = 0.56$ при $T = 360 \text{ К}$ в $Tm_{0.04}Mn_{0.95}Se$. С ростом концентрации изменение импеданса в магнитном поле уменьшается. При нагревании магнитоимпеданс меняет знак по частоте и температуре (рис. 1).

Импеданс в селенидах увеличивается в магнитном поле и проходит через максимум при нагревании образцов. Увеличение импеданса обусловлено изменением диагональной компоненты диэлектрической проницаемости в магнитном поле, которая пропорциональна проводимости $\sigma(\omega) = i\omega\epsilon$, импеданс $Z^2 = 1/\sigma^2 + 1/(\omega C)^2 \approx 1/\epsilon^2$. В электрически неоднородной среде продольная компонента диэлектрической проницаемости имеет вид [5]:

$$Re[\epsilon_{xx}(\omega)] = \frac{\epsilon(1 - \beta^2 + (\omega\tau)^2(1 + \beta^2)^2)}{1 + (\omega\tau)^2(1 + \beta^2)^2} \quad (4)$$

где $\beta = \mu H$, μ – подвижность, $\tau = RC$. Относительное изменение импеданса [6]:

$$\frac{(Z(H) - Z(0))}{Z(H)} = \frac{(\epsilon(0) - \epsilon(H))}{\epsilon(0)} = \frac{\beta^2}{1 + (\omega\tau)^2(1 + \beta^2)^2} \quad (5)$$

и его компонент удовлетворительно описывается этой функцией в области малых концентраций (рис. 1). В результате из импеданса можно получить информацию об электрической неоднородности [7].

Итак, температурное поведение компонент импеданса в селенидах качественно отличается от сульфидов [8]. Так, сопротивление на переменном токе при нагревании

проходит через максимум при T_{\max} . При $T < T_{\max}$ превалирует реактивная часть импеданса. С ростом концентрации замещения марганца тулием импеданс, и его компоненты увеличиваются на порядок. Возможно, образование зарядового упорядочения и увеличение емкости на два порядка. Релаксация носителей заряда описывается в модели Дебая. Найден активационный характер времени релаксации и энергия активации. Для малых концентраций импеданс увеличивается в магнитном поле в селенидах. С ростом концентрации магнитоимпеданс меняет знак по частоте и температуре. Увеличение импеданса вызвано уменьшением диэлектрической проницаемости в магнитном поле.

Работа поддержана Российским научным фондом, Правительством Красноярского края и проектом Красноярского научного фонда № 23-22-10016.

Список использованных источников:

1. Hu J., Rosenbaum T.F. and Betts J.B. Current Jets, Disorder, and Linear Magnetoresistance in the Silver Chalcogenides // *Physical Review Letters*. – 2005. – V. 95. – P. 186603.
2. Aplesnin S.S., Sitnikov M.N., Romanova O.B., Kharkov A.M., Begisheva O.B. and Zelenov F.V. Electro-sound and Asymmetry of the I–V Characteristic induced by ultrasound in the $Re_xMn_{1-x}S$ ($Re = Tm, Yb$) // *The European Physical Journal Plus*. – 2022. – V. 137. – P. 226.
3. Evers F. and Mirlin A.D. Anderson transitions // *Reviews of Modern Physics*. – 2008. – V. 80. – P. 1355.
4. Strange P., Svane A., Temmerman W.M., Szotek Z. and Winter H. Understanding the valency of rare earths from first-principles theory // *Nature*. – 1999. – V. 399. – P. 756–758.
5. Parish M.M. and Littlewood P.B. Magnetocapacitance in Nonmagnetic Composite Media // *Physical Review Letters*. – 2008. – V. 101. – P. 166602.
6. Aplesnin S.S., Kharkov A.M., Sitnikov M.N. Turning of activation energy and magnetoimpedance by alternating current frequency in manganese sulfide with partial substitution by samarium ions // *Physics of the Solid State*. – 2023. – V. 65. – No. 11. – P. 1801.
7. Howard M., Mitrovic D. and Vijayakumar S. Transferring impedance control strategies between heterogeneous systems via apprenticeship learning // *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. – 2010. – V. 8. – P. 98–105.
8. Romanova O.B., Aplesnin S.S., Sitnikov M.N., Udod L.V. and Kharkov A.M. Magnetoresistance and magnetoimpedance in holmium manganese sulfide // *Applied Physics A*. – 2022. – V. 128. – P. 124.

УДК 537.622

Антиферромагнитные материалы для спинтроники**Гареева З.В.**

д.ф.-м. н., в.н.с. ИФМК УФИЦ РАН

Звездин А.К.

д.ф.-м. н., г.н.с. ИОФ РАН

***Аннотация.** Рассмотрены магнитные структуры и их модификация под действием электрических и спин-поляризованных токов в проводящих антиферромагнетиках на примере CuMnAs . В рамках теоретико-группового подхода проведена классификация магнитных параметров порядка CuMnAs по неприводимым представлениям пространственной группы симметрии. Получены инвариантные комбинации параметров порядка, дающие вклад в термодинамический потенциал системы. Показано, что в антиферромагнетиках тетрагональной симметрии действие спинового тока приводит к скосу магнитных подрешеток и возникновению слабого ферромагнетизма. Рассмотрены некоторые аспекты динамики намагниченности в антиферромагнетиках тетрагональной симметрии.*

***Ключевые слова:** проводящие антиферромагнетики, электрический ток, спиновый ток, симметрия*

Antiferromagnetic materials for spintronics**Gareeva Z. V.,**Doctor of physical and mathematical Sciences, Leading Scientist, IMCP of Ufa Research
Scientific Center of Russian Academy of Sciences**Zvezdin A.K.**Doctor of physical and mathematical Sciences, Head Scientist, Prokhorov Institute of
General Physics of Russian Academy of Sciences

***Annotation.** Magnetic structures and their modification under the influence of electric and spin-polarized currents in conducting antiferromagnets are considered using CuMnAs as an example. Within the framework of the group theoretical approach, a classification of the magnetic order parameters of CuMnAs was carried out according to irreducible representations of the space symmetry group. Invariant combinations of order parameters that contribute to the thermodynamic potential of the system are obtained. The results of experimental studies on switching magnetic states in CuMnAs are interpreted. It has been shown that in antiferromagnets of tetragonal symmetry, the action of a spin current leads to the canting of magnetic sublattices and the emergence of weak ferromagnetism. Aspects of the dynamics of magnetization in antiferromagnets of tetragonal symmetry are considered.*

***Keywords:** conducting antiferromagnets, electric current, spin current, symmetry*

В последние годы активное развитие получила концепция антиферромагнитной спинтроники [1], что связано с возможностями технологического использования преимуществ антиферромагнитно упорядоченных материалов в современных технологиях. Устойчивость антиферромагнетиков к действию внешнего магнитного поля, высокоскоростная динамика

намагниченности и хорошие транспортные свойства делают эти материалы привлекательными для использования в устройствах памяти произвольного доступа, в том числе, в качестве компонент спин-туннельных магниторезистивных элементов.

В данной работе рассмотрен CuMnAs , электронная структура, магнитные и транспортные свойства которого достаточно хорошо известны [2]. Рассмотрим кристаллическую структуру и магнитные свойства антиферромагнетика CuMnAs . В элементарной ячейке содержится четыре молекулы CuMnAs , кристаллическая структура CuMnAs описывается пространственной группой симметрии $D_{4h}^7 (P4/nmm_1)$. Ионы Mn^{3+} занимают позиции 4с в нотации Вайкопфа. Группа D_{4h}^7 содержит набор из 16 операций симметрии, из которых можно выделить независимые элементы $4_{2z}^+, 2_d, \bar{1}$ в качестве генераторов группы. Расположение элементов симметрии – винтовых осей второго порядка $2_{1x}, 2_{1y}$, винтовой оси четвертого порядка 4_{2z}^+ , оси второго порядка 2_d и инверсии $\bar{1}$ в элементарной ячейке CuMnAs , а также на ее проекции на плоскость, перпендикулярную главной оси кристалла 4_{2z}^+ показано на Рис.1.

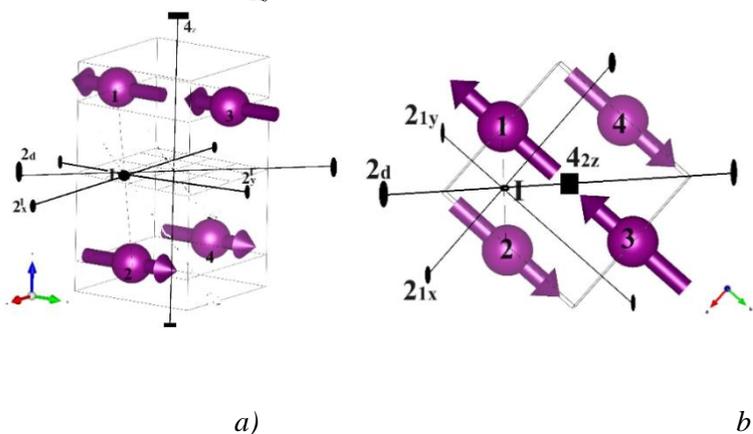


Рис.1. а) Элементарная ячейка CuMnAs , б) проекция ячейки на плоскость ab , положение основных элементов симметрии.

С кристаллической структурой связан характер магнитного упорядочения. Согласно нейтронографическим данным [2] ионы Mn^{3+} в CuMnAs образуют антиферромагнитно – упорядоченную структуру \mathbf{G} -типа при температурах $T = 330 - 360$ К. На примере высокотемпературного антиферромагнетика CuMnAs проведен теоретико-групповой анализ магнитных состояний, реализуемых в антиферромагнитных кристаллах тетрагональной симметрии. Магнитные параметры порядка, а также компоненты зарядового и спинового токов классифицированы по неприводимым представлениям пространственной группы симметрии кристалла. В рамках подхода Турова [3] интерпретированы результаты экспериментальных исследований переключения магнитных состояний антиферромагнетика CuMnAs под действием импульсов электрического тока [2]. Изучено влияние спинового тока на магнитные структуры CuMnAs , показано, что действие спинового тока приводит к формированию обменно-связанных ферромагнитных структур.

Работа поддержана грантом РФФ № 23-22-00225.

Список использованной литературы:

1. V. Baltz, A. Manchon, M. Tsoi, et al.// Rev. Mod. Phys. – 2018– 90-015005.
2. P. Wadley et al.// Science – 2016 – 351-587.
3. Е. А. Туров, В. В. Николаев// Успехи физических наук –2005 – 175 – 457.

УДК 538.91

Магнитные свойства твердых растворов $\text{Bi}_{1-y}\text{Sm}_y\text{Fe}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ **Карпинский Д.В.**

д.ф.-м.н., старший научный сотрудник института ПМТ МИЭТ,
заведующий лабораторией оксидных материалов ГО «НПЦ НАНБ по материаловедению»

Латушко С.И.

инженер института ПМТ МИЭТ, младший научный сотрудник
ГО «НПЦ НАНБ по материаловедению»

Желудкевич Д.В.

инженер института ПМТ МИЭТ, младший научный сотрудник
ГО «НПЦ НАНБ по материаловедению»

Силибин М.В.

к.т.н., доцент института ПМТ МИЭТ

Аннотация. Твердые растворы $\text{Bi}_{0.88}\text{Sm}_{0.12}\text{Fe}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ с $0 \leq x \leq 0.1$ полученные методом твердофазных реакций соответствуют области морфотропной фазовой границы «ромбоэдр-орторомб». Измерения намагниченности при комнатной температуре указывают на увеличение остаточной намагниченности в составах с увеличением концентрации ионов титана до $M_R \sim 0,3$ э.м.е./г при $x = 0.06$, дальнейшее увеличение содержания ионов Ti приводит к снижению намагниченности. Снижение температуры приводит к уменьшению остаточной намагниченности, что обусловлено частичным восстановлением пространственно-модулированной спиновой структуры. Измерения намагниченности в слабых (до 10 кЭ) и сильных (до 140 кЭ) полях позволили выделить вклад компонент намагниченности, обусловленные как слабым ферромагнетизмом так и магнитными моментами, локализованными в межфазовых областях двухфазных твердых растворов.

Ключевые слова: феррит висмута, мультиферроики, магнитометрия, магнитные свойства, структурные фазовые переходы, морфотропная фазовая граница.

Magnetic properties of organic solutions $\text{Bi}_{1-y}\text{Sm}_y\text{Fe}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ **Karpinsky D.V.**

Doctor of physical and mathematical sciences, senior researcher at Institute of Advanced Materials and Technologies NRU MIET, Head of the Laboratory of oxide materials of the Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus"

Latushka S.I.

Engineer at Institute of Advanced Materials and Technologies NRU MIET, junior research fellow at "SPMRC of NASB"

Zheludkevich D.V.

Engineer at Institute of Advanced Materials and Technologies NRU MIET, junior research fellow at "SPMRC of NASB"

Silibin M.V.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Institute of Advanced Materials and Technologies NRU MIET

Annotation. *Solid solutions $\text{Bi}_{0.88}\text{Sm}_{0.12}\text{Fe}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ with $0 \leq x \leq 0.1$ prepared by the solid-state reaction method, correspond to the “rhombohedral-orthorhombic” morphotropic phase boundary region. Magnetization measurements performed at room temperature show an increase in remanent magnetization with the titanium ion concentration up to $M_R \sim 0.3$ emu/g at $x = 0.06$; a further increase in Ti content leads to a decrease of magnetization. Temperature decrease leads to a decrease in remnant magnetization, which causes partial restoration of the spatially modulated spin structure. Magnetization measurements in weak (up to 10 kOe) and strong (up to 140 kOe) fields allowed to identify the components of magnetization associated with weak ferromagnetism and with unbounded spins located at the phase boundary regions of the mixed phase compounds.*

Keywords: *ferrite-bismuth, multiferroics, magnetometry, magnetic properties, structural phase transitions, morphotropic phase boundary.*

В настоящее время одной из важных задач современного материаловедения, является разработка новых функциональных магнитоэлектрических материалов с магнитными и электрическими параметрами, соответствующими актуальным требованиям электронной промышленности, а также удовлетворяющие современным экологическим нормам. Используемые в настоящее время функциональные оксидные материалы [1-3] обладают определенными недостатками – имеют невысокую диэлектрическую проницаемость в сильных полях, большие диэлектрические потери при высоких частотах, невысокую магнитную восприимчивость, низкие температуры магнитных и электрических фазовых переходов и т.п.. В данной работе исследованы особенности концентрационного фазового перехода «ромбоэдр-ортормб» в системе твердых растворов $\text{Bi}_{0.88}\text{Sm}_{0.12}\text{Fe}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ с $0 \leq x \leq 0.1$. Исследована последовательность изменения структурного состояния составов $\text{Bi}_{0.88}\text{Sm}_{0.12}\text{Fe}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ при увеличении концентрации ионов титана, определена область существования полярной ромбоэдрической и ортормбической фаз, обуславливающих комплексное магнитное состояние составов, что вносит существенный вклад в область разработки и получения новых функциональных магнитоэлектрических материалов для создания различных электротехнических устройств.

Синтез керамических составов системы $\text{Bi}_{0.88}\text{Sm}_{0.12}\text{Fe}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ с $0 \leq x \leq 0.1$ проводился методом твердофазных реакций. В качестве исходных реагентов использовались ЧДА оксиды Bi_2O_3 , Fe_2O_3 , Sm_2O_3 и TiO_2 . Смесь химических реактивов, взятых в стехиометрическом соотношении, тщательно перемешивалась в планетарной мельнице RETSCH. Полученные порошки прессовались в таблетки (диаметр 10 мм, толщина 1 мм) при давлении 0.1 ГПа. После отжига при $T=900$ °С (в течение 20 часов), последующего измельчения и прессования составы синтезировались при температуре ~ 960 °С (в течение 12 часов). Исследования составов методом дифракции рентгеновского излучения проводились при помощи дифрактометра Adani PowDiX 600 с использованием Cu-K α излучения. Анализ дифракционных данных проводился методом полнопрофильного анализа Ритвельда с помощью программного комплекса FullProf. Исследования намагниченности составов проводилось с использованием универсальной установки измерения физических свойств PPMS Cryogenic ltd. в диапазоне температур 5 – 300 К и магнитных полях до 140 кЭ.

Данные рентгеноструктурного анализа указывают на высокую фазовую чистоту составов, твердые растворы $\text{Bi}_{0.88}\text{Sm}_{0.12}\text{Fe}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ обладают смешанным структурным

состоянием с преобладанием ромбоэдрической фазы (пр. гр. $R3c$) и незначительным количеством антиполярной орторомбической фазы (пр. гр. $Pbam$). Объемная доля орторомбической фазы постепенно уменьшается от $\sim 50\%$ в составе $\text{Bi}_{0.88}\text{Sm}_{0.12}\text{FeO}_3$ до $\sim 10\%$ в составе $\text{Bi}_{0.88}\text{Sm}_{0.12}\text{Fe}_{0.94}\text{Ti}_{0.06}\text{O}_3$, в твердых растворах с большим содержанием ионов Ti доля орторомбической фазы становится пренебрежимо малой и не обнаруживается рентгеновскими дифракционными измерениями. Химическое замещение ионами Ti также приводит к постепенному уменьшению величины ромбоэдрического искажения, что подтверждается уменьшением отношения параметров c/a . Объем элементарной ячейки, рассчитанный для антиполярной орторомбической фазы, также уменьшается с увеличением содержания Ti , хотя эти изменения не столь заметны по сравнению с изменениями, наблюдаемыми для ромбоэдрической фазы (рис. 1). Рассчитанные параметры элементарной ячейки представлены на рисунке 1.

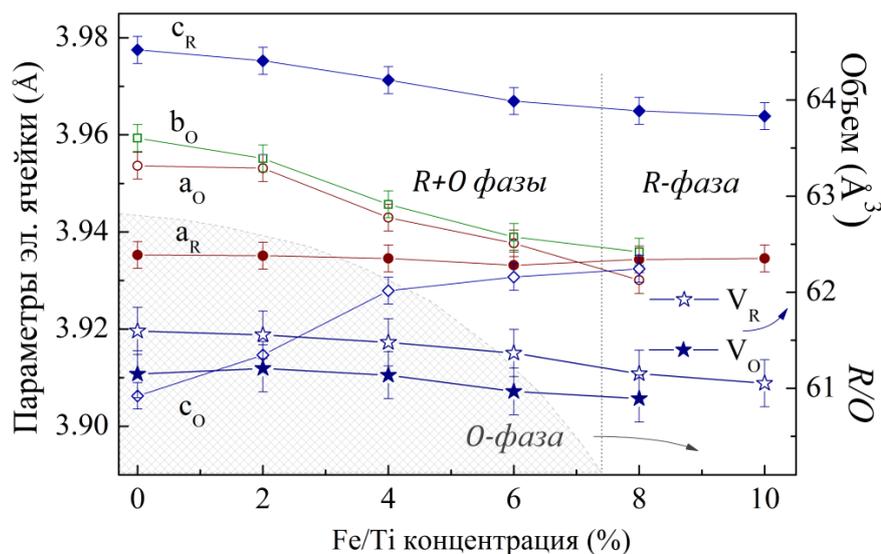


Рис. 1. Рассчитанные параметры элементарной ячейки R- и O- фаз составов $\text{Bi}_{0.88}\text{Sm}_{0.12}\text{Fe}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$; расчетное объемное соотношение фаз R/O, обозначено итриховой областью.

Петли намагниченности, полученные при комнатной температуре для составов с $x \leq 0.4$, указывают на наличие метамагнитного перехода, индуцированного сильными магнитными полями. Изменение магнитной структуры составов вероятно вызвано разрушением пространственно-модулированной спиновой структуры, частично сохранившейся в этих составах при комнатной температуре. Составы с $x \geq 0.6$ характеризуются полным разрушением модулированной магнитной структуры, что сопровождается увеличением величины остаточной намагниченности, которая в составе с $x = 0.06$ достигает 0.28 э.м.е./г (при измерении в сильных магнитных полях) и далее уменьшается с увеличением содержания Ti (рисунок 2). Результаты измерения намагниченности составов со смешанным структурным состоянием ($x < 0.08$) указывают на слабую корреляцию между типом структурных искажений и величиной остаточной намагниченности. Измерения намагниченности, выполненные в слабых полях (до 10 кЭ) позволили выяснить природу различной остаточной намагниченности, наблюдаемой для составов в сильных и слабых магнитных полях.

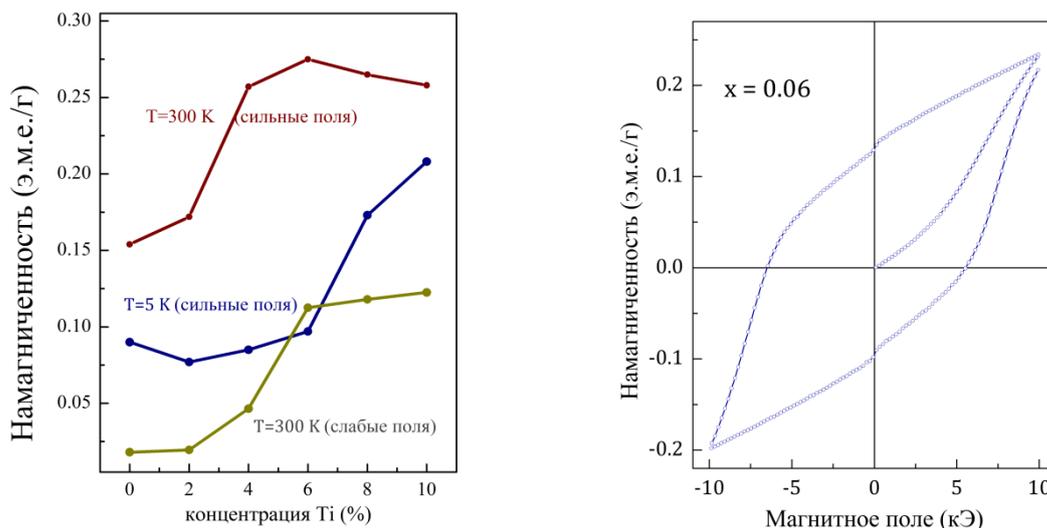


Рис. 2. Зависимости остаточной намагниченности составов $Bi_{0.88}Sm_{0.12}Fe_{1-x}Ti_xO_3$ полученные в режимах измерения сильных и слабых полей (рисунок слева) и петля магнитного гистерезиса состава с $x=0.06$, полученная в слабых магнитных полях.

Модель, описывающая эволюцию магнитного состояния составов предполагает значительный вклад свободных спинов в остаточную намагниченность, что подтверждается данными намагниченности, полученными в слабых магнитных полях. Намагниченность составов при измерении в сильных магнитных полях обусловлено в значительной степени слабым ферромагнетизмом, т.е. скошенностью магнитных моментов ионов железа, обусловленных взаимодействием Дзялошинского – Мория. Эволюция остаточной намагниченности составов обусловлена главным образом слабым ферромагнетизмом и изменениями пространственно-модулированной спиновой структуры; которая в значительной степени зависит от температуры и химической однородности структурного состояния. Компонента намагниченности, связанная со свободными спинами, вносит значительный вклад в остаточную намагниченность в слабых магнитных полях, поскольку намагниченность, вызванная слабым ферромагнетизмом фрустрирована в магнитных фазах твердых растворов со смешанным структурным состоянием.

Работа выполнена при поддержке РФФ (23-19-00347).

Список использованной литературы:

1. D. Kan, L. Pálová, V. Anbusathaiah, C. Cheng, S. Fujino, V. Nagarajan, K. M. Rabe, and I. Takeuchi// Adv. Funct. Mater. – 2010 – vol. 20 – p. 1108.
2. L. Tang, X. Zhou, M. Habib, J. Zou, X. Yuan, Y. Zhang, and D. Zhang// Ceramics International – 2023 – vol. 49 – p. 31965.
3. Z. Liao, W. Sun, Q. Zhang, J. Li, and J. Zhu// J. Appl. Phys. – 2019 – vol.125 – p. 175113.

УДК 537.611.45:537.622.5:543.429.3

Сверхтонкие взаимодействия и пространственная спин-модулированная структура в мультиферроиках $\text{Bi}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-y}$ ($x = 0 - 0.10$)**Покатилов В.С.**

д.ф.м.н., в.н.с., Институт перспективных технологий и индустриального программирования РТУ МИРЭА

Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина РАН

Русаков В.С.

д.ф.м.н., профессор, Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

Гапочка А.М.

к.ф.м.н., н.с., Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

Кубрин С.П.

д.ф.-м.н., в.н.с., НИИ физики Южного Федерального Университета

Сигов А.С.

д.ф.м.н., зав. кафедрой, Институт перспективных технологий и индустриального программирования РТУ МИРЭА

***Аннотация.** Представлены данные рентгеновских и мессбауэровских мультиферроиков $\text{Bi}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-y}$ ($x = 0 - 0.10$), полученных методом твердофазного синтеза. Кристаллическая структура образцов ромбоэдрическая $R\bar{3}c$. Измерены концентрационные зависимости параметров кристаллической решетки. Мессбауэровские спектры ядер ^{57}Fe расшифровывались в рамках модели пространственной спин-модулированной структуры циклоидного типа с учетом существования позиций катионов железа с различным кислородным окружением. Показано, что замещение трехвалентных катионов висмута двухвалентными катионами стронция приводит к сильному увеличению параметра ангармонизма спиновой модуляции.*

***Ключевые слова:** мультиферроики, пространственная спин-модулированная структура, параметр ангармонизма, мессбауэровская спектроскопия*

Hyperfine interactions and spatial spin-modulated structure in $\text{Bi}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-y}$ multiferroics ($x = 0 - 0.10$)**Pokatilov V.S.**

Dr.Sc, Leading Researcher, Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming of RTU MIREA

Vereshchagin Institute of High Pressure Physics of the Russian Academy of Sciences

Rusakov V.S.

Dr.Sc, Professor, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

Gapochka A.M.

Ph.D., Associate Professor, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

Kubrin S.P.

Dr.Sc, Leading Researcher, Research Institute of Physics Southern Federal University

Sigov A. S.

Dr.Sc, Head of the Department Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming of RTU MIREA

***Annotation.** The data of X-ray and Mössbauer studies of multiferroics $\text{Bi}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-y}$ ($x = 0 - 0.10$), obtained by solid-phase synthesis, are presented. The crystal structure of the samples is rhombohedral $R3c$. The concentration dependences of the crystal lattice parameters were measured. The Mossbauer spectra of ^{57}Fe nuclei were decoded within the framework of a model of a spatial spin-modulated cycloidal structure, taking into account the existence of positions of iron cations with different oxygen environments. It is shown that the substitution of trivalent bismuth cations with divalent strontium cations leads to a strong increase in the anharmonicity parameter of spin modulation.*

***Keywords:** multiferroics, spatial spin-modulated structure, anharmonicity parameters, Mössbauer spectroscopy*

Целью настоящей работы являлось исследование влияния замещения трехвалентных ионов висмута двухвалентными ионами стронция в системе $\text{Bi}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-y}$ ($x = 0 - 0.10$) с ромбоэдрической структурой на ПСМС и ее параметры методом мессбауэровской спектроскопии при температурах 295 и 87 К.

Поликристаллические образцы системы $\text{Bi}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-y}$ были приготовлены методом твердофазного синтеза [1]. Для улучшения качества мессбауэровских спектров и уменьшения времени измерений образцы обогащались стабильным изотопом ^{57}Fe в количестве 10 моль %.

Кристаллическая структура образцов системы $\text{Bi}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-y}$ ($x = 0 - 0.10$) исследовалась методом порошковой рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре MiniFlex 600 с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения с длиной волны $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ (в режиме работы: $I = 15 \text{ mA}$, $U = 40 \text{ kV}$). Дифрактограммы регистрировались в геометрии Брэгга–Брентано с шагом $0,02^\circ$ в диапазоне углов $10-80^\circ$ с использованием Ni-фильтра на дифрагированном пучке и высокоскоростного кремниевого ленточного 1D детектора D/teX Ultra. Фазовый анализ проводился с помощью программы SmartLab Studio II (Rigaku Corporation) и базы данных PDF-2. Уточнение структурных параметров проводился методом Ритвельда.

Мессбауэровские спектры ядер ^{57}Fe снимались в геометрии поглощения на спектрометре MS1104Em (НИИ физики, г. Ростов на Дону) в режиме постоянных ускорений с источником $^{57}\text{Co}(\text{Rh})$ при 295 и 87 К. Обработка спектров осуществлялась методом модельной расшифровки с помощью программы SpectrRelax [2].

Рентгенографический анализ показал, что замещение Bi^{3+} на Sr^{2+} в рассматриваемой области составов ($x \leq 0.10$) синтезированных поликристаллических образцов $\text{Bi}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-y}$ кристаллическая структура остается ромбоэдрической подобно кристаллической структуре BiFeO_3 с пространственной группой $R3c$. Все исследованные образцы содержали небольшое, не более 2-4%, количество примесной фазы $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$. В гексагональном представлении параметр a практически не изменяется, а параметр c заметно уменьшается при увеличении количества атомов Sr^{2+} в ферритах $\text{Bi}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-y}$ при $x \leq 0.10$ (см. рис. 1). Эти данные показывают, что атомы Sr^{2+} замещают атомы Bi^{3+} в ромбоэдрической структуре и образуют твердые растворы в области составов $x = 0 - 0.10$.

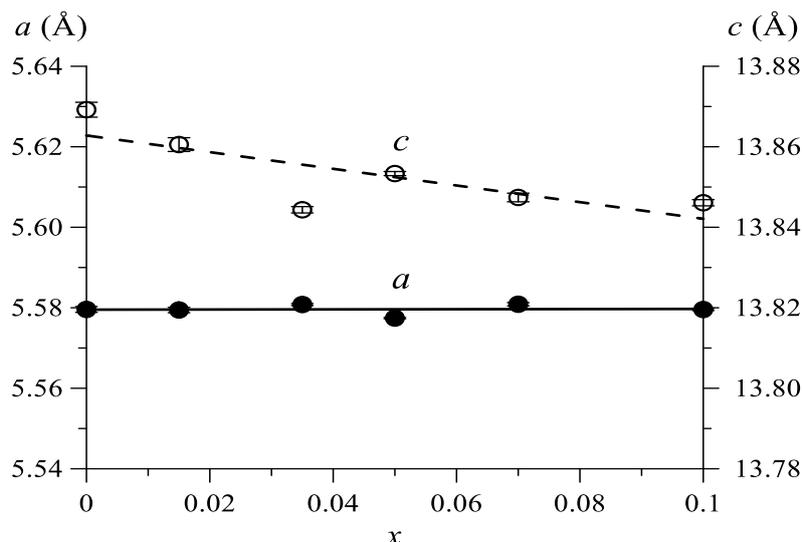


Рис. 1. Концентрационные зависимости параметров элементарной ячейки исследованных мультиферроиков $\text{Bi}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-y}$ при 295 К.

Для адекватного описания мессбауэровских спектров ядер ^{57}Fe в мультиферроиках $\text{Bi}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-y}$ с $x = 0 - 0.10$ рассматривалось существование катионов железа Fe^{3+} в позициях с различным ближайшим кислородным окружением: позиции с шестью $\text{Fe}(6)$ (октаэдрические позиции), с пятью $\text{Fe}(5)$ (квадратно-пирамидальные позиции) и четырьмя $\text{Fe}(4)$ (тетраэдрические позиции) анионов кислорода. Этим катионам железа соответствуют три парциальных спектра с различными параметрами сверхтонкой магнитной структуры. При расшифровке экспериментальных спектров замещенных ферритов висмута $\text{Bi}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-y}$ все эти парциальные спектры соответствовали модели единой ангармонической спиновой волны, в которой принимают участие спины всех атомов железа с различным окружением. В результате были определены значения параметров сверхтонких взаимодействий (СТВ): изомерного сдвига δ , константы квадрупольного взаимодействия e^2qQ , изотропного H_{is} и анизотропного H_{an} сверхтонких полей в области расположения ядра, параметра ангармонизма m спиновой волны. Параметр $0 \leq m \leq 1$ количественно определяет степень ангармоничности при переходе от идеальной спиновой циклоиды ($m = 0$) к квадратной спин-модулированной структуре ($m \approx 1$) [3].

На рис. 2 представлена концентрационные зависимости параметра ангармонизма m ПСМС циклоидного типа при 295 и 87 К в ферритах $\text{Bi}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-y}$ ($x = 0 - 0.10$) с ромбоэдрической структурой. Из рис. 2 следует, что при малых замещениях трехвалентных ионов Bi^{3+} двухвалентными ионами Sr^{2+} при понижении температуры параметр ангармонизма m значительно увеличивается (более, чем в 2 раза). Для чистого феррита BiFeO_3 m увеличился от 0.15(4) при 295 К до 0.33(6) при 87 К. Однако для составов, близких к $x = 0.10$ (границе фазового перехода из ромбоэдрической фазы в кубическую), параметр почти не изменился и принимает значение, близкое к значению $m \sim 0.50$ при комнатной температуре.

Эти данные показывают, что при замещении катионов Fe^{3+} на катионы Sr^{2+} в мультиферроиках $\text{Bi}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-y}$ ($x = 0 - 0.10$) происходит перегруппировка магнитных моментов атомов железа по длине ПСМС, увеличивается относительное количество магнитных моментов атомов железа, направленных вдоль “легкой оси” c по отношению к количеству магнитных моментов атомов железа, лежащих в “легкой плоскости”, перпендикулярной оси c . Это означает, что при замещении атомов Fe^{3+} атомами Sr^{2+} и понижении температуры увеличиваются искажения октаэдров, увеличивается константа одноосной анизотропии [4].

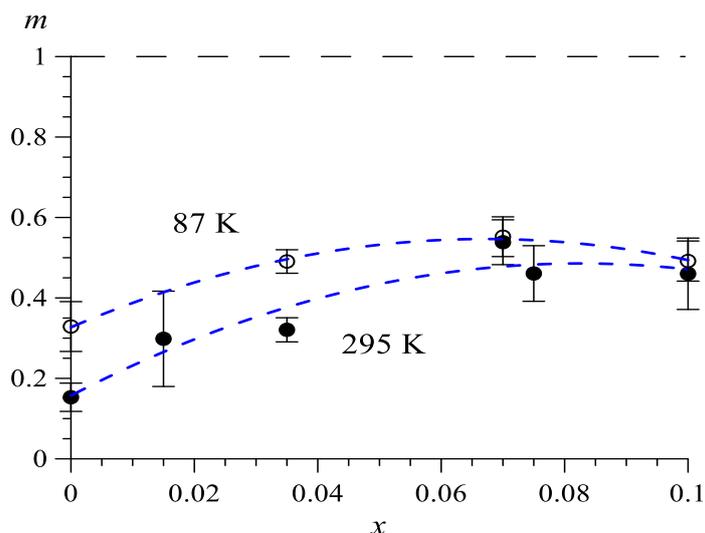


Рис. 2. Концентрационные зависимости параметра ангармонизма m спиновой модуляции в исследованных мультиферроиках $\text{Bi}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-y}$ при 295 и 87 К.

Замещение катионов Fe^{3+} катионами Sr^{2+} в мультиферроиках $\text{Bi}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-y}$ ($x = 0 - 0.10$) при $T = 295$ К приводит к сжатию решетки вдоль оси c (рис. 1). Это искажение октаэдров вдоль оси c , дополнительное к тому, которое уже существует в BiFeO_3 из-за смещения катионов Bi^{3+} , анионов O^{2-} и катионов Fe^{3+} вдоль оси c (при переходе из неполярной фазы в полярную при T_C) – так называемые сегнетоэлектрические искажения, увеличивает одноосную анизотропию K_u [4].

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание для университетов № ФГФЗ-2023-0005), а также программы развития экспериментальной приборной базы Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Список использованных источников:

1. Покатилов В.С., Сигов А.С., Коновалова А.О., Покатилов В.В. Магнитные и электронные состояния ионов железа в перовските $\text{Bi}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{FeO}_3$ // Известия РАН. Серия Физическая. – 2010. – Т. 74, № 8. – С. 1166–1168
2. Matsnev M.E. and Rusakov V.S. SpectrRelax: an application for Mössbauer spectra modelling and fitting // AIP Conference Proceedings. – 2012. – V. 1489. – P. 178–185.
3. Rusakov V.S., Pokatilov V.S., Sigov A.S., Matsnev M.E., Gapochka A.M., Pyatakov A.P. The effect of temperature on parameters of hyperfine interactions and spatial spin-modulated structure in multiferroic BiFeO_3 // Ferroelectrics. – 2020, V. 569. – P. 286–294.
4. Park J.-G., Le M. D., Jeong J., Lee S. J. Phys. Structure and spin dynamics of multiferroic BiFeO_3 // Condens. Matter. – 2014 – V.26. – P. 1–32.

УДК 538.955

Замещенный иттрием феррит висмута: золь-гель метод синтеза**Тарасенко Т.Н.**

к.ф.-м.н., ст. науч.сотр., Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

Михайлов В.И.

к.ф.-м.н., ст. науч.сотр., Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

Ковалев О.Е.

мл. науч.сотр., Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

Грибанов И.Ф.

к.ф.-м.н., ст. науч.сотр., Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

Демидова Е.А.

инженер, Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

Головчан А.В.

к.ф.-м.н., ст. науч.сотр., Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

***Аннотация.** Магнитные свойства поликристаллических мультиферроиков $Bi_{1-x}Y_xFeO_3$ ($x=0.05-0.3$), полученных золь-гель синтезом, исследованы в магнитных полях до 9.7 кЭ. Намагниченность насыщения M_s возрастает с ростом x , что обусловлено искажениями кристаллической решетки, приводящими к разрушению спиновой циклоиды, характерной для $BiFeO_3$. Зависимости $M_s(x)$ коррелируют с данными рентгеноструктурного анализа: сосуществование при $x \geq 0.15$ ромбоэдрической $R3c$ и орторомбической $Pbnm$ фаз.*

***Ключевые слова:** мультиферроики $Bi_{1-x}Y_xFeO_3$, золь-гель метод синтеза, кристаллическая структура, намагниченность насыщения*

Yttrium-substituted bismuth ferrite: sol-gel method of synthesis**Tarasenko T.N.**Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher,
Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering**Mikhaylov V.I.**Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher
Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering**Kovalev O.Ye.**

Junior scientist, Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering

Gribanov I.F.Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher,
Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering**Demidova Ye.A.**

Engineer, Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering

Golovchan A.V.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher
Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering

Annotation. *Magnetic properties of polycrystalline multiferroics $Bi_{1-x}Y_xFeO_3$ ($x=0.05-0.3$) obtained by sol-gel synthesis have been investigated in magnetic fields up to 9.7 kOe. The saturation magnetisation M_s increases with increasing x , which is due to the distortions of the crystal lattice leading to the destruction of the spin cycloid characteristic of $BiFeO_3$. The $M_s(x)$ dependences correlate with the data of X-ray diffraction analysis: coexistence of rhombohedral $R3c$ and orthorhombic $Pbnm$ phases at $x \geq 0.15$.*

Keywords: *multiferroics $Bi_{1-x}Y_xFeO_3$, sol-gel method of synthesis, crystal structure, magnetization of saturation*

Разрушение спиральной спиновой структуры (циклоиды), характерной для феррита висмута $BiFeO_3$ (BFO) [1], для проявления в нем «скрытого» ферромагнетизма (ФМ) можно достичь способом изовалентного замещения ионов Bi^{3+} ионами редкоземельных металлов и/или ионов Fe^{3+} – ионами переходных металлов [2-5]. С другой стороны, можно получать образцы замещенного BFO в наноразмерном состоянии, при этом их размер должен быть сравнимым с периодом циклоиды (≤ 62 нм) [1].

Данная работа посвящена изучению магнитных свойств замещенных иттрием образцов мультиферроика BFO, $Bi_{1-x}Y_xFeO_3$ ($0.05 \leq x \leq 0.3$), полученных золь-гель синтезом [4]. В качестве исходных компонентов для серии образцов твердых растворов $Bi_{1-x}Y_xFeO_3$ ($x = 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3$) были взяты высокочистые оксиды (марки ОСЧ) Y_2O_3 , Bi_2O_3 и карбонильное железо в стехиометрическом соотношении. Растворением в разбавленной азотной кислоте был получен раствор нитратов, лимонную кислоту добавляли в как комплексообразователь и в качестве гелеобразующего агента - этиленгликоль. После выпаривания реакционной смеси до гелеобразного состояния и дальнейшего нагрева получался сухой осадок, который прокаливался при постепенном повышении температуры до 600 °С. Полученные нанопорошки (~ 40 нм) спрессовывались в таблетки толщиной 1.5 мм и диаметром 8 мм с последующим отжигом при температуре 850 °С (10 минут). Для стабилизации свойств образцов был произведен их дополнительный обжиг при 1000 °С (5 ч).

Рентгенофазовый анализ образцов $Bi_{1-x}Y_xFeO_3$ показал, что при $x = 0.05$ и 0.1 структура незначительно отличается от исходной ромбоэдрической структуры (пр. гр. $R3c$) “чистого” BFO (рис. 1). С дальнейшим ростом степени замещения ($x \geq 0.15$), наряду с рефлексами ромбоэдрической структуры, появляются рефлексы орторомбической фазы (пр. гр. $Pbnm$) [4].

Концентрационная зависимость намагниченности насыщения $M_s(x)$ для системы $Bi_{1-x}Y_xFeO_3$ ($x=0.05-0.3$) представлена на рис. 2. С увеличением содержания иттрия в $Bi_{1-x}Y_xFeO_3$ до $x=0.3$ $M_s(x)$ монотонно возрастает в отличие от синтезированных золь-гель методом образцов ВФО, в которых, кроме замещения висмута иттрием, ионы Fe^{3+} частично замещены ионами Mn^{3+} [2], где $M_s(x)$ имеет максимум при $x=0.075$, а затем убывает.

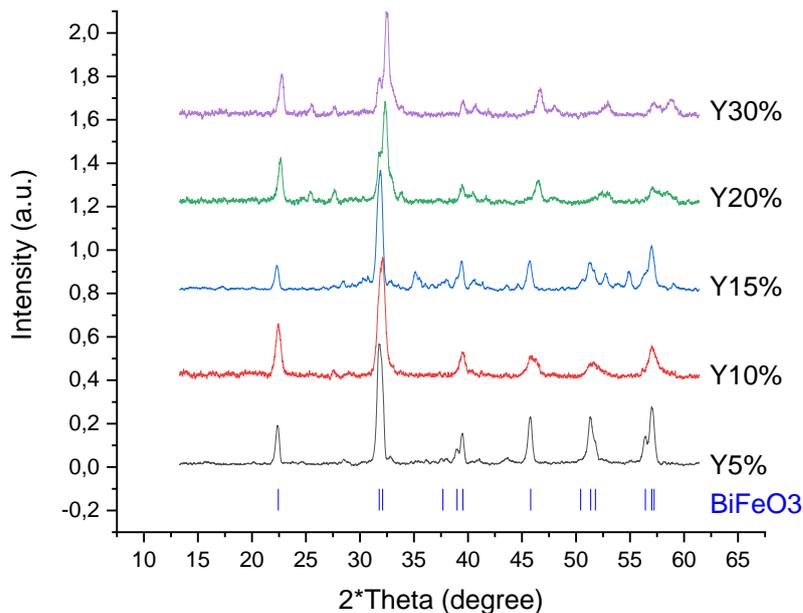


Рис. 1. Рентгенодифрактограммы образцов мультиферроиков $Bi_{1-x}Y_xFeO_3$ для различных степеней замещения x при комнатной температуре

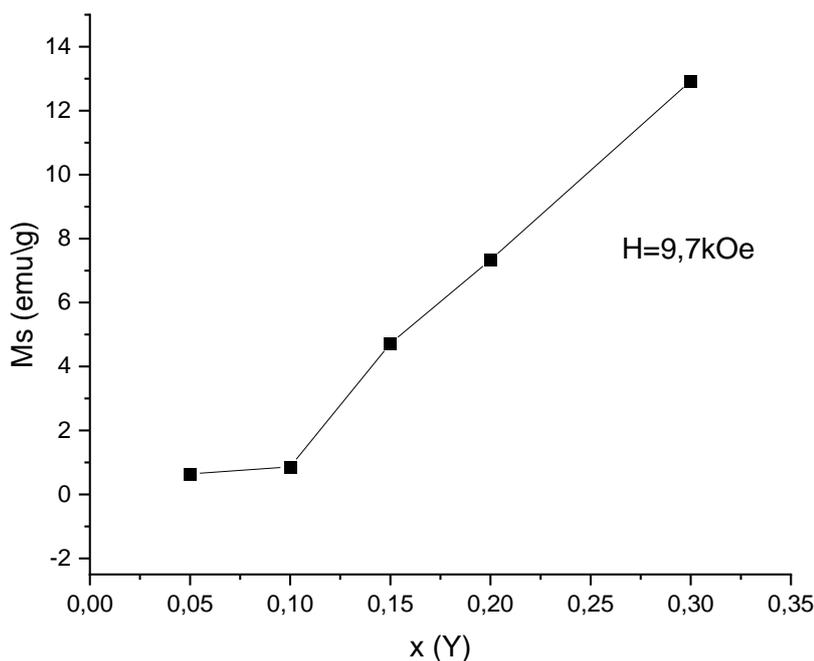


Рис. 2. Концентрационная зависимость намагниченности насыщения для составов $Bi_{1-x}Y_xFeO_3$ при $0.05 \leq x \leq 0.3$ в поле $H = 9.7$ kOe

Характер зависимости $M_s(x)$, полученной в нашей работе [4], согласуется с данными работы [5], в которой серия образцов $Bi_{1-x}Y_xFeO_3$ ($x = 0.05-0.2$) была получена твердофазным синтезом. Однако в нашей работе составы с $x = 0.05$ и 0.1 имеют меньшую намагниченность, чем образцы таких же составов в [5]. На рентгенодифрактограммах [5] имеются, помимо побочных примесных фаз силленита $Bi_{25}FeO_{39}$ и муллита $Bi_2Fe_4O_9$, обычно возникающих при

твердофазном синтезе, рефлекс фазы железо-иттриевого граната $Y_3Fe_5O_{12}$. Кластеры, содержащие такие включения, могут давать вклад в намагниченность. Подобная ситуация возможна и при наличии в образцах составов $Bi_{1-x}Y_xFeO_3$ [6] фазы магнетита Fe_3O_4 .

Для ВФО с двойным замещением (Sm и Mn) [7], синтезированных методом холодного прессования под высоким давлением, остаточная намагниченность ФМ фазы увеличивается, достигая максимума при 20 % замещения, и уменьшается при дальнейшем увеличении процентного содержания заместителей [7]. В диапазоне $0.15 < x < 0.20$ имеет место сосуществование двух фаз: ромбоэдрической $R3c$ и орторомбической $Pbam$. При комнатной температуре в этих составах наблюдалось сосуществование ФМ и антиферромагнитной фаз.

Таким образом, в нашей работе, как и во всех рассмотренных случаях изовалентного замещения мультиферроика ВФО, при определенной степени замещения, помимо $R3c$ -фазы, наблюдалось возникновение орторомбической фазы и сосуществование обеих фаз в некоторой области замещений.

Структурные искажения, создаваемые присутствием немагнитного иона Y^{3+} с меньшим ионным радиусом по сравнению с ионным радиусом Bi^{3+} , вызывают разрушение спиновой циклоиды, характерной для ВФО, тем самым проявляя «скрытый» ферромагнетизм и объемную намагниченность ВФО, легированного иттрием. Этому способствует также получение нанопорошковых образцов $Bi_{1-x}Y_xFeO_3$ золь-гель синтезом.

Список использованных источников:

1. Пятаков А.П., Звездин А.К. Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики // УФН. – 2012. – Т. 182, № 6. – С. 593–620.
2. Pandey R., Pradhan L.K., Kumar P., Kar M. Double crystal symmetries and magnetic orderings in co-substituted (Y and Mn) bismuth ferrite // Ceram. Int. – 2018. – V. 44, No 15. – P. 18609-18616.
3. Тарасенко Т.Н., Михайлов В.И., Кравченко З.Ф., Бурховецкий В.В., Изотов А.И., Легенький Ю.А., Живулько А.М., Янушкевич К.И., Аплеснин С.С. Роль замещений марганцем катионов железа в изменении магнитных и электрических характеристик магнитоэлектриков $BiFe_{1-x}Mn_xO_3$ ($x = 0.05$ и 0.15) // Изв. РАН. – 2023. – Т. 87, № 3. – С. 412–416.
4. Михайлов В.И., Тарасенко Т.Н., Кравченко З.Ф., Ковалев О.Е., Грибанов И.Ф., Давыдейко Н.В., Демидова Е.А., Потапская О.Н., Головчан А.В. Магнитные характеристики мультиферроиков $Bi_{1-x}Y_xFeO_3$ ($0.05 \leq x \leq 0.3$), синтезированных золь-гель методом // Физика и техника высоких давлений. – 2023. – Т. 33, № 4. – С. 26-35.
5. Bao Lin F., Hao X., Zhao Xian X. Structure and multiferroic properties of Y-doped $BiFeO_3$ ceramics // Chinese Sci. Bull. – 2010. – V. 55, No 4-5, – P. 452–456.
6. Кравцова П.Д., Томкович М.В, Волков М.П., Бурьяненко И.В., Семёнов В.Г., Попков В.И., Ломанова Н.А. Магнитные свойства нанокристаллических материалов на основе системы $(1-x)BiFeO_3-(x)YFeO_3$ // ФТТ – 2023. – Т.65, Вып.12. – С.2212–2215.
7. Макоед И.И., Ревинский А.Ф., Лозенко В.В., Галяс А.И., Демиденко О.Ф., Живулько А.М., Янушкевич К.И., Мошалков В.В. Особенности поведения магнитных свойств мультиферроиков $Bi_{1-x}Sm_xFeO_3$, синтезированных под высоким давлением // ФТТ. – 2017. – Т.59, Вып.8. – С. 1514-1519.

УДК 537.6/.8

Мультикалорические материалы и эффекты**Амиров А.А.**

с.н.с. Институт физики им Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН

Аннотация. Термины «мультикалорический эффект» и «мультикалорики» являются относительно новыми терминами и объединяют в себе явления и материалы, связанные с сосуществованием известных калорических эффектов под действием внешних сил различной природы (магнитного поля, электрическое поле, механическое воздействие). Мультикалорические материалы на сегодняшний день находятся в фокусе внимания исследователей в качестве перспективной основы для улучшения эффективности известных твердотельных систем охлаждения работающих на одиночных калорических эффектах. Особый интерес с фундаментальной точки зрения представляют перекрестные эффекты, наблюдаемые при комбинационном воздействии внешних полей, а также природа взаимосвязи магнитных, электрических, теплофизических свойств и структуры при таких воздействиях.

Ключевые слова: мультикалорический эффект, мультикалорики, мультикалорические материалы, мультиферроики, калорические эффекты

Multicaloric materials and effects**Amirov A. A.**

Amirkhanov Institute of Physics, Dagestan Scientific Center of Russian Academy of Sciences

Annotation. The terms "multicaloric effect" and "multicaloric" are relatively new concepts and combine phenomena and materials associated with the coexistence of known caloric effects under the influence of external forces of various nature (magnetic field, electric field, and mechanical action). Multicaloric materials are currently in the focus of researchers' attention as a promising basis for improving the efficiency of well-known solid-state cooling systems operating on single caloric effects. Of particular interest from a fundamental point of view are the cross-effects observed under the combined action of external fields, as well as the nature of the relationship of magnetic, electrical, thermophysical properties and structure under such influences.

Keywords: multicaloric effect, multicaloric, multicaloric materials, multiferroics, caloric effects

В последние годы значительно вырос интерес к поиску и исследованию материалов, в которых наблюдаются гигантские калорические эффекты (КЭ) различной природы, в связи с возможностью их практического использования в альтернативных твердотельных системах охлаждения. Известны магнитокалорический (МКЭ), электрокалорический (ЭКЭ), механокалорический (МехКЭ) (частные случаи, барокалорический (БКЭ) и эластокалорический (ЭлКЭ)) эффекты, природа возникновения которых обусловлена изменениями температуры (энтропии) при изменении величин соответствующих внешних магнитных, электрических или упругих полей. Одним из современных и активно исследуемых в последние годы направлений в физике конденсированного состояния является подход, основанный на идее использования парных КЭ. Основанный на наблюдении хотя бы двух из известных КЭ подход к исследованию термодинамических свойств материалов получил объединительный термин «мультикалорический», а материалы, в которых наблюдаются эти

эффекты – «мультикалорики» и рассматриваются в качестве перспективной основы для улучшения эффективности энергетических систем, основанных на одиночных калорических эффектах [1-3].

Мультикалорический эффект, обратимое изменение температуры (энтропии) вещества в адиабатических (изотермических) условиях при воздействии двух или более внешних полей (магнитного, электрического и механического напряжения) [4]. Одновременное или последовательное наблюдение двух или более калорических эффектов называют мультикалорическими эффектами. Каждому виду калорического эффекта соответствует определённое внешнее поле или воздействие. Так, внешним полем для магнитокалорического эффекта является магнитное поле напряжённостью H , электрокалорического – электрическое поле напряжённостью E , механокалорического – механическое напряжение σ (для ЭлКЭ) или гидростатическое давление p (для БКЭ). Хотя внешнее воздействие для эласто- и барокалорического эффектов имеет единую природу, в первом случае оно – одноосно, а во втором – изотропно. Известны также такие виды механокалорического эффекта, как флексокалорический и торсиокалорический, в которых типом механического воздействия являются изгиб и кручение, соответственно. Данные виды механокалорических эффектов на сегодняшний день мало изучены.

Возможность сосуществования МКЭ и ЭлКЭ при приложении магнитного поля и давления впервые обсуждалась российскими физиками А. М. Тишиным и Ю. И. Спичкиным, которые предложили формулу для их расчёта [5]. Позднее идея о гигантских калорических эффектах в области фазового перехода 1-го рода была высказана Л. Маноса (Mañosa L.), которые обнаружили гигантский БКЭ в сплаве Гейслера Ni–Mn–In, обладающем МКЭ, а затем и в сплаве Fe-Rh [6]. В целом, калорические эффекты схожи, и параметры, характеризующие их природу – изотермическое изменение энтропии ΔS и адиабатическое изменение температуры ΔT – могут быть представлены общими формулами:

$$\Delta S = \int \left(\frac{\partial X}{\partial T} \right)_Y dY$$

$$\Delta T_{AD} = - \int \frac{T}{C_Y} \left(\frac{\partial X}{\partial T} \right)_Y dY,$$

где Y – соответствующее внешнее поле (E , H , σ или p), $\frac{\partial X}{\partial T}$ – температурная производная сопряжённого параметра порядка (поляризации, намагничённости, линейной или объёмной деформации), C_Y – теплоёмкость в соответствующем поле Y . Мультикалорический эффект не является суммой одиночных калорических эффектов, а связан с взаимодействием между магнитной, электрической подсистемами и структурой материала, что даёт соответствующий вклад в суммарный эффект.

Мультикалорики могут быть отнесены к мультиферроикам – материалам, в которых сосуществует не менее двух видов из известных ферроупорядочений (магнитного, сегнетоэлектрического, сегнетоэластического). Поскольку наличие каждого вида упорядочения связано с соответствующим калорическим эффектом, которые, кроме того, ещё и взаимосвязаны между собой, то в мультиферроиках потенциально могут наблюдаться мультикалорические эффекты. Теоретические и экспериментальные работы указывают на реализуемость этой идеи. Так например, в поликристаллическом образце $0,8\text{Pb}(\text{Fe}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3-0,2\text{Pb}(\text{Mg}_{1/2}\text{W}_{1/2})\text{O}_3$ были экспериментально обнаружены магнитокалорический ($\sim 0,26$ К в магнитном поле 7 Тл при температуре 5 К) и электрокалорический ($\sim 0,25$ К в электрическом поле 60 кВ/см при температуре 180 К) эффекты [7].

На сегодняшний день не существует общепринятой классификации мультикалориков, однако она, очевидно, может быть аналогична классификации мультиферроиков. Можно выделить: а) «природные» мультикалорики – однофазные соединения, природа калорических и мультикалорических эффектов в которых связана с магнитным, электрическим упорядочением и их взаимосвязью со структурой, а также магнитоэлектрическим взаимодействием; б) искусственные мультикалорики – композитные структуры различного

типа связности, калорические и мультикалорические эффекты в которых являются продуктом свойств каждой из компонент, а также результатом их межфазного взаимодействия.

Экспериментальные работы по поиску «природных» мультикалориков с комбинированными МКЭ и ЭКЭ не достигли существенного прогресса. Такие соединения преимущественно демонстрируют слабый магнитоэлектрический эффект, а калорические и мультикалорические эффекты в основном наблюдаются в области низких температур, что делает их практическое применение невозможным. Более успешным оказался подход по изучению природных магнитокалорических материалов с фазовым переходом 1-го рода при одновременном или последовательном наложении магнитного поля и гидростатического (или одноосного) давления [8-9]. Так, на примере сплава Гейслера показана возможность использования мультикалорического эффекта для уменьшения гистерезисных явлений в материалах с гигантским МКЭ и улучшения эффективности цикла, основанного на магнитном охлаждении. В композитных мультикалориках экспериментально продемонстрирована возможность управления температурой фазового перехода и гистерезисом магнитной компоненты композита, через механическое воздействие пьезоэлектрической компоненты, при подаче на неё электрического напряжения [10].

В настоящее время в экспериментальных исследованиях мультикалорических эффектов можно выделить следующие тенденции: а) поиск, получение и исследование новых композитных структур (смесевых (керамических, полимерных), цилиндрических, слоистых (двух или мультислойных)), состоящих из компонентов с исходными высокими значениями калорических эффектов, магнитострикционных и пьезоэлектрических параметров в области комнатных температур; б) развитие и совершенствование экспериментальных методик одновременного приложения постоянных и циклических внешних полей (магнитного, электрического и механического) в «природных» мультикалориках.

Список использованной литературы:

1. Hou H., Qian S., Takeuchi I., Materials, physics and systems for multicaloric cooling, *Nat. Rev. Mater.* 2022. –V.7 – P.633–652.
2. Amirov A.A., Tishin A. M., Pakhomov O.V., Multicalorics – new materials for energy and straintronics (Review) // *Phys. Solid State.* – 2022 – V.64. – P.395-409.
3. Stern-Taulats E. et al. Multicaloric materials and effects // *MRS Bulletin.* – 2018. – V. 43. – №. 4. – P. 295-299.
4. Амиров А.А., Мультикалорический эффект // Научно-образовательный портал «Большая российская энциклопедия» – 2023.
5. Tishin A. M. and Spichkin Y. I. The Magnetocaloric Effect and Its Applications// Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia – 2003 – pp. 58-62.
6. Manosa L., Gonzalez-Alonso D. , Planes A., Bonnot E. , Barrio M., Tamarit J. L. , Aksoy S., Acet M. Giant solid-state barocaloric effect in the Ni–Mn–In magnetic shape-memory alloy // *Nature Materials.* – 2010. – V.9. – P. 478-481.
7. Ursic H., Bobnar V., Malic B., Filipic C., Vrabelj M., Drnovsek S., Jo Y, Wencka M., Kutnjak Z. A multicaloric material as a link between electrocaloric and magnetocaloric refrigeration// *Scientific Reports.* – 2016. – V.6. – P. 26629.
8. Gràcia-Condal A., Stern-Taulats E., Planes A. Mañosa L. Caloric response of Fe₄₉Rh₅₁ subjected to uniaxial load and magnetic field// *Phys. Rev. Materials.*-2018.- V.2.-084413
9. Gottschall T., Gràcia-Condal A., Fries M., Taubel A., Pfeuffer L., Mañosa L., Planes A., Skokov K. P. and Gutfleisch O. A multicaloric cooling cycle that exploits thermal hysteresis// *Nature Materials.* – 2018. – V.17. – P. 929–934.
10. Liu Y. et al. Large reversible caloric effect in FeRh thin films via a dual-stimulus multicaloric cycle // *Nature communications.* – 2016. – V. 7. – P. 11614.

УДК 537.633, 537.622

Мультиферроэлектрические явления в ортоферрите гадолиния в области низкотемпературных фазовых переходов

Иванов В.Ю.

к. ф.-м.н., в.н.с., Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Кузьменко А.М.

к. ф.-м.н., с.н.с., Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Тихановский А.Ю.

м.н.с., Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Мухин А.А.

к. ф.-м.н., в.н.с., Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

***Аннотация.** Работа посвящена детальному экспериментальному исследованию магнитных, магнитоэлектрических и магнитодиелектрических свойств орторомбического мультиферроика $GdFeO_3$ при намагничивании вдоль основных кристаллографических осей. Обнаружены характерные аномалии на температурных и полевых зависимостях исследуемых величин, связанные с переворотом слабого ферромагнитного момента Fe при $H||c$ и спин-флоп переходом в обеих Gd- и Fe- подсистемах при $H||a$. Для последнего случая построена магнитная фазовая диаграмма при $T \leq 20$ К.*

***Ключевые слова:** ортоферрит гадолиния, электрическая поляризация, диэлектрическая проницаемость, намагниченность, спин-переориентационные переходы*

Multiferroical phenomena in gadolinium orthoferrite in the region of low temperature phase transitions

Ivanov V.Yu.,

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences

Kuzmenko A.M.,

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences

Tikhanovskii A.Yu.,

Junior Researcher, Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences

Mukhin A.A.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences

***Annotation.** The work is devoted to a detailed experimental study of the magnetic, magnetoelectric and magnetodielectric properties of the orthorhombic multiferroic $GdFeO_3$ in magnetic field along the main crystallographic axes. Characteristic anomalies were found in the temperature and field dependences of the studied quantities, associated with the reversal of the Fe weak ferromagnetic*

moment at $H||c$ and the spin-flop transition in both Gd and Fe subsystems at $H||a$. For the latter case, a magnetic phase diagram was constructed at $T \leq 15$ K.

Keywords: Gadolinium orthoferrite, electrical polarization, permittivity, magnetization, spin reorientation transitions

Ортоферрит гадолиния GdFeO_3 имеет искаженную структуру перовскита с центросимметричной орторомбической элементарной ячейкой (пр. гр. Pbnm), содержащей по 4 иона Fe^{3+} и Gd^{3+} . Благодаря взаимодействию Дзялошинского-Мория, так же, как и у других редкоземельных ортоферритов, спины железа ($S=5/2$) упорядочиваются антиферромагнитно при $T_{\text{N}}^{\text{Fe}} \sim 660 - 670$ K в слабо скошенную к оси z структуру $\Gamma_4(\text{G}_x\text{F}_z)$ в обозначениях Берто [1]. При температуре $T_{\text{N}}^{\text{Gd}} \approx 2.5$ K происходит собственное антиферромагнитное упорядочение моментов гадолиния в нецентросимметричную структуру $\Gamma_5(\text{g}_x\text{a}_y)$ [2-3].

В работе [4] японскими авторами было обнаружено существование магнитоэлектрического эффекта: спонтанной электрической поляризации вдоль оси c при температурах ниже T_{N}^{Gd} , продемонстрированы температурные зависимости поляризации при $H || a$ в разных магнитных полях, а также её полевые зависимости при $H || a$ и $H || c$ при $T = 2$ K. Возникновение поляризации сопровождалось ростом диэлектрической постоянной ϵ , что было продемонстрировано зависимостями $\epsilon(T)$ в разных полях при $H || a$. Возникновение магнитоэлектрического эффекта связывалось с обменно-стрикционным механизмом.

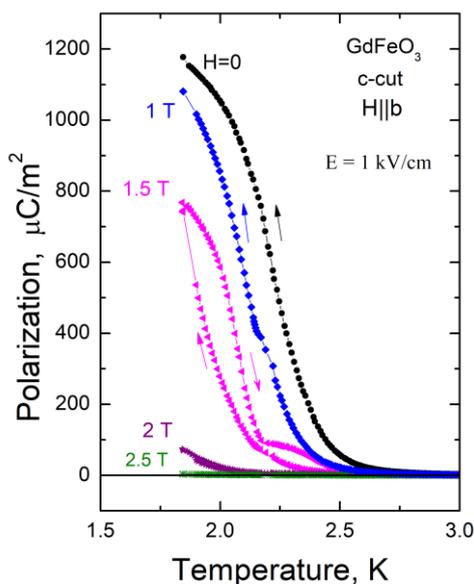


Рис. 1а. Температурные зависимости поляризации вдоль оси c в разных магнитных полях $H||b$. Стрелки показывают направление изменения температуры (охлаждение или нагрев).

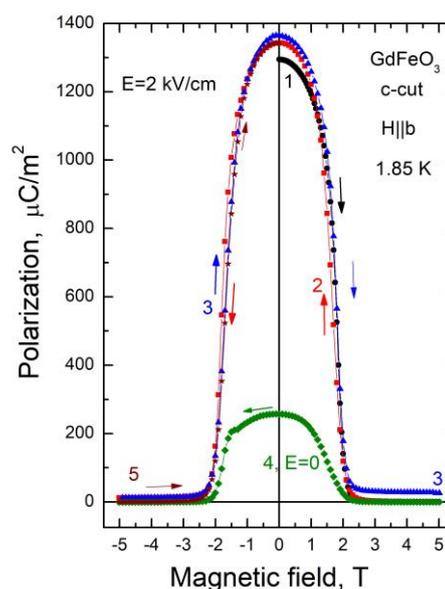


Рис. 1б. Зависимость поляризации от магнитного поля $H||b$ при $T=1.85$ K. Номера – последовательность сканирования по полю (1: $0 \rightarrow 5$ Тл, 2: 5 Тл $\rightarrow -5$ Тл, 3: -5 Тл $\rightarrow 5$ Тл, 4: 5 Тл $\rightarrow -5$ Тл, 5: -5 Тл $\rightarrow 0$). Кривые 1, 2, 3 и 5 измерены в $E=2$ кВ/см, кривая 4 – в $E=0$.

Целью данной работы было более подробное изучение температурных и полевых зависимостей электрической поляризации и радиочастотной диэлектрической проницаемости вдоль оси c в магнитных полях, направленных вдоль всех основных кристаллографических направлений. Измерения ϵ проведены и при температурах выше T_{N}^{Gd} . Полученные данные

дополнены некоторыми магнитными измерениями, Все измерения проведены на установке MPMS-5L (QUANTUM DESIGN).

На рис. 1 приведены температурные и полевые зависимости электрической поляризации, измеренной вдоль оси c (P_c), в магнитных полях $H//b$ (этот случай в работе [4] представлен не был). Так же, как и в случаях $H//a$ и $H//c$, при охлаждении в электрическом поле ниже $T_N^{\text{Gd}} = 2.5$ К возникает спонтанная электрическая поляризация, подавляемая в полях ~ 2.5 Тл. Дополнительных аномалий на зависимостях $P_c(H_b)$ не наблюдается. Отметим наличие гистерезиса на зависимостях $P_c(T)$ (показан для $H_b = 1.5$ Тл) и возникновение поляризации, хотя и меньшей величины, после выведения магнитного поля в $E=0$, что можно связать с эффектом памяти в доменных стенках ферроэлектрических доменов.

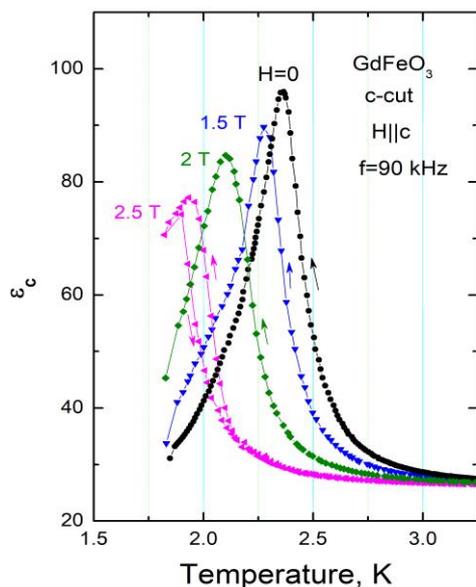


Рис. 2а. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости вдоль оси c в разных магнитных полях $H//c$. Стрелки показывают направление изменения температуры.

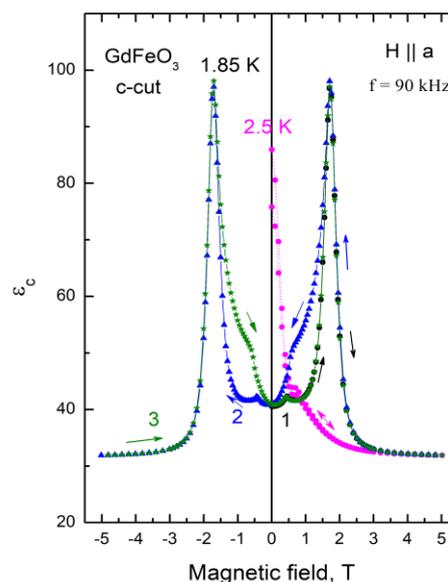


Рис. 2б. Зависимость диэлектрической проницаемости от магнитного поля $H//a$ при $T=1.85$ К (кривые 1 – 3) и 2.5 К. Номера – последовательность сканирования по полю (1: $0 \rightarrow 5$ Тл, 2: 5 Тл $\rightarrow -5$ Тл, 3: -5 Тл $\rightarrow 5$ Тл).

На рис. 2а приведены температурные зависимости диэлектрической проницаемости, измеренной вдоль оси c (ϵ_c) в разных магнитных полях $H//c$, а на рис 2б – зависимости $\epsilon_c(H_a)$. Аналогично приведенных в [4] зависимостей $\epsilon_c(T)$ для $H//a$, магнитные поля $H//c$ также смещают пики диэлектрической проницаемости в сторону низких температур. Зависимости диэлектрической проницаемости от магнитного поля в работе [4] не приводились. Согласно нашим измерениям зависимости $\epsilon_c(H)$ при всех направлениях магнитного поля при самых низких температурах (1.85 К) имеют похожий вид: сильный рост проницаемости при увеличении поля, достижение максимума в полях, в которых поляризация испытывает максимальную скорость падения, и выход на постоянное значение при дальнейшем росте поля. Однако в области полей меньше 1 Тл на зависимостях $\epsilon_c(H)$ при $H//c$ и $H//a$ наблюдаются дополнительные аномалии, связанные с переворотом слабого ферромагнитного момента Fe в первом случае и спин-флоп переходом в обеих Gd и Fe- подсистемах во втором случае. При $T = T_N^{\text{Gd}} = 2.5$ К максимум на зависимостях $\epsilon_c(H)$ смещается к $H=0$ (малиновая кривая на рис. 2б), а при $T > T_N^{\text{Gd}}$ проницаемость в $H=0$ сильно уменьшается и её полевая зависимость становится слабой. Тем не менее, в случае $H//a$ на зависимостях $\epsilon_c(H_a)$ в некоторых магнитных полях H_{cr} наблюдается небольшая аномалия, которую мы связываем со спин-флоп переходом

в подсистеме железа: $\Gamma_4(G_xF_z) \rightarrow \Gamma_2(G_zF_x)$ (см. рис. 3). Примерно в тех же магнитных полях наблюдаются слабые аномалии на производных $d\sigma/dH$, полученных дифференцированием кривых намагничивания $\sigma(H_a)$.

На рис. 4 приведен участок фазовой диаграммы, построенный на основе магнитодиэлектрических и магнитных данных. Сплошная черная линия разделяет области с конфигурациями железа $\Gamma_4(G_xF_z)$ и $\Gamma_2(G_zF_x)$. Ниже 2.5 К одновременно с переориентацией спинов железа происходит и спин-флоп моментов гадолиния из конфигурации $g_x a_y$ в конфигурацию $g_z f_x$. Черная пунктирная линия – экстраполяция границы фаз на область низких температур. Синей штрихпунктирной линией отмечена область существования неколлинеарных конфигураций гадолиниевой подсистемы. В полях выше этой линии происходит спин-флип переход в коллинеарное состояние с исчезновением электрической поляризации.

Проведен анализ наблюдаемых эффектов с учетом допускаемых симметрий магнитоэлектрических взаимодействий, который позволил их объяснить и связать с индуцированными магнитным полем фазовыми переходами.

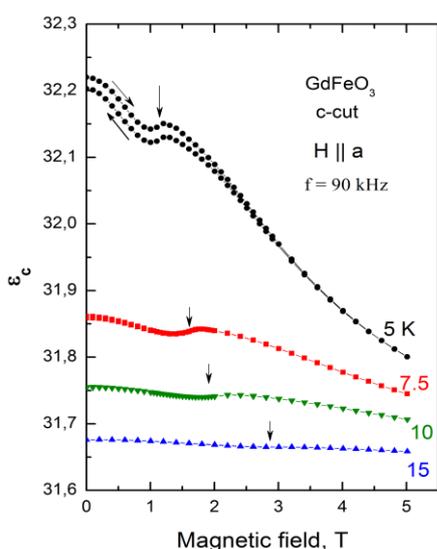


Рис.3. Зависимость диэлектрической проницаемости от магнитного поля $H||a$ при разных температурах выше T_N^{Gd} . Стрелками отмечены аномалии на кривых $\epsilon_c(H_a)$.

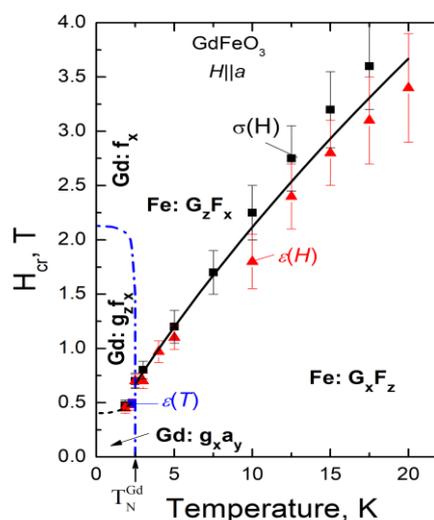


Рис.4. Фазовая диаграмма $GdFeO_3$ при $H||a$. Черная линия разделяет фазы с разными конфигурациями Fe, синяя штрихпунктирная линия – область АФМ упорядочения Gd.

Работа поддержана грантом РФФ №22-12-00375.

Список использованной литературы:

1. Bertaut, E.F. // in Magnetism Vol. 3 (eds Rado, G. T. and Suhl, H.) (Academic, Press, New York, 1963. pp. 149-209).
2. Cashion, J.D., Cooke, A.H., Martin, D.M. and Wells, M.R. // J. Phys. C –1970. –Vol. 3, pp. 1612-1620.
3. Vitebskii, I.M., Kovtun, N.M., Troitskii, G.A. and Khmara, V.M. // Izv. Akad. Nauk USSR, Ser. Fiz. 1988. – Vol. 52 – pp. 1739-1740.
4. Tokunaga Y., Furukawa N., Sakai H., Taguchi Y., Arima T., and Tokura Y. // Nature Materials. 2009. –Vol. 8–. p. 558.

УДК 537.632

**Фазовые переходы в редкоземельных ферроборатах $R\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$
($R = \text{Y, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho}$)**

Фролов К.В.

к.ф.-м. н., ведущий научный сотрудник, Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова, КККиФ НИЦ Курчатовский институт

Смирнова Е.С.

к.ф.-м. н., научный сотрудник доцент, Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова, КККиФ НИЦ Курчатовский институт

Алексеева О.А.

д.ф.-м. н., ведущий научный сотрудник, Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова, КККиФ НИЦ Курчатовский институт

Любутин И.С.

д.ф.-м. н., профессор, главный научный сотрудник, Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова, КККиФ НИЦ Курчатовский институт

Гудим И.А.

к.ф.-м. н., ведущий технолог, Институт физики им Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН

***Аннотация.** Редкоземельные ферробораты $R\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$, содержащие две магнитные подсистемы ионов железа и редкоземельных элементов, являются интересными модельными объектами для изучения мультиферроидных свойств. В этих соединениях наблюдаются структурные и магнитные фазовые переходы, динамика которых, а также тип и размерность магнитного упорядочения зависят от радиуса редкоземельного иона и особенностей локальной структуры.*

***Ключевые слова:** мультиферроики, ферробораты, мёссбаэуровская спектроскопия, монокристалльный рентгеноструктурный анализ, фазовые переходы, магнитное упорядочение*

**Phase transitions in rare earth ferroborates $R\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$
($R = \text{Y, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho}$)**

Frolov K.V.,

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, leading researcher, Shubnikov Institute of Crystallography, KCC&Ph NRC Kurchatov Institute

Smirnova E.S.,

Candidate of physical and mathematical Sciences, researcher, Shubnikov Institute of Crystallography, KCC&Ph NRC Kurchatov Institute

Alekseeva O.A.,

Doctor of physical and mathematical Sciences, leading researcher, Shubnikov Institute of Crystallography, KCC&Ph NRC Kurchatov Institute

Lyubutin I.S.,

Doctor of physical and mathematical Sciences, professor, chief researcher, Shubnikov Institute of Crystallography, KCC&Ph NRC Kurchatov Institute

Gudim I.A.,

Candidate of physical and mathematical Sciences, leading technologist, Kirensky Institute of Physic, FRC KSC SB RAS

Annotation. *Rare-earth ferrobates $RFe_3(BO_3)_4$, containing two magnetic subsystems of iron and rare-earth ions, are interesting model objects for studying multiferroic properties. In these compounds, structural and magnetic phase transitions are observed, the dynamics of which, as well as the type and dimension of magnetic ordering, depend on the radius of the rare-earth ion and the features of the local structure.*

Keywords: *multiferroics, ferrobates, Mössbauer spectroscopy, single crystal X-ray diffraction analysis, phase transitions, magnetic ordering*

Редкоземельные ферробораты $RFe_3(BO_3)_4$ (R – редкоземельный элемент) демонстрируют мультиферроидные свойства за счёт сложных обменных взаимодействий между железной и редкоземельной магнитными подсистемами и активно исследуются последние 15 лет [1–7]. В зависимости от присутствия в составе конкретного иона R в этих соединениях может наблюдаться структурный фазовый переход, а при температурах ниже 40 К наблюдается магнитный фазовый переход и реализуются различные типы магнитных структур, эффекты спиновой переориентации и магнитоэлектрические эффекты.

В данной работе методами мёсбауэровской спектроскопии на ядрах ^{57}Fe и монокристалльной рентгеновской дифракции в диапазоне температур 5 – 500 К исследованы монокристаллы $RFe_3(BO_3)_4$ ($R = Y, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho$). Исследованы динамика структурного и магнитного фазовых переходов и влияние на неё особенностей ближайшего кислородного окружения редкоземельных ионов и ионов железа, определены типы и размерности магнитного порядка, а также особенности спиновой переориентации.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН и при финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение № 23-22-00286).

Список использованной литературы:

1. A.M. Kadomtseva, Y.F. Popov, G.P. Vorob'ev et al. Magnetoelectric and Magnetoelastic Properties of Rare-Earth Ferrobates. //Low Temp. Phys. – 2010. – 36. – 511.
2. A.M. Kuz'menko, A.A. Mukhin, V.Y. Ivanov et al. Effects of the Interaction between R and Fe Modes of the Magnetic Resonance in $RFe_3(BO_3)_4$ Rare-Earth Iron Borates. //JETP Lett. – 2011. – 94. – 294.
3. A.M. Kuzmenko, A.A. Mukhin, V.Y. Ivanov et al. Coupled R and Fe Magnetic Excitations in $RFe_3(BO_3)_4$ //Multiferroics. Solid State Phenom. – 2012. – 190. – 269.
4. T. Kurumaji, K. Ohgushi, Y. Tokura. Magnetoelectric Responses from the Respective Magnetic R and Fe Subsystems in the Noncentrosymmetric Antiferromagnets $RFe_3(BO_3)_4$ ($R = Eu, Gd, \text{ and } Tb$) // Phys. Rev. B. – 2014. – 89. – 195126.

5. M.T. Popova // High-resolution spectroscopy of rare-earth ferrobates with a huntite structure. Low Temp. Phys. – 2019. – 45. – 1000.
6. H. Zhang, S. Liu, C.S. Nelson et al. Structural features associated with multiferroic behavior in the $RX_3(BO_3)_4$ system.// Journal of Physics: Condensed Matter. – 2019. –31. – 505704
7. E.S. Smirnova, O.A. Alekseeva, V.V. Artemov, T.A. Sorokin, D.N. Khmelenin, E.V. Sidorova, K.V. Frolov, I.A. Gudim. Crystal Structure of Bismuth-Containing Samarium Iron–Aluminium Borates $Sm_{1-x}Bi_xFe_{3-y}Al_y(BO_3)_4$ ($x = 0.05–0.07$, $y = 0–0.28$) in the Temperature Range of 25–500 K. Crystals. 2023. 13. 1128.

УДК 537.611.3

Влияние направления электрического поля на характер проявления флексомагнитоэлектрического эффекта в одноосных пленках

Вахитов Р.М.

д.ф.-м. н., профессор кафедры теоретической физики ФТИ УУНИТ

Ибрагимова А.Р.

аспирант кафедры теоретической физики ФТИ УУНИТ

Солонецкий Р.В.

к.ф.-м. н., научный сотрудник ФТИ УУНИТ

***Аннотация.** В работе исследуется влияние внешних электрического и магнитного полей в одноосных плёнках с флексомагнитоэлектрическим эффектом. Показано, что в случае, когда электрическое поле направлено вдоль нормали к плоскости пленки, при определённых ориентациях магнитного поля можно существенно усилить (или ослабить) степень проявления флексомагнитоэлектрического эффекта в изучаемых плёнках. Кроме того, изучено влияние электрического поля направленного в плоскости пленки на структуру и свойства 180° доменной границы в изучаемом образце.*

***Ключевые слова:** одноосная ферромагнитная пленка, флексомагнитоэлектрический эффект, 180 -градусная доменная граница, 0 -градусная доменная граница, неоднородное электрическое поле, магнитное поле.*

The influence of the direction of the electric field on the nature of the flexomagnetoelectric effect in uniaxial films

Vakhitov R.M.

Doctor of physical and mathematical Sciences, Professor of the Department of Theoretical Physics at FTI UUNIT - Ufa University of Science and Technology

Ibragimova A.R.

Postgraduate student of the Department of Theoretical Physics at FTI UUNIT– Ufa University of Science and Technology

Solonetskiy R.V.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher at FTI UUNIT - Ufa
University of Science and Technology

Annotation. *The paper investigates the influence of external electric and magnetic fields in uniaxial films with a flexomagnetoelectric effect. It is shown that in the case when the electric field is directed along the normal to the film plane, at certain orientations of the magnetic field, it is possible to significantly enhance (or weaken) the degree of manifestation of the flexomagnetoelectric effect in the studied films. In addition, the effect of an electric field directed in the plane of the film on the structure and properties of the 180° domain wall in the studied sample was studied.*

Keywords: *uniaxial ferromagnetic film, flexomagnetoelectric effect, 180-degree domain wall, 0-degree domain wall, inhomogeneous electric field, magnetic field.*

Исследования магнитоэлектрических явлений в магнитных материалах, как правило, вызывают повышенный интерес, что связано с возможностью их применения при создании различных устройств спинтроники с низким энергопотреблением [1]. Одним из таких эффектов, привлекая внимание многих исследователей, стало обнаруженное в пленках ферритов-гранатов явление смещения доменных границ (ДГ) под действием неоднородного электрического поля [2] (флексомагнитоэлектрический эффект). Долгое время природа данного эффекта оставалась достаточно дискуссионной; для его объяснения были предложены два механизма: флексомагнитоэлектрический (ФМЭ) [1], когда в рассматриваемом магнетике присутствует неоднородное магнитоэлектрическое взаимодействие, впервые введенное в [3], и механизм, обусловленный смещением одноподобных ионов относительно положений равновесия под действием неоднородного электрического поля [4]. Они оба на качественном уровне достаточно хорошо объясняют экспериментальные данные.

Последовавшие за ним работы по изучению этого эффекта выявили новые аспекты его проявления и, в частности, было установлено, что на ФМЭ эффект в феррит-гранатовых пленках существенное влияние оказывает магнитное поле, которое при определенных условиях может привести к его усилению [5,6]. В работе [7] был проведен теоретический анализ микромагнитных структур, возможных в таких пленках с ФМЭ взаимодействием, и показано, что при действии на них электрического поля с $\mathbf{E} \parallel \text{Oz}$ (Oz направлен вдоль нормали к поверхности пленки), в них наряду со 180° ДГ могут возникнуть еще два типа магнитных неоднородностей: 0° ДГ с квазиблоховской структурой и 0° ДГ типа Нееля [8]. Они характеризуются нетривиальными свойствами, но пока что мало изучены, а экспериментально не были обнаружены [2]. Это связано с тем, что первый тип 0° ДГ может зародиться только при больших значениях электрического поля \mathbf{E} , значительно превышающих их значения при котором наблюдается ФМЭ эффект в эксперименте [2], а у второго типа структура ДГ такова, что образующиеся заряды в области ДГ экранируют друг друга, т.е. интегральная величина поляризации (суммарный заряд, образующийся в области ДГ) равна нулю.

Изучено также влияние внешнего электрического поля, направленного параллельно плоскости пленки на структуру и свойства 180° ДГ. В случае $\mathbf{E} \parallel \text{Ox}$ (Oxz - это плоскость вращения магнитных моментов в ДГ), происходит трансформация структуры 180° ДГ блоховского типа; аналогично случаю $\mathbf{E} \parallel \text{Oz}$ [7] она становится квазиблоховской с выходом намагниченности из плоскости ДГ. Кроме того, под действием поля в окрестности стенки индуцируются заряды, которые представляют собой четную функцию от y (Oy-направление вдоль которого магнетик неоднороден). При этом интегральная поляризация отлична от нуля и с увеличением электрического поля сначала резко возрастает, а затем асимптотически стремится к некоторой постоянной. Следует отметить, что значение поля при котором имеет место резкое возрастание интегральной поляризации, существенно выше аналогичных полей, когда $\mathbf{E} \parallel \text{Oz}$. В случае $\mathbf{E} \parallel \text{Oy}$ решение уравнений Эйлера-Лагранжа, соответствующих полной энергии рассматриваемой пленки с учетом ФМЭ взаимодействия [7], возможно, если электрическое поле является неоднородным и $\lambda_1 \neq \lambda_2$ (λ_1, λ_2 – магнитоэлектрические

постоянные [7]). Если эти условия выполняются, то решением этих уравнений будет 0° ДГ неелевского типа. При этом её дифференциальная поляризация является нечетной функцией от y . Соответственно, интегральная поляризация такой ДГ будет равна нулю, т.к. в результате в окрестности стенки образуется двойной электрический слой противоположного знака. При этом их собственные электрические поля взаимно экранируют друг друга. В заключение отметим, что значения полей (для случая $\mathbf{E} \parallel Oz$), при котором интегральная поляризация в 180° ДГ переходит на асимптотическое поведение значительно (на порядок) превышает значения этих полей с аналогичным поведением, которое имеет место в случае $\mathbf{E} \parallel Oz$. Последнее означает, что флексомагнитоэлектрический эффект (ФМЭ) при действии поля \mathbf{E} вдоль оси Ox проявляется значительно слабее, чем в случае $\mathbf{E} \parallel Oz$.

Авторы благодарят за финансовую поддержку Государственное задание Российской Федерации на проведение научных исследований лабораториями (Теория, моделирование и получение тонкоплёночных, наноструктурированных и гибридных структур (FRRR-2024-0001))

Список использованной литературы

1. Пятаков А.П., Звездин А.К. Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики // УФН. 2012. Т. 182. № 6. С. 593–620
2. Логгинов А.С., Мешков Г.А., Николаев А.В., Пятаков А.П. Магнитоэлектрическое управление доменными границами в пленке феррита-граната // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 86. № 2. С.124-1273.
3. Барьяхтар В.Г., Львов В.А., Яблонский Д.А. Теория неоднородного магнитоэлектрического эффекта // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т.37. № 12. С. 565-5674.
4. Кабыченков А.Ф., Лисовский Ф.В., Мансветова Е. Г. Магнитоэлектрический эффект в пленках гранатов с наведенной магнитной анизотропией в неоднородном электрическом поле//Письма в ЖЭТФ.2013. Т.9. №5. С.304-308
5. Veshchunov I. S., Mironov S. V., Magrini W., Stolyarov V. S., Rossolenko A.N., Skidanov V.A., Trebbia J.B., Buzdin A. I., Tamarat P., Lounis B. Direct Evidence of Flexomagnetoelectric Effect Revealed by Single-Molecule Spectroscopy// Phys.Rev.Lett. 2015, T.115, P.027601 (1-5)
6. Вахитов Р.М., Солонецкий Р.В., Низямова А.Р. Особенности проявления флексомагнитоэлектрического эффекта во внешнем магнитном поле // ФММ. 2023. Т.124. №1. С.10-16.
7. Вахитов Р.М., Гареева З.В., Солонецкий Р.В., Мажитова Ф.А. Микромагнитные структуры, индуцированные неоднородным электрическим полем, в магнитодноосных пленках с флексомагнитоэлектрическим эффектом // ФТТ. 2019. Т.61. № 6. С. 1120-112
8. Maksutova F.A, Solonetskiy R.V., Vakhitov R.M., Pyatakov A.P. The electric-field-induced “zero-degree domain walls” in ferromagnets // Europhys. Lett. 2020. V.129. P. 27004 (1-5)

УДК 314.748

**Модель описания поляризации в магнитоэлектрическом эффекте
спинового происхождения****Труханова М.И.**

к.ф.-м.н., ассистент, кафедра общей физики, физический факультет, Московский
государственный университет имени М.В. Ломоносова;

научный сотрудник, лаборатория теоретической физики, Институт проблем безопасного
развития атомной энергетики РАН.

Андреев П.А.

к.ф.-м.н., доцент, кафедра общей физики, физический факультет, Московский
государственный университет имени М.В. Ломоносова.

***Аннотация.** В редкоземельных манганитах существует сильная связь между магнетизмом и сегнетоэлектричеством, когда электрическая поляризация может быть вызвана особым магнитным упорядочением. Мы предлагаем модель описания статической и динамической поляризации, которая строится из микроскопических свойств и поведения спинов магнитных ионов, на основе метода многочастичной квантовой гидродинамики. Электрический дипольный момент в рассматриваемых системах возникает в результате спин-орбитальной связи и пропорционален векторному произведению спинов ионов. Получена зависимость макроскопической поляризации от спиновой плотности, которая, с точностью до коэффициента пропорциональности, совпадает с результатом, представленным в модели М. Мостового (Phys. Rev. Lett. 2006). Выведено новое общее уравнение эволюции поляризации. В качестве основных механизмов, оказывающих влияние на динамику поляризации, исследуется обменное кулоновское взаимодействие, моделируемое гамильтонианом Гейзенберга, и взаимодействие магнитных моментов с внешним магнитным полем.*

***Ключевые слова:** магнитоэлектрический эффект, дипольная поляризация, мультиферроики.*

Model of the polarization description in the magnetoelectric effect of spin origin**Trukhanova M. I.**

PhD, assistant, Department of general physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State
University;

Research assistant, Theoretical Physics Laboratory, Nuclear Safety Institute, RAS.

Andreev P. A.

PhD, associate professor, Department of general physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow
State University.

***Annotation.** In rare earth manganites, there is a strong coupling between magnetism and ferroelectricity, where electrical polarization can be caused by specific magnetic ordering. We propose a new model for the description of static and dynamic polarization, which is derived from*

the microscopic properties and behavior of the spins of magnetic ions, and based on the method of many-particle quantum hydrodynamics. The electric dipole moment in the investigated systems results from spin-orbit coupling, and is proportional to the vector product of the ions' spins. The dependence of macroscopic polarization on spin density was obtained, which coincides with the result presented in the model of M. Mostovoy (Phys. Rev. Lett. 2006). A new general equation is derived for the evolution of polarization. The exchange Coulomb interaction, represented by the Heisenberg Hamiltonian, and the interaction of magnetic moments with an external magnetic field are investigated as the main mechanisms influencing polarization evolution.

Keywords: magnetoelectric effect, dipole polarization, multiferroics.

Физика магнитоэлектрического эффекта представляет собой активно развивающуюся область как экспериментальных, так и теоретических исследований [1, 2]. Изучение микроскопических механизмов возникновения поляризации и её динамической эволюции в магнитных диэлектриках, несомненно, является сложной и многогранной задачей. В то же время, метод многочастичной квантовой гидродинамики уже давно применяется для изучения неравновесных процессов в системах с большим числом взаимодействующих частиц [3, 4], на основе вывода динамических уравнений для наблюдаемых физических величин.

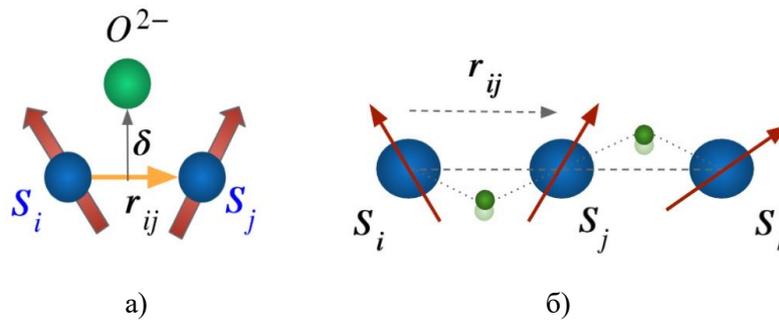


Рис. 1. Неколлинеарная спиновая структура ячейки кристалла, состоящая из магнитных ионов (синие сферы) и иона-лиганда (зеленые сферы), \vec{r}_{ij} – вектор, соединяющий центры масс ионов, $\vec{\delta}$ – вектор смещение иона-лиганда, $\vec{S}_{i,j}$ – вектор спина i,j -ого иона (а); циклоидальная спиральная (право-винтовая) спиновая структура со смещением иона-лиганда из центра масс (б);

Рассмотрим ячейку материала $M_i - O - M_j$, состоящую из положительно заряженных магнитных ионов переходных металлов $M_{i,j}$, обладающих неколлинеарными спинами, и немагнитного отрицательно заряженного иона-лиганда, например O^{2-} (рис.1). Антисимметричное обменное взаимодействие между магнитными ионами приводит к образованию в такой ячейке электрического дипольного момента $\vec{d}_{ij} = \alpha_{ij} \vec{r}_{ij} \times (\vec{S}_i \times \vec{S}_j)$ [5], где α_{ij} – скалярный коэффициент, характеризующий спин-орбитальную связь между магнитными ионами, \vec{r}_{ij} – вектор, соединяющий их центры масс. Примером материала, в котором при определенных температурах проявляется спиральный магнитный порядок и возможен магнитоэлектрический эффект, является редкоземельный манганит $TbMnO_3$ [2].

Введем микроскопическое представление наблюдаемых физических полей. Электрическую поляризацию в окрестности точки \vec{r} физического пространства можно представить как квантовое среднее оператора плотности дипольного момента $\hat{d}_i = \sum_{j,j \neq i}^N \alpha(r_{ij}) \cdot \vec{r}_{ij} \times (\hat{S}_i \times \hat{S}_j)$, который возникает в окрестности i -ого магнитного иона

$$\vec{P}(\vec{r}, t) = \sum_s \int dR \sum_{i=1}^N \delta(\vec{r} - \vec{r}_i) \psi_s^\dagger(R, t) \hat{d}_i \psi_s(R, t), \quad (1)$$

здесь $dR = \prod_{i=1}^N d\vec{r}_i$ - элемент объёма в $3N$ -мерном конфигурационном пространстве, N - число магнитных ионов, \hat{S}_i - оператор спина i -ого иона. Введем тем же способом плотность спина среды $\vec{s}(\vec{r}, t) = \sum_s \int dR \sum_{i=1}^N \delta(\vec{r} - \vec{r}_i) \psi_s^\dagger(R, t) \hat{S}_i \psi_s(R, t)$. Волновая функция состояния ионов $\psi_s(R, t)$ зависит от $3N$ пространственных координат $R = \{\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_N\}$ и время t , а её эволюция удовлетворяет нестационарному уравнению Паули $i\hbar \partial_t \psi_s(R, t) = \hat{H} \psi_s(R, t)$, в котором многочастичный гамильтониан взаимодействий содержит энергию Зеемана магнитных моментов во внешнем магнитном поле \vec{B}_i и вклад кулоновского обменного взаимодействия

$$\hat{H} = - \sum_{i=1}^N \gamma_i \hat{S}_i \cdot \vec{B}_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j \neq i}^N U_{ij} \cdot (\hat{S}_i \cdot \hat{S}_j), \quad (2)$$

где $U_{ij} = U(|\vec{r}_i - \vec{r}_j|)$ - скалярная функция обменного кулоновского взаимодействия (обменный интеграл). Используя свойство быстрого убывания функций $U_{ij}(r_{ij})$ и $\alpha_{ij}(r_{ij})$ с расстоянием между магнитными ионами r_{ij} , и метод, подробно изложенный в работе [6], мы выводим уравнение динамики электрической поляризации, которое является уравнением гидродинамического типа $\hbar \partial_t P^\alpha(\vec{r}, t) = \Lambda_u^\alpha(\vec{r}, t) + \Lambda_B^\alpha(\vec{r}, t)$ [7]. Первое слагаемое в правой части уравнения появляется вследствие влияния кулоновского обменного взаимодействия

$$\Lambda_u^\alpha = \frac{g_{u(\alpha)}}{3} \varepsilon^{\alpha\beta\gamma} (s^\gamma \partial_\beta \pi^{\sigma\sigma} - \pi^{\sigma\sigma} \partial_\beta s^\gamma + \pi^{\gamma\sigma} \partial_\beta s^\sigma - s^\sigma \partial_\beta \pi^{\gamma\sigma}) + \frac{2g_{(\alpha)}}{9} \varepsilon^{\alpha\beta\gamma} g_{ou} \left(\vec{s}^2 \partial_\beta s^\gamma - \frac{1}{2} s^\gamma \partial_\beta \vec{s}^2 \right), \quad (3)$$

где $s^\gamma(\vec{r}, t)$ - плотность спина среды, $\pi^{\gamma\sigma}(\vec{r}, t)$ - нематический тензор, зависящий, в общем виде, от пространственных координат и времени

$$\pi^{\alpha\beta}(\vec{r}, t) = \frac{1}{2} \sum_s \int dR \sum_{i=1}^N \delta(\vec{r} - \vec{r}_i) \psi_s^\dagger(R, t) (\hat{S}_i^\alpha \hat{S}_i^\beta + \hat{S}_i^\beta \hat{S}_i^\alpha) \psi_s(R, t). \quad (4)$$

Второе слагаемое следует из действия магнитного поля на магнитные моменты ионов

$$\Lambda_B^\alpha = 2\gamma(\vec{P} \times \vec{B}) - \frac{2}{3} g_{(\alpha)} \gamma \left\{ (\vec{B} \cdot (\vec{s} \times \vec{\nabla})) \vec{s} + \vec{s} (\vec{B} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{s})) \right\} + \frac{1}{3} g_{(\alpha)} \gamma \left\{ \vec{s} (\vec{s} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{B})) + \vec{s} \times (\vec{s} \cdot \vec{\nabla}) \vec{B} \right\}. \quad (5)$$

Константы взаимодействий в выражениях (3) и (5) имеют вид

$$g_{ou} = \int U(\xi) d\xi, \quad g_{(\alpha)} = \int \xi^2 \alpha(\xi) d\xi, \quad g_{u(\alpha)} = \int \xi^2 U(\xi) \alpha(\xi) d\xi. \quad (6)$$

Первое слагаемое в $\Lambda_B^\alpha(\vec{r}, t)$ представляет собой крутящий момент $\sim \vec{P} \times \vec{B}$, который действует со стороны внешнего магнитного поля на поляризацию, вызванную определённым спиновым порядком. Второе и третье слагаемые характеризуют влияние однородного магнитного поля на неоднородную спиновую плотность среды. Если внешнее магнитное поле приложено перпендикулярно вектору киральности ионных спинов $\vec{S}_i \times \vec{S}_j$, спиновая спираль стремится вращаться до тех пор, пока все моменты подрешетки не окажутся в плоскости, перпендикулярной полю. В результате вращается и вектор электрической поляризации. Два последних слагаемых в выражении Λ_B^α становятся важными при действии неоднородного магнитного поля и проявляют себя в динамическом магнитоэлектрическом эффекте.

Уравнение эволюции поляризации должно быть замкнуто уравнениями динамики плотности спина \vec{s} и нематического тензора $\pi^{\nu\sigma}$

$$\partial_t \vec{s} = \frac{2\gamma}{\hbar} \vec{s} \times \vec{B} + \frac{g_u}{\hbar} (\vec{s} \times \Delta \vec{s}), \quad \partial_t \pi^{\alpha\beta} = \frac{g_{ou}}{\hbar} (\pi^{\alpha\gamma} \varepsilon^{\beta\gamma\sigma} + \pi^{\beta\gamma} \varepsilon^{\alpha\gamma\sigma}) s^\sigma, \quad (7)$$

где $g_u = \frac{1}{3} \int \tau^2 U(\tau) d\vec{\tau}$. Используя свойство быстрого убывания функции $\alpha_{ij}(r_{ij})$ с расстоянием между ионами, в низшем ненулевом порядке разложения, поляризация среды может быть представлена через плотность спина \vec{s} или намагниченность $\vec{M} = \gamma \vec{s}$ в виде

$$P^\alpha(\vec{r}, t) = \frac{g_{(\alpha)}}{3} (s^\beta(\vec{r}, t) \partial_\beta s^\alpha(\vec{r}, t) - s^\alpha(\vec{r}, t) \partial_\beta s^\beta(\vec{r}, t)). \quad (8)$$

Выражение (8), с точностью до произвольного коэффициента, совпадает с поляризацией, выведенной из соображений симметрии в феноменологической модели М. Мостового [8] для спирального магнетика. Таким образом, можно найти связь между константой взаимодействия $g_{(\alpha)}$ и неопределённым коэффициентом λ из работы [8], которая имеет вид $g_{(\alpha)} = 3\lambda\chi_e\gamma^2$, где χ_e – диэлектрическая восприимчивость.

Исследование Трухановой М.И. поддержано Российским научным фондом, грант № 22-72-00036 (<https://rscf.ru/project/22-72-00036/>).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Zvezdin A. K. and Pyatakov A. P. Inhomogeneous magnetoelectric interaction in multiferroics and related new physical effects // *Physics Uspekhi*. – 2009. – V. 52. – p. 845 - 851.
2. Tokura Y., Seki S. and Nagaosa N. Multiferroics of spin origin // *Rep. Prog. Phys.* – 2014. – Vol. 77. – p. 076501.
3. Andreev P. A. and Kuz'menkov L. S. Problem with the single-particle description and the spectra of intrinsic modes of degenerate boson-fermion systems // *Phys. Rev. A*. – 2008. – Vol. 78. – p. 053624.
4. Andreev P. A. and Trukhanova M. I. Separated spin evolution quantum hydrodynamics of degenerate electrons with spin-orbit interaction and extraordinary wave spectrum // *Journal of Plasma Physics*. – 2016. – Vol. 84. – p. 905840504.
5. Katsura H., Nagaosa N. and Balatsky A. V. Spin current and magnetoelectric effect in noncollinear magnets // *Phys. Rev. Lett.* – 2004. – Vol. 95. – p. 057205.
6. Andreev P.A. and Trukhanova M.I. Quantum Hydrodynamic Representation of the Exchange Interaction in the Theory of Description of Magnetically Ordered Media // *Moscow University Physics Bulletin*. – 2023. – Vol. 78. – p.445-452.
7. Trukhanova M. I., Andreev P. A., Obukhov Yu. N. A new quantum hydrodynamic description of ferroelectricity in spiral magnets // *arXiv:2311.03610*.
8. Mostovoy M. Ferroelectricity in Spiral Magnets // *Phys. Rev. Lett.* – 2006. – Vol. 96, - p. 067601.

УДК 537.624.4

Структура и свойства доменных границ в (001)-ориентированных пленках ферритов-гранатов с флексомагнитоэлектрическим эффектом

Вахитов Р.М.

д.ф.-м.н., профессор теоретической физики, Уфимский университет науки и технологий

Юмагузин А.Р.

доцент кафедры теоретической физики, Уфимский университет науки и технологий

Баймухаметова З.А.

м.н.с., Уфимский университет науки и технологий

***Аннотация.** В работе изучаются структура и свойства 180-градусной доменной границы в (001)-ориентированной пленки ферритов-гранатов с учетом флексомагнитоэлектрического эффекта. Показано, что при действии электрического поля происходит трансформация структуры блоховской доменной границы, которая в результате становится квазиблоховской. Однако это не приводит к усилению флексомагнитоэлектрического эффекта.*

***Ключевые слова:** магнитоэлектрический эффект, пленки ферритов-гранатов, доменная граница, электрическое поле*

Structure and properties of domain walls in (001)-oriented ferrite-garnet films with flexomagnetoelectric effect

Vakhitov R.M.

Professor of the Theoretical Physics Department of Ufa University of Science and Technology

Yumaguzin A.R.

Associate Professor of the Theoretical Physics Department of Ufa University of Science and Technology

Baimukhametova Z.A.

Junior researcher of the Theoretical Physics Department of Ufa University of Science and Technology

***Annotation.** In this work, the structure and properties of a 180-degree domain wall in a (001)-oriented ferrite-garnet film are studied, taking into account the flexomagnetoelectric effect. It is shown that under the action of explicit fields, the structure of the Bloch domain wall is transformed, which as a result becomes quasi-Bloch. However, this does not lead to an increase in the flexomagnetoelectric effect.*

***Keywords:** magnetoelectric effect, ferrite garnet film, domain wall, electric field.*

Как известно, магнитоэлектрические материалы являются уникальными магнетиками, в которых сегнетоэлектрическими свойствами можно управлять с помощью магнитного поля и, наоборот, магнитные структуры – воздействием электрического поля [1]. Соответственно, как материалы, которые могут выполнять более одной задачи, они привлекательны для разработки новых устройств в спинтронике с энергосберегающими функциями. К магнитоэлектрическим

материалам относятся и пленки ферритов-гранатов, в которых более 15 назад был обнаружен флексомагнитоэлектрический (ФМЭ) эффект. Он представляет собой явление смещения доменных границ (ДГ) под действием неоднородного электрического поля [2]. Особенностью ФМЭ-эффекта в исследуемых пленках была зависимость степени его проявления от ориентации развитой поверхности пленки относительно кристаллографических осей. При этом в исследовании участвовали (210)-, (011)- и (111)-ориентированные пленки [3]. В работе [4] также был зафиксирован ФМЭ-эффект в пленках ферритов-гранатов с ориентацией (001), но другим методом, основанным на спектроскопии флуоресценции одиночных молекул. Однако из-за специфики проведения этих исследований в работе практически отсутствовали данные по структуре ДГ и её возможной трансформации при действии на неё электрического поля \mathcal{E} . Из-за недостатка такой информации возникла необходимость в теоретическом изучении поведения магнитных неоднородностей, возможных в пленке типа (001) в электрическом поле.

Анализ уравнений Эйлера-Лагранжа [4], описывающих структуру неоднородностей для рассматриваемого магнетика (т.е. с учетом в [4] наличия кубической анизотропии), показывает, что если пренебречь неоднородным магнитоэлектрическим взаимодействием, то решения, соответствующие 180° - градусным ДГ (180° ДГ) с неблоховской структурой будут отсутствовать, в отличие от тех же пленок с ориентациями (210), (011) и (111), в которых имеет место выход намагниченности M из плоскости стенки [5]. В этом случае существуют только такие решения, которым соответствует 180° ДГ блоховского или неелевского типов с M [001] в доменах и с ориентацией плоскости ДГ, характеризуемая углом ψ : $\psi = \pi n/2$, $n \in Z$, если $\varkappa > 0$ и $\psi = \pi/4 + \pi n/2$, если $-1 < \varkappa < 0$. Здесь $\varkappa = K_1/K_u$, где K_u, K_1 соответственно, константы наведенной одноосной и кубической анизотропий. При наличии неоднородного магнитоэлектрического взаимодействия ($\mathcal{E} \neq 0$, $\mathcal{E} \parallel Oz$) распределение намагниченности M в 180° ДГ трансформируется и последняя преобразуется в 180° ДГ с квазиблоховской структурой [4]. Соответственно, благодаря ФМЭ механизму в окрестности ДГ индуцируется поляризация, величина которой является четной функцией координаты y , достигающей своего максимума v_m в центре стенки ($y=0$). С увеличением величины электрического поля \mathcal{E} возрастает максимальный угол выхода намагниченности из плоскости стенки φ_m . Соответственно возрастает и величина v_m , что в свою очередь, ведет к увеличению интегральной величины поляризации N (суммарной величины поляризации ДГ). Расчеты показывают, что все закономерности ФЭ, найденные в [4] для магнитоодноосной пленки (зависимости $\varphi = \varphi(y)$, $v = v(y)$, а также φ_m , v_m и N от поля \mathcal{E}) в данном случае точно такие же. В то же время анализ влияния величины кубической анизотропии на вышеперечисленные параметры ФЭ показывает, что с возрастанием \varkappa величина интегральной поляризации не увеличивается. Можно также отметить, что при отрицательных значениях \varkappa ($-1 < \varkappa < 0$) с возрастанием его абсолютной величины значение интегральной поляризации также не возрастает (Рис.1). Такое проявление ФЭ в (001) – ориентированной пленке вполне можно объяснить симметрией ее магнитной системы: при $\varkappa > 0$ легкими осями кубической анизотропии являются оси $< 100 >$, которые вносят примерно одинаковый вклад, как в одноосную, так и в легкоплоскостную анизотропию. Аналогичная ситуация имеет место и в случае $\varkappa < 0$.

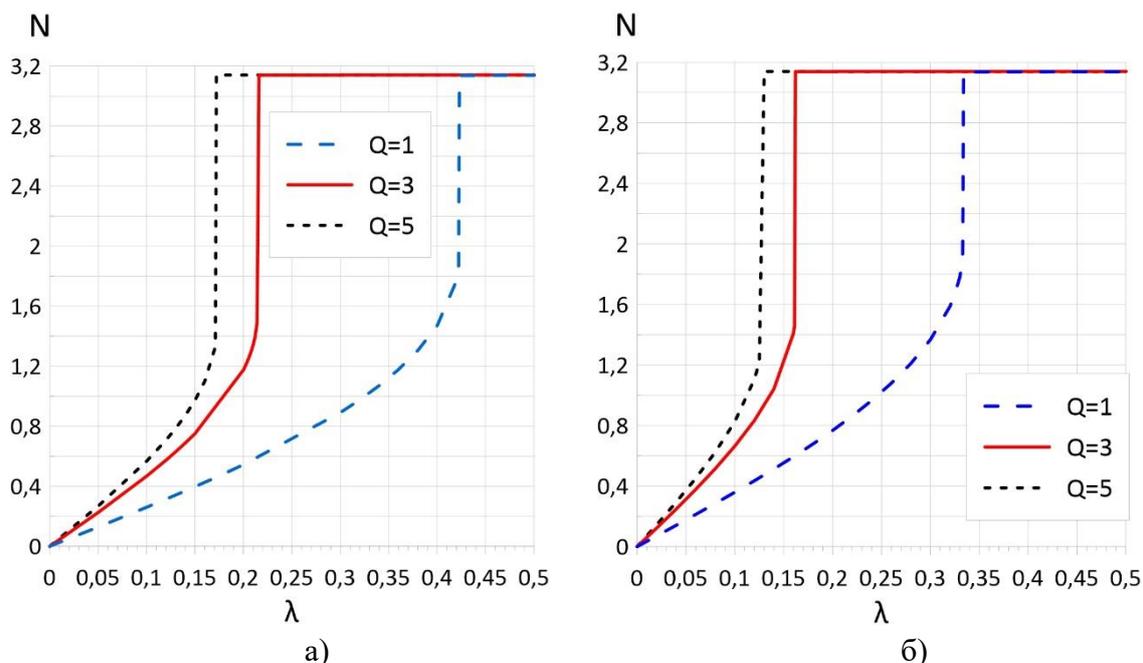


Рис.1. Графики зависимости интегральной поляризации N от величины приведенного электрического поля λ для случаев $\varphi = -0.8$ (а), $\varphi = 0.8$ (б) (Q – фактор качества пленки)

Список использованных источников:

1. Пятаков А.П., Звездин А.К. Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики //УФН. – 2012. – т.182. – с.593-620
2. Логгинов А.С., Мешков Г.А., Николаев А.В., Пятаков А.П. Магнитоэлектрическое управление доменными границами в пленке феррита-граната // Письма в ЖЭТФ – 2007. том 86. – в.2. – с.124 –127
3. Вахитов Р.М., Исхакова Р.Р., Юмагузин А.Р. Магнитные фазы и неоднородные микромагнитные структуры в феррит-гранатовой пленке с ориентацией (210) // Физика твердого тела. – 2018. – Т. 60. – № 5. – С. 923-932
4. Veshchunov I.S., Mironov S.V., Magrini W. et all Direct Evidence of Flexomagnetoelectric Effect Revealed by Single-Molecule Spectroscopy// Phys. Rev. -2015.-**115**.- 027601
5. Вахитов Р.М., Гареева З.В., Солонецкий Р.В., Мажитова Ф.А. Микромагнитные структуры, индуцированные неоднородным электрическим полем, в магнитодноосных пленках с флексомагнитоэлектрическим эффектом // Физика твердого тела – 2019. – Т.61– № 6. – с.1120-1127

УДК 314.748

Спин токовая модель электрической поляризации в мультиферроиках с дипольным моментом пропорциональным, скалярному или векторному произведению спинов**Андреев П.А.**

к.ф.-м.н., доцент, кафедра общей физики, физический факультет, Московский
Государственный университет имени М.В. Ломоносова.

Труханова М.И.

к.ф.-м.н., ассистент, кафедра общей физики, физический факультет, Московский
Государственный университет имени М.В. Ломоносова;

научный сотрудник, лаборатория теоретической физики, Институт проблем безопасного
развития атомной энергетики РАН.

***Аннотация.** Существует три механизма образования электрической поляризации в мультиферроиках второго рода. В случае, когда электрический дипольный момент (эдм) группы ионов пропорционален векторному произведению спинов магнитных ионов существует спин токовая модель поляризации. В этой модели поляризация среды пропорциональна тензору спинового тока. Нами показано, что спин токовая модель возникает из-за баланса плотности силы спин-орбитального взаимодействия, с плотностью силы действующей на поляризацию среды со стороны неоднородного электрического поля. Этот баланс не связан с механизмом образования поляризации. Более того, различные механизмы формирования спинового тока дают разные механизмы образования поляризации. Мы рассмотрели два механизма образования спинового тока это кулоновское обменное взаимодействие в форме гамильтониана Гайзенберга и взаимодействие Дзялошинского-Мория. Показано, что кулоновский обмен приводит к эдм пропорциональному векторному произведению спинов магнитных ионов. Скалярный коэффициент пропорциональности оказывается пропорциональным обменному интегралу. Во втором случае, показано, что взаимодействие Дзялошинского-Мория приводит к эдм пропорциональному скалярному произведению спинов магнитных ионов. Векторная константа пропорциональности оказывается пропорциональна вектору смещения иона лиганда от линии соединяющей магнитные ионы (т.к. этот вектор входит в константу Дзялошинского).*

***Ключевые слова:** магнитоэлектрический эффект, дипольная поляризация, намагниченность, мультиферроики.*

Spin current model of electrical polarization in multiferroics with a dipole moment proportional to the scalar or vector product of spins**Andreev P. A.**

PhD, associate professor, Department of general physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow
State University.

Trukhanova M. I.

PhD, assistant professor, Department of general physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University;

Research assistant, Theoretical Physics Laboratory, Nuclear Safety Institute, RAS.

Annotation. *There are three mechanisms for the formation of electric polarization in multiferroics of the second kind. In the case when the electric dipole moment (edm) of a group of ions is proportional to the vector product of the spins of magnetic ions, there is a spin-current model of polarization. In this model, the polarization of the medium is proportional to the spin current tensor. We have shown that the spin current model arises due to the balance of the force density of the spin-orbit interaction with the force density acting on the polarization of the medium from the inhomogeneous electric field. This balance is not related to the mechanism of polarization formation. Moreover, different mechanisms for the formation of spin current give different mechanisms for the formation of polarization. We considered two mechanisms for the formation of a spin current: the Coulomb exchange interaction in the form of the Heisenberg Hamiltonian and the Dzyaloshinsky-Moriya interaction. It is shown that the Coulomb exchange leads to the edm proportional to the vector product of the spins of magnetic ions. The scalar proportionality coefficient turns out to be proportional to the exchange integral. In the second case, it is shown that the Dzyaloshinsky-Moriya interaction leads to an edm proportional to the scalar product of the spins of magnetic ions. The vector constant of proportionality turns out to be proportional to the displacement vector of the ligand ion from the line connecting the magnetic ions (since this vector is included in the Dzyaloshinsky constant).*

Keywords: *magnetoelectric effect, dipole polarization, magnetization, multiferroics.*

Обычно в литературе выделяют три механизма связи электрического дипольного момента (эдм) ячейки кристалла со спинами входящих в неё магнитных ионов [1]. В случае, когда эдм пропорционален векторному произведению спинов $\mathbf{d}_{12} = \alpha[\mathbf{r}_{12} \times [\mathbf{S}_1 \times \mathbf{S}_2]]$, была предложена спин токовая модель поляризации. В этой модели, вектор поляризации (плотность эдм) P^α , пропорционален тензору спинового тока $J^{\alpha\beta}$, при этом коэффициентом пропорциональности, связывающим тензорные компоненты, выступает символ Леви-Чивита $P^\alpha : \varepsilon^{\alpha\beta\gamma} J^{\beta\gamma}$ (здесь и ниже подразумевается суммирование по повторяющемуся индексу). Нами поставлена задача о микроскопическом обосновании спин токовой модели и вопросе о применимости спин токовой модели для различных механизмов формирования эдм в мультиферроиках второго рода, в соответствии с изменением механизма образования спинового тока.

Рассмотрим квантовую динамику частиц (ионов) образующих мультиферроик второго рода, где электрический дипольный момент связан со спинами магнитных ионов. Для описания микроскопических процессов мы используем нестационарное многочастичное уравнение Паули, с гамильтонианом, в котором мы учитываем энергию диполя в электрическом поле и спин-орбитальное взаимодействие, наряду с другими взаимодействиями (такими как кулоновское обменное взаимодействие в форме гамильтониана Гейзенберга, энергии Зеемана магнитного момента в магнитном поле, диполь-дипольного взаимодействия и т.д.). Используя метод многочастичной квантовой гидродинамики [2], который, в частности, позволяет вывести полевую форму уравнения Ландау-Лифшица [3], мы выводим уравнение

баланса импульса. Энергия диполя в электрическом поле приводит к плотности силы в следующем виде $\mathbf{F} = P^\beta \nabla E^\beta$. А спин-орбитальное взаимодействие приводит к плотности силы в следующем виде $\mathbf{F} = -\mu \varepsilon^{\beta\gamma\delta} J^{\gamma\delta} \nabla E^\beta / c$. Вне зависимости от механизма формирования спинового тока $J^{\alpha\beta}$ возможно формирование баланса этих сил, что приводит к связи электрической поляризации со спиновым током $P^\beta = \mu \varepsilon^{\beta\gamma\delta} J^{\gamma\delta} / c$.

Дальнейший анализ выражения для поляризации возможен при подстановке явного вида спинового тока. Для этого выведем уравнение эволюции плотности спина (которая пропорциональна намагниченности для системы магнитных частиц одного сорта). Приведем определение векторного поля спиновой плотности $\mathbf{S}(\mathbf{r}, t)$, как квантовое среднее соответствующего оператора, которое используется в методе многочастичной квантовой гидродинамики

$$\mathbf{S}(\mathbf{r}, t) = \int \psi^\dagger(R, t) \sum_{i=1}^N \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) \hat{s}_i \psi(R, t) dR, \quad (1)$$

где $\psi(R, t)$ – это многочастичная волновая функция (спинор), суммирование по спиновым индексам явно не показано в формуле (1), $R = \{\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N\}$ – совокупность координат N частиц, dR – это элемент объёма в 3N мерном конфигурационном пространстве, \hat{s}_i это оператор спина i-ой частицы, $[s_i^\alpha, s_j^\beta] = i\hbar \delta_{ij} \varepsilon^{\alpha\beta\gamma} s_i^\gamma$ – коммутатор операторов спина, $\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) \hat{s}_i$ – оператор плотности спина i-ой частицы.

Рассматривая эволюцию плотности спина в результате взаимодействия ионов посредством обменного кулоновского взаимодействия в форме гамильтониана Гейзенберга $H_H = (-1/2) \sum_{i,j \neq i} J_{ij}(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \hat{s}_i^\beta \hat{s}_j^\beta$, мы приходим [3] к известному вкладу энергии неоднородности в уравнении Ландау-Лифшица $\partial_t \mathbf{S} = (1/6) g_j [\mathbf{S} \times \Delta \mathbf{S}]$, где $g_j = \int J(r) r^2 dV$ это интеграл по объёму от сферически симметричного обменного интеграла умноженного на квадрат координаты. Правую часть уравнения эволюции спина можно представить как дивергенцию тензора спинового тока $\partial_t S^\alpha + \partial^\beta J^{\alpha\beta} = 0$, где $J^{\alpha\beta} = -(1/6) \varepsilon^{\alpha\mu\nu} g_j S^\mu \partial^\beta S^\nu$. Это выражение для спинового тока можно подставить в формулу для поляризации и получить

$$P^\beta = \mu \varepsilon^{\beta\gamma\delta} J^{\gamma\delta} / c = -(1/6) \mu \varepsilon^{\beta\gamma\delta} \varepsilon^{\gamma\mu\nu} g_j S^\mu \partial^\delta S^\nu / c = (1/6) \mu g_j (S^\beta (\nabla \cdot \mathbf{S}) - (\mathbf{S} \cdot \nabla) S^\beta) / c. \quad (2)$$

Отметим, что выражение для поляризации (2) получено Мостовым [4] из соображений симметрии без уточнения механизма образования мультиферроика. Финальным шагом стоит вычисление оператора электрического дипольного момента, который после вычисления квантового среднего, по формуле аналогичной (1) и используя процедуру разложения аналогичную работам [2, 3], даст выражение (2). Соответствующий оператор эдм имеет следующий вид $\hat{\mathbf{d}}_{ij} : [\mathbf{r}_{ij} \times [\hat{s}_i \times \hat{s}_j]]$ (см. Рис. 2 (d,e,f) в [1], также отметим, что в [1] речь идёт об обратной (инверсной) модели Дзялошинского-Мория), в котором коэффициент пропорциональности, согласно предложенной модели, определяется обменным интегралом.

Рассмотрим другой механизм возникновения спинового тока, а именно взаимодействие Дзялошинского-Мория $H_{DM} = (-1/2) \sum_{i,j \neq i} \mathbf{D}_{ij}(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \cdot [\hat{s}_i \times \hat{s}_j]$, где $\mathbf{D}_{ij} = -\mathbf{D}_{ji} = \beta(r_{ij}) \mathbf{r}_{ij} \times \delta$ векторная константа Дзялошинского, в представленную структуру входит вектор смещения лиганда δ [5]. В этом случае получаем уравнение Ландау-Лифшица в виде

$$\partial_t \mathbf{S} = (1/3) g_{(\beta)} ((\mathbf{S} \cdot [\delta \times \nabla]) \mathbf{S} - S^\beta [\delta \times \nabla] S^\beta), \quad (3)$$

где $g_{(\beta)} = \int \beta(r)r^2 dV$. Второе слагаемое в уравнении (3) может быть представлено в виде дивергенции тензора спинового тока $J_{DM}^{\alpha\beta} = -(1/6)\varepsilon^{\alpha\beta\gamma} g_{(\beta)}\delta^\gamma \cdot \mathbf{S}^2$. Это приводит к поляризации следующего вида

$$P_{DM}^\alpha = \mu\varepsilon^{\alpha\mu\nu} J_{DM}^{\mu\nu} / c = (-1/3)\mu g_{(\beta)} \cdot \delta^\alpha \cdot \mathbf{S}^2 / c, \quad (4)$$

которая параллельна смещению лиганда. Также определим соответствующий вид оператора эдм $\hat{\mathbf{d}}_{ij} : \mathbf{\Pi}_{ij}(\hat{\mathbf{s}}_i \cdot \hat{\mathbf{s}}_j)$ (см. Рис. 2 (a,b,c) в [1], в [1] речь идёт об обменно-стрикционном механизме, возникающем в результате симметричного обменного взаимодействия) в котором векторный коэффициент пропорциональности, согласно предложенной модели, определяется вектором смещения лиганда $\mathbf{\Pi}_{ij} : \delta$.

Вывод состоит в том, что предложена микроскопическая модель поляризации мультиферроиков второго рода (для двух из трёх известных механизмов). В частности, получена интерпретация направления векторной константы, в случае, когда электрический дипольный момент пропорционален скалярному произведению спинов.

Список использованных источников:

1. Tokura Y., Seki S. and Nagaosa N. Multiferroics of spin origin // Rep. Prog. Phys. – 2014. – V. 77. – P. 076501.
2. Andreev P. A. and Kuz'menkov L. S. Problem with the single-particle description and the spectra of intrinsic modes of degenerate boson-fermion systems // Phys. Rev. A. – 2008. – V. 78. –P. 053624.
3. Andreev P. A. and Trukhanova M. I. Quantum Hydrodynamic Representation of the Exchange Interaction in the Theory of Description of Magnetically Ordered Media // Moscow University Physics Bulletin. – 2023. – V. 78. – P. 445-452.
4. Mostovoy M. Ferroelectricity in Spiral Magnets // Phys. Rev. Lett. -2006. -Т. 96, -С.067601.
5. Хомский Д. И. Мультиферроики и не только: Электрические свойства различных магнитных текстур // ЖЭТФ. – 2021. – Т. 159. – Вып. 4. С. 581–593.
6. Andreev P. A. and Trukhanova M. I. Electric polarization evolution equation for antiferromagnetic multiferroics with the polarization proportional to the scalar product of the spins // arXiv. – 2024. arXiv:2403.01211.

УДК 539.21:537.86

Эффект Нернста–Эттингсгаузена в халькогенидах с переменной валентностью**Аплеснин С.С.**

д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой физики СибГУ имени М.Ф. Решетнева

Харьков А.М.

к.ф.-м.н., доцент кафедры физики СибГУ имени М.Ф. Решетнева

Ситников М.Н.

к.ф.-м.н., доцент кафедры физики СибГУ имени М.Ф. Решетнева

Аннотация. *Исследуются электронные и структурные переходы в сульфидах и селенидах марганца, замещенных ионами самария и тулия из ИК спектров и коэффициента теплового расширения. Найдено изменение коэффициента термоЭДС в магнитном поле (НЭ) и корреляция аномалий коэффициента НЭ в окрестности электронно-структурных переходов. Определен тип носителей тока из Холловских измерений, термоЭДС и электросвук. Установлена область температур с поляронным, дырочным и электронным типом проводимости. Найдено изменение электросвук в магнитном поле, что объясняется в рамках модели диффузии носителей тока в окрестности перехода. Обнаружено управление током за счет ультразвука.*

Ключевые слова: *коэффициент Нернста–Эттингсгаузена, электросвук, халькогениды, ИК спектры*

Nernst–Ettinghausen effect chalcogenides with variable valence**Aplesnin S.S.**

Dr.Sc., professor, head of the department of physics, Reshetnev Siberian State University

Kharkov A.M.

Ph.D., associate professor, department of physics, Reshetnev Siberian State University

Sitnikov M.N.

Ph.D., associate professor, department of physics, Reshetnev Siberian State University

Annotation. *Electronic and structural transitions in manganese sulfides and selenides substituted with samarium and thulium ions from IR spectra and thermal expansion coefficient are studied. A change in the thermopower coefficient in a magnetic field (NE) and a correlation of anomalies in the NE coefficient in the vicinity of electronic-structural transitions have been found. The type of current carriers is determined from Hall measurements, thermopower and electric sound. A temperature region with polaron, hole and electronic types of conductivity has been established. A change in electrosound by a magnetic field was found, which is explained within the framework of the model of diffusion of current carriers in the vicinity of the transition. Current tunable by ultrasonic possible has been found.*

Keywords: *Nernst-Ettingshausen coefficient, electrosound, chalcogenides, IR spectra*

Управление транспортными характеристиками (проводимость, термоЭДС) в

полупроводниках, как магнитным полем [1, 2], так ультразвуком [3, 4] является актуальной задачей с фундаментальной и прикладной точки зрения. Сульфиды редкоземельных элементов имеют высокий КПД для термоэлектриков [5], который можно увеличить в магнитном поле (эффект Нернста–Эттингсгаузена). Замещение марганца в халькогенидах ионами переменной валентности приведет к локальной деформации, к смещению химпотенциала и к изменению электронной плотности на уровне химпотенциала. К халькогенидам с переменной валентностью относятся сульфид самария и селенид тулия. В твердых растворах Mn-Sm-Tm-S-Se, за счет химического давления можно регулировать валентность, как по температуре, так и по концентрации. Понижение локальной симметрии при деформации в окрестности редкоземельных ионов вызовет анизотропию электрической поляризации и соответственно анизотропию рассеяние носителей заряда на заряженной области. Кулоновский потенциал рассеяния зависит от величины заряда и от химического давления, которое можно варьировать мощностью ультразвука.

В работе исследуется влияние магнитного поля на термоЭДС и на затухание ультразвука. Для практического приложения можно использовать регулирование тока с помощью ультразвука.

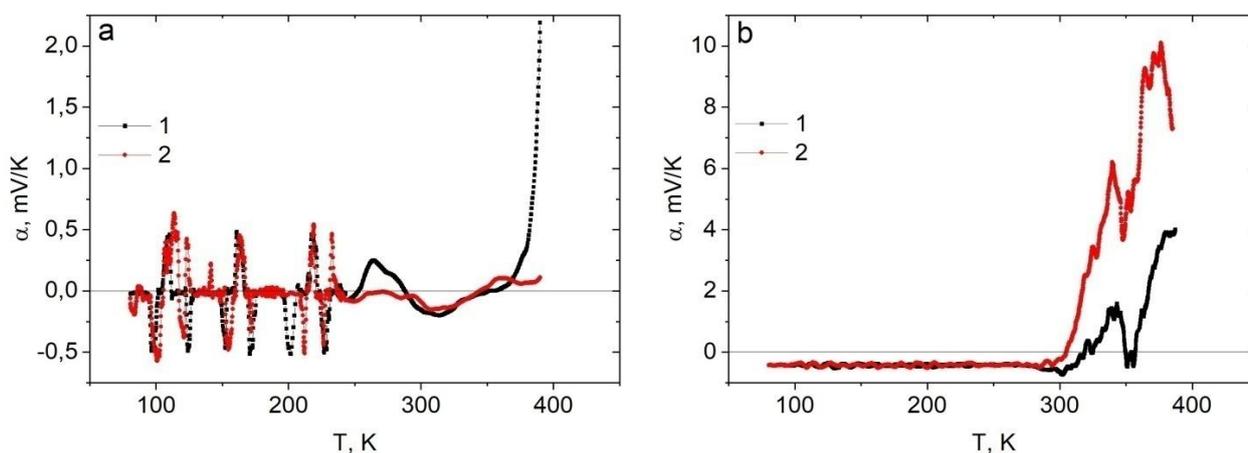


Рис. 1. Температурная зависимость коэффициента термоЭДС для $Sm_{0.1}Mn_{0.9}S$ (a) и для $Mn_{0.9}Tm_{0.08}Se$ (b) без поля $H = 0$ (1) и в магнитном поле $H = 8 \text{ kOe}$ (2)

Проведен морфологический и рентгеноструктурный анализ, согласно которому твердые растворы имеют ГЦК тип решетки. Продольный эффект Нернста–Эттингсгаузена (НЭ) заключается в изменении термоЭДС полупроводников под действием магнитного поля. На рис. 1a представлен коэффициент термоЭДС в $Sm_{0.1}Mn_{0.9}S$ без поля и в магнитном поле. Осцилляции коэффициента НЭ по температуре в $Sm_{0.1}Mn_{0.9}S$ обусловлены контактной разностью потенциалов двух фаз и диффузией. В однофазном состоянии градиент температур по образцу индуцирует градиент фононов и электронов. В области температуры структурного перехода в образце возникают две фазы и контактная разность потенциалов $U_c = kT/e \ln(n_A/n_B)$, где n_A/n_B – концентрации носителей тока в А и В фазах. Отличие по знаку контактной разности потенциалов от диффузионной приводит к смене знака термоЭДС. Поэтому максимумы коэффициента теплового расширения и термоЭДС коррелируют между собой.

В $Mn_{0.9}Tm_{0.08}Se$ структурные переходы ниже комнатной температуры отсутствуют и выше комнатной температуры максимум термоЭДС вызван пиннингованием решеточных поляронов, которые определили из интенсивности ИК спектров.

Напряжение, индуцируемое ультразвуком, достигает максимума при 360 К и обусловлено исчезновением локальной электрической поляризации кластеров с ионами самария. В магнитном поле растет время локализации носителей тока и полярность электрозвука меняется при нагревании и коррелирует с температурами изменения термоЭДС.

В конфигурации, электрический ток перпендикулярен скорости звука, можно регулировать величину сопротивления. В АФМ области сопротивление уменьшается более чем в два раза в $\text{Sm}_{0.1}\text{Mn}_{0.9}\text{S}$ и практически не меняется в $\text{Mn}_{0.9}\text{Tm}_{0.08}\text{Se}$. В парамагнитной области потенциальный барьер между ямами уменьшается под действием ультразвука, увеличивается концентрация носителей тока и соответственно проводимость. В области комнатных температур варьировать сопротивлением можно до 20 % с повторяемостью результатов. Эти образцы можно использовать в качестве звуковых транзисторов в широкой области температур.

Итак, из транспортных характеристик и ИК спектров найден электронно-структурный переход. Найдены температуры с максимальным значением коэффициента температурного сопротивления $1/R(dR/dT)$, при которых пиннингуются решеточные поляроны с деформацией решетки. Полосы поглощения в ИК области также объясняются в рамках решеточных поляронов. Также как в сульфиде марганца, носители тока определенные из константы Холла отличаются по знаку от носителей, найденных из термоЭДС. Носителями тока являются электроны, за исключением узкого интервала температур. Найдена область температур, в которой изменение электрозвука и термоЭДС в магнитном поле качественно совпадают.

Работа поддержана Российским научным фондом, Правительством Красноярского края и проектом Красноярского научного фонда № 23-22-10016.

Список использованных источников:

1. Takiguchi K., Anh L.D., Chiba T., Koyama T., Chiba D. and Tanaka M. Giant gate-controlled proximity magnetoresistance in semiconductor-based ferromagnetic–non-magnetic bilayers // *Nature Physics*. – 2019. – V. 15. – P. 1134–1139.
2. Romanova O.B., Aplesnin S.S., Sitnikov M.N., Udod L.V. and Kharkov A.M. Magnetoresistance and magnetoimpedance in holmium manganese sulfide // *Applied Physics A*. – 2022. – V. 128. – P. 124.
3. Aplesnin S.S., Sitnikov M.N., Romanova O.B., Kharkov A.M., Begisheva O.B. and Zelenov F.V. Electro-sound and Asymmetry of the I–V Characteristic induced by ultrasound in the $\text{Re}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ ($\text{Re} = \text{Tm}, \text{Yb}$) // *The European Physical Journal Plus*. – 2022. – V. 137. – P. 226.
4. Tagantsev A.K. Theory of flexoelectric effect in crystals // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. – 1985. – V. 88. – P. 2108-2122.
5. Jaldurgam F.F., Ahmad Z. and Touati F. Low-Toxic, Earth-Abundant Nanostructured Materials for Thermoelectric Applications // *Nanomaterials*. – 2021. – V. 11. – No. 4. – P. 895.

УДК 537.633

**Магнитоэлектрические свойства парамагнитных редкоземельных ионов
Tb в лангасите****Тихановский А.Ю.**

младший научный сотрудник ИОФ РАН

Иванов В.Ю.

к.ф.-м. н., ведущий научный сотрудник ИОФ РАН

Кузьменко А.М.

к.ф.-м. н., старший научный сотрудник ИОФ РАН

Мухин А.А.

к.ф.-м. н., ведущий научный сотрудник ИОФ РАН

Аннотация. В работе представлены комплексные исследования магнитных и магнитоэлектрических свойств Tb лангасита. В нем впервые обнаружена индуцированная магнитным полем электрическая поляризация. Проведены детальные измерения намагниченности и индуцированной поляризации при различных направлениях магнитного поля. Разработана модель, учитывающая квазидублетное основное состояние иона Tb³⁺ в кристаллическом поле симметрии C₂ и объясняющая наблюдаемые эффекты. В рамках этой модели разработан микроскопический подход, объясняющий возникновение поляризации. Получены компоненты тензора локальной магнитоэлектрической восприимчивости и показано, что эффективная локальная поляризация преимущественно возникает в плоскости, ортогональной направлению изинговской оси. Представленные результаты расширяют понимание микроскопических особенностей проявления магнитоэлектрического эффекта и его механизмов.

Ключевые слова: магнитные материалы, изинговский магнетик, редкоземельные лангаситы, мультиферроики

Magnetoelectric properties of paramagnetic Tb ions in langasite**Tikhanovskii A.Yu.**

Junior Researcher, GPI – Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences

Ivanov V.Yu.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, GPI – Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences

Kuzmenko A.M.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, GPI – Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences

Mukhin A.A.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, GPI – Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences

Annotation. *The study presents comprehensive investigations into the magnetic and magnetoelectric properties of Tb langasite. We report the first observation of a magnetic field induced electric polarization in it. Detailed measurements of magnetization and induced polarization were conducted under various magnetic field orientations. The developed model takes into account the quasi-doublet ground state of the Tb^{3+} ion in the C_2 symmetry crystal field and explaining the observed effects. A developed microscopic approach elucidate the origin of polarization. Components of the local magnetoelectric susceptibility tensor were determined, showing that effective local polarization predominantly arises in a plane orthogonal to the direction of the Ising axis. The presented results expand our understanding of the magnetoelectric effect microscopic origin.*

Keywords: *magnetic materials, Ising magnetic, rare-earth langasites, multiferroics*

Соединения со структурой лангасита ($La_3Ga_5SiO_{14}$) широко исследованы и известны сильными пьезоэлектрическими и нелинейными оптическими свойствами. Например, редкоземельные лангаситы $Nd_3Ga_5SiO_{14}$ и $Pr_3Ga_5SiO_{14}$, привлекли внимание благодаря проявлению нелинейных оптических, пьезоэлектрических и необычных магнитных свойств[1][2], а в замещенном $(La_{0.985}Ho_{0.015})_3Ga_5SiO_{14}$ впервые была обнаружена индуцированная магнитным полем электрическая поляризация и предложена модель магнитной структуры, в рамках которой описаны особенности поведения соединения в магнитном поле[3]. Однако, равновероятное заполнение позиций 2d ионами Ga/Si вызывает нарушение локальной симметрии C_2 . Это приводит к отклонению изинговских осей от разрешенных симметрией направлений и сложному поведению соединений в магнитном поле[4], что значительно усложняет исследование микроскопических причин возникновения поляризации и объяснения их природы. В работе мы представляем комплексное (экспериментальное и теоретическое) исследование магнитных и магнитоэлектрических свойств $(La_{0.95}Tb_{0.05})_3Ga_5SiO_{14}$, с более простой (слабо искаженной) магнитной структурой.

Полевые зависимости намагниченности при низких температурах насыщаются в поле ~ 1 Тл, а магнитная восприимчивость в исследуемом диапазоне температур $\sim T^{-1}$. Таким образом, поведение некрамерсовских магнитных ионов Tb^{3+} во внешнем магнитном поле, определяется нижним квазидублетом мультиплета 7F_6 с малой величиной расщепления. Угловые зависимости намагниченности в базисной плоскости ab^* обладают 60° анизотропией, с максимумом вдоль оси a и минимумом вдоль оси b^* . Намагниченность в плоскостях ac и b^*c имеет значительно большую анизотропия с острым минимумом при $H \parallel c$.

Измерения индуцированной полем поляризации показали, что ее компоненты в базисной плоскости $ab^*(P_a)$ квадратично зависят от магнитного поля в области слабых магнитных полей (рис. 1) и имеют квазилинейный характер в сильных магнитных полях при низких температурах (рис. 1а-с). Поляризация вдоль тригональной оси (P_c) появляется только, начиная с членов четвертой степени по полю (H^4) и, как и плоскостная поляризация, становится квазилинейной в сильных полях.

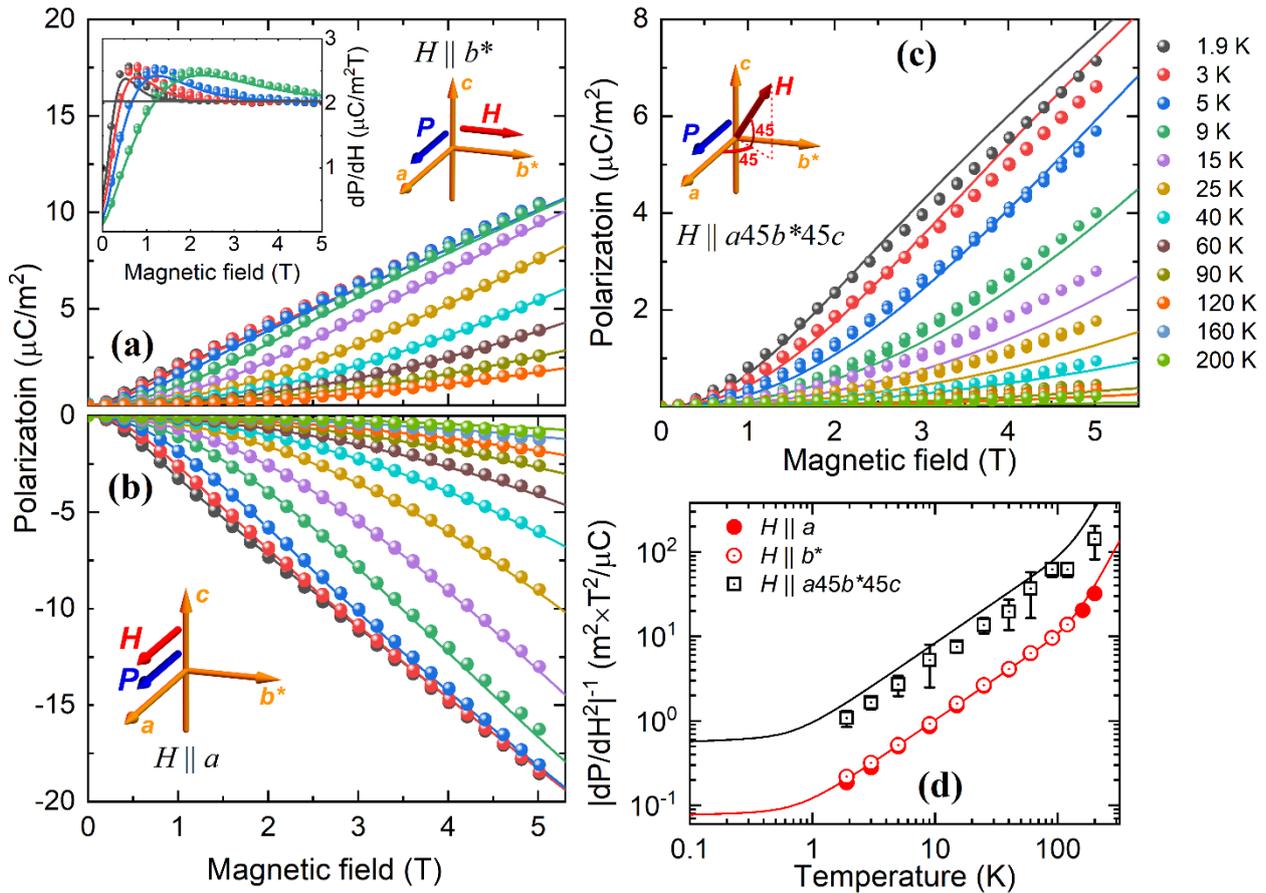


Рис. 1. Полевые зависимости электрической поляризации P_a в $(La_{0.95}Tb_{0.05})_3Ga_5SiO_{14}$, индуцированной магнитным полем (a) $H \parallel a$, (b) $H \parallel b^*$ и (c) $H \parallel a45b^*45c$ (отклоненным от оси c на угол 45° в вертикальной плоскости, пересекающей ab^* под углом 45° к оси a) при различных температурах. На вставке изображена производная поляризации по полю dP/dH при $H \parallel b^*$, демонстрирующая линейный ход поляризации в области сильных магнитных полей. (d) Температурные зависимости $(dP/dH^2)^{-1}$ при $H \parallel a, b^*, a45b^*45c$, полученных из полевых зависимостей P_a . Символы – эксперимент, сплошные линии – теория.

Для описания наблюдаемых явлений мы положили, что основным состоянием некрамерсовского иона Tb^{3+} в кристаллическом поле симметрии C_2 является квазидублет, который определяет основной вклад в анизотропный магнитный момент иона и отделен от возбужденных уровней. В рамках предложенной модели мы выполнили моделирование магнитных свойств $(La_{0.95}Tb_{0.05})_3Ga_5SiO_{14}$ и показали, что оси анизотропии Tb^{3+} направлены вдоль локальных осей второго порядка $a, b, -a-b$.

С учетом основного состояния Tb^{3+} в кристаллическом поле разработан микроскопический подход для описания индуцированной полем электрической поляризации кристалла, которая определяется суперпозицией локальных поляризаций, связанных операций симметрии C_3 и зависящими от локальных магнитных восприимчивостей ионов Tb^{3+} .

Поляризация в базисной плоскости P_{a,b^*} определяется суммой локальных магнитных восприимчивостей в области слабых магнитных полей, а в сильных магнитных полях, как и поляризации вдоль тригональной оси (P_c), обусловлена неэквивалентным поведением позиций и соответствующих восприимчивостей ионов Tb^{3+} в поле.

Из совокупности экспериментальных данных, полученных в широком диапазоне магнитных полей и температур, мы определили компоненты тензора локальной магнитоэлектрической восприимчивости. Эффективная локальная поляризация, учитывающая изменение электронной плотности редкоземельного иона и связанные с этим

решеточные искажения, преимущественно возникает в плоскости ортогональной направлению изинговской оси, а ее величина достигает сотен $\mu\text{C}/\text{m}^2$ на ион.

Работа поддержана грантом РФФ № 22-42-05004.

Список использованной литературы:

1. Zorko A. et al. Ground State of the easy-axis rare-earth kagome langasite $\text{Pr}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ // *Phys. Rev. Lett.* 2010. Vol. 104, № 5. P. 3–6.
2. Bordet P. et al. Magnetic frustration on a Kagomé lattice in $\text{R}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ langasites with $\text{R} \leq \text{Nd, Pr}$ // *J. Phys. Condens. Matter.* 2006. Vol. 18, № 22. P. 5147–5153.
3. Weymann L. et al. Unusual magnetoelectric effect in paramagnetic rare-earth langasite // *npj Quantum Mater.* 2020. Vol. 5, № 1. P. 61.
4. Тихановский А.Ю. Влияние локальных нарушений симметрии на магнитоэлектрические свойства $(\text{La}_{0,985}\text{Ho}_{0,015})_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ // Тезисы докладов Школы-конференции молодых ученых «Прохоровские недели». 2023. Vol. 1.

УДК 537.6/.8

Моделирование сдвига фазы спиновых волн при прохождении через электрически управляемую доменную стенку

Мясников Н.В.

Аспирант физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Пятаков А.П.

д.ф.-м.н., проф., физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

***Аннотация.** В новой ветви электроники – магنونике – рассматривают различные способы возбуждения спиновых волн и способы управления их свойствами, например модуляцию амплитуды и фазы. В материалах с неоднородным магнитоэлектрическим взаимодействием в качестве фазового модулятора для спиновой волны может выступать доменная стенка, управляемая внешним электрическим полем. В работе показано, что естественный для микромагнетизма объект – доменная стенка – способна при различной своей структуре изменять свойства фазы проходящих спиновых волн.*

***Ключевые слова:** магنونика, микромагнетизм, неоднородное магнитоэлектрическое взаимодействие, доменная стенка*

Simulation of phase shift of spin waves passing through an electrically controlled domain wall

Myasnikov N.V.,

Postgraduate student, Department of Oscillations, Physics Faculty, M.V. Lomonosov MSU
– Moscow State University

Pyatakov A.P.,

Doctor of physical and mathematical Sciences, Professor of Department of Oscillations,
Physics Faculty, M.V. Lomonosov MSU – Moscow State University

***Annotation.** A new branch of electronics, magnonics, considers various ways to excite spin waves and to control their properties, for example, amplitude modulation and phase shifts. In materials with inhomogeneous magnetoelectric interaction a domain wall controlled by an external electric field can act as a phase modulator for a spin wave. It is shown that the domain wall, a natural object for micromagnetism, is capable of changing the properties of the phase of passing spin waves with its different structure.*

***Keywords:** magnonics, micromagnetism, inhomogeneous magnetoelectric interaction, domain wall*

В последнее время в мире активно развиваются альтернативные ветки электроники, которые используют в качестве переносчика информации спин электрона (спинтроника [1]) или коллективные возбуждения спинов (магنونика [2]), в противоположность традиционно используемому зарядовому транспорту. В области магنونики возникает необходимость управления свойствами спиновых волн. В частности, отдельной степенью свободы может выступать фаза спиновой волны. Для сред с магнитным упорядочением естественными являются такие объекты как доменные стенки. Отдельная доменная стенка может выступать в качестве спинового клапана для спиновых волн [3], т.е. в зависимости от структуры доменной

стенки спиновые волны, прошедшие через нее, могут иметь разные свойства или не проходить вовсе. Вместе с тем известно, что в магнитных материалах с нарушенной центральной симметрией проявляется неоднородное магнитоэлектрическое взаимодействие [4], суть которого состоит в том, что неоднородное распределение вектора намагниченности (например, внутри доменной стенки) приводит к возникновению электрической поляризации. Таким образом, в подобных материалах появляется возможность управлять микромагнитной структурой за счет внешнего электрического поля, и даже оказывается возможным зарождаются цилиндрические магнитные домены [5].

В связи с возможностями применять доменные стенки в магноники и управлять структурой доменной стенки внешним электрическим полем возникает интересная задача по моделированию прохождения спиновых волн через доменную стенку, управляемую электрическим полем. Динамика спиновых волн в ферромагнитном материале может быть рассчитана на основе уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -|\gamma|[\mathbf{M}, \mathbf{H}^{eff}] + \frac{\alpha}{M_s} \left[\mathbf{M}, \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \right], \quad (1)$$

$$\mathbf{H}^{eff} = -\frac{\delta F(\mathbf{M})}{\delta \mathbf{M}}, \quad (2)$$

где \mathbf{M} - вектор намагниченности, \mathbf{H}^{eff} - эффективное магнитное поля, определяемое как вариационная производная от свободной энергии $F(\mathbf{M})$ по \mathbf{M} , $|\gamma|$ – гиромагнитное отношение для электрона, α – константа затухания, M_s – намагниченность насыщения. Неоднородное магнитоэлектрическое взаимодействие может быть включено в модель за счет дополнительного слагаемого в потенциале свободной энергии [4]:

$$F_{me} = -\gamma_{me} \mathbf{E}(\mathbf{m}(\nabla, \mathbf{m}) + [\mathbf{m} \times [\nabla \times \mathbf{m}]]), \quad (3)$$

где γ_{me} – константа магнитоэлектрического взаимодействия, \mathbf{E} - электрическое поле внутри среды, \mathbf{m} – безразмерный вектор намагниченности. С помощью уравнений (1-3) был проведен численный расчет распространения спиновых волн, возбуждаемых магнитным полем, через доменную стенку Блоха и через доменную стенку Нееля, контролируруемую внешним электрическим полем.

Основной результат состоит в том, что фаза спиновой волны, прошедшей через доменную стенку Блоха (см. Рис. 1), примерно на 180 градусов отличается от фазы спиновой волны, прошедшей через доменную стенку Нееля (см. Рис. 2). Различие фаз показано на Рис.3: на нем приведены прецессирующие компоненты намагниченности для случая каждой доменной стенки, а также их сумма, малость величины которой указывает на то, что прошедшие волны распространяются практически в противофазе.

Работа была поддержана грантом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (программа Junior Leader).

Список использованной литературы:

1. S. D. Bader и S. S. P. Parkin, Spintronics //Annual Review of Condensed Matter Physics – 2010 – v. 1 – № 1– pp. 71-88.
2. A. Barman et.al., The 2021 Magnonics Roadmap//Journal of Physics: Condensed Matter – 2021 –v. 33 – p. 413001.
3. S. J. Hämäläinen, M. Madami, H. Qin, G. Gubbiotti и S. van Dijken, Control of spin-wave transmission by a programmable domain wall//Nature Communications – 2018 –v. 9 – № 1– p. 4853
4. A. P. Pyatakov, G. A. Meshkov и A. K. Zvezdin, Electric polarization of magnetic textures: New horizons of micromagnetism// Journal of Magnetism and Magnetic Materials–2012– v.

324 – № 21– p. 3551–3554.

5. K.S. Antipin, T.T. Gareev, N.V. Myasnikov, E.P. Nikolaeva и А. Р. Pyatakov, Bipolar electric field-induced nucleation of magnetic domains with 90 domain walls//Journal of Applied Physics – 2021 – v. 129 – № 2 – p. 24103.

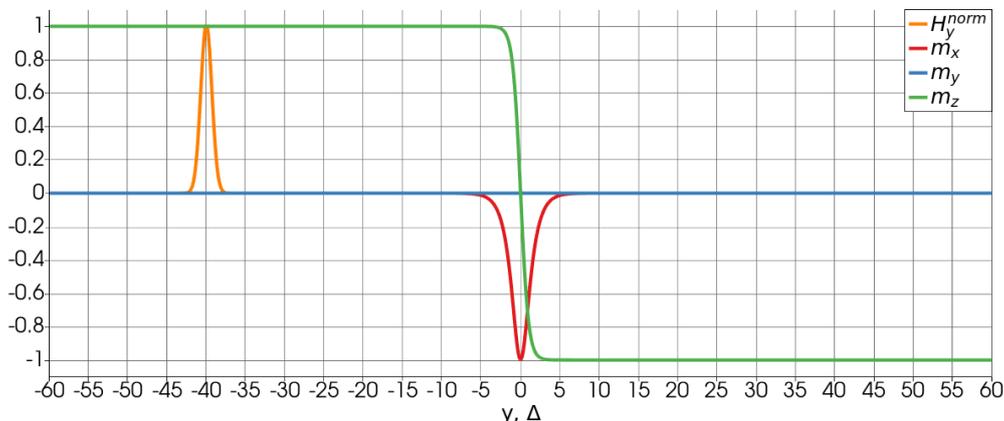


Рис. 1. Структура доменной стенки Блоха и положение прикладываемого магнитного поля (пик слева)

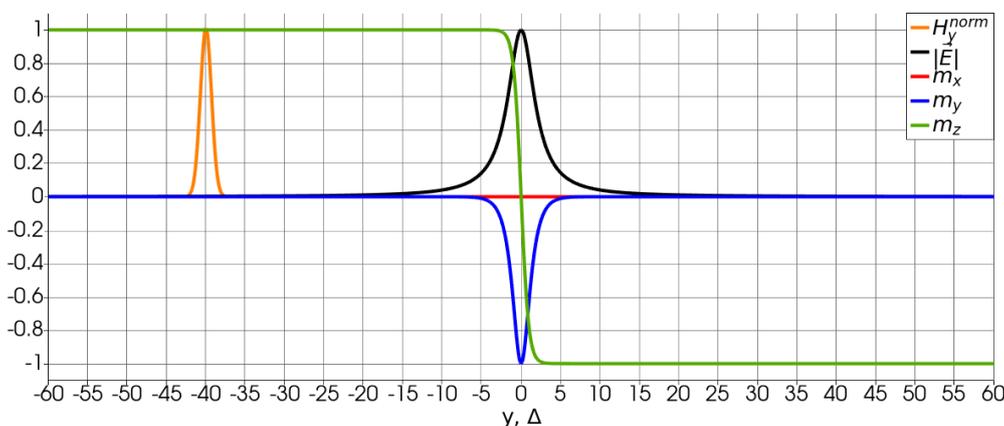


Рис. 2. Структура доменной стенки Нееля, контролируемой внешним электрическим полем (отмечено черной линией) и положение прикладываемого магнитного поля (пик слева)

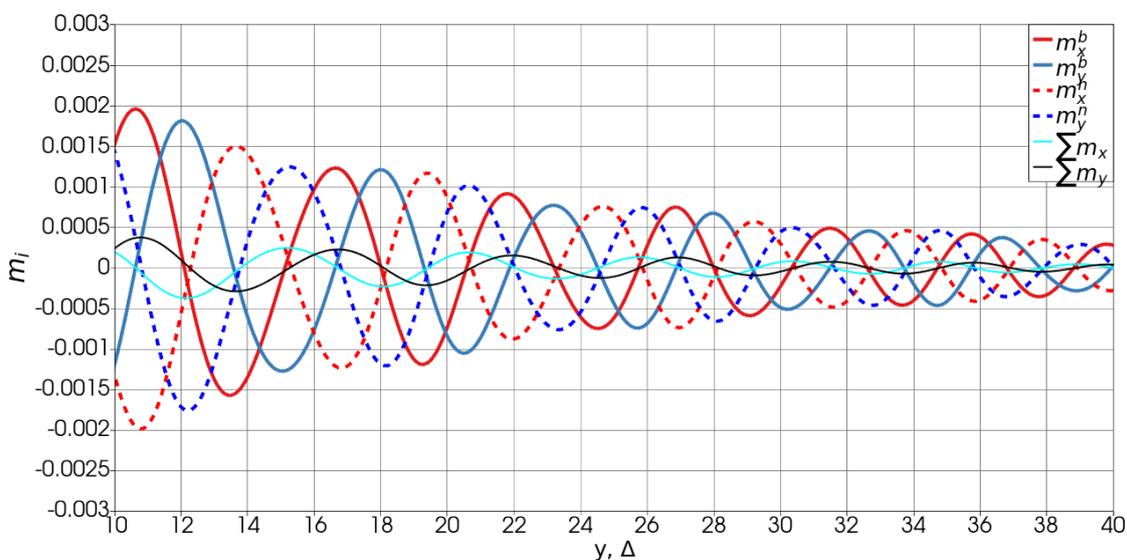


Рис. 3. Структура спиновых волн, прошедших по отдельности через доменные стенки Блоха и Нееля, а также их сумма.

УДК 537.63

Исследование низкочастотного обратного магнитоэлектрического эффекта**Иванов С.В.**

магистрант, лаборатория «Микро- и нанотехнологий» Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого

Соколов О.В.

к.ф.-м.н., инженер-исследователь, Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого

Бичурин М.И.

д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой, Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого

Аннотация. В работе проводится моделирование изгибной, продольно-сдвиговой и крутильной мод низкочастотного (НЧ) обратного магнитоэлектрического эффекта для композитов ЦТС-19 / АМАГ – 321 и GaAs / АМАГ – 321.

Ключевые слова: НЧ обратный магнитоэлектрический эффект, пьезоэлектричество, магнитострикция, ЦТС-19, GaAs, АМАГ – 321.

Research of the low frequency converse magnetoelectric effect**Ivanov S.V.**

Master's student, «Micro- and nanotechnologies» laboratory, Yaroslav-the-Wise Novgorod State University

Sokolov O.V.

Ph. D. (Phys.-Math.), Research engineer, Yaroslav-the-Wise Novgorod State University

Bichurin M.I.

Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Department, Yaroslav-the-Wise Novgorod State University

Annotation. Research of the bending, longitudinal-shear and torsional modes of the LF converse magnetoelectric effect for PZT-19 / AMAG – 321 and GaAs composites is investigated in the paper.

Keywords: LF converse magnetoelectric effect, piezoelectricity, magnetostriction, PZT-19, GaAs, AMAG – 321.

Магнитоэлектрический композит – это структура, в которой пьезоэлектрический и магнитострикционный материал механически соединены и для которой наблюдается прямой и обратный магнитоэлектрический (МЭ) эффект. Данные композиты могут быть использованы в качестве основных элементов различных устройств на основе МЭ эффекта, при этом обеспечивая большую чувствительностью и небольшие габаритные размеры данных устройств [1-3]: датчиков магнитного поля, фильтров, генераторов, фазовращателей, харвестеров, антенн и т. д.

Функциональные свойства МЭ композитов определяются обратным МЭ коэффициентом в случае обратного МЭ эффекта и МЭ коэффициентом по напряжению в случае прямого МЭ эффекта.

В данной работе производится моделирование обратного МЭ эффекта для композитов, изображенных на рис. 1, в режиме изгибной, продольно-сдвиговой и крутильной мод электромеханического резонанса (ЭМР).

Внешнее переменное электрическое напряжение на пьезоэлектрической фазе МЭ композита вызывает продольные и изгибные деформации пьезоэлектрика, передающиеся так же магнитострикционной фазе композита, но с некоторыми потерями из-за наличия клея, соединяющего фазы композита. В ходе деформаций магнитострикционной фазы композита в данной фазе генерируется переменная намагниченность с той же частотой, что и частота напряжения на пьезоэлектрической фазе. На частотах ЭМР МЭ композита для изгибной, продольно-сдвиговой и крутильной мод амплитуда этих деформаций становится максимальной, вследствие чего амплитуда переменной намагниченности также принимает максимальное значение. Кроме внешнего электрического поля на пьезоэлектрике для генерации переменной намагниченности необходимо также внешнее постоянное магнитное поле определенной величины, приложенное к магнитострикционной фазе для обеспечения высокого значения магнитострикции материала. В случае изгибной моды постоянное магнитное поле ориентировано по длине (вдоль оси X) МЭ композита (рис. 1), в случае продольно-сдвиговой и крутильной мод постоянное магнитное поле ориентировано по ширине МЭ композита (вдоль оси Y) и в качестве пьезоэлектрика МЭ композита применяется GaAs в связи с наличием у GaAs компоненты тензора пьезоэлектрического коэффициента, необходимой для режима продольно-сдвиговой и крутильной мод ЭМР.

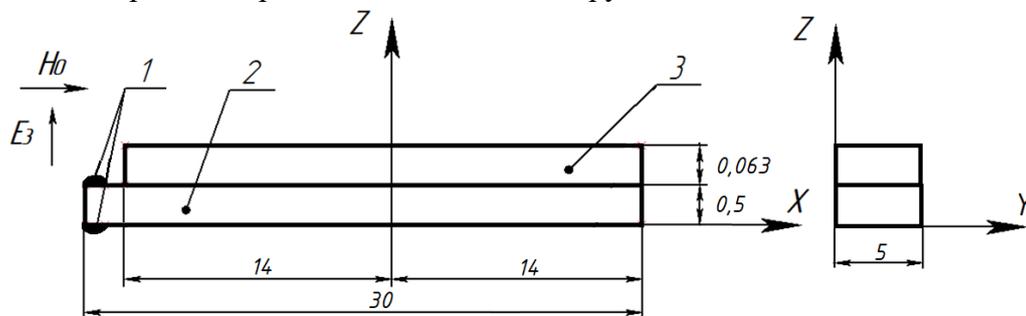


Рис. 1. Эскиз МЭ композита ЦТС-19 (GaAs) / АМАГ - 321. Размеры в мм

На рис. 1: 1 – электроды, с которых на пьезоэлектрик подано напряжение, 2 – пьезоэлектрическая фаза (ЦТС-19 / GaAs), 3 – магнитострикционная фаза АМАГ-321 (ПАО «Мстатор»), $H_0 = 15$ Э – экспериментально определенное значение внешнего постоянного магнитного поля, при котором обратный МЭ коэффициент композита с АМАГ-321 максимален, E_3 – напряженность электрического поля, приложенного к пьезоэлектрической фазе.

Обратный МЭ коэффициент, связывающий переменную магнитную индукцию в магнитострикционной фазе и напряженность внешнего электрического поля в пьезоэлектрической фазе, определяется по формуле:

$$\alpha_{conv} = \frac{m B_1}{E_3}, \quad (1)$$

где ${}^m B_1$ – переменная магнитная индукция в магнитоэлектрической фазе композита, возникающая в ходе обратного МЭ эффекта, T_l , E_3 – амплитуда переменной напряженности электрического поля, приложенная к пьезоэлектрику композита, В/м.

На рисунке 2 приведены результаты теоретических расчетов частотной зависимости обратного МЭ коэффициента, выполненных в соответствии с работой [4] с помощью материальных параметров фаз композита (пьезоэлектрического коэффициента, псевдопьезомагнитного коэффициента, геометрических размеров фаз, модулей податливости и упругости и т. д.), при изгибной, продольно-сдвиговой и крутильной модах для МЭ композитов ЦТС-19 / АМАГ – 321 и GaAs / АМАГ – 321.

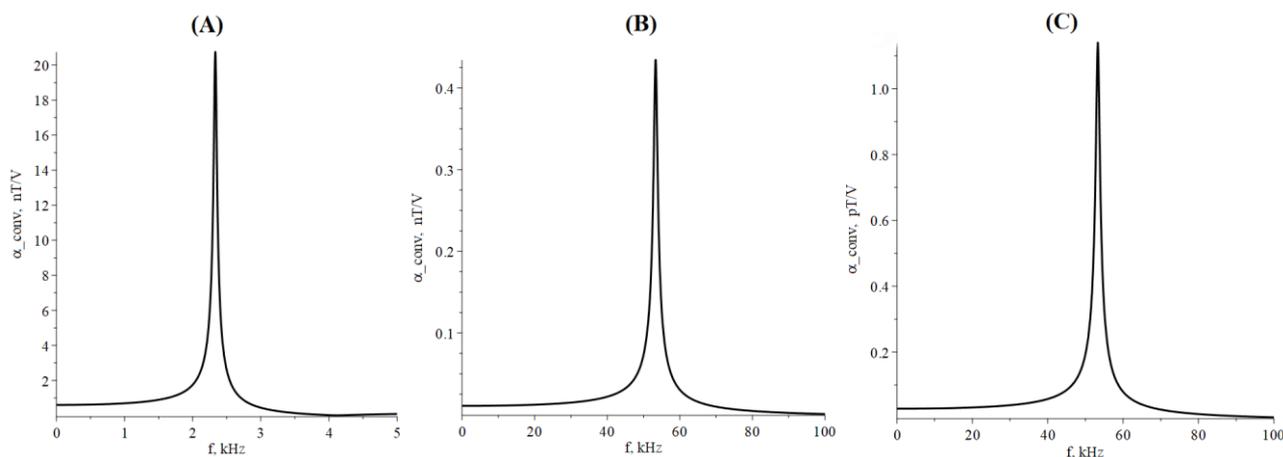


Рис. 2. Зависимость обратного МЭ коэффициента от частоты напряжения на пьезоэлектрической фазе композита. Изгибная мода, МЭ композит ЦТС-19 / АМАГ - 321 (А), Продольно-сдвиговая мода, МЭ композит GaAs / АМАГ – 321 (В), Крутильная мода, МЭ композит GaAs / АМАГ – 321 (С)

В результате теоретических расчетов было определено, что для композита ЦТС-19 / АМАГ – 321 с размерами, перечисленными на рисунке 1, обратный МЭ коэффициент при изгибной моде колебаний больше на 2 и 4 порядка, чем при продольно-сдвиговой и крутильной модах, соответственно, для композита GaAs / АМАГ - 321 с теми же размерами. При этом резонансная частота изгибной моды в 20 раз меньше резонансной частоты колебаний продольно-сдвиговой и крутильной мод.

В дальнейшем планируется сравнить данные расчета с экспериментальными результатами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24–15–20044.

Список использованных источников:

1. Bichurin M., Petrov R., Sokolov O., Leontiev V., Kuts V., Kiselev D., Wang Y. Magnetolectric Magnetic Field Sensors: A Review // Sensors. 2021 – №21. P. 2-19.
2. Wu H., Tatarenko A. Bichurin M., Wang Y. A multiferroic module for biomechanical energy harvesting // Nano Energy. 2021 – №83. P. 3-7.
3. Fu S., Cheng J., Jiang T., Wu H., Fang Z., Jiao J., Sokolov O., Ivanov S., Bichurin M., Wang Y. Bias-free very low frequency magnetolectric antenna // Applied Physics Letters. 2023. – №122. P. 1-4.
4. Bichurin, M.; Sokolov, O.; Ivanov, S.; Leontiev, V.; Lobekin, V.; Semenov, G.; Wang, Y. Modeling the Converse Magnetolectric Effect in the Low-Frequency Range. Sensors 2024, 24, 151. <https://doi.org/10.3390/s24010151>.

УДК 538.955

Влияние температуры на магнитоэлектрический эффект в структуре с лангататом**Болотина Е.В.**

лаборант, НОЦ «Магнитоэлектрические материалы и устройства», РТУ МИРЭА

Савельев Д.В.

к.ф.-м.н, инженер-исследователь, НОЦ «Магнитоэлектрические материалы и устройства», РТУ МИРЭА

Турутин А.В.

к.ф.-м.н., с.н.с. лаборатории физики оксидных сегнетоэлектриков, НИТУ МИСиС

Кубасов И.В.

к.ф.-м.н., с.н.с. лаборатории физики оксидных сегнетоэлектриков, НИТУ МИСиС

Темиров А.А.

н.с. лаборатории физики оксидных сегнетоэлектриков, НИТУ МИСиС

Фетисов Л.Ю.

д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры нанoeлектроники РТУ МИРЭА

***Аннотация.** В работе исследовано влияние температуры на магнитоэлектрический эффект в структуре на основе монокристалла лангатата с напыленными с обеих сторон слоями аморфного магнитного сплава. Измерения проводили в диапазоне температур от 220 до 340 К. При комнатной температуре МЭ коэффициент составил 9 В/(Э·см). Выявлена линейная зависимость МЭ коэффициента от температуры.*

***Ключевые слова:** магнитоэлектрический эффект, лангатат, температурные зависимости, аморфный магнитный сплав, композитная структура.*

The effect of temperature on the magnetoelectric effect in a structure with langatate**Bolotina E.V.,**

Laboratory assistant, Scientific and educational center "Magnetoelectric materials and devices", MIREA – Russian Technological University

Savelev D.V.,

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Enginner-researcher, Scientific and educational center "Magnetoelectric materials and devices", MIREA – Russian Technological University

Turutin A.V.,

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Physics of Oxide Ferroelectrics, NUST MISIS

Kubasov I.V.,

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Physics of Oxide Ferroelectrics, NUST MISIS

Temirov A.A.,

Researcher, Laboratory of Physics of Oxide Ferroelectrics, NUST MISIS

Fetisov L.Y.,

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the
Department of nanoelectronics, IPTIP of MIREA – Russian Technological University

Annotation. *In this study, the effect of temperature on the magnetoelectric effect (ME) in a structure based on a langatate single crystal with layers of an amorphous magnetic alloy deposited on both sides was investigated. The measurements were carried out in the temperature range from 220 to 340 K. At room temperature, the ME coefficient was $9 \text{ V}/(\text{E}\cdot\text{cm})$. A linear dependence of the ME coefficient on temperature was revealed.*

Keywords: *magnetoelectric effect, langatate, temperature dependences, amorphous magnetic alloy, composite structure.*

Разработка высокочувствительных датчиков магнитных полей на основе высокочастотных магнитоэлектрических (МЭ) композитных структур, изготовленных из монокристаллических пьезоэлектриков, является в настоящий момент актуальной задачей [1]. МЭ эффект в слоистых композитных структурах возникает благодаря комбинации магнитострикции магнитного слоя и пьезоэлектрического эффекта в пьезоэлектрическом слое. Он реализуется следующим образом: при помещении структуры в постоянное магнитное поле в ферромагнитном (ФМ) слое вследствие магнитострикции возникают деформации, передающиеся жестко скрепленному с ним пьезоэлектрическому (ПЭ) слою, в котором, в результате пьезоэффекта, возникает разность потенциалов [2]. Метод соединения магнитных и пьезоэлектрических слоев в таких композитах – важный фактор, влияющий на величину МЭ эффекта. Ранее было показано, что изготовление слоистых композитов посредством склеивания плохо сказывается на температурной стабильности и передаче деформаций [2], поэтому актуальным является переход к пленочным технологиям.

В данной работе был исследован МЭ эффект в трехслойной композитной структуре аморфный магнитный сплав – лангатат – аморфный магнитный сплав, размеры которой составили $22 \times 4.7 \times 1.5 \text{ мм}$. Толщина каждого из ФМ слоев составила $\sim 2 \text{ мкм}$. Слои наносили методом высокочастотного магнетронного распыления мишени. Осаждение проводили в вакуумной технологической камере SUNPLA-40TM без дополнительного нагрева подложкодержателя. Синтез метгласа проходил в атмосфере аргона с рабочим давлением $0,5 \text{ Па}$ при мощности магнетрона 200 Вт , а температура подложки не превышала $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Изготовление образцов было проведено в НИТУ МИСИС.

Исследования МЭ эффекта проводили динамическим методом [3] на установке, разработанной в НОЦ «Магнитоэлектрические материалы и устройства» [4]. Композитную структуру помещали между кольца Гельмгольца, который создавал однородное постоянное магнитное поле напряженностью до 350 Э . Переменное магнитное поле с амплитудой h до 0.22 Э - с использованием модулирующих катушек, питаемых от генератора (Agilent 33210A, Agilent Technologies, Inc., Santa Clara, CA, USA). Напряжение $u(t)$, генерируемое МЭ структурой, измерялось вольтметром (АКИП – 2401, АО «ПриСТ», Москва, Россия) со входным сопротивлением 10 МОм .

Были исследованы зависимости линейного магнитоэлектрического эффекта от температуры. На рис. 1 приведена амплитудно-частотная характеристика МЭ коэффициента структуры в постоянном поле $H = 70 \text{ Э}$, измеренная при комнатной температуре. Наблюдался только один резонансный пик вблизи частоты $f_0 \approx 96.55 \text{ кГц}$, соответствующей первой моде продольных колебаний структуры, с амплитудой $\alpha = u/(a_p h) \approx 9 \text{ В}/(\text{Э}\cdot\text{см})$ и добротностью $Q = f/\Delta f = 4830$, где Δf – ширина пика на уровне 0.7 .

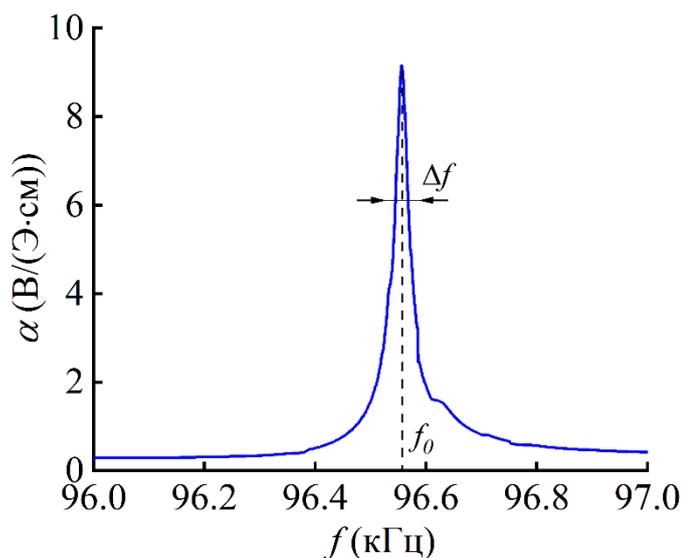


Рис. 4. Зависимость МЭ коэффициента от частоты возбуждающего переменного поля при постоянном поле $H = 70$ Э.

На рис. 2 приведена зависимость нормированного на максимальное значение МЭ коэффициента α/α_{\max} от температуры. Видно, что она имеет линейный вид. Наблюдаемое изменение МЭ преобразования составляет 70% в заданном диапазоне температур, что хорошо согласуется с полученными ранее результатами [4] для структуры на основе лангатата с наклеенной лентой аморфного сплава Metglas 2605S3A. Такое поведение связано с уменьшением акустической добротности резонанса почти в 2 раза при увеличении температуры в исследуемом диапазоне.

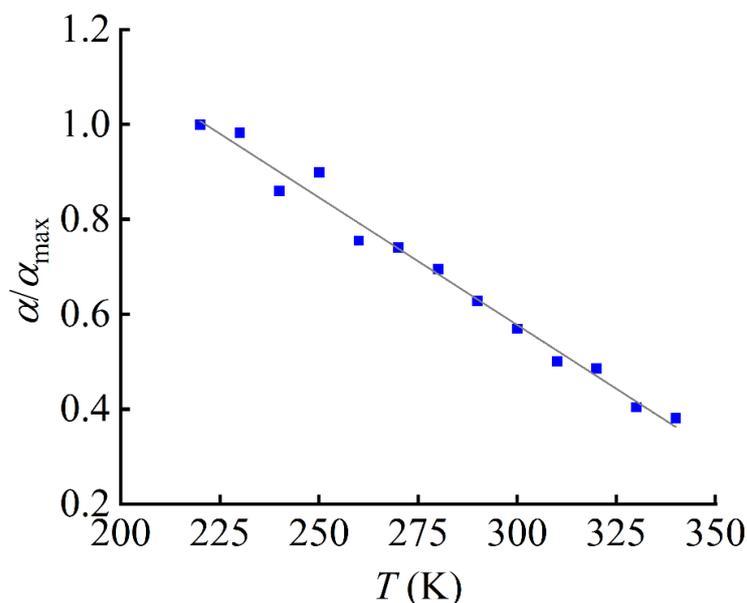


Рис. 5. Зависимость нормированного МЭ коэффициента от температуры в оптимальном постоянном магнитном поле.

Полученные зависимости изменения частоты резонанса от температуры представлены на рис. 3. Наблюдается незначительный рост резонансной частоты с увеличением температуры, который обусловлен температурной стабильностью модуля Юнга лангатата [4].

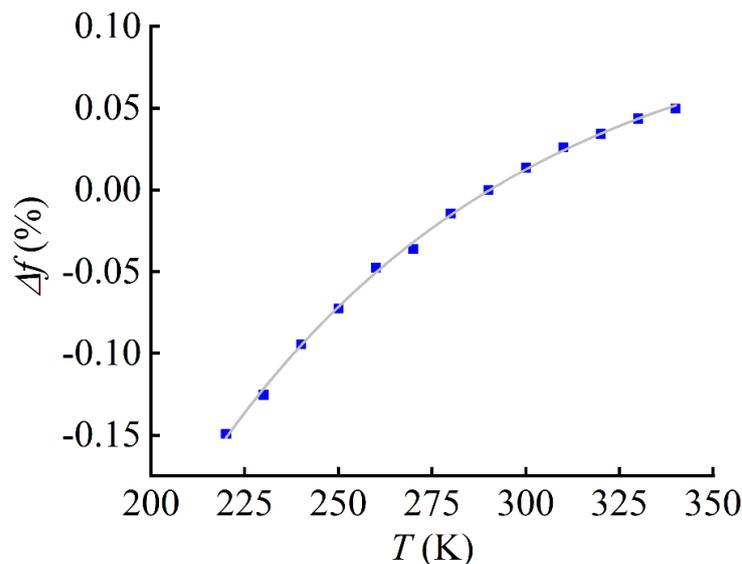


Рис. 6. Зависимость резонансной частоты от температуры.

Таким образом, в работе впервые исследовано влияние температуры на линейный МЭ эффект в структуре, состоящей из монокристалла лангатата с напыленными с обеих сторон тонкими слоями аморфного ферромагнетика. Показано, что МЭ коэффициент линейно уменьшается с ростом температуры до 340 К, что хорошо согласуется с результатами, полученными в статье [4].

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-7910128-П) и Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (проект № FSME-2024-0001)

Список использованной литературы:

1. Kopyl S., Surmenev R., Surmeneva M. et. al. Magnetolectric effect: principles and applications in biology and medicine– a review // *Materials Today Bio.* - 2021. - V. 12 - 100149.
2. Nan C.-W., Bichurin M. I., Dong S., Viehland D.; Srinivasan G. Multiferroic magnetolectric composites: Historical perspective, status, and future directions // *Journal of Applied Physics* - 2008, - № 103 - 031101.
3. Vopson M.M., Fetisov Y.K., Caruntu G. et. al. Measurement Techniques of the Magneto-Electric Coupling in Multiferroics // *Materials.* - 2017. - V.10, № 8. - 963.
4. Burdin, D.A., Ekonomov, N.A., Chashin, D.V. et. al. Temperature Dependence of the Resonant Magnetolectric Effect in Layered Heterostructures // *Materials.* - 2017 - № 10. - 1183.

УДК 537.633.9

Влияние магнитного поля на формирование структуры и магнитоэлектрические свойства композитов

Поддубная Н.Н.

к.ф.-м. н., заведующий лабораторией нелинейных материалов
ГНУ ИТА НАН Беларуси

Лалетин В.М.

к.ф.-м. н., ведущий научный сотрудник лаборатории нелинейных материалов
ГНУ ИТА НАН Беларуси

Разбаев П.А.

младший научный сотрудник лаборатории нелинейных материалов, аспирант
ГНУ ИТА НАН Беларуси

Кудыбин М.В.

младший научный сотрудник лаборатории нелинейных материалов, аспирант
ГНУ ИТА НАН Беларуси

Набздоров И.С.

аспирант ГНУ ИТА НАН Беларуси

***Аннотация.** Магнитоэлектрические композиционные материалы являются многообещающими для нового класса устройств микроэлектроники и стрейнтроники, обеспечивая взаимное преобразование напряженности магнитного поля и поляризации в широкой области температур. Величина магнитоэлектрического эффекта в них определяется магнито- и пьезо стрикционными свойствами компонент структуры. Представленная работа позволяет оценить вклад магнитного поля, воздействующего в процессе электрохимического осаждения, на величину магнитоэлектрического преобразования в композите. Понимание влияния магнитного и электрического полей на магнитоэлектрическое преобразование определяет фундаментальный интерес к решаемой задаче. Возможность смещения максимального магнитоэлектрического эффекта в область малых магнитных полей важно для решения практической задачи по использованию магнитоэлектрического преобразования.*

***Ключевые слова:** композиционные материалы, электрохимическое осаждение, поляризация, магнитоэлектрический эффект*

The influence of a magnetic field on the formation of structure and magnetoelectric properties of composites

Poddubnaya N.N.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences.,
Head of Laboratory of Nonlinear Materials SSI ITA NAS of Belarus

Laletin V.M.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Leading Researcher, Laboratory of Nonlinear Materials SSI ITA NAS of Belarus

Razbaev P.A.

Junior Researcher, Laboratory of Nonlinear Materials, Postgraduate Student
SSI ITA NAS of Belarus

Kudybin M.V.

Junior Researcher, Laboratory of Nonlinear Materials, Postgraduate Student
SSI ITA NAS of Belarus

Nabzdorov I.S.

postgraduate student SSI ITA NAS of Belarus

Annotation. *Magnetoelectric composite materials are promising for a new class of microelectronics and straintronics devices, providing mutual conversion of magnetic field strength and polarization over a wide temperature range. The magnitude of the magnetoelectric effect in them is determined by the magneto- and piezoelectric properties of the structure components. The presented work makes it possible to estimate the contribution of the magnetic field acting during the electrochemical deposition process on the magnitude of the magnetoelectric conversion in the composite. Understanding the influence of magnetic and electric fields on the magnetoelectric transformation determines the fundamental interest in the problem being solved. The possibility of shifting the maximum magnetoelectric effect to the region of low magnetic fields is important for solving the practical problem of using magnetoelectric conversion.*

Keywords: *composite materials, electrochemical deposition, polarization, magnetoelectric effect*

За последние десятилетия теория магнитоэлектрического взаимодействия получила стремительное развитие. Несмотря всесторонние исследования магнитоэлектрических композитов интерес к ним не только не снижается, но и усиливается, благодаря новым возможностям применения материалов [1-3]. При выборе материалов исследований постулатом стало высказывание Voongard – максимальные магнитоэлектрические свойства определяются пьезо- и магнитоэлектрическими свойствами компонент композита, и взаимодействием между этими компонентами [4]. Теоретически и экспериментально было показано, что величина эффекта в слоистых структурах может быть существенно выше, чем в объемных композитах [3, 5]. Проведена экспериментальная и теоретическая оценка взаимодействия компонент структуры посредством добротности в зависимости от метода формирования композита [6]. Эти и другие факторы определили выбор методики получения материалов исследования электрохимическим осаждением.

Анализируя магнитоэлектрические свойства пленок магнитомягких металлов, полученных различными методами, было обнаружено существенное изменение их свойств. Отличия определяются многими факторами, зависящими от методов получения покрытий. К ним можно отнести соотношение параметров решетки при формировании пленок на подложках, наличие внешних и внутренних напряжений в ходе формирования покрытий металлов. Кроме того, ряд исследований показал существенное влияние наличия внешнего магнитного поля на магнитные свойства покрытий [7]. Ранее нами было показано влияние поляризации подложки на свойства структуры и скорость роста металлических покрытий [6]. Здесь, мы попробовали систематизировать полученные экспериментальные результаты влияния магнитного поля и поляризации в процессе получения магнитоэлектрических покрытий электрохимическим осаждением на характер и величину магнитоэлектрического эффекта композитов.

В эксперименте участвовали композиты металл/пьезоэлектрик/металл на основе титаната бария, цирконат-титанат свинца и поливинилфторид, полученные химическим

и электрохимическим осаждением никеля. Керамику различных составов получали традиционным методом высокотемпературного спекания. Пленки полимера – по технологии, описанной в [1]. Использованы образцы в форме дисков диаметром 8,5 – 9 мм (в зависимости от состава керамики), и образцы в форме квадратов с длиной стороны 4 мм. Высота всех образцов на основе керамики составляла 400 мкм, на основе полимера – 500 мкм. Никелевые электроды нанесены методом химической металлизации (на керамику) и магнетронного напыления (на ПВДФ). Образцы одинакового состава и формы, полученные при прочих равных условиях, делили на четыре одинаковые части. Первая часть была поляризована, затем подверглась электрохимическому осаждению (e/P). Вторая часть была поляризована, затем подверглась электрохимическому осаждению в магнитном поле (P/eI+H). Третья и четвертая части сначала осадили в магнитном поле и без него, а после поляризовали (соответственно eI/P и eI+H/P).

Так, определено, что воздействие магнитного поля в процессе осаждения меняет не только магнитные свойства пленок, но и магнитоэлектрические свойства композитов в целом. При этом, имеет значение поляризация подложки. Осаждение в магнитном поле на поляризованную подложку приводит к ослаблению магнитоэлектрического коэффициента (например рис. 1). В то время как поляризация композита, полученного с использованием магнитного поля в процессе осаждения, позволяет усилить величину МЭ коэффициента и перераспределить максимальные величины между продольным и поперечным МЭ эффектом.

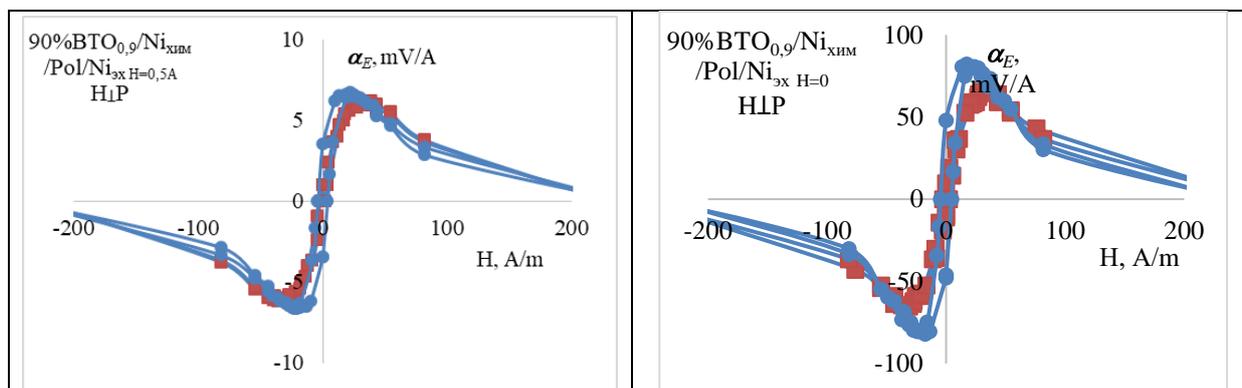


Рисунок 1 – Линейная полевая зависимость МЭ коэффициента состава $50\% \text{Ba}_{0,65}\text{Ca}_{0,35}\text{TiO}_3 + 50\% \text{BaTi}_{0,9}\text{Zr}_{0,1}\text{O}_3$ при поперечной ориентации

Эффекты зависят от взаимной ориентации поляризации и магнитных полей как при получении, так и при исследовании композитов. Помимо усиления магнитоэлектрического коэффициента наблюдается смещение его максимальной величины в область малых магнитных полей для гибридных композитов, полученных осаждением на керамику с магнитоэлектрическими свойствами.

Такие проявления позволяют управлять магнитоэлектрическими свойствами композитов, добиваясь максимального магнитоэлектрического преобразования при определенной пространственной ориентации композита во внешнем магнитном поле, либо напротив – создавать композиты с достаточно равномерным распределением магнитоэлектрического коэффициента при продольной и поперечной ориентации образца ко внешние магнитным полям. Полученный результат согласуется с существующей теорией пьезоэлектрических, магнитоэлектрических и магнитоэлектрических материалов. Понимание влияния магнитного и электрического полей на магнитоэлектрическое преобразование определяет фундаментальный интерес к решаемой задаче, и позволяет определить механизмы управления магнитоэлектрическим эффектом, что важно для решения практической задачи по использованию магнитоэлектрического преобразования.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ в рамках грантов Ф20МЦ–006, Ф21ВА–006, Ф23МЭ–009, задания 1.14 Государственной программы научных исследований «Материаловедение, новые материалы и технологии».

Список использованной литературы:

1. C. Tu, Z.-Q. Chu, B. Spetzler, P. Hayes, C.-Z. Dong, X.-F. Liang, N.-X. Sun, Mechanical-resonance-enhanced thin-film magnetoelectric heterostructures for magnetometers, mechanical antennas, tunable RF inductors, and filters// *Materials* – 2019– 12 (14) – 2259, <https://doi.org/10.3390/ma12142259>.
2. M.M. Vopson, Fundamentals of multiferroic materials and their possible applications// *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* – 2015 – 40 (4) – 223–250, <https://doi.org/10.1080/10408436.2014.992584>.
3. C.-W. Nan, M.I. Bichurin, S. Dong, D. Viehland, G. Srinivasan, Multiferroic magnetoelectric composites: historical perspective, status, and future directions// *J. Appl. Phys.* –2008. – 103 (3) – 031101, <https://doi.org/10.1063/1.2836410>.
4. Boomgaard V.D.J. An in Situ Grown eutectic Magnetoelectric composite material. Part 1. Composition and unidirectional solidification // *J. Mater. Sci.* – 1974. – V.9, N.10 – P. 1705-1709.
5. А.А. Бухараев, А.К. Звездин, А.П. Пятаков, Ю.К. Фетисов// *УФН* – 2018 – 188 –1288. DOI: 10.3367/UFNe.2018.01.038279]
6. Paddubnaya, N.N. Dependence of magnetoelectric effect in layered lead zirconate-titanate / nickel heterostructures on the interface type / N.N. Paddubnaya [at al]. // *Functional materials.* – 2010. – Vol. 17, No 3 – P. 329–333.
7. A.I. Vorobjova, D.L. Shimanovich, K.I. Yanushkevich, S.L. Prischepa, E.A. Outkina, Properties of Ni and Ni–Fe nanowires electrochemically deposited into a porous alumina template// *Beilstein J. Nanotechnol.* – 2016. – 7. –1709–1717, <https://doi.org/10.3762/bjnano.7.163>.

УДК 537.6/. 8

Мультифизическая модель композитного слоистого мультиферроика для оптимизации магнитоэлектрических композитов $[Fe_{10}Ni_{90}/Cu]_p/Fe_{10}Ni_{90}/PVDF$ **Кудюков Е.В.**

к.ф.-м. н., научный сотрудник ОМТТ НИИ ФПМ ИЕНиМ УрФУ

Калинин М.А.

Лаборант-исследователь ОМТТ НИИ ФПМ ИЕНиМ УрФУ

Балымов К.Г.

к.ф.-м. н., старший научный сотрудник ОМТТ НИИ ФПМ ИЕНиМ УрФУ

Аннотация. В данной работе построена мультифизическая модель пленочного композитного мультиферроика в программном пакете COMSOL Multiphysics. Проведенная валидация на экспериментальных данных композитов типа $[Fe_{10}Ni_{90}/Cu]_p/Fe_{10}Ni_{90}/PVDF$, где p -количество периодов структуры, позволила заключить что модель дает хорошее согласие с экспериментальными данными. Основным результатом данной работы является установление механизма изменения магнитоэлектрического эффекта в зависимости от параметров наноструктурированных пленок. Так, основным фактором увеличения МЭ сигнала при увеличении толщины слоя $Fe_{10}Ni_{90}$ и количества периодов p является уменьшение демпфирующего влияния подложки. Полученная модель может использоваться для оптимизации подобного рода структур, а также для нахождения собственных частот колебаний для определения резонансной частоты.

Ключевые слова: наноструктуры, мультиферроики, моделирование, метод конечных элементов

Multiphysics model of composite layered multiferroic for optimization of magnetoelectric composites $[Fe_{10}Ni_{90}/Cu]_p/Fe_{10}Ni_{90}/PVDF$ **Kudyukov E.V.,**

Candidate of physical and mathematical Sciences, researcher, Solid State Magnetism department, INSM of UrFU

Kalinin M.A.,

Assistant researcher, Solid State Magnetism department, INSM of UrFU

Balymov K.G.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior researcher, Solid State Magnetism department, INSM of UrFU

Annotation. In this work, a multiphysics model of a film composite multiferroic was built in the COMSOL Multiphysics software package. Validation carried out on experimental data of composites of the $[Fe_{10}Ni_{90}/Cu]_p/Fe_{10}Ni_{90}/PVDF$ type, where p is the number of periods of the structure, allowed us to conclude that the model gives good agreement with the experimental data. The main result of

this work is to establish the mechanism for changing the magnetoelectric effect depending on the parameters of nanostructured films. Thus, the main factor in increasing the ME signal with increasing thickness of the $Fe_{10}Ni_{90}$ layer and the number of periods p is a decrease in the damping effect of the substrate. The resulting model can be used to optimize structures of this kind, as well as to find natural vibration frequencies to determine the resonant frequency.

Keywords: nanostructures, multiferroics, modeling, finite element method

Магнитоэлектрический эффект является одним из наиболее перспективных предметов исследований последних нескольких десятилетий [1]. Среди множества материалов с МЭ эффектом, наибольшее внимание уделяется композитным структурам, в которых достигаются существенно большие значения коэффициента магнитоэлектрической связи чем в так называемых «природных» мультиферроиках [2]. Одним из примеров таких композитных структур являются пленочные слоистые мультиферроики [3-4], в которых высокие значения магнитоэлектрической связи достигаются за счет сильной механической связи между слоями. В таких структурах перспективным является использование полимерного слоя PVDF в качестве сегнетоэлектрической компоненты [5], за счет реализации сильной механической связи между компонентами наряду с высокими значениями пьезоэлектрического коэффициента d_{33} . В качестве магнитоэлектрической компоненты может выступать сплав $Fe_{10}Ni_{90}$ обладающий отличными магнитомягкими свойствами и относительно высокой константой магнитоэлектрической связи (-20 ppm). Одной из проблем пленочных мультиферроиков, несмотря на высокие значения МЭ связи, является значительно меньший МЭ сигнал по сравнению с массивными образцами из-за небольшого объема входящих в них компонент. Однако, наращивание толщины магнитоэлектрического слоя происходит через реализацию «закритического» магнитного состояния, характеризующегося возникновением перпендикулярной компоненты намагниченности, и существенно ухудшающим магнитомягкие свойства $Fe_{10}Ni_{90}$. Отличным решением данной проблемы может являться использование наноструктурирования данного слоя, что позволит увеличить объем магнитоэлектрической компоненты и избежать возникновения перпендикулярной анизотропии. С целью наиболее эффективной оптимизации характеристик таких наноструктурированных структур и установлению физических факторов влияющих на величину их МЭ эффекта целесообразно использовать современные методы компьютерного моделирования. Таким образом, целью данной работы является построение мультифизической модели композитного, наноструктурированного мультиферроика, а также ее валидация на экспериментальных данных, полученных для данных структур, и проведение дальнейшей оптимизации для достижения максимальной величины МЭ эффекта.

Для построения компьютерной модели использовался современный программный пакет COMSOL Multiphysics. В нем использовался модуль «MEMS» для учета электромагнитных явлений совместно с механическими и температурными. Экспериментальные данные получены на пленках типа $[Fe_{10}Ni_{90}(x)/Cu(y)]_p/Fe_{10}Ni_{90}(x)/PVDF(200 \text{ нм})$ с варьируемыми параметрами толщины слоев (x,y) и периодом (p). Наноструктурированные пленки $Fe_{10}Ni_{90}$ получались методом магнетронного напыления в атмосфере аргона на стеклянные подложки фирмы Corning толщиной 0.2 мм, в присутствии магнитного поля ~200 Э в плоскости подложки. Для нанесения полимерного слоя PVDF использовался метод спинкоатинга на установке SpinNXC при максимальной скорости вращения 10000 об/м.

На рис. 1 представлен схематичный вид моделируемой структуры в COMSOL Multiphysics. Для упрощения построения сетки слои Cu заменялись на граничное условие позволяющее учитывать эффективные свойства слоя и его толщину.

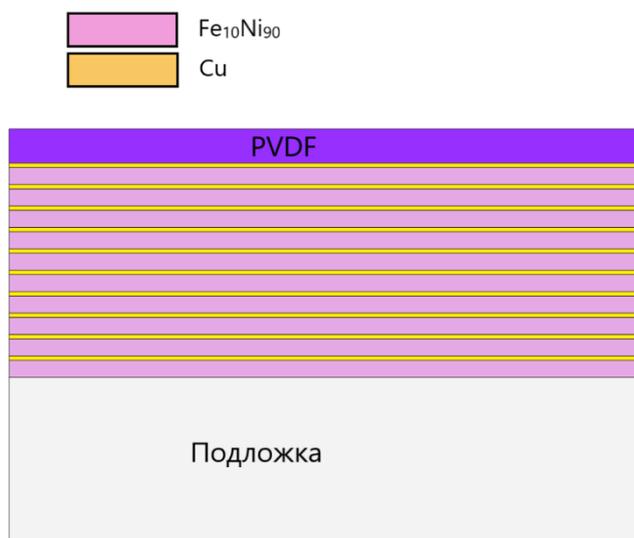


Рисунок 1. Схематичный вид многослойной структуры, построенной в COMSOL Multiphysics.

На рис. 2 представлены результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных для пленок $[\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{90}(100 \text{ нм})/\text{Cu}(3 \text{ нм})]_p/\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{90}(100 \text{ нм})/\text{PVDF}(200 \text{ нм})$ с варьируемым количеством периодов p .

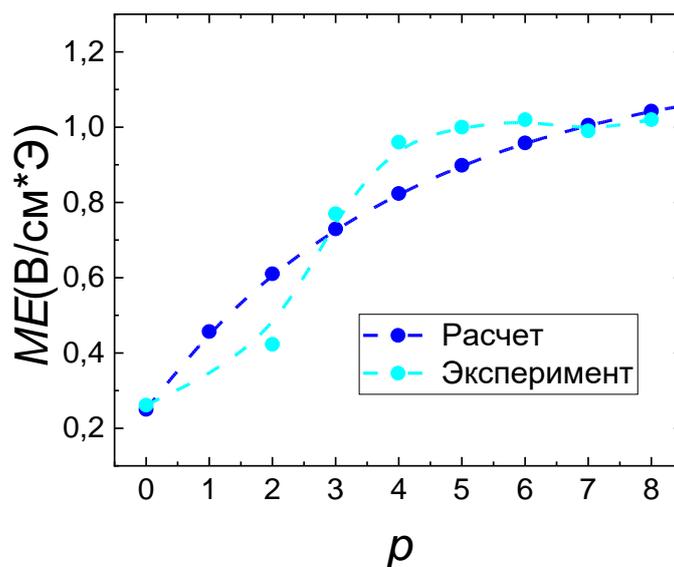


Рисунок 2. Расчетная и экспериментальная зависимость коэффициента магнитоэлектрической связи в пленках $[\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{90}(100 \text{ нм})/\text{Cu}(3 \text{ нм})]_p/\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{90}(100 \text{ нм})/\text{PVDF}(200 \text{ нм})$.

Как можно видеть из рис. 2, мультифизическая модель композитного мультиферроика дает хорошее количественное согласие с экспериментальными данными при использовании табличных материальных свойств из внутренней библиотеки COMSOL.

Построенная модель позволила заключить что определяющим фактором роста коэффициента магнитоэлектрической связи при увеличении периодов в структуре является уменьшение демпфирующего влияния подложки, препятствующей свободной деформации магнитоэлектрического наноструктурированного слоя $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{90}$. На рис. 3 представлена эпюра распределения напряжения по Мизесу по толщине данной структуры.

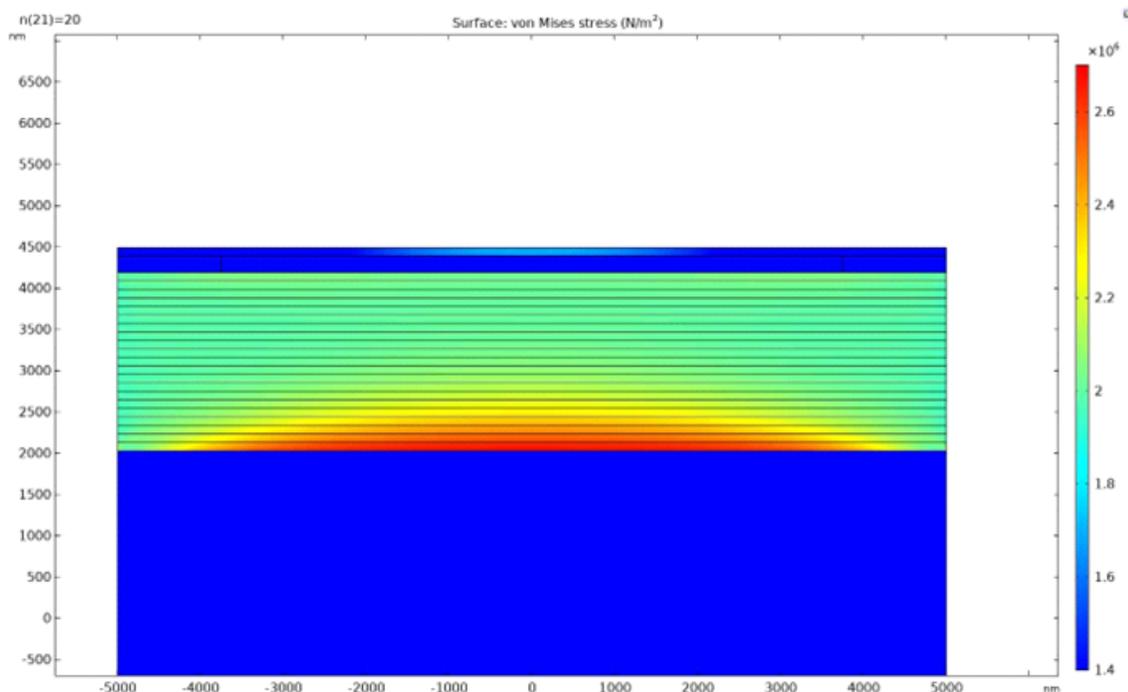


Рисунок 3. Распределение напряжений по Мизесу (МПа) по толщине композитной структуры.

Как можно заметить из рис. 3, величина напряжений в толщине наноструктурированного слоя существенно снижается в направлении от подложки к пленке PVDF, что обуславливает рост магнитоэлектрического эффекта.

Таким образом, на основе экспериментальных данных проведена валидация модели, определены факторы влияющие на изменение коэффициента магнитоэлектрической связи, а также проведена оптимизация многослойной структуры на основе данной модели, при варьировании толщины слоев $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{90}$ и Cu.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 23-22-00394.

Список использованной литературы:

1. M. Fiebig // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2005 – 38 – R123.
2. R. Jahns, A. Piorra et al. // J. Am. Ceram. Soc. – 2013- 96 – 1673-1681.
3. X. Liang, C. Dong et al. // Sensors – 2020 – 20(5) – 1532.
4. D.R. Patil, A. Kumar, J. Ryu // Sensors – 2021– 21(23) – 8012.
5. R.I. Harry, S. Zainnudin, S. Jeelani // Materials Science Forum – 2023 – 1109 – 115-121.

УДК 537.9

Исследование магнитоэлектрического эффекта в мультиферроидных пленках на основе PVDF**Савин В.В.**

инженер-исследователь НОЦ «Умные материалы и биомедицинские приложения, БФУ им. И. Канта

Игнатов А.А.

инженер-исследователь НОЦ «Умные материалы и биомедицинские приложения, БФУ им. И. Канта

Колесникова В.Г.

младший научный сотрудник НОЦ «Умные материалы и биомедицинские приложения, БФУ им. И. Канта

Сальников В.Д.

лаборант-исследователь НОЦ «Умные материалы и биомедицинские приложения, БФУ им. И. Канта

Омельянчик А.С.

научный сотрудник НОЦ «Умные материалы и биомедицинские приложения, БФУ им. И. Канта

Воронцов П.А.

лаборант-исследователь НОЦ «Умные материалы и биомедицинские приложения, БФУ им. И. Канта

Ершов П.А.

научный сотрудник НОЦ «Умные материалы и биомедицинские приложения, БФУ им. И. Канта

Родионова В.В.

к.ф.-м. н., директор НОЦ «Умные материалы и биомедицинские приложения, БФУ им. И. Канта

Аннотация. В данной работе исследован магнитоэлектрический эффект в полимерных композитах на основе поливинилиденфторида с добавлением ферромагнитного нано- и микроразмерного наполнителя. С практической точки зрения подобные материалы интересны тем, что на сегодняшний день не разработан оптимальный протокол создания полимерных композитов с дисперсным наполнителем, обладающих высоким магнитоэлектрическим откликом; с фундаментальной точки зрения – механизм возбуждения ферромагнитным наполнителем напряжений в полимерной матрице до конца не понятен.

Ключевые слова: магнитоэлектрический эффект, магнитоэлектрический коэффициент, пьезоэлектричество, композитные материалы.

Study of the magnetoelectric effect in multiferroic films based on PVDF**Savin V.V.**

Research engineer of REC “Smart materials and biomedical applications”, Immanuel Kant Baltic Federal University

Ignatov A.A.

Research engineer of REC “Smart materials and biomedical applications”, Immanuel Kant Baltic Federal University

Kolesnikova V.G.

Junior researcher of REC “Smart materials and biomedical applications”, Immanuel Kant Baltic Federal University

Salnikov V.D.

Research assistant of REC “Smart materials and biomedical applications”, Immanuel Kant Baltic Federal University

Omelyanchik A.S.

Research of REC “Smart materials and biomedical applications”, Immanuel Kant Baltic Federal University

Vorontsov P.A.

Research assistant of REC “Smart materials and biomedical applications”, Immanuel Kant Baltic Federal University

Ershov P.A.

Research of REC “Smart materials and biomedical applications”, Immanuel Kant Baltic Federal University

Rodionova V.V.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, director of REC “Smart materials and biomedical applications”, Immanuel Kant Baltic Federal University

Annotation. *In this work, the magnetoelectric effect in polymer composites based on polyvinylidene fluoride with the ferromagnetic nano- and microfiller was studied. From a practical point of view, such materials are interesting because optimal protocol has not been developed for creating polymer composites with a dispersed filler; from a fundamental point of view, the mechanism of excitation of stresses in a polymer matrix by a ferromagnetic filler is not fully understood.*

Keywords: *magnetoelectric effect, magnetoelectric coefficient, piezoelectricity, composite materials.*

Полимерные композиты, обладающие магнитоэлектрическим эффектом, являются перспективным материалом для создания гибких датчиков магнитного поля, накопителей энергии, измерительных приборов. Также полимерные композиты с дисперсным наполнителем, не содержащие в своем составе керамики и не имеющие слоистую структуру, являются перспективным материалом в области биомедицинских приложений, так как

поверхностный заряд, создаваемый в композите с помощью прикладываемого к нему магнитного поля, способен влиять на дифференциацию стволовых клеток и стимулировать их рост [1].

Композитные пленки из поливинилиденфторида с ферромагнитным нано- и микроразмерным наполнителем, исследованные в данной работе, были изготовлены несколькими способами: методом рабельного ножа [2], FDM методом 3D-печати из расплава и DIW методом послойной 3D-печати полимером с наполнителем, растворенным в диметилформамиде (DMF) и тетрагидрофуране (THF). В качестве наполнителя использовались наночастицы феррита-кобальта (CFO), гексаферрита стронция (SrFO) и аморфные ферромагнитные микропровода из сплава состава железо-кремний-бор (FeSiB). Толщина полученных композитов находится в диапазоне 20-200 мкм, размер 10x10 мм.

Синтезированные композиты были охарактеризованы с помощью вибрационной магнитометрии, рентгеновской дифракции, дифференциальной сканирующей калориметрии, ИК-Фурье спектроскопии; был измерен магнитоэлектрический коэффициент α_{ME} [3, 4] и пьезоэлектрический коэффициент d_{33} [5].

Оценено влияние типа магнитного наполнителя, его размера и наличия покрытия, а также влияние анизотропии наполнителя, наведенной внешним магнитным полем в процессе синтеза композитных пленок, на величину магнитоэлектрического коэффициента в мультиферроидных пленках.

По итогам проведенного исследования был подобран оптимальный протокол создания композитных мультиферроидных микро-пленок, обладающих максимальным магнитоэлектрическим коэффициентом $\alpha_{ME} \approx 20$ мВ/см*Э.

Данное исследование было выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 21-72-30032).

Список использованной литературы:

1. Omelyanchik A. et al. Boosting magnetoelectric effect in polymer-based nanocomposites // *Nanomaterials*. – 2021. – Т. 11. – №. 5. – С. 1154.
2. Orudzhev F. et al. Porous hybrid PVDF/BiFeO₃ smart composite with magnetic, piezophotocatalytic, and light-emission properties // *Catalysts*. – 2023. – Т. 13. – №. 5. – С. 874.
3. Hassanpour Amiri M., Sharifi Dehsari H., Asadi K. Magnetoelectric coupling coefficient in multiferroic capacitors: Fact vs Artifacts // *Journal of Applied Physics*. – 2022. – Т. 132. – №. 16.
4. Duong G. V. et al. The lock-in technique for studying magnetoelectric effect // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2007. – Т. 316. – №. 2. – С. 390-393.
5. Savin V.V. et al. Studying physical properties of a polyvinylidene fluoride/lead zirconate titanate piezoelectric composite // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, – 2024. – Т. 88. – №. 4. – С. 576–580 (принята к печати).

УДК 537.63 : 538.955

Синаптическое поведение композитной магнитоэлектрической гетероструктуры FeBSiC - ЦТС**Федулов Ф.А.**к.т.н., научный сотрудник НОЦ «Магнитоэлектрические материалы и устройства»
РТУ МИРЭА**Савельев Д.В.**

к.ф.-м. н., инженер-исследователь НОЦ «Магнитоэлектрические материалы и устройства» РТУ МИРЭА

Болотина Е.В.

студент кафедры наноэлектроники ИПТИП РТУ МИРЭА

Джапаридзе М.В.

аспирант кафедры наноэлектроники ИПТИП РТУ МИРЭА

Фетисов Ю.К.д.ф.-м. н., директор НОЦ «Магнитоэлектрические материалы и устройства»
РТУ МИРЭА

***Аннотация.** В настоящее время одним из перспективных направлений развития высокопроизводительных и низкопотребляющих вычислительных систем является создание искусственных синаптических устройств, имитирующих функции биологических синапсов. В работе продемонстрировано синаптическое поведение композитной мультиферроидной гетероструктуры на основе пьезокерамики цирконата-титаната свинца и аморфного магнитного сплава Metglas при резонансном возбуждении магнитоэлектрического (МЭ) эффекта и приложении импульсов электрического поля различной амплитуды и полярности. МЭ коэффициент α_E рассматривали в качестве синаптического веса, а выходное электрическое напряжение гетероструктуры как постсинаптический потенциал. В ходе исследования показана возможность имитации таких синаптических характеристик, как долгосрочное возбуждение (LTP) и угнетение (LTD) в МЭ гетероструктуре, а также синаптической пластичности, зависящей от времени прихода спайка (STDP). Данная работа демонстрирует возможность создания нейроморфных вычислительных систем на основе мультиферроидных композитных гетероструктур «пьезоэлектрик-ферромагнетик».*

***Ключевые слова:** магнитоэлектрический эффект, мультиферроидная гетероструктура, синаптическое устройство, магнитострикция, пьезоэлектричество.*

Synaptic behavior of composite magnetoelectric heterostructure FeBSiC - PZT**Fedulov F.A.,**Candidate of Technical Sciences, Research Fellow, Research-Education Center
"Magnetoelectric materials and devices" RTU MIREA**Savelev D.V.,**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Engineer-researcher, Research-Education Center "Magnetoelectric materials and devices" RTU MIREA

Bolotina E.V.,

student, Department of Nanoelectronics, IPTIP of MIREA – Russian Technological University

Dzaparidze M.V.,

PhD student, Department of Nanoelectronics, IPTIP of MIREA – Russian Technological University

Fetisov Y.K.,

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Director, Research-Education Center "Magnetoelectric materials and devices" RTU MIREA

Annotation. *Currently, one of the promising directions for the development of high-performance and low-power computing systems is the research in the field of artificial synaptic devices that imitate the functions of biological synapses. The work demonstrates the synaptic behavior of a composite magnetoelectric heterostructure based on piezoceramics of lead zirconate titanate and amorphous magnetic alloy Metglas at resonant excitation of the magnetoelectric (ME) effect and the application of electric field pulses of different amplitudes and polarity. The ME coefficient α_E was considered as the synaptic weight, and the output electrical voltage of the heterostructure as the postsynaptic potential. The study demonstrated the possibility of simulating synaptic characteristics such as long-term potentiation (LTP) and depression (LTD) in the ME heterostructure, as well as spike-timing-dependent synaptic plasticity (STDP). This work demonstrates the possibility of creating neuromorphic computing systems based on piezoelectric-ferromagnetic magnetoelectric composite heterostructures.*

Keywords: *magnetoelectric effect, multiferroic heterostructure, synaptic device, magnetostriction, piezoelectricity*

Быстрое развитие информационных технологий стимулирует исследования в области вычислительных систем, обладающих высокой эффективностью и малым энергопотреблением. Одним из перспективных направлений является создание нейроморфных вычислительных систем, выходящих за рамки традиционной архитектуры фон Неймана [1-4]. Основным элементом таких систем являются искусственные синаптические устройства, способные воспроизводить функции биологических синапсов.

Одним из направлений исследования в области нейроморфных систем является создание синаптических устройств на основе магнитоэлектрических (МЭ) эффектов в композитных мультиферроидных гетероструктурах ферромагнетик-пьезоэлектрик (ФМ-ПЭ) [5, 6]. МЭ эффекты в таких слоистых гетероструктурах ФМ-ПЭ проявляются в виде генерации электрического поля при действии на структуру магнитного поля (прямой эффект) [7].

Данная работа посвящена исследованию синаптического поведения в МЭ гетероструктуре на основе пьезокерамики цирконата-титаната свинца (ЦТС) и аморфного магнитного сплава Metglas в резонансном режиме, что значительно увеличивает значение МЭ коэффициента и амплитуду генерируемого МЭ структурой напряжения.

В измерениях использовали гетероструктуру, содержащую слой из пьезокерамики цирконата-титаната свинца состава $\text{PbZr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}\text{O}_3$ (ЦТС-19) толщиной $a_p = 250$ мкм с Ag-электродами (НИИ Элпа, Россия) и слой из аморфного магнитного сплава FeBSiC (Metglas 2605SA1, Metglas Inc., USA) толщиной $a_m = 25$ мкм. Слои были механически соединены с

помощью цианоакрилатного клея. Размеры гетероструктуры в плоскости составляли 19 мм × 8 мм. (рис.1)

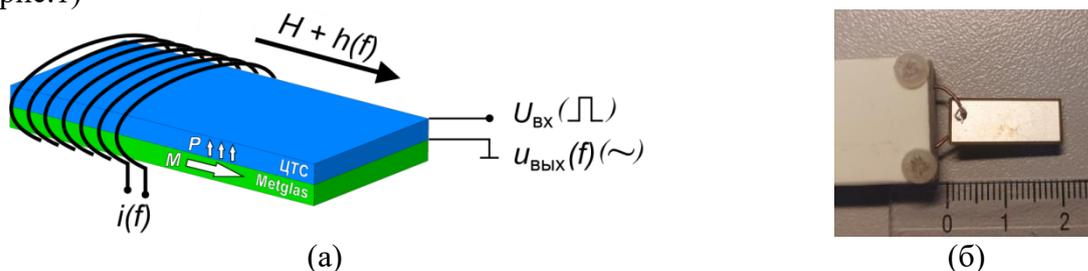


Рисунок 1. Схематическое изображение (а) и внешний вид (б) исследуемой МЭ гетероструктуры.

В ходе измерений гетероструктуру помещали в переменное возбуждающее магнитное поле $h\cos(2\pi ft)$ амплитудой $h = 0-4.8$ Э и частотой $f = 40-120$ кГц и постоянное магнитное поле $H = 0-100$ Э. Поля были направлены вдоль длинной оси образца. При исследовании влияния импульсов электрического поля на величину МЭ коэффициента α_E , к электродам ЦТС слоя структуры прикладывали импульсы напряжения прямоугольной формы разной полярности длительностью $\tau = 5$ с амплитудой $U = 0-400$ В, которые создавали в слое ЦТС импульсы электрического поля с амплитудой $E = 0-16$ кВ/см.

Для мультиферроидной гетероструктуры, с точки зрения нейроморфного поведения, приходящий импульс электрического поля можно рассматривать как потенциал действия. МЭ коэффициент α_E является аналогом синаптического веса, а генерируемое гетероструктурой МЭ напряжение u_m играет роль постсинаптического потенциала – возбуждающего (EPSP) или тормозного (IPSP). Сохранение устойчивого состояния структуры после воздействия импульсов электрического поля, приводящее к увеличению или уменьшению выходного напряжения u_m , представляет собой долгосрочное возбуждение (LTP) и депрессию (LTD), соответственно.

Для моделирования нейроморфного поведения в гетероструктуре ЦТС-Metglas к ПЭ слою прикладывали импульсы электрического поля различной полярности, постепенно увеличивая напряженность поля, с последующим измерением МЭ характеристик гетероструктуры. Из рис.2 видно, что первый импульс поля E положительной полярности амплитудой 16 кВ/см поляризует ПЭ слой и структура генерирует напряжение с амплитудой $u_m \approx 620$ мВ. Последующие импульсы поля отрицательной полярности с возрастающей напряженностью приводят сначала к уменьшению амплитуды генерируемого напряжения, а затем и к изменению фазы напряжения на π . Последующее воздействие на структуру электрических импульсов положительной полярности с возрастающей амплитудой поля приводит к уменьшению амплитуды напряжения u_m до нуля, смену фазы на π и последующему росту амплитуды до величины насыщения. Аналогичным образом при приложении к структуре импульсов электрического поля изменялись величина и знак МЭ коэффициента α_E .

Из рис.2 следует, что приложение импульсов поля положительной полярности приводит к увеличению α_E и u_m , в то время как импульсы поля отрицательной полярности уменьшают эти параметры. Таким образом, увеличение u_m эквивалентно появлению EPSP, а его уменьшение представляет собой появление IPSP.

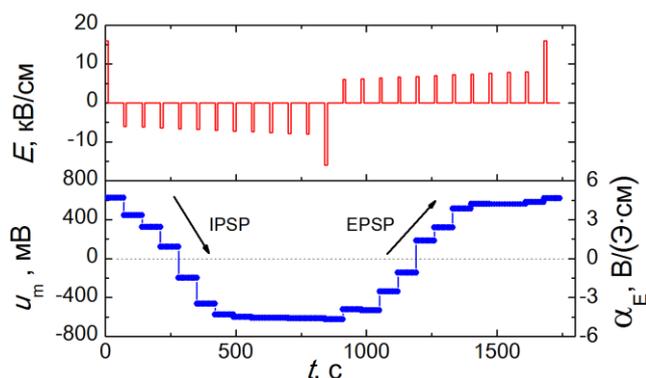


Рисунок 2. Зависимости генерируемого напряжения u_m и МЭ коэффициента α_E гетероструктуры от времени при приложении к ней импульсов электрического поля E различной амплитуды и полярности. Смена знака u_m и α_E на соответствует изменению фазы генерируемого МЭ напряжения на π .

В работе экспериментально продемонстрирована имитация синаптической пластичности STDP, а также таких синаптических свойств как LTD, LTP, EPSP и IPSP в композитной МЭ гетероструктуре ЦТС-Metglas при резонансном возбуждении за счёт изменения МЭ коэффициента α_E при приложении импульсов электрического поля различной амплитуды и полярности, выступающих в качестве потенциала действия. Резонансное возбуждение МЭ гетероструктуры значительно увеличивает значение МЭ коэффициента, до $\alpha_E = 5.2$ В/Э·см, и величину генерируемого МЭ напряжения до $u_m = 620$ мВ, по сравнению с возбуждением вне резонанса, описанном в предшествующих исследованиях других авторов.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-72-01053. Часть измерений проведена на оборудовании Объединенного Центра коллективного пользования РТУ МИРЭА.

Список использованной литературы:

1. van de Burgt Y., Melianas A., Keene S.T., Malliaras G., Salleo A. Organic Electronics for neuromorphic computing // Nature Electronics. – 2018. – Vol.1. – №7. – P.386–397.
2. Jeong D.S., Hwang C.S. Nonvolatile memory materials for neuromorphic intelligent machines // Advanced Materials. – 2018. – V.30. – №42. – Art. No.1704729.
3. Islam R., Li H., Chen P.-Y., Wan W., Chen H.-Y., Gao B., et al. Device and materials requirements for neuromorphic computing // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2019. – V.52. – №11. – Art. No.113001.
4. Zhu J., Zhang T., Yang Y., Huang R. A comprehensive review on emerging artificial neuromorphic devices // Applied Physics Reviews. – 2020. – V.7. – №1. – Art. No.011312
5. Lu P.-P., Shen J.-X, Shang D.-S, Sun Y. Artificial synaptic device based on a multiferroic heterostructure // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2019. – V.52 – №46. – Art. No.465303.
6. Shen J, Shang D, Chai Y, Wang S, Shen B, Sun Y. Mimicking synaptic plasticity and neural network using memtransistors // Advanced Materials. – 2018. – V.30. – №12. – Art. No. 1706717.
7. Fetisov Y.K., Srinivasan G. Nonlinear magnetoelectric effects in layered multiferroic composites // Journal of Applied Physics. – 2024. – V.135. – №2. – Art. No. 024102.

УДК 538.956

Управляемый индуктор на основе несимметричной кольцевой магнитоэлектрической гетероструктуры

Мусатов В.И.

аспирант, стажёр-исследователь, НОЦ Магнитоэлектрические материалы и устройства, РТУ МИРЭА

Федулов Ф.А.

к.т.н., научный сотрудник, НОЦ Магнитоэлектрические материалы и устройства, РТУ МИРЭА

Савельев Д.В.

к.ф.-м. н., инженер-исследователь, НОЦ Магнитоэлектрические материалы и устройства, РТУ МИРЭА

Фетисов Л.Ю.

д.ф.-м. н., ведущий инженер, НОЦ Магнитоэлектрические материалы и устройства, РТУ МИРЭА

***Аннотация.** Поиск возможности увеличить коэффициент перестройки индуктивности у магнитоэлектрических индукторов в настоящее время является актуальной задачей ввиду применения индукторов в электрических схемах. В работе экспериментально продемонстрирован принципиально новый подход к увеличению коэффициента перестройки индуктивности в электрическом поле магнитоэлектрического индуктора. Показано, что добавление ещё одного ферромагнитного слоя с противоположным знаком магнитострикции приводит к увеличению коэффициента перестройки γ на 22 %.*

***Ключевые слова:** кольцевая гетероструктура, индуктор, магнитострикция, пьезоэффект*

Controlled inductor based on an asymmetric ring magnetoelectric heterostructure

Musatov V.I.,

Postgraduate student, research intern, Research and Educational Center «Magnetoelectric materials and devices», MIREA -Russian Technological University

Fedulov F.A.,

PhD, Research fellow, Research and Educational Center «Magnetoelectric materials and devices», MIREA -Russian Technological University

Savelev D.V.

Ph.D, Research engineer, Research and Educational Center «Magnetoelectric materials and devices», MIREA -Russian Technological University

Fetisov L.Y.

Dr. of Sc., leading researcher, Research and Educational Center «Magnetolectric materials and devices», MIREA – Russian Technological University

Annotation. *Finding an opportunity to increase the inductance tuning factor γ of magnetolectric inductors is currently an urgent task due to the use of inductors in electrical circuits. The work experimentally demonstrated a fundamentally new approach to increasing the inductance tuning factor in the electric field of a magnetolectric inductor. It has been shown that the addition of another ferromagnetic layer with the opposite sign of magnetostriction leads to an increase in the tuning coefficient γ by 22%.*

Keywords: *ring heterostructure, inductor, magnetostriction, piezoelectric effect*

Трансформаторы, индукторы и конденсаторы являются основными пассивными элементами электрических цепей в силовой электронике. В настоящее время наблюдается рост интереса к индукторам нового поколения, которые по сравнению с классическими магнитными индукторами характеризуются более быстрой работой, более низким энергопотреблением, и занимают меньше места в электрической цепи, а также могут менять свою индуктивность при приложении электрического поля [1]. Изменение индуктивности при приложении электрического поля достигается путем использования магнитоэлектрических (МЭ) композитов. Такие композитные материалы позволяют обеспечить взаимосвязь между магнитным и электрическим полями ввиду наличия ферромагнитных (ФМ) и пьезоэлектрических (ПЭ) слоёв. Известно, что использование именно кольцевых индукторов по сравнению с планарными конфигурациями является наиболее предпочтительным с точки зрения применения в виду высоких значений коэффициента перестройки индуктивности $\gamma = (L(E_0) - L(E))/L(E)$, где $L(E_0)$ – индуктивность в отсутствие электрического поля [2]. Одним из известных способов усиления магнитоэлектрического преобразования в композитных материалах является использование несимметричных конструкций [3], поэтому их можно также использовать для повышения коэффициента перестройки индуктивности. К настоящему времени такого рода исследований не проводилось. Поэтому в рамках выполнения работы был изготовлен трёхслойный кольцевой индуктор Metglas-PZT-Ni, и проведено исследование зависимости его индуктивности от приложенного электрического поля при различных частотах тестового сигнала.

Исследуемый образец, рисунок 1, представляет собой трёхслойную гетероструктуру, состоящую из пьезоэлектрического кольца, внешнего и внутреннего ферромагнитных слоёв – аморфной ленты марки Metglas и электролитически осаждённого слоя Ni, соответственно. Радиально поляризованное ПЭ кольцо PZT-19 имеет внутренний диаметр 16 см, толщину 1 мм и ширину 5 мм. На внешнюю поверхность ПЭ кольца наклеен при помощи цианокрилатного клея ФМ слой ленты марки Metglas 2605SA1, который имеет толщину 27 мкм и ширину 5 мм. На внутреннюю поверхность кольца электролитически осаждён слой никеля толщиной 10 мкм из раствора электролита Bright Nickel Bath WN1 (WIELAND Edelmetalle GmbH) на основе NiSO₄ и NiCl₂. Осаждение никеля проводили в течение 150 мин при плотности тока 1 А/дм².

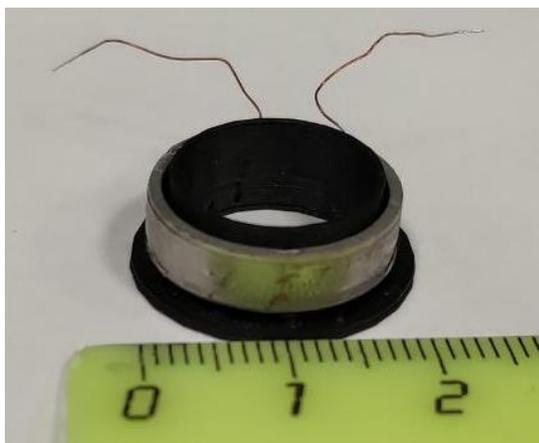


Рис. 1. Трёхслойная Кольцевая гетероструктура Metglas-PZT-Ni.

К исследованной гетероструктуре прикладывали электрическое напряжение U до 2 кВ при помощи высоковольтного источника питания Stanford Research Systems PS350 на электроды пьезоэлектрического кольца, что создавало электрическое поле E напряженностью до 20 кВ/см. Индуктивность L регистрировали методом последовательного резонанса с помощью RLC-метра АКТАКОМ АМ-3026 в диапазоне частот тестового генератора $f = 20$ Гц – 5 МГц с точностью 0.1 %.

На рисунке 2 показана измеренная зависимость индуктивности от частоты тестового сигнала при различных значениях электрических полей. Электрическое поле, приложенное к ПЭ кольцу, приводит к его деформации, которая передаётся магнитному слою. Деформация магнитного слоя приводит к изменению намагниченности и как следствие – изменению индуктивности. Видно, что эффективная перестройка индуктивности от электрического поля происходит только до частоты 2 кГц ввиду магнитных свойств ферромагнитных слоёв. На рисунке 3 показана зависимость коэффициента перестройки $\gamma = (L(E_0) - L(E)) / L(E)$ от приложенного электрического поля на частоте 300 Гц, полученная из данных рисунка 2. Максимальный коэффициент перестройки составил 503 %. Это значение коэффициента перестройки на 22 % выше, чем у гетероструктуры, содержащей ФМ слой только снаружи пьезоэлектрического кольца [4].

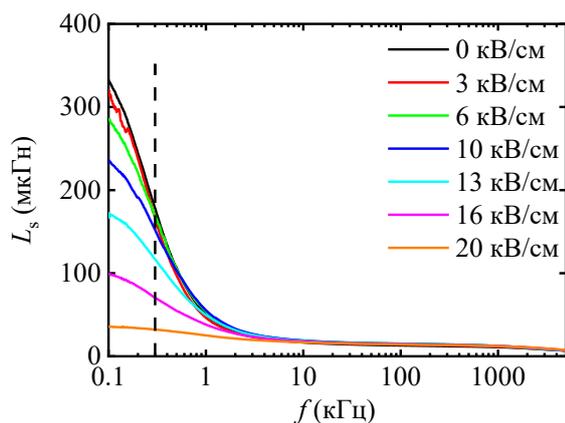


Рис. 2. Зависимость индуктивности от частоты при различных значениях электрических полей. Пунктирной линией обозначена частота 300 Гц.

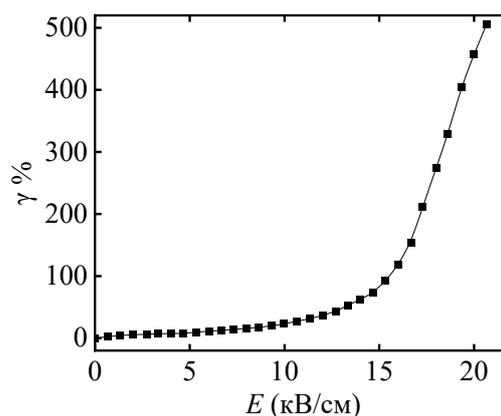


Рис. 3. Зависимость коэффициента перестройки от приложенного электрического поля на частоте 300 Гц.

Таким образом, в работе впервые была предложена концепция трёхслойного несимметричного перестраиваемого магнитоэлектрического индуктора. Показано, что наличие дополнительного ФМ слоя, имеющего другой знак магнитострикции, приводит к

увеличению коэффициента перестройки индуктивности по сравнению с кольцевой двухслойной гетероструктурой, содержащей только один ФМ слой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 19-79-10128-П.

Список использованной литературы:

1. Lou J., Reed D., Liu M., Sun N. X. Electrostatically tunable magnetoelectric inductors with large inductance tunability // Applied Physics Letters – 2009., 94(11).
2. Yan Y., Geng L. D., Tan Y., et al. Colossal tunability in high frequency magnetoelectric voltage tunable inductors // Nature communications – 2018., 9(1), p. 4998.
3. Fetisov L. Y., Perov N. S., Fetisov Y. K., Srinivasan G., Petrov V. M. Resonance magnetoelectric interactions in an asymmetric ferromagnetic-ferroelectric layered structure // Journal of Applied Physics. – 2011., 109(5).
4. Savelev D. V., Fetisov L. Y., Chashin D. V., Fetisov Y. K. Magnetoelectric ring-type inductors tuned by electric and magnetic fields // IEEE Sensors Letters – 2021., 5(11), pp. 1-4.

УДК 62-523.2

Электромагнитный автономный источник энергии

Переверзева А.П.

Магистрант, ИПТИП, РТУ МИРЭА

Чашин Д.В.

К.т.н., инженер

НОЦ «Магнитоэлектрические материалы и устройства»

Фетисов Л.Ю.

д. ф-м. н., профессор, ИПТИП, РТУ МИРЭА,

НОЦ «Магнитоэлектрические материалы и устройства»

***Аннотация.** В работе разработан электромагнитный автономный источник энергии на основе магнитной левитации. Данный автономный источник энергии работает на низких частотах и может работать от движения человека. Получена зависимость напряжения от времени при движении человека.*

***Ключевые слова:** автономный источник энергии, постоянные магниты, магнитная левитация, вибрационный*

Electromagnetic autonomous energy source

Pereverzeva A.P.

Master student, IPTIP of MIREA – Russian Technological University

Chashin D.V.

Ph.D., leading engineer

Research and Educational Center «Magnetoelectric materials and devices»

Fetisov L.Y.

Dr. Sc., professor, IPTIP of MIREA – Russian Technological University
Research and Educational Center «Magnetolectric materials and devices»

Annotation. *In this work, an electromagnetic autonomous energy source based on magnetic levitation has been developed. This autonomous energy source operates at low frequencies and can be powered by human movement. The dependence of voltage on time during human movement was obtained.*

Key words: *autonomous energy source, permanent magnets, magnetic levitation, vibration based*

Тенденции к автоматизации процессов, интеллектуальной логистике, безопасности и комфорту требуют все большего количества электроники для сбора, обработки и передачи данных. В тоже время существенное повышение эффективности электронных компонентов и схем, достигнутое за последние десятилетия, позволяет использовать беспроводные источники малой мощности для их питания. Многие датчики и системы контроля, например, потребляют милливатты мощности. Что позволило начать активное внедрение таких технологий как «Беспроводные сенсорные сети», «Умный город», «Интернет вещей» и т.д. [1].

Беспроводные источники энергии преобразовывают энергию окружающей среды в электричество в небольших масштабах. В качестве источников энергии окружающей среды, можно использовать излучение, движение или тепло, электромагнитные поля и т.д.

Вибрационная энергия является одной из наиболее распространённых и её можно преобразовать в электрическую энергию различными способами [2-3]. Одним из возможных способов преобразования энергии вибрации в электрическую являются электромагнитные автономные источники энергии с магнитной левитацией. Они хорошо подходят для работы на низких частотах. Кроме того, автономные источники энергии с магнитной левитацией являются надёжными и имеют низкие требования к техническому обслуживанию [4].

В данной работе было разработано устройство для преобразования энергии вибрации в электрическую энергию. Работа данного устройства основана на законе Фарадея. При движении человека, устройство начинает вибрировать, происходит смещение магнита относительно катушки и в катушке возникает ток, который можно использовать для зарядки батареи. Предложенное устройство состоит из трёх магнитов, помещённых в корпус, и двух катушек, намотанных вокруг корпуса. Нижний и верхний магниты закреплены, а центральный магнит левитирует между ними (рис. 1). Для создания устройства использовались три одинаковых цилиндрических магнита длиной 15 мм и диаметром 12 мм из NdFeB. Катушки состояли из 121 витка медной проволоки толщиной 0.5 мм и имели длину 14 мм каждая.

По сравнению с ранее предложенной конструкцией подобного генератора [5], были использованы две катушки, которые располагались в месте максимальной концентрации магнитных полей по торцам подвижного магнита. Был создан макет данного устройства. Измерена резонансная частота в зависимости от расстояния между внешними магнитами. Измерена накапливаемая энергия при однократном возбуждении данного устройства.

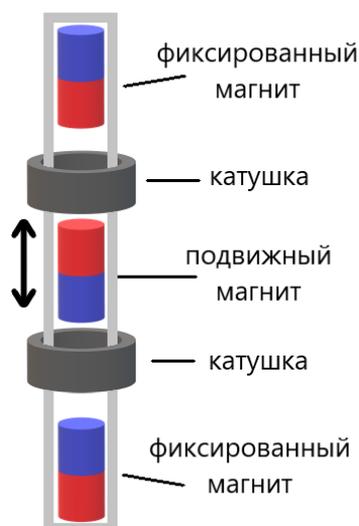


Рис. 1. Схема автономного источника энергии.

Изготовлен макет электромагнитного автономного источника энергии на основе магнитной левитации. Данное устройство может использоваться для питания маломощных модулей, а также носимой электроники.

Список использованных источников:

1. Kim J.W., Salauddin M., Cho H., Rasel M.S., Park J.Y. Electromagnetic energy harvester based on a finger trigger rotational gear module and an array of disc Halbach magnets // *Appl Energy*. – 2019. – №250. – pp.776–785.
2. Kecik, K. Modification of Electromechanical Coupling in Electromagnetic Harvester // *Energies*. – 2022. – №15. – p. 4007.
3. Wu H., Tatarenko A., Bichurin M.I., Wang Y. A multiferroic module for biomechanical energy harvesting // *Nano Energy*. – 2021. – №83. – p. 105777.
4. Berdy D.F., Valentino D.J., Peroulis D. Design and optimization of a magnetically sprung block magnet vibration energy harvester // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2014. – №218. – pp. 69–79.
5. Saha C.R., O'Donnell T., Wang N., McCloskey P. Electromagnetic generator for harvesting energy from human motion // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2008. – №147. – pp. 248-253.

УДК 537.6; 537.9

Магнитоэлектрические эффекты в кольцевых композитных гетероструктурах ферромагнетик - пьезоэлектрик

Фетисов Л.Ю.

д.ф.-м.н., профессор кафедры наноэлектроники ИПТИП РТУ МИРЭА

Мусатов В.И.

аспирант кафедры наноэлектроники ИПТИП РТУ МИРЭА

Чашин Д.В.

к.т.н., ст. инженер НОЦ «Магнитоэлектрические материалы и устройства» РТУ МИРЭА

Фетисов Ю.К.

д.ф.-м.н., директор НОЦ «Магнитоэлектрические материалы и устройства» РТУ МИРЭА

Аннотация. Исследованы низкочастотные магнитоэлектрические эффекты в композитных гетероструктурах кольцевой формы, содержащих ферромагнитные и пьезоэлектрические слои. Эффекты возникают благодаря комбинации магнитострикции и пьезоэлектричества из-за механической связи слоев. Измерены частотные и полевые характеристики эффектов для различных ориентаций магнитного поля, разработаны методы расчета характеристик эффектов. Продемонстрированы возможности использования кольцевых гетероструктур для создания датчиков магнитных полей и токов, удвоителей частоты, электрически перестраиваемых индукторов.

Ключевые слова: магнитоэлектрический эффект, композитная гетероструктура, магнитострикция, пьезоэлектричество

Magnetolectric effects in circular composite ferromagnet - piezoelectric heterostructures

Fetisov L.Y.

D.Sc., Professor, Department of Nanoelectronics, IPTIP, RTU MIREA

Musatov V.I.

Graduated student, Department of Nanoelectronics, IPTIP, RTU MIREA

Chashin D.V.

PhD, Senior engineer, REC “Magnetolectric materials and devices”, RTU MIREA

Fetisov Y.K.

D.Sc., Director of REC “Magnetolectric materials and devices”, RTU MIREA

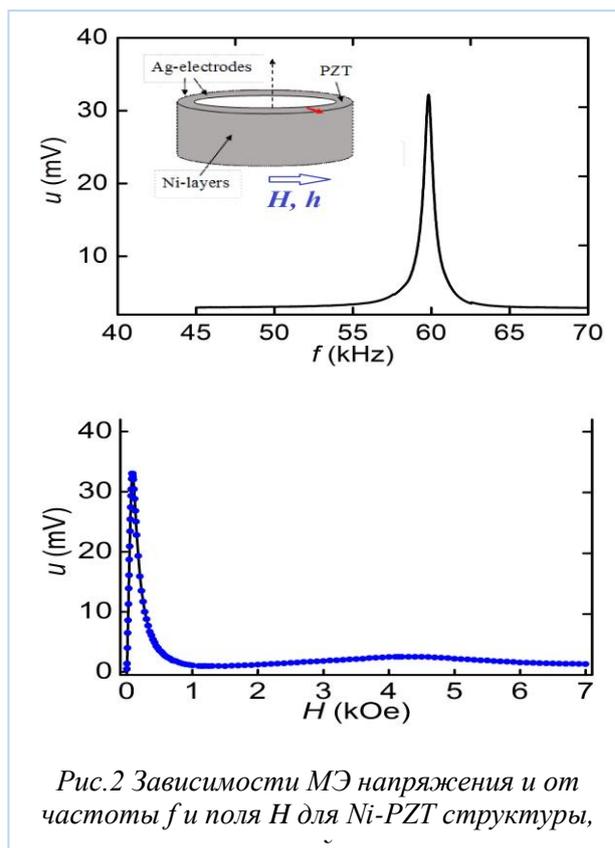
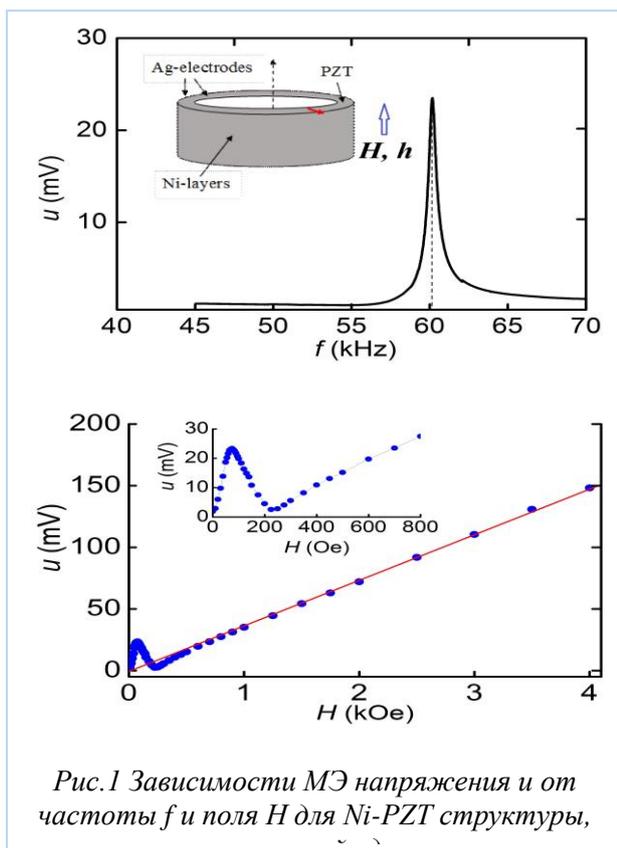
Annotation. Low-frequency magnetolectric effects in ring-shaped composite heterostructures containing ferromagnetic and piezoelectric layers have been studied. The effects arise from a combination of magnetostriction and piezoelectricity due to the mechanical coupling of the layers. The frequency and field characteristics of the effects were measured for various magnetic field orientations, and methods for calculating the characteristics of the effects were developed. The possibilities of using ring heterostructures to create magnetic field and current sensors, frequency doublers, and electrically tunable inductors have been demonstrated.

Keywords: magnetolectric effect, composite heterostructure, magnetostriction, piezoelectricity

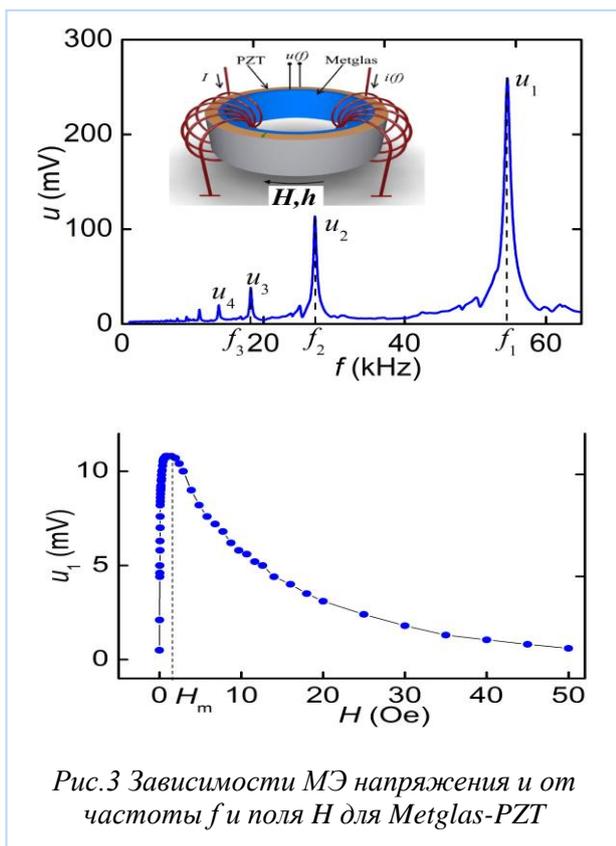
Магнитоэлектрические (МЭ) эффекты в композитных гетероструктурах ферромагнетик-пьезоэлектрик (ФМ-ПЭ) привлекают внимание в связи с перспективами использования в датчиках магнитных полей, устройствах низкочастотной электроники и автономных источниках питания [1]. Эффекты возникают благодаря комбинации магнитострикции и пьезоэлектричества слоев структур и реализуют эффективное преобразование магнитного поля H в электрическое E . К настоящему времени подробно изучены характеристики МЭ эффектов в планарных гетероструктурах со слоями из различных материалов [2]. Показано, что эффективность преобразования полей зависит как от свойств слоев, так и от формы структур [3].

В настоящей работе детально исследованы частотные, полевые и амплитудные характеристики МЭ эффектов в гетероструктурах кольцевой формы с ПЭ слоями из керамики цирконата-титаната свинца (PZT) и ФМ слоями из никеля или аморфного сплава FeBSiC (Metglas). ФМ слои наносили на поверхности PZT-колец методом электролитического осаждения либо низкотемпературной сварки, что обеспечивало механическую связь между слоями. Структуры помещали в постоянное намагничивающее поле $H=0-7$ кЭ, возбуждали переменным магнитным полем $h \cos(2\pi ft)$ с частотой $f=1-100$ кГц и амплитудой $h=0-1$ Э и регистрировали переменное напряжение $u(f)$, генерируемое между электродами PZT кольца. Измерения проведены для трех базовых ориентаций постоянного и переменного полей: вдоль оси кольца (рис.1), в плоскости кольца (рис.2) и для кругового намагничивания (рис.3).

В качестве примера на рис.1 приведены зависимости МЭ напряжения u от частоты f



возбуждающего магнитного поля при $H=\text{const}$ и от постоянного поля H при $f=\text{const}$ для PZT кольца с внешним диаметром 18 мм, шириной 5 мм и толщиной 1.5 мм со слоями Ni толщиной 15 мкм на поверхностях. Резонансный пик вблизи частоты $f_1 \approx 60$ кГц соответствует возбуждению основной моды радиальных акустических колебаний кольца. Необычная полевая характеристика $u(H)$ на рис.1 обусловлена вкладом в напряжение двух эффектов: магнитоэлектрического в области малых полей и пьезоиндукционного в больших полях [4]. На рис.2 приведены характеристики МЭ эффекта в той же структуре, намагниченной в плоскости кольца. Видно, что зависимость $u(f)$ имеет аналогичный вид, а зависимость $u(H)$



качественно отличается от предыдущей: напряжение достигает максимума в поле $H_m \approx 75$ Э и имеет место второй максимум в больших полях. Наличие МЭ напряжения в больших магнитных полях обусловлено вкладом участков структуры, где поле H направлено по нормали к магнитному слою и эффекты размагничиванию существенны. Наконец, на рис. 3 показаны частотная и полевая характеристики МЭ эффекта в кольцевой структуре PZT-Metglas, намагниченной с помощью катушек в круговом направлении [5]. В этом случае, кроме основного пика u_1 вблизи частоты f_1 , на частотной характеристике наблюдали дополнительные пики, соответствующие нелинейной генерации гармоник. В кольцевой структуре с замкнутыми круговыми полями эффекты размагничивания не играют существенной роли, поэтому максимум МЭ напряжения на зависимости $u_1(H)$ достигался в чрезвычайно низких полях $H_m \approx 1$ Э, что важно для применений.

Приведенные результаты демонстрируют, что полевые характеристики МЭ эффектов в кольцевых ФМ-ПЭ гетероструктурах значительно отличаются от характеристик эффектов в планарных структурах и требуют дальнейшего изучения. В работе разработаны методы расчета как линейных, так и нелинейных характеристик МЭ эффектов в кольцевых гетероструктурах, продемонстрированы возможности применения кольцевых структур для создания датчиков магнитных полей, датчиков токов, удвоителей частоты, электрически перестраиваемых индукторов и других устройств.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ: госзадание № FSFZ-2023-005 и проект № 075-15-2022-1131 и РФФ, проект 19-79-10128-П.

Часть измерений выполнена с использованием оборудования Объединенного центра коллективного пользования РТУ МИРЭА.

Список использованной литературы:

1. Leung C. M., Li J., Viehland D., Zhuang X. A review on applications of magnetoelectric composites: from heterostructural uncooled magnetic sensors, energy harvesters to highly efficient power converters // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2018. –V.51. –P. 263002.
2. Liang X., Chen H., Sun N.X. Magnetoelectric materials and devices // APL Materials –2021. – V. 9. –P. 041114.
3. Pan D.A., Tian J.J., Zhang S.G., Sun J.S., Volinsky A.A., Qiao L.J. Geometry effects on magnetoelectric performance of layered Ni/PZT composites // Mater. Sci. Eng. B. – 2009. –V. 163(2). –P. 114–119.
4. Y.K. Fetisov, D.V. Chashin, G. Srinivasan. Piezoinductive effects in a piezoelectric ring with metal electrodes, J. Appl. Phys. 2009. v. 106. Paper 044103.
5. D.V. Savelev, F.A. Fedulov, V.I. Musatov, D. A. Burdin, E.V. Bolotina, L.Y. Fetisov, Y.K. Fetisov, Nonlinear resonant magnetoelectric effect in a circumferentially magnetized ferromagnetic-piezoelectric ring heterostructure // Appl. Phys. Lett. – 2023. –V. 122. –P. 192902.

УДК 538.955

Магнитоэлектрическое взаимодействие в структуре аморфный нанокристаллический сплав АМАГ 212Н – ЦТС**Филиппов Д.А.**

д. ф.-м. н., профессор кафедры промышленных технологий ИПТ НовГУ

Сапельников С.О.

аспирант кафедры промышленных технологий ИПТ НовГУ

Мирзахмедов Т.-Б.Е.

студент кафедры промышленных технологий ИПТ НовГУ

Аннотация. Величина магнитоэлектрического взаимодействия в слоистых магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах зависит как от свойств, так и от геометрических размеров магнетика и пьезоэлектрика. С точки зрения магнитных и электрических свойств аморфный сплав АМАГ 212Н и пьезокерамика ЦТС являются весьма перспективными материалами для создания композиционных магнитоэлектрических структур. В работе проведено исследование зависимости магнитоэлектрического отклика структуры от числа слоев аморфной нанокристаллической ленты. Установлено, что оптимальным с точки зрения величины магнитоэлектрического отклика и технологии изготовления являются симметричные структуры, содержащие по три слоя ленты аморфного сплава с каждой стороны.

Ключевые слова: магнитострикция, пьезоэлектричество, магнитоэлектрический эффект, аморфный нанокристаллический сплав.

**Magnetolectric interaction in the structure of the amorphous nanocrystalline alloy
AMAG 212N – PZT****Filippov D.A.,**Doctor of physical and mathematical Sciences, Professor of the Industrial Technologies
Department, IPT of NovSU**Sapelnikov S.O.,**

Postgraduate student of the Industrial Technologies Department, IPT of NovSU

Mirzakhmedov T.-B.E.

Student of the Industrial Technologies Department, IPT of NovSU

Annotation. The magnitude of magnetolectric interaction in layered magnetostrictive-piezoelectric structures depends both on the properties and on the geometric dimensions of the magnet and piezoelectric. From the point of view of magnetic and electrical properties, the AMAG 212N amorphous alloy and PZT piezoceramics are very promising materials for creating composite magnetolectric structures. In this work, we studied the dependence of the magnetolectric response of the structure on the number of layers of an amorphous nanocrystalline ribbon. It has been

established that symmetrical structures containing three layers of amorphous alloy on each side are optimal from the point of view of the magnitude of the magnetoelectric response and manufacturing technology.

Keywords: *magnetostriction, piezoelectricity, magnetoelectric effect, amorphous nanocrystalline alloy.*

В последние годы композиционные магнитоэлектрические (МЭ) материалы вызывают большой фундаментальный и практический интерес, поскольку на их основе возможно создание принципиально новых приборов, которые невозможно создать при использовании традиционных материалов [1-3]. Величина МЭ отклика в слоистых магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах зависит как от свойств, так и от геометрических размеров магнетика и пьезоэлектрика. Пьезокерамика ЦТС обладает большим значением пьезоэлектрического коэффициента и часто используется для создания МЭ структур. Аморфный нанокристаллический сплав АМАГ 212 Н обладает большой магнитострикцией при малых полях подмагничивания и является весьма перспективным материалом для изготовления МЭ композитов. Проблема при его использовании заключается в том, что он выпускается в виде лент толщиной $t_{ml}=20$ мкм, а величина МЭ отклика имеет максимум, когда между толщиной пьезоэлектрика t_p и магнетика t_m имеет место соотношение [4] $t_p\sqrt{Y_p} = t_m\sqrt{Y_m}$, где $Y_p = 67$ ГПа, $Y_m = 110$ ГПа – модули Юнга пьезоэлектрика и магнетика соответственно. Отсюда следует, что максимальная величина эффекта наблюдается тогда, когда толщина магнетика $t_m = 0.8t_p$. Для изготовления гетероструктур использовали пластины пьезоэлектрика толщиной $t_p = 300$ мкм. Для того, чтобы выполнялось оптимальное соотношение между толщинами общая толщина магнетика должна быть $t_m = 240$ мкм, т.е. гетероструктура должна содержать по шесть слоев аморфного сплава с каждой стороны. Технологически сделать такую структуру довольно сложно, поскольку в процессе склеивания большого числа слоев наблюдается коробление структуры, вследствие чего ухудшается механическое взаимодействие между слоями. Экспериментально установлено, что оптимальной с точки зрения технологического процесса изготовления и величины эффекта является симметричная структура, содержащая три слоя аморфного сплава с каждой стороны.

Список использованной литературы:

1. Tu, C.; Chu, Z.Q.; Spetzler, B.; Hayes, P.; Dong, C.Z.; Liang, X.F.; Chen, H.H.; He, Y.F., Wei, Y.Y.; Lisenkov, I.; et al. Mechanical-Resonance-Enhanced Thin-Film Magnetoelectric Heterostructures for Magnetometers, Mechanical Antennas, Tunable RF Inductors and Filters. – Materials. – 2019. – 12. – 2259.
2. Vopson, M.M. Fundamentals of Multiferroic Materials and Their Possible Applications. Crit. Rev. Solid State Mater. Sci. – 2015. – 40. – pp.223–250.
3. Бухараев А.А., Звездин А.К., Пятаков А.П., Фетисов Ю.К. Стрейнтроника – новое направление микро- и наноэлектроники и науки о материалах // УФН. – 2018. – Т. 188. – № 12. – С. 1288-1330
4. Филиппов Д.А. Лалетин В.М., Galichyan T.A. Магнитоэлектрический эффект в двухслойной магнитострикционно-пьезоэлектрической структуре // Физика твердого тела. – 2013. – т. 55. – №9. – с. 1728-1733

УДК 537.6

Магнитоэлектрический эффект в неоднородных структурах Metglas / PZT / Metglas

Ивашева Е.Е.

студентка 4 курса бакалавриата, лаборант, Новгородский государственный университет
им. Ярослава Мудрого

Соколов О.В.

к.ф.-м.н., инженер-исследователь, Новгородский государственный университет
им. Ярослава Мудрого

Бичурин М.И.

д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой, Новгородский государственный университет
им. Ярослава Мудрого

***Аннотация.** Работа посвящена исследованию прямого и обратного магнитоэлектрического (МЭ) эффекта в неоднородных симметричных магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах Metglas / PZT / Metglas с превышением длины Metglas над длиной PZT. Приводятся зависимости МЭ коэффициента по напряжению от разности длин фаз композитов при постоянной длине пьезоэлектрика в области продольной моды электромеханического резонанса (ЭМР).*

***Ключевые слова:** магнитоэлектрический эффект, неоднородная магнитоэлектрическая структура, электромеханический резонанс*

Magnetolectric effect in heterogeneous structures Metglas / PZT / Metglas

Ivasheva E.E.

Bachelor's student, laboratory-assistant, Yaroslav-the-Wise Novgorod State University

Sokolov O.V.

Ph. D. (Phys.-Math.), research engineer, Yaroslav-the-Wise Novgorod State University

Bichurin M.I.

Dr. Sc. (Phys.-Math.), professor, Head of Department, Yaroslav-the-Wise Novgorod State University

***Annotation.** The work is devoted to the study of the direct and converse magnetolectric (ME) effect in heterogeneous symmetrical magnetostrictive-piezoelectric structures Metglas / PZT / Metglas with the Metglas length exceeding the PZT length. The dependences of the ME voltage coefficient on the difference in the phase lengths of the composites at a constant length of the piezoelectric in the region of the longitudinal mode of electromechanical resonance (EMR) are presented.*

***Keywords:** magnetolectric effect, heterogeneous magnetolectric structure, electromechanical resonance*

В последнее время активно исследуется прямой и обратный магнитоэлектрический (МЭ) эффект в различных магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах в связи с большими

перспективами их применения в датчиках магнитных полей [1], харвестерах [2], очень низкочастотных МЭ антеннах [3]. При прямом МЭ эффекте происходит генерация электрического поля в МЭ структуре во внешнем переменном магнитном поле, при обратном эффекте – изменяется намагниченность структуры во внешнем переменном электрическом поле. Особый интерес для исследователей представляют неоднородные МЭ структуры в связи с большим количеством вариаций неоднородностей и их малой изученностью.

На рис. 1 представлена структурная схема исследуемого симметричного МЭ композита Metglas / PZT / Metglas с превышением длины магнитострикционной фазы над пьезоэлектрической.

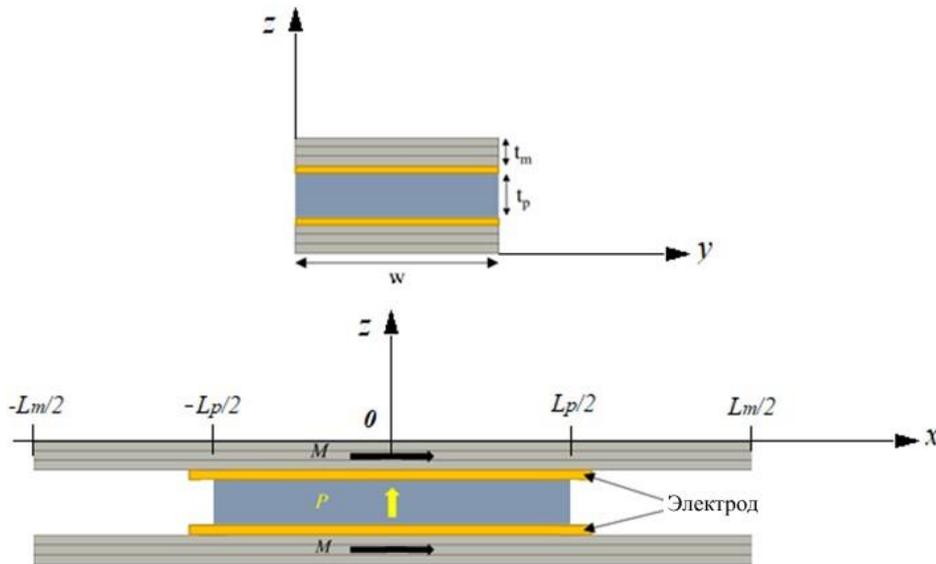


Рис. 1. Структурная схема МЭ композита

При расчете МЭ коэффициента композит разбивался на 3 участка: от левого края магнитострикционных лент до начала пьезоэлектрика, от начала пьезоэлектрика до конца пьезоэлектрика, от конца пьезоэлектрика до правого края магнитострикционных лент. После нахождения и решения уравнений движения для каждого участка происходила стыковка решений с учетом граничных условий.

В ходе моделирования прямого МЭ эффекта в области продольной моды была получена следующая формула МЭ коэффициента по напряжению α_{DME} :

$$\alpha_{DME} = \frac{2d_{31}^m Y^B q_{11}^p s_{11}^m t^p v_2 \sin(p\eta_2)}{t_2 \left[\sin^2(m\eta) - \cos^2(p\eta_1) \right] \left\{ p\eta_2^p s_{11} c_{11} \cos(p\eta_2) (\varepsilon \varepsilon_0^p s_{11} - d_{31}^2) + \right.} \quad (1)$$

$$\left. \cdot \cos(p\eta_1 + m\eta) \right\} + \frac{p v_2 d_{31}^2 \sin(p\eta_2)}{p\eta_1^p s_{11}^m t^m Y^B \sin(p\eta_2) \left[\varepsilon \varepsilon_0^p s_{11} - d_{31}^2 \right] \left\{ \sin(2^m \eta) - \sin(2^p \eta_1) \right\}};$$

где $m\eta = \frac{k_1 L_m}{2}$, $p\eta_1 = \frac{k_1 L_p}{2}$, $p\eta_2 = \frac{k_2 L_p}{2}$, d_{31} – пьезоэлектрический модуль, q_{11} – пьезомагнитный

модуль, s_{11}^p – коэффициент податливости пьезоэлектрической фазы, ε – диэлектрическая проницаемость, ε_0 – электрическая постоянная, Y^B – модуль Юнга, $c_{11} = \frac{p v_2}{p s_{11}} + m v_2 Y^B$ –

эффективный коэффициент жесткости композита, v_2 – объемная доля пьезоэлектрической фазы на 2-м участке композита, v_2^m – объемная доля магнитострикционной фазы на 2-м участке, t –

толщина магнитоэлектрической фазы, t_2 – толщина 2-го участка композита, L_p – длина пьезоэлектрической фазы, L_m – длина магнитоэлектрической фазы, $k_1 = k_3 = \sqrt{\frac{m \rho}{m Y B}} \omega$ – волновое число для 1-го и 3-го участков, $k_2 = \sqrt{\frac{\rho_2}{c_{11}}} \omega$ – волновое число для 2-го участка, ${}^m \rho$ – плотность магнитоэлектрического материала, ρ_2 – эффективная плотность 2-го участка композита, ω – круговая частота внешнего переменного магнитного поля.

По формуле (1) был найден МЭ коэффициент по напряжению на резонансной частоте продольной моды для каждого МЭ композита Metglas / PZT/ Metglas при прямом МЭ эффекте. Композиты имели постоянную длину пьезоэлектрика и различные длины магнитоэлектрической фазы. После получения всех резонансных значений МЭ коэффициентов по напряжению, был построен график зависимости $\alpha_{\text{ДМЕ}}$ на частоте ЭМР от разности длин магнитоэлектрической и пьезоэлектрической фаз композитов dL при постоянной длине пьезоэлектрика в области продольной моды, который представлен ниже на рис. 2.

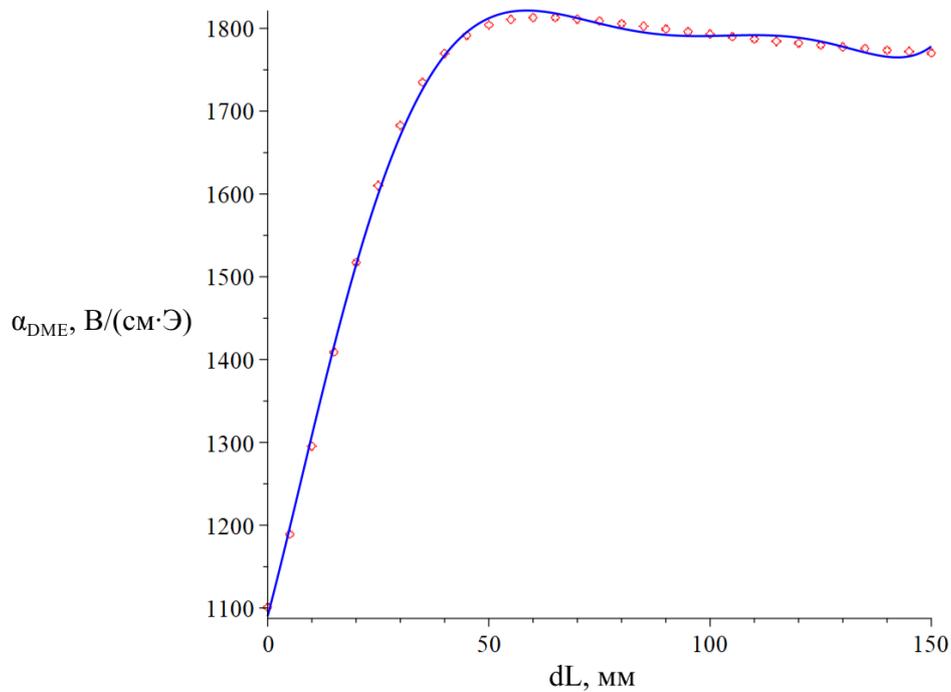


Рис. 2. Зависимость прямого МЭ коэффициента по напряжению от разности длин магнитоэлектрической и пьезоэлектрической фаз при постоянной длине пьезоэлектрика

При моделировании обратного МЭ эффекта в области продольной моды была получена следующая формула обратного МЭ коэффициента $\alpha_{\text{СМЕ}}$:

$$\alpha_{\text{СМЕ}} = \frac{4q_{11} {}^m t {}^m Y {}^p v_2 d_{31} \sin({}^p \eta_2)}{L_m {}^p s_{11} \left[2 {}^m Y k_1 {}^m t \sin({}^p \eta_2) \sin({}^p \eta_1 - {}^m \eta) + c_{11} k_2 t_2 \cos({}^p \eta_2) \cos({}^p \eta_1 - {}^m \eta) \right]}. \quad (2)$$

На рис. 3 представлен график зависимости $\alpha_{\text{СМЕ}}$ на частоте ЭМР от dL при постоянной длине пьезоэлектрика в области продольной моды, построенный по методике, описанной выше для рис. 2.

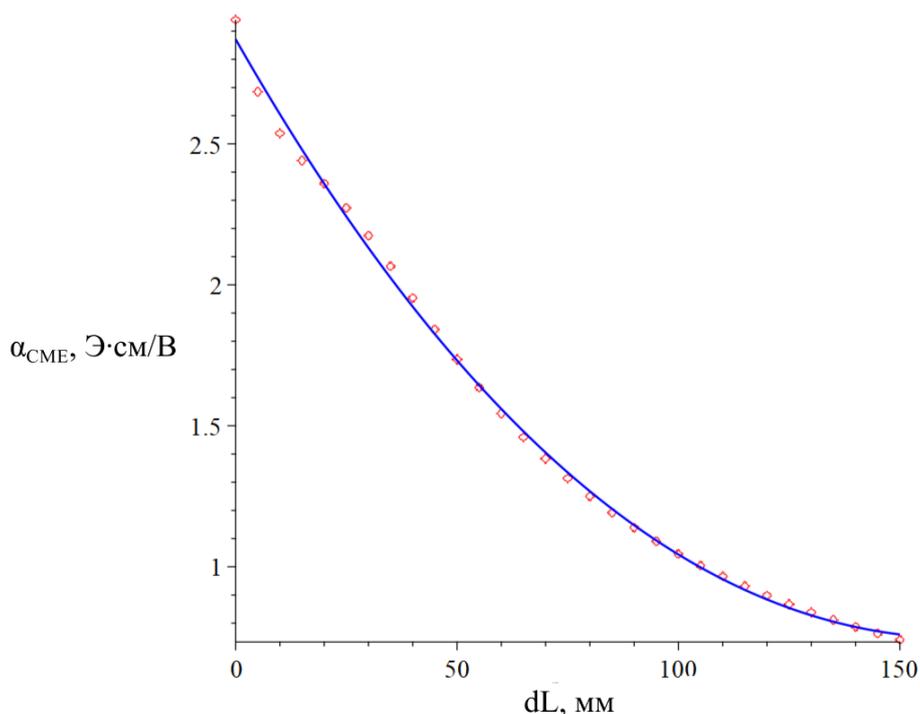


Рис. 3. Зависимость обратного МЭ коэффициента от разности длин магнитоэлектрической и пьезоэлектрической фаз при постоянной длине пьезоэлектрика

Из рис. 2 видно, что при прямом МЭ эффекте, с увеличением разности длин фаз композита до значения $dL = 60$ мм, наблюдается увеличение α_{DME} . После значения $dL = 60$ мм возрастание прямого МЭ коэффициента отсутствует. При обратном МЭ эффекте, наоборот, наблюдается уменьшение α_{CME} с увеличением разности длин фаз композита, что показано на рис. 3, и наибольшее значение α_{CME} наблюдается при равных длинах магнитоэлектрической и пьезоэлектрической фаз.

Таким образом установлено, что при прямом МЭ эффекте увеличить значение МЭ коэффициента возможно в неоднородной МЭ структуре за счет превышения длины магнитоэлектрической фазы до определенного значения над длиной пьезоэлектрика, а при обратном МЭ эффекте – наибольший МЭ коэффициент достигается при равных длинах магнитоэлектрической и пьезоэлектрической фаз.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-15-20044.

Список использованных источников:

1. Bichurin M., Petrov R., Sokolov O., Leontiev V., Kuts V., Kiselev D., Wang Y. Magnetolectric Magnetic Field Sensors: A Review // Sensors. 2021 – №21. P. 2-19.
2. Wu H., Tatarenko A. Bichurin M., Wang Y. A multiferroic module for biomechanical energy harvesting // Nano Energy. 2021 – №83. P. 3-7.
3. Fu S., Cheng J., Jiang T., Wu H., Fang Z., Jiao J., Sokolov O., Ivanov S., Bichurin M., Wang Y. Bias-free very low frequency magnetolectric antenna // Applied Physics Letters. 2023. – №122. P. 1-4.

УДК 538.955

Установка для измерения магнитострикции

Бурдин Д.А.

к.ф.-м. н., с.н.с., Научно-образовательный центр “Магнитоэлектрические материалы и устройства” РТУ МИРЭА

***Аннотация.** В работе представлена усовершенствованная тензометрическая установка для измерения зависимости магнитострикции ферромагнитных пластин, в зависимости от постоянного магнитного поля до 5 кЭ. По достигнутому разрешению (лучше 10^{-7} м/м) установка на порядок превосходит аналогичные устройства.*

***Ключевые слова:** магнитострикция, пьезоэлектрический эффект, тензометр*

Setup for magnetostriction measurement

Burdin D.A.

Ph.d., senior researcher, Research and Educational Center “Magnetolectric materials and devices”, RTU MIREA

***Annotation.** The paper presents an improved strain gauge installation for measuring the dependence of the magnetostriction of ferromagnetic plates, depending on a constant magnetic field of up to 5 kOe. In terms of the resolution achieved (better than 10^{-7} m/m), the installation is an order of magnitude superior to similar devices.*

***Keywords:** magnetostriction, piezoelectric effect, strain meter*

Для исследования магнитоэлектрического эффекта в композитных структурах важно знать детальную зависимость магнитострикции от постоянного магнитного поля, так как она определяет важнейшие характеристики магнитоэлектрического эффекта [1]. Типичная магнитострикция насыщения λ_s применяемых ферромагнитных материалов составляет порядка 10 мкм/м, но в последнее время внимание исследователей всё более привлекают монокристаллические материалы, обладающих на порядок более низкой λ_s [2]. Наиболее доступным и простым методом измерения малых деформаций является тензорезистивный, когда на поверхность образца наклеивается металлофольговый тензочувствительный резистор на тонкой плёночной подложке. Этот метод хорошо подходит для исследования материалов с большой и средней магнитострикцией ($\lambda_s > 10$), однако при деформации менее 10 мкм/м электрический шум и паразитные смещения уже заметно искажают измеренную зависимость [3].

В данной работе описана тензометрическая установка, основанная на использовании тензорезистивного моста переменного тока, что, в совокупности с рядом других решений, позволило повысить разрешение метода примерно на порядок – до 10^{-7} м/м.

Внешний вид установки приведён на рис.1. Установка состоит из трёх основных частей: магнитной системы, контрольно-измерительного блока и измерительной ячейки.

Магнитная система состоит из стандартного лабораторного электромагнита, питаемого от программируемого источника Keysight E3634A (США), и лабораторного гауссметра LakeShore 421 (США). Электромагнит обеспечивает в зазоре 35 мм магнитное поле до 5 кЭ.

В зазоре электромагнита располагается измерительная ячейка с образцом. Ячейка состоит из двух основных частей: подвижного основания и быстроразъёмной платы с образцом

и предварительным усилителем. Предварительный усилитель выполнен на основе малошумящего инструментального усилителя INA849 (Texas Instruments, США). Для уменьшения влияния температурных флуктуаций температура платы стабилизируется с точностью 0.01 К с помощью элемента Пельтье и платинового сопротивления температуры.

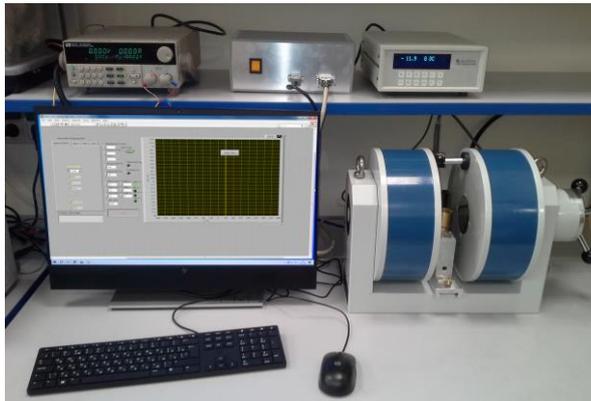


Рис.1. Внешний вид установки

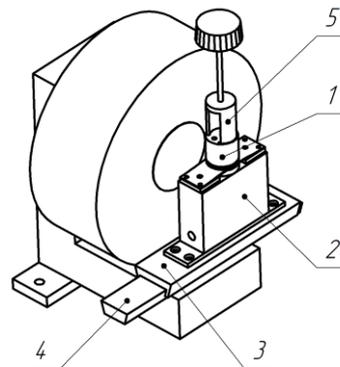


Рис.2. Ячейка на основании: конструкция и внешний вид: 1 – ячейка, 2 – основание-радиатор, 3 – каретка ячейки, 4 – рельс основания, 5 – съёмная рукоять.

Контрольно-измерительный блок служит для питания измерительного моста переменным напряжением с частотой 410 Гц и амплитудой до 4 В, формирования биполярного напряжения от -500В до 500 В для исследования обратного пьезоэлектрического эффекта, а также детектирования и оцифровки сигнала с выхода предусилителя.

Принцип работы установки основан на питании измерительного моста переменным напряжением, что эквивалентно амплитудной модуляции измерительного сигнала, с последующим синхронным детектированием. Детектирование реализовано с помощью микросхемы демодулятора AD630. Демодуляция, по сути, представляет собой изменение знака коэффициента усиления периодически, синхронно с переходом через ноль питающего мост напряжения.

Согласно проведённому расчёту, размах электрических шумов, приведённых ко входу, соответствует деформации $\Delta\epsilon_{pp} \approx 6\sigma_\epsilon = 0.088$ мкм/м, причём основной вклад в данный шумовой сигнал делает фликер-шум резисторов измерительного моста. Фактически измеренный размах шума системы составил 0.094 мкм/м, что хорошо согласуется с расчётом.

Следует также отметить, что из-за высокой чувствительности системы сильное влияние на результаты измерений могут оказывать температурные флуктуации. Так, изменение температуры образца в 0.01 градуса может привести к отклонению уровня измеренной деформации на величину, равную ширине линии $\Delta\epsilon_{pp}$. Поэтому при разработке измерительной ячейки были приняты меры по уменьшению влияния колебаний температуры. К числу этих мер относится закрытое исполнение ячейки для защиты от конвективных потоков, активная стабилизация температуры платы с образцом с точность 0.01 градус, а также оптимизация амплитуды напряжения питания измерительного моста.

На рис.3 показана измеренная на новой установке зависимость магнитострикции NiZnFe от постоянного магнитного поля. Магнитострикция насыщения составила около 6 мкм/м, при этом на графике отчётливо виден гистерезис в области полей до 200 Э при прямом и обратном ходе.

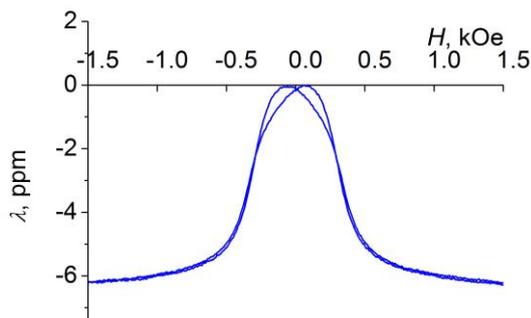


Рис.3. Измеренная полевая зависимость магнитострикции пластины ZnFe.

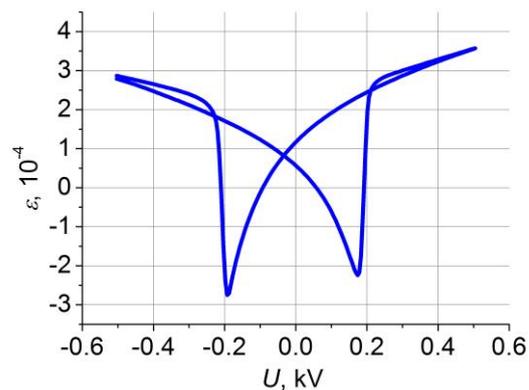


Рис.4. Измеренная полевая зависимость магнитострикции пластины ZnFe.

Для демонстрации возможностей установки по исследованию пьезоэлектрической деформации на рис. 4 показана измеренная зависимость деформации пластины ЦТС-19 толщиной 300 мкм от величины приложенного к её обкладкам электрического напряжения.

Таким образом, разработана усовершенствованная установка для измерения полевых зависимостей магнитострикционной и пьезоэлектрической деформации. Благодаря применённым решениям, в частности, возбуждению тензомота переменным током и синхронному детектированию, удалось добиться предельного разрешения по деформации на уровне 10^{-7} мкм/м. Возможность одновременного управления магнитным и электрическим полем позволяет проводить комплексные исследования магнитоупругой связи в композитных структурах ферромагнетик-пьезоэлектрик.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант №.19-79-10128-П).

Список использованных источников:

1. Chu Z., PourhosseiniAsl M., Dong S. Review of multi-layered magnetoelectric composite materials and devices applications // J. App. Phys. D. -2018. -V. 51. -P. 243001.
2. Burdin D.A., Chashin D.V., Ekonomov N.A., Srinivasan G., Fetisov Y.K. Low-frequency resonant magnetoelectric effects in a planar heterostruture of ferromagnetic yttrium iron garnet film and piezoelectric quartz // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2023. – V.469. - 170476.
3. Chashin D.V., Burdin D.A., Fetisov L.Y., Economov N.A., Fetisov Y.K. Precise measurement of magnetostriction of ferromagnetic plates // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. – 2018. – V.11 (1) – p. 30-34.

УДК 537.624; 537.632

Управляемая упругими деформациями многополосная частотная фильтрация спиновых волн в мультиферроидной структуре – магнонный кристалл/пьезоэлектрик

Грачев А.А.

к.ф.-м. н., старший научный сотрудник, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

Садовников А.В.

к.ф.-м. н., доцент, кафедра физики открытых систем, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

***Аннотация.** В данной работе показаны результаты исследования режимов распространения спиновых волн в управляемой упругими деформациями мультиферроидной структуре с двумя периодами. Используя радиофизические измерения, были получены данные о передаче и дисперсии спиновых волн при различных конфигурациях внешнего электрического поля, приложенного к пьезоэлектрическому слою. Продемонстрировано формирование запрещённых зон в спектре спиновых волн и изменение пропускания спиновых волн при изменении конфигурации внешнего электрического поля. Методом конечных элементов показано, что сочетание неоднородности внутреннего магнитного поля магнонного кристалла, обусловленной наличием периодических гофрированных областей, с упругими деформациями, что увеличивает амплитуду модуляции внутреннего магнитного поля. Рассматриваемая структура может быть использована в качестве многополосного спин-волнового NAND/NXOR логического затвора.*

Ключевые слова: спиновые волны, магنونика, стрейнтроника, магнонный кристалл

Strain-controlled multiband frequency filtering of spin waves in multiferroic structure - magnonic crystal/piezoelectric.

Grachev A. A.,

PhD, Senior researcher, Saratov State University

Sadovnikov A.V.,

Ph.D., Assistant Prof., Dept. of Physics of Open Systems, Saratov State University

***Annotation.** Here, we present the results of an investigation into spin wave propagation modes in an elastic strain-controlled multiferroic structure with two periods. Radiophysical measurements were used to obtain data on the transmission and dispersion of spin waves under different configurations of the external electric field applied to the piezoelectric layer. We demonstrate the formation of forbidden zones in the spin wave spectrum and the variation of spin wave transmission under changing external electric field configurations. The finite element method shows that the inhomogeneity of the internal magnetic field of the magnonic crystal, caused by the presence of periodic corrugated regions, combined with elastic deformations, increases the amplitude of the modulation of the internal magnetic field. The proposed structure can be used as a multiband spin-wave NAND/NXOR logic gate.*

Keywords: spin waves, magnonics, straintronics, magnonic crystal

Магنونика использует спиновые волны, также известные как магноны, в

магнитоупорядоченных материалах для переноса информационных сигналов в микро- и наноструктурах [1-3]. Использование спиновых волн открывает путь к электронике нового поколения и устройствам спинтроники со значительно улучшенными параметрами, такими как скорость, энергопотребление и меньшие пространственные размеры элементов. Спин-волновые устройства, работающие в диапазоне частот от единиц гигагерц до 10 ТГц, имеют длину спиновой волны на четыре-пять порядков меньше, чем радиоволны аналогичной частоты, и могут быть легко интегрированы в современные микро- и наноразмерные электронные устройства и схемы, включая 3D-архитектуру ультрабольших интегральных схем [2,3]. Железо-иттриевый гранат обладает наименьшим затуханием спиновых волн и поэтому может рассматриваться, как один из наиболее перспективных магнитных материалов и может быть использован при создании таких устройств, как энергонезависимая память, магنونные транзисторы, магنونная логика, а также управляемых СВЧ-устройств, основанных на принципах диэлектрической магноники[4-6].

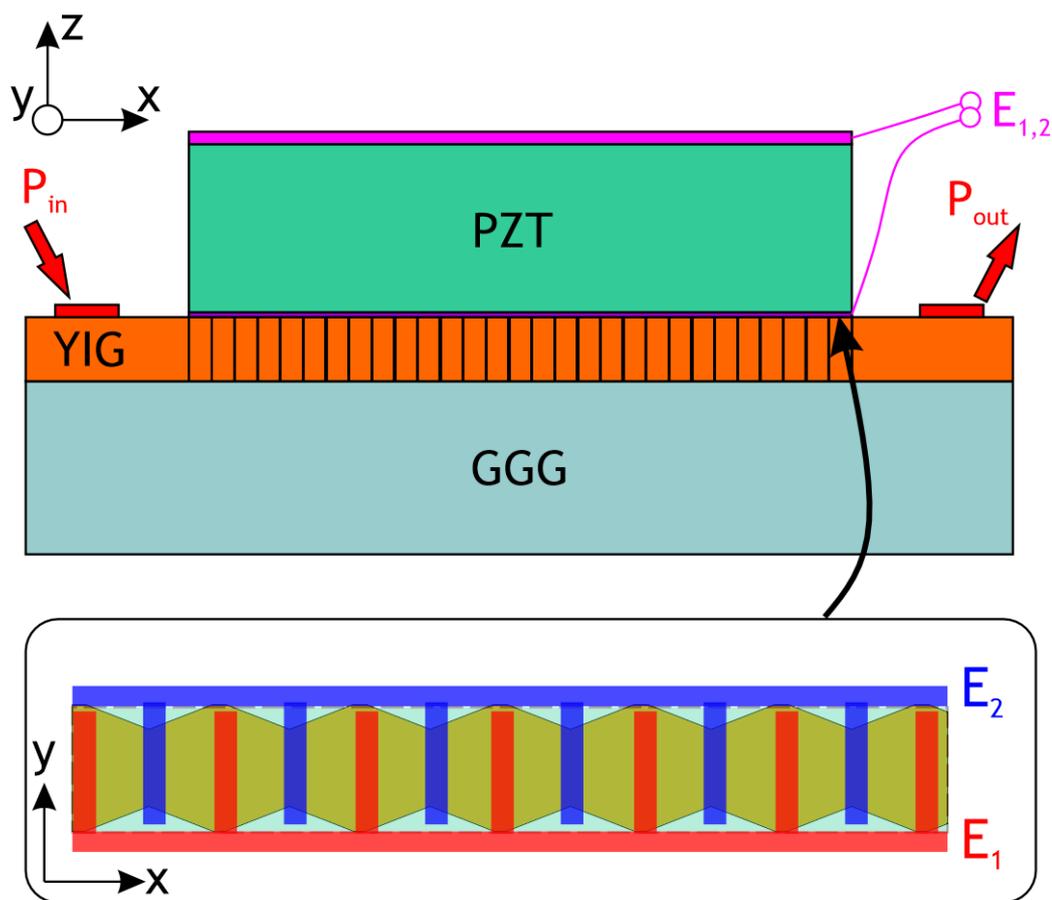


Рис. 1. Схема рассматриваемой структуры

Целью данной работы является рассмотрение простой конструкции перестраиваемого МК, обеспечивающей условия для создания запрещённой зоны с управляемым усилением отражения СВ от периодической решетки. Для достижения этой цели показано управляемое электрическим полем распространение СВ в МК с пьезоэлектрическим слоем.

Структура, показанная на рис. 1(а), состоит из пленки ЖИГ, толщиной 10 мкм и шириной 1 мм. Пленка ЖИГ была изготовлена методом жидкофазной эпитаксии на подложке из гадолиний-галлиевого граната (ГГГ) толщиной 500 мкм. Намагниченность насыщения слоя ЖИГ составляет $4\pi M_0 = 1750$ Гс. С помощью методики лазерной резки из пленки ЖИГ был создан волновод шириной 1 мм. Кроме того, на боковых участках полосы YIG были сформированы треугольные области с периодом 250 мкм и глубиной 200 мкм. Таким образом, эта периодическая структура представляет собой МК. В данном случае регулярный участок МК имеет ширину 600 мкм. Длина МК составляет 8 мм. На вершине МК находится

пьезоэлектрический слой толщиной 200 мкм из цирконата-титаната свинца (ЦТС). После этого на нижнюю часть слоя ЦТС был напылён слой титана толщиной 100 нм. На нижней части слоя ЦТС с помощью метода лазерной резки была создана периодическая система титановых электродов типа встречные штыри. Период электродов составил 125 мкм. Однородное статическое магнитное поле $H_0 = 1300$ Э было приложено в плоскости МК вдоль направления u для эффективного возбуждения поверхностных магнитостатических волн.

Для исследования передаточных характеристик (абсолютное значение параметра S_{21}) и дисперсии СВ рассматриваемой структуры использовался векторный анализатор цепей. Продемонстрировано формирование запрещённых зон в спектре СВ и изменение пропускания при изменении конфигурации внешнего электрического поля. Методом конечных элементов показано, что сочетание неоднородности внутреннего магнитного поля магнетонного кристалла, обусловленной наличием периодических гофрированных областей, с упругими деформациями, что увеличивает амплитуду модуляции внутреннего магнитного поля. При помощи микромагнитного моделирования показано, что это усиление модуляции приводит к изменению пропускания спиновых волн на частоте запрещённой зоны магнетонного кристалла.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-79-30027).

Список использованной литературы:

1. Barman A. et al. The 2021 magnonics roadmap //Journal of Physics: Condensed Matter. – 2021 – Т. 33 –№. 41 – С. 413001
2. Papp Á., Porod W., Csaba G. Nanoscale neural network using non-linear spin-wave interference //Nature communications. – 2021. – Т. 12. – №. 1. – С. 6422.
3. Chen J., Yu H., Gubbiotti G. Unidirectional spin-wave propagation and devices //Journal of Physics D: Applied Physics. – 2021. – Т. 55. – №. 12. – С. 123001.
4. Grachev A. A., Sadovnikov A. V., Nikitov S. A. Strain-Tuned Spin-Wave Interference in Micro-and Nanoscale Magnonic Interferometers //Nanomaterials. – 2022. – Т. 12. – №. 9. – С. 1520.
5. Grachev A. A. et al. Reconfigurable dipolar spin-wave coupling in a bilateral yttrium iron garnet structure //Physical Review Applied. – 2023. – Т. 19. – №. 5. – С. 054089.
6. Grachev A. A. et al. Nonreciprocal spin-wave transport in an asymmetric three-dimensional magnonic coupler //Physical Review Applied. – 2024. – Т. 21. – №. 2. – С. 024031.

УДК 538.955

Магнитоэлектрические эффекты в гибкой композитной структуре с магнитострикционным волоконным композитом

Савельев Д.В.

к.ф.-м. н., инженер-исследователь НОЦ «Магнитоэлектрические материалы и устройства»
РТУ МИРЭА

Мусатов В.И.

аспирант кафедры нанoeлектроники ИПТИП РТУ МИРЭА

Фетисов Л.Ю.

д.ф.-м. н., профессор кафедры нанoeлектроники ИПТИП РТУ МИРЭА

Аннотация. В диапазоне температур от 240 до 320 К исследован резонансный магнитоэлектрический эффект в композитной структуре ПВДФ-магнитострикционный волоконный композит. Получены частотные и полевые зависимости магнитоэлектрического напряжения, генерируемого структурой. Частота резонанса линейно убывала во всем диапазоне температур. Магнитоэлектрический коэффициент практически не изменяется при температурах ниже комнатной. Дальнейшее увеличение температуры приводит к его уменьшению примерно на 20%.

Ключевые слова: магнитоэлектрический эффект, магнитострикционный волоконный композит, гибкая композитная структура, пьезополимер.

Magnetolectric effects in flexible composite structure comprising magnetostrictive fibrous composite

Savelev D.V.

PhD, Engineer-researcher, SEC "Magnetolectric materials and devices", RTU MIREA

Musatov V.I.

Graduated student, Department of Nanoelectronics, IPTIP, RTU MIREA

Fetisov L.Y.

D.Sc., Professor, Department of Nanoelectronics, IPTIP, RTU MIREA

Annotation. Resonant magnetolectric effect in composite structure comprising piezoelectric polymer PVDF and magnetostrictive fibrous composite was investigated in temperature range between 240K and 320K. ME voltage dependencies on frequency and magnetic field were obtained. It was shown that resonant frequency linearly decreased with increasing temperature. Magnetolectric voltage coefficient slightly changed below room temperature. In higher temperatures its values decreased about 20%.

Keywords: magnetolectric effect, magnetostrictive fibrous composite, flexible composite structure, piezopolymer

Магнитоэлектрический (МЭ) эффект заключается в изменении поляризации образца под действием магнитного поля. Наибольшие по величине МЭ эффекты наблюдали в гибких композитных мультиферроиках, состоящих из механически соединенных слоев

ферромагнетика (ФМ) и пьезоэлектрика (ПЭ) [1]. Одним из перспективных материалов ФМ слоев таких структур является магнитострикционный волоконный композит (МВК), представляющий собой набор параллельных волокон магнитострикционного ФМ, помещенных в полимерную матрицу вплотную друг к другу [2]. Ранее было показано, что МВК перспективны для создания гибких датчиков магнитных полей, в том числе чувствительных к направлению магнитного поля [2,3]. Тем не менее, для применения таких структур необходимо исследовать влияние температуры окружающей среды на их параметры. В данной работе впервые исследован МЭ эффект в гибкой композитной структуре, состоящей из слоев пьезополимера ПВДФ и МВК на основе проводов аморфного магнитного сплава, в диапазоне температур от 240 до 320 К.

Слой МВК состоял из проводов аморфного магнитного сплава FeCoSiB (ELIRI[®], Moldova), покрытых стеклом. Общий диаметр волокон составлял 71 мкм. Размеры МВК в плоскости составили 20 мм × 13 мм. Микрофотография изготовленного слоя МВК приведена на рис. 1а. Слой ПЭ представлял собой коммерчески доступный пьезоэлемент LDT028K на основе ПВДФ с размерами в плоскости 25 мм × 13 мм. Изображение изготовленной композитной структуры ПВДФ-МВК приведена на рис. 1б. Структуру закрепляли на массивном основании с одного конца и помещали в постоянное магнитное поле H величиной до 100 Э, создаваемое катушками Гельмгольца, направленное вдоль оси волокон. Переменное магнитное поле $h\cos(2\pi ft)$ амплитудой h до 3 Э в диапазоне частот 0.1-100 кГц коллинеарное постоянному создавала пара модулирующих катушек.

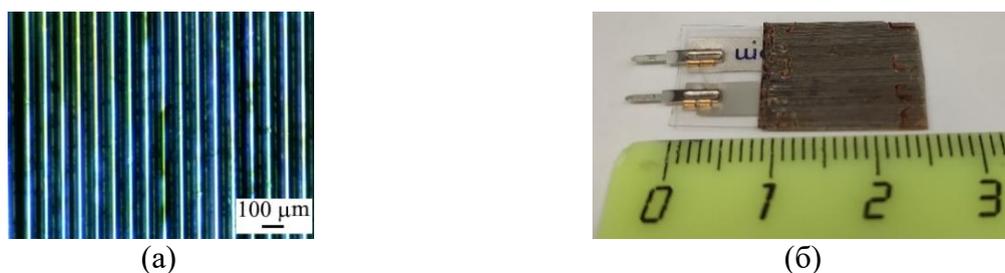


Рис.1. (а) Микрофотография МВК, (б) фотография композитной структуры ПВДФ-МВК

На рис. 2 показана измеренная на частоте резонанса $f = 2.2$ кГц зависимость МЭ коэффициента от магнитного поля, полученная при температуре 290 К. Его наибольшее значение составило $\dot{\alpha} \approx 23$ В/(Э·см) в поле $H_m \approx 18.2$ Э, соответствующем максимальному значению пьезомагнитного модуля МВК ($q = \partial\lambda/\partial H$). Наблюдавшееся на начальном участке медленное увеличение МЭ коэффициента также было обнаружено на полевой зависимости пьезомагнитного модуля МВК. Величина МЭ коэффициента превышает значения для аналогичных структур, в которых в качестве слоя ФМ использована лента аморфного сплава Metglas или МВК на основе никеля [2-4].

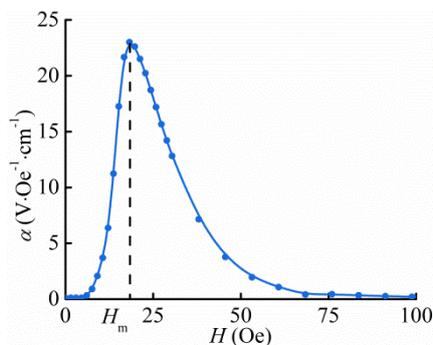


Рис.2. Зависимость МЭ коэффициента от магнитного поля H , полученная при температуре 290 К

Поскольку МЭ напряжение и резонансная частота значительно изменяются под действием температуры, было проведено сравнение следующих нормированных параметров: отношение МЭ напряжения при данной температуре к его максимальному значению u/u_{\max} и отношение изменения частоты к ее максимальному значению $\Delta f/f_{\max}$, где $\Delta f = f - f_{\max}$. На рис. 3

приведены зависимости данных параметров от температуры. Видно, что МЭ коэффициент практически не изменялся до 290 К. При дальнейшем увеличении температуры его величина уменьшалась примерно на 19%, что обусловлено как уменьшением пьезомагнитного модуля МВК, так и уменьшением пьезомодуля ПВДФ [5]. Резкое уменьшение МЭ коэффициента при 240 К может быть обусловлено стеклованием слоя ПВДФ. Ранее было показано, что при температуре ниже температуры стеклования $T_g \approx 230-240$ К наблюдается резкое уменьшение пьезомодуля d_{31} ПВДФ [6]. При увеличении температуры от 240 до 320 К частота резонанса линейно уменьшалась примерно на 24%, что обусловлено уменьшением модуля Юнга слоев ПВДФ и МВК.

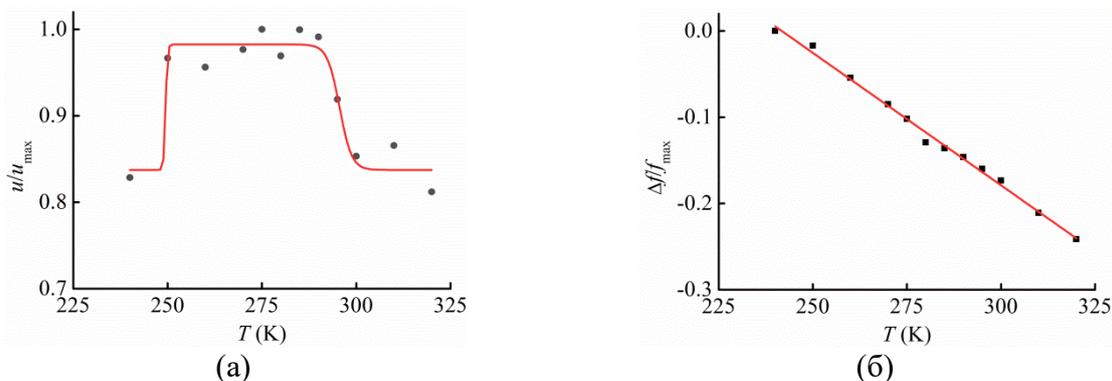


Рис. 3. Зависимость (а) относительного уменьшения МЭ коэффициента и (б) частоты резонанса от температуры структуры ПВДФ-МВК

Таким образом, в работе впервые исследован МЭ эффект в композитной структуре ПВДФ-МВК в широком диапазоне температур. Показано, что резонансная частота структуры уменьшается при увеличении температуры. МЭ напряжение уменьшается на 20% при температуре 320 К, по сравнению с максимальным значением. Полученные результаты могут быть использованы для создания датчиков магнитных полей на основе структур с магнитострикционными волоконными композитами.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № ФСФЗ-2023-0005).

Список использованной литературы:

1. Liang X., Matyushov A., Hayes P. et al. // IEEE. Trans. Mag. – 2021 – V. 57. – P.400157.
2. Fetisov L.Y., Saveliev D.V., Dzharparidze M.V., Musatov V.I., Fetisov Y.K. // Appl. Phys. Lett. – 2021. – V. 119. –P. 252904.
3. Saveliev D.V., Fetisov L.Y., Musatov V.I., Dzharparidze M.V. Anisotropic magnetoelectric effect in lead zirconate titanate and magnetostrictive fiber composite structures. // Russ. Tech. J. – 2022. –V. 10. – P. 85-92.
4. Fetisov L., Baraban I., Fetisov Y. et al. Nonlinear magnetoelectric effects in flexible composite ferromagnetic–piezopolymer structures // JMMM. – 2017. – V. 441. – P. 628-634.
5. Silva M.P., Costa C.M., Sencadas V. et al. Degradation of the dielectric and piezoelectric response of β -poly(vinylidene fluoride) after temperature annealing. // J Polym Res. – 2011. – V. 18. – P. 1451–1457.
6. Tashiro K., Tadokoro H., Kobayashi M. Structure and piezoelectricity of poly(vinylidene fluoride) // Ferroelectrics. – 1981. – V. 32. – P. 167-175.

УДК 541.64:537.3:53.092:53.098:678.84

Аномальная электропроводность магнитного эластомера под действием деформации и магнитного поля

Степанов Г.В.

нач. лаб. магнитных композитов АО «ГНИИХТЭОС»

Семеренко Д.А.

к.ф.-м. н., ст.н.с. НИИРЛ МГТУ им. Н.Э.Баумана

Лобанов Д.А.

к.т.н. в.н.с. лаборатории магнитных композитов АО «ГНИИХТЭОС»

Бахтияров А.В.

м.н.с. лаборатории магнитных композитов АО «ГНИИХТЭОС»

***Аннотация.** Магнитоактивные эластомеры (МАЭ) – новый тип магнитоуправляемых композиционных материалов, состоящих из порошка железа и полимерной матрицы, электрические свойства которых изменяются в магнитном поле. В частности, в магнитном поле электропроводность материала в магнитном поле возрастает на 5 порядков, аналогично она возрастает и при гидростатическом нагружении. Вольтамперная характеристика материала характеризуется экспоненциальной зависимостью, что указывает на то, что электропроводность в материале осуществляется по механизму туннелирования электрона. Исследование динамики изменения электропроводности под внешним воздействием показало, наличие аномально резкого кратковременного возрастания сопротивления перед его падением при воздействии давления или магнитного поля. Это указывает на наличие процесса разрушения и длительного процесса восстановления электропроводящего мостика между электропроводящим наполнителем композита, или аномально длительное время туннелирования электрона в полимерной матрице.*

***Ключевые слова:** магнитоактивные эластомеры, сопротивление, туннелирование, электропроводность, магнитное поле*

Abnormal electrical conductivity of a magnetic elastomer under the influence of deformation and magnetic field

Stepanov G.V.

Head of Laboratory for Magnetic composites of JSC GNIICHTEOS

Semerenko D. A.

Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher Laboratory
Bauman Moscow State Technical University

Lobanov D.A.

Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher Laboratory for Magnetic composites
JSC GNIICHTEOS

Bakhtiarov A.B.

Junior Researcher at the Laboratory for Magnetic composites JSC GNIICHTEOS

Annotation. *Magnetoactive elastomers feature magnetocontrollable composite materials of a new type consisting of a polymer matrix and particles of iron filling it and exhibiting the capability to vary their electrical parameters under the influence of magnetic fields. In particular, in sufficiently strong external fields their conductivity may increase by 5 orders of magnitude; a similar effect is observed under hydrostatic pressure. The volt-ampere characteristic of the material has the features of an exponent, which points to the possibility that its conductivity may be based on an electron tunneling mechanism. Investigation of the dynamic pattern of the capability to conduct electric current showed that the moment when a mechanical or field action is applied is immediately followed by a sharp and narrow peak of resistance before this parameter starts decreasing more gradually. This suggests that if the tunneling indeed takes place and an impact must result in the destruction of conductive paths established among the particles, then either their re-establishing requires a certain time or the tunneling itself of an electron through the polymer is a lengthy process.*

Keywords: *Magnetoactive elastomers, resistance, tunneling effects, electrical conductivity, magnetic fields*

В последние годы активно развивается научно-практическое направление – «умные» материалы. Свойства таких материалов изменяются под внешним воздействием. Одним из таких материалов являются магнитоактивные эластомеры (МАЭ), свойства которых изменяются под воздействием магнитного поля. Изначально исследовали магнитодеформационный эффект – деформация в неоднородном магнитном поле [1, 2], магнитореологический эффект – повышение вязкоупругих свойств в магнитном поле [3]. В последнее время активно исследуют электрические свойства в магнитном поле – магнитоэлектрический и магниторезистивный эффект. Зависимость этих свойств исследуют как при переменном [4], так и при постоянном токе [5]. Электропроводность материала в магнитном поле 300 мТл возрастает на 5-6 порядков. Также значительно возрастает проводимость под действием гидростатического давления – пьезорезистивный эффект. Интересно, что (вольтамперная) ВА-характеристика для материала имеет экспоненциальную зависимость, сопротивление материала уменьшается с увеличением перепада напряжения на образце [5]. Это указывает, что электропроводность протекает по механизму туннелирования электрона. Скорей всего имеет место смешанный механизм, включающий и закон Ома.

МАЭ по своей структуре представляет собой композит, в эластичную полимерную матрицу которого внедрены магнитные частицы, как правило железные порошки, например, карбонильного железа. Такой электропроводящий наполнитель под действием магнитного поля намагничивается и взаимодействуя между собой образует цепеподобные структуры, вытянутые вдоль линий магнитного поля. Способность образовывать обратимые структуры определяется упругими свойствами матрицы. Обычно, модуль упругости Юнга для материала находится в интервале 10-100 кПа. Таким образом под действием магнитного поля, магнитный электропроводящий наполнитель структурируется в электропроводящие цепи и сопротивление материала значительно уменьшается. Процесс обратимый, после выключения магнитного поля частицы возвращаются на свои места под действием упругих сил полимерной матрицы. Аналогичные процессы наблюдаются при сдавливании образца, частицы электропроводящего наполнителя сближаются друг с другом и сопротивление материала уменьшается в направлении сдавливания – пьезорезистивный эффект. Процессы структурирования растянуты во времени и занимают несколько секунд до достижения стационарного состояния, что связано с величиной упругости полимерной матрицы. На рис. 1 представлена ВА-характеристика образца МАЭ диаметром 2 см и толщиной 1.5 мм и зависимость электропроводности от магнитного поля.

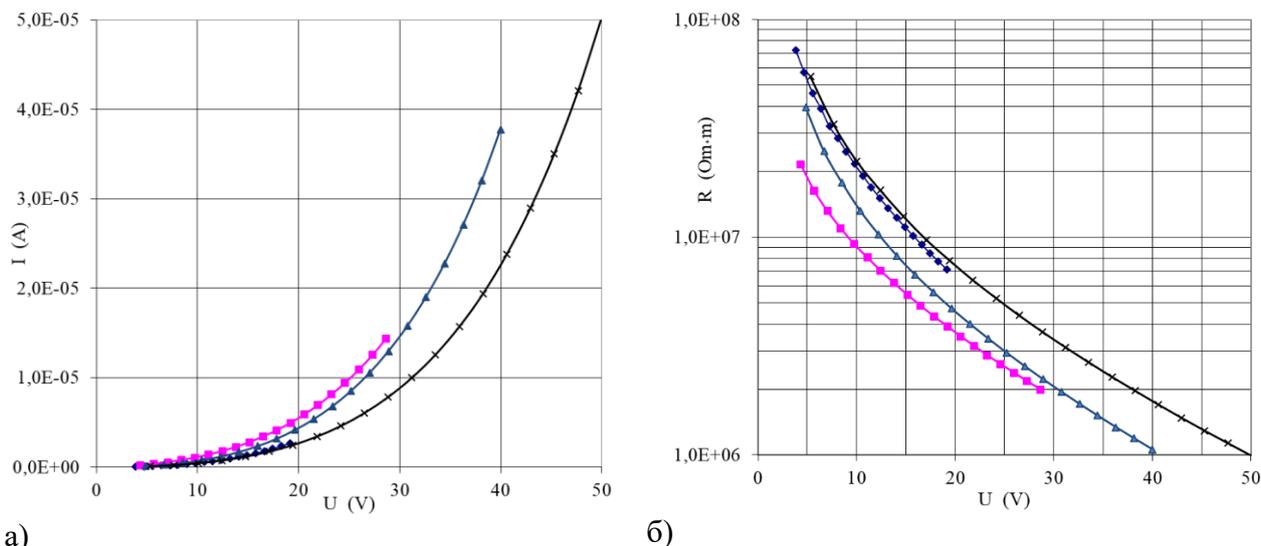


Рис. 1. а) ВА-характеристика для образца МАЭ. б) Зависимость сопротивления от напряжения.

Как видно из рисунка, электропроводность МАЭ протекает через механизм туннелирования. Мы видим типичную экспоненциальную зависимость на ВА-характеристике и соответственно снижение сопротивления образца от напряжения, приложенного к образцу. Данное явление является типичным для композитных электропроводящих структур, в которых частицы электропроводящего наполнителя разъединены диэлектрической плёнкой микронной толщины. Однако один новый, непонятный эффект сопровождает процесс снижения сопротивления под действием магнитного поля и гидростатического давления. Как видно из рис. 2 при подаче на образец магнитного поля, сопротивление материала кратковременно возрастает, перед типичным снижением.

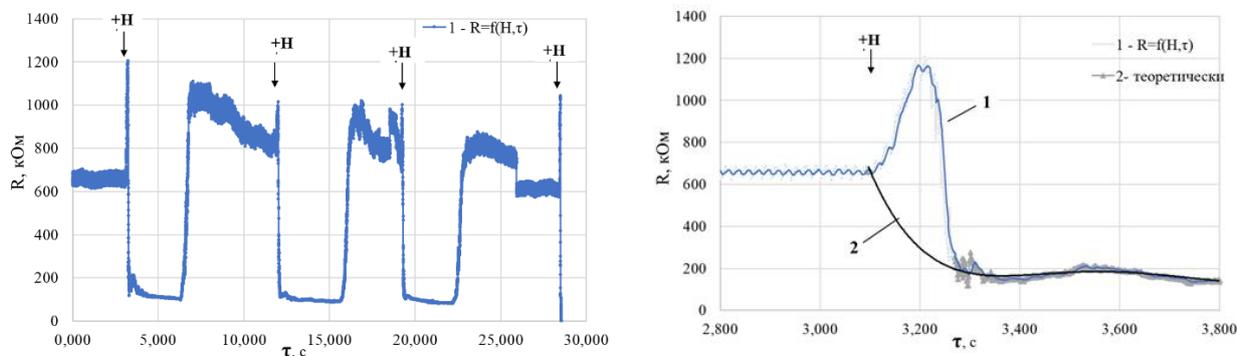


Рис. 2. Зависимость сопротивление образца при ступенчатом включении магнитного поля 200 мТл. Справа укрупнённая часть первого пика на рисунке слева. Разрешение 1 мс.

На рис. 2 (справа) показана укрупнённая часть первого пика левого рисунка. Теоретически, при приложении магнитного поля, сопротивление должно снижаться по кривой 2. На самом деле снижение сопротивления происходит по кривой 1. Мы наблюдаем довольно большой пик, связанный с возрастанием сопротивления в течение 100 мс с последующим снижением сопротивления до заданного, равновесного. Такое же поведение сопротивления наблюдается и при воздействии на образец гидростатического давления. При кратковременном ударе наблюдается резкий скачок возрастания сопротивления, как показано на рис. 3.

Анализ всех полученных результатов показывает, что процесс роста сопротивления объединён процессом перестройки внутренней структуры МАЭ, процессом движения частиц в полимерной матрице. Независимо от того, сближаются частицы или расходятся, на время движения частиц сопротивление всего образца увеличивается. Поскольку процесс

электропроводности протекает через диэлектрическую плёнку полимера, представляется, что при протекании тока через диэлектрик, в нём должен образоваться электропроводящий мостик.

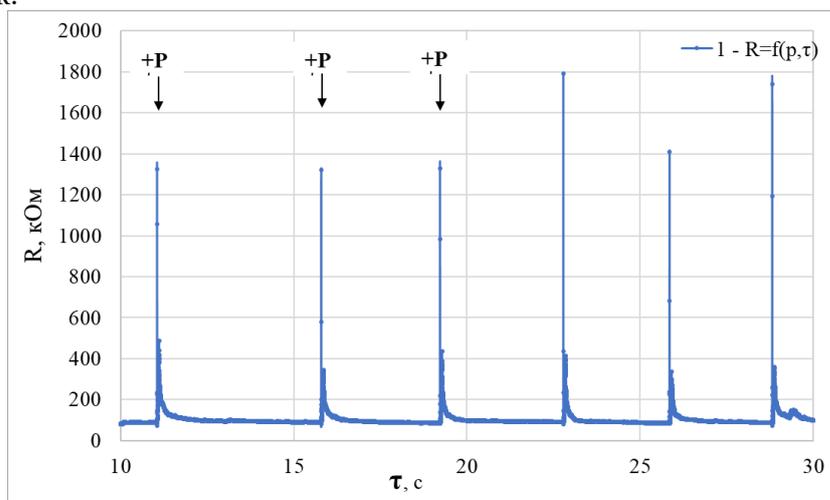


Рис. 3. Зависимость сопротивления образца МАЭ при ударе по образцу.

Для его образования требуется время, поскольку процесс может быть, как физический, так и в какой-то степени химический (ионная проводимость), так как процесс идёт через специфическую химическую среду полимера. В момент деформации полимера образованный туннельным током электропроводящий мостик разрушается и далее вновь восстанавливается при новых стационарных положениях частиц электропроводящего наполнителя. Какое время необходимо для появления электропроводящего мостика? Всё ещё зависит от времени наступления нового стационарного положения электропроводящих частиц. В наших наблюдениях при минимальном регистрируемом времени релаксационного процесса 2-5 мс и числе точек перехода между электропроводящими частицами 100-200, время необходимое для восстановления электропроводящего перехода или восстановления туннелирования в миллион раз больше, чем при обычном протекании тока через проводник. Время туннелирования и механизм являются дискуссионным вопросом. Вот такое дискуссионное явление наблюдается.

Список использованной литературы:

1. Nikitin L. V., Mironova L. S., Stepanov G. V., Samus A. N. The Influence of a Magnetic Field on the Elastic and Viscous Properties of Magnetoelastics // Polymer Science, Ser. A. – 2001 – Vol. 43, No. 4 – P. 443–450.
2. Nikitin L.V., Stepanov G.V., Mironova L.S., Gorbunov A.I. Magnetodeformational effect and effect of shape memory in magnetoelastics // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2004. – V. 272-276. – P. 2072–2073, 10.1016/j.jmmm.2003.12.838
3. Borin D., Stepanov G., Musikhin A., Zubarev A., Bakhtiarov A., Storozhenko P. Magnetorheological Effect of Magnetoactive Elastomer with a Permalloy Filler // Polymers. 2020. – V.12. – N.10. – P.2371. <https://doi.org/10.3390/polym12102371>
4. Stepanov G.V., Bakhtiarov A.V., Lobanov D.A., Borin D.Yu., Semerenko D.A., Storozhenko P.A. Magneto-resistive and magnetocapacitive effects in magnetic elastomers // Journal SN Applied Sciences. 2022. – V.4. – No. 178. – 12 p. DOI:10.1007/s42452-022-05068-y
5. Stepanov G.V., Bakhtiarov A.V., Lobanov D.A., Storozhenko P.A., Magneto-resistivity and piezoresistivity of magnetoactive elastomers // JMMM. – 2023. – V. 587. – Art.#171313. doi.10.1016/j.jmmm.2023.171313

УДК 537.633.9

**Магнитоэлектрический эффект в гибридных структурах
на основе бессвинцовой керамики****Разбаев П.А.**младший научный сотрудник лаборатории нелинейных материалов
ГНУ ИТА НАН Беларуси, Витебск, Беларусь**Набздоров И.С.**аспирант лаборатории нелинейных материалов ГНУ ИТА НАН Беларуси,
Витебск, Беларусь**Кудыбин В.М.**младший научный сотрудник лаборатории нелинейных материалов
ГНУ ИТА НАН Беларуси, Витебск, Беларусь**Лалетин В.М.**к.ф.-м. н., ведущий научный сотрудник лаборатории нелинейных материалов
ГНУ ИТА НАН Беларуси, Витебск, Беларусь**Поддубная Н.Н.**к.ф.-м. н., заведующий лабораторией нелинейных материалов
ГНУ ИТА НАН Беларуси, Витебск, Беларусь

***Аннотация.** Получены гибридные структуры никель – объемный композит – никель, на основе твердого раствора титаната бария с добавками феррита никеля. Покрытие никеля наносилось методами химического и электрохимического осаждения в режиме реверсивного тока. Увеличение магнитоэлектрического коэффициента в гибридных структурах превосходит величину эффекта, наблюдаемую в объемных композитах, более чем на порядок и достигает значений, наблюдаемых в композитах на основе традиционно используемой керамики цирконат-титанат свинца. Нанесение покрытий никеля в течение 20 минут приводит к перераспределению величин продольного и поперечного эффекта.*

***Ключевые слова:** гибридные структуры, магнитоэлектрический эффект, бессвинцовые материалы, титанат бария.*

Magnetoelectric effect in hybrid structures based on lead-free ceramics**Razbaev P.A.,**Junior researcher, Laboratory
of nonlinear materials, State Scientific Institution ITA NAS of Belarus, Vitebsk, Belarus**Nabzdorov I.S.,**Graduate student, Laboratory
of nonlinear materials, State Scientific Institution ITA NAS of Belarus, Vitebsk, Belarus**Kudybin V.M.,**Junior researcher, Laboratory of nonlinear materials,
State Scientific Institution ITA NAS of Belarus, Vitebsk, Belarus**Laletin V.M.,**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading researcher, Laboratory of nonlinear materials, State Scientific Institution ITA NAS of Belarus, Vitebsk, Belarus

Poddubnaya N.N.,

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of Laboratory of nonlinear materials, State Scientific Institution ITA NAS of Belarus, Vitebsk, Belarus

Annotation. Hybrid structures of nickel – bulk composite – nickel, based on a solid solution of barium titanate with additions of nickel ferrite, have been obtained. Nickel coating was applied using chemical and electrochemical deposition methods in reverse current mode. The increase in the magnetoelectric coefficient in hybrid structures exceeds the magnitude of the effect observed in bulk composites by more than an order of magnitude and reaches the values observed in composites based on traditionally used lead zirconate titanate ceramics. Deposition of nickel coatings for 20 minutes leads to a redistribution of the longitudinal and transverse effect values..

Keywords: hybrid structures, magnetoelectric effect, lead-free materials, barium titanate.

Для изготовления композиционных структур с магнитоэлектрическими свойствами использовалась бессвинцовая керамика титаната бария состава $50\% \text{Ba}_{0,65}\text{Ca}_{0,35}\text{TiO}_3 + 50\% \text{BaTi}_{0,9}\text{Zr}_{0,1}\text{O}_3$, и феррит, обладающий высоким удельным сопротивлением $\sim 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Образцы объемного композита с содержанием 10% феррита никеля получены высокотемпературным твердофазным синтезом из феррита и титаната бария. Синтез феррита никеля $\text{NiFe}_{1,9}\text{Co}_{0,02}\text{O}_4$, легированного кобальтом, проведен при температуре 1100°C в течение двух часов. Спекание композиционного состава проводилось на воздухе при температуре 1330°C . Спеченные композиты подвергались плоскопараллельной шлифовке до толщины 400 мкм. На поверхность образцов наносились покрытия никеля химическим осаждением. Для получения толстых пленок никеля с магнитными свойствами использован раствор электрохимического никелирования на основе сульфата никеля с добавкой сахарина при $\text{pH} = 3,6-4$. Оптимальный режим осаждения наблюдался при токе 10 А/дм^2 и температуре раствора 40°C . С целью нанесения гладкого покрытия раствор перемешивался воздухом, а осаждение осуществлялось в импульсном режиме с длительностью периодов осаждение/растворение 90/9 с. Толщина покрытия определялась длительностью осаждения, составлявшей для всех образцов 20 минут.

Линейный МЭ эффект исследовали путем измерения напряжения, возникающего на образце при наложении на него переменного и медленно меняющегося магнитных полей. Переменное магнитное поле создавалось катушками Гельмгольца. Его амплитуда составляла 80 А/м , частота 1 кГц . Величина медленно меняющегося магнитного поля изменялась в пределах $\pm 200 \text{ кА/м}$. Исследования были проведены при двух различных ориентациях образца: вектор электрической поляризации перпендикулярен и параллелен внешнему постоянному и переменному магнитным полям (transversive и longitudinal effect, соответственно). МЭ коэффициент по напряжению (α_E) определяли исходя из толщины образца (h), величины напряжения (dU) и напряженности переменного магнитного поля (dH): $\alpha_E = dU/(h \cdot dH)$.

Результаты исследования МЭ зависимостей для объемных структур и гибридных композитов на их основе представлены на рисунках 1 и 2.

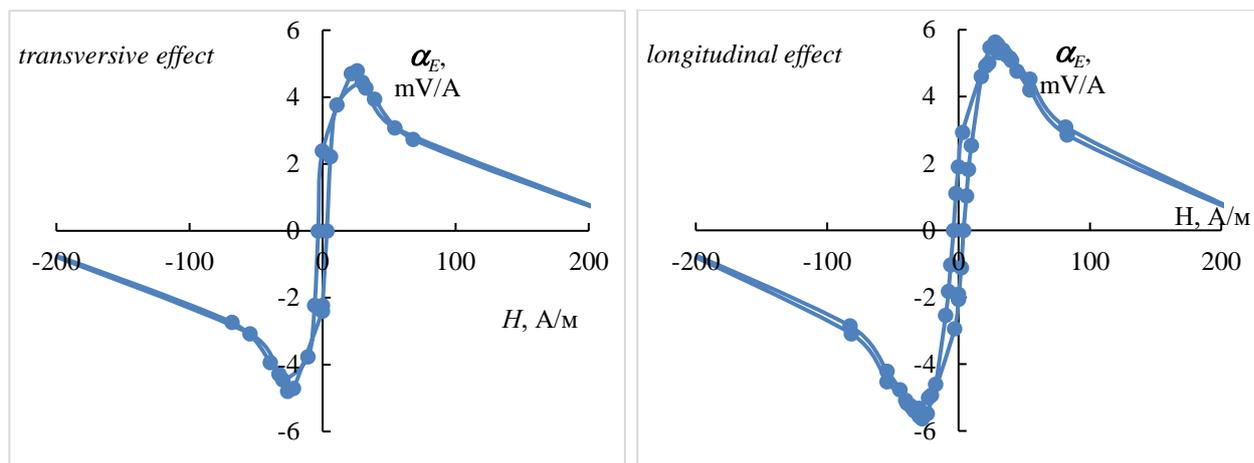


Рисунок 1. Линейная полевая зависимость продольного и поперечного МЭ коэффициента объемного композита состава $50\%Ba_{0.65}Ca_{0.35}TiO_3+50\%BaTi_{0.9}Zr_{0.1}O_3$

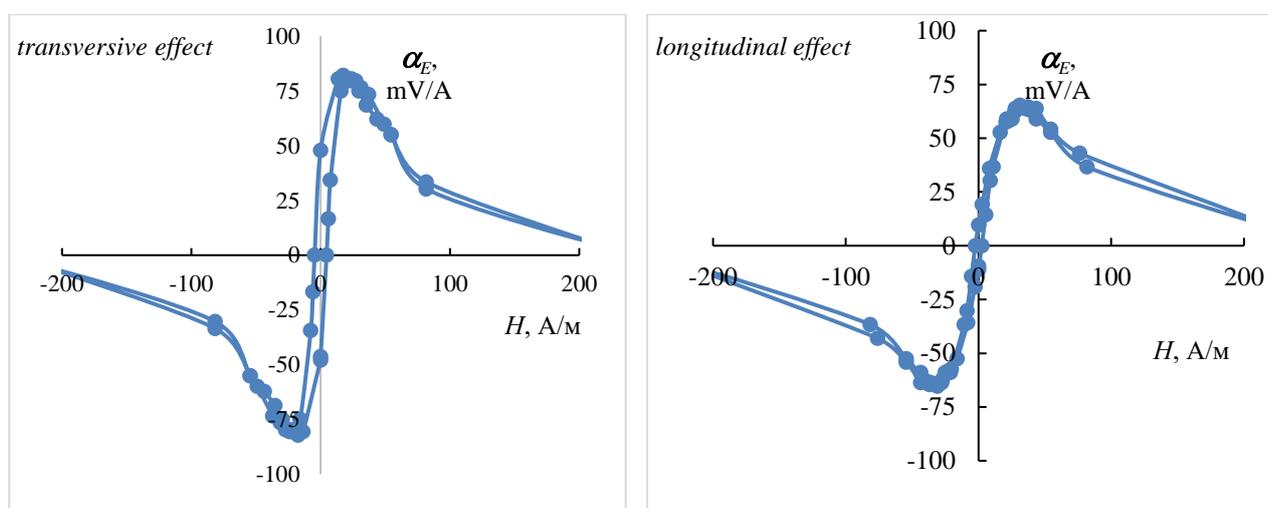


Рисунок 2. Линейная полевая зависимость продольного и поперечного МЭ коэффициента гибридной структуры состава $Ni/50\%Ba_{0.65}Ca_{0.35}TiO_3+50\%BaTi_{0.9}Zr_{0.1}O_3/Ni$

На рисунке 1 представлена типичная зависимость продольного и поперечного эффекта. Величина МЭ коэффициента достаточно низкая, и составляет 5,4 мВ/А в случае продольной ориентации, и 4,8 мВ/А при поперечной. Зависимость МЭ коэффициента, приведенная на рисунке 2, показывает существенный рост МЭ коэффициента при использовании магнитного покрытия никеля на композите с неизменным составом. В этом случае величина продольного эффекта, наблюдаемого в структуре, на 20% ниже, чем поперечного. Общая толщина покрытия никеля, полученного на композите за 20 мин, составляет не более 10 мкм. Т.о. металлизация магнитоэлектрической керамики с увеличением толщины композита менее, чем на 2,5%, позволяет повысить магнитоэлектрический коэффициент более, чем в 10 раз.

Полученные значения величины α_E сравнимы с МЭ эффектом, наблюдаемым на традиционно используемой композиционной керамике цирконат-титанат свинца [1], что позволяет рассчитывать на использование магнитоэлектрических структур для реализации прикладных устройств преобразования магнитного поля в электрический сигнал.

Список использованной литературы:

1. Laletin V.M., Paddubnaya N.N., Srinivasan G., De Vreugd C.P., Bichurin M.I., Petrov V.M., Filippov D.A. Frequency and field dependence of magnetoelectric interactions in layered ferromagnetic transition metal-piezoelectric lead zirconate titanate. //Appl. Phys. Lett. – 2005. – vol.87. – p.222507.

УДК 537.9

Исследование вкладов магнитострикционного и магниторотационного эффектов в магнитоэлектрический отклик полимерной мультиферроидной пленки**Игнатов А.А.**инженер-исследователь НОЦ «Умные материалы и биомедицинские приложения,
БФУ им. И. Канта**Райхер Ю.Л.**д.ф.-м. н., главный научный сотрудник Лаборатории динамики дисперсных систем,
ИМСС УрО РАН**Столбов О.В.**к.ф.-м. н., старший научный сотрудник Лаборатории динамики дисперсных систем,
ИМСС УрО РАН**Сальников В.Д.**лаборант-исследователь НОЦ «Умные материалы и биомедицинские приложения,
БФУ им. И. Канта**Савин В.В.**инженер-исследователь НОЦ «Умные материалы и биомедицинские приложения,
БФУ им. И. Канта**Воронцов П.А.**лаборант-исследователь НОЦ «Умные материалы и биомедицинские приложения,
БФУ им. И. Канта**Родионова В.В.**к.ф.-м. н., директор НОЦ «Умные материалы и биомедицинские приложения, БФУ
им. И. Канта

***Аннотация.** Композитные магнитоэлектрики имеют ряд преимуществ перед аналогичными однофазными системами; одно из них заключается в возможности тонкой «настройки» свойства материала за счёт выбора компонентов, их соотношения и методов постобработки материалов. Для реализации такой «настройки» важно понимать детали механического взаимодействия фаз. Цель настоящей работы – экспериментально продемонстрировать, что в композите типа ферромагнитный наполнитель–пьезоэлектрический полимер магнито-стрикционный и магниторотационный вклады в магнитоэлектрический эффект могут иметь сопоставимую величину.*

***Ключевые слова:** композитные мультиферроики, прямой магнитоэлектрический эффект*

Study of the contributions of magnetostrictive and magnetorotational effects to the magnetoelectric response of a polymer multiferroic film**Ignatov A.A.**

Research engineer, REC “Smart Materials and Biomedical Applications”, IKBFU

Raikher Y.L.

Prof., Chief researcher at the Laboratory of Dispersed Systems Dynamics, ICMM, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

Stolbov O.V.

Dr., Senior researcher at the Laboratory of Dispersed System Dynamics, ICMM, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

Salnikov V.D.

Laboratory researcher, REC “Smart Materials and Biomedical Applications”, IKBFU

Savin V.V.

Research engineer, REC “Smart Materials and Biomedical Applications”, IKBFU

Vorontsov P.A.

Laboratory researcher, REC “Smart Materials and Biomedical Applications”, IKBFU

Rodionova V.V.

Dr., Director of the REC “Smart Materials and Biomedical Applications”, IKBFU

Annotation. *Composite magnetoelectrics possess several advantages over their single-phase analogues. One of those merits is the possibility to finely “tune” the properties of the material through the choice of the phases, their ratio, and methods of post-processing treatment. To implement such “tuning”, it is essential to understand the details of mechanical interaction of the phases. The purpose of this work is to experimentally demonstrate that in a composite of the ferromagnet particles–piezoelectric polymer type the magnetostrictive and magnetorotational contributions in the magnetoelectric effect might have comparable magnitudes.*

Keywords: *composite multiferroics, direct magnetoelectric effect*

Магнитоэлектрические композиты способны демонстрировать как прямой магнитоэлектрический эффект (электрическая поляризация под действием магнитного поля), так и обратный: изменять намагниченность в ответ на приложенное электрическое поле. В композитах этот эффект является следствием механического взаимодействия ферромагнитной и пьезоэлектрической фаз. Такие материалы имеют ряд преимуществ перед однофазными мультиферроиками, поскольку их отклик на порядок выше [1], а их природа даёт возможность легко варьировать соотношение фаз для программирования свойств композита в соответствии с его конкретным предназначением. Высокая величина магнитоэлектрического эффекта позволяет использовать такие композиты в качестве чувствительных элементов датчиков магнитного или электрического поля [2,3], устройств сбора энергии [3], интеллектуальных каркасов для тканевой инженерии [4] и т. д.

Одним из открытых вопросов прикладной физики магнитоэлектрических композитов является организация оптимальной механической связи между ферромагнитной и пьезоэлектрической фазами, а также характер данной связи. В большинстве исследований рассматривается только вклад магнитострикции в магнитоэлектрический отклик; однако теоретические оценки свидетельствуют, что в определённых условиях вклад от механических поворотов частиц оказывается соизмеримым по величине с магнитострикционным [5].

В качестве экспериментальной проверки указанного вывода будут представлены результаты эксперимента по измерению прямого магнитоэлектрического эффекта в квазистатических условиях. Установка для измерения магнитоэлектрического эффекта представляет собой плоский конденсатор (композит с металлическими обкладками), помещенный в поле медленно вращающихся неодимовых магнитов. Магнитоэлектрический коэффициент рассчитывается как отношение измеренного напряжения к произведению толщины образца на напряженность магнитного поля.

В качестве объекта исследования были выбраны композиты на основе пьезоактивной полимерной матрицы (ПВДФ), наполненной наночастицами магнитожёстких ферритов: $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ и CoFe_2O_4 . Для увеличения адгезии между ПВДФ и наночастицами поверхность последних была покрыта олеиновой кислотой.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 21-72-30032.

Список использованной литературы:

1. Pereira N., Lima A.C., Lanceros-Mendez S., Martins P. // Materials. – 2020. – V. 13. – Art. no. 4033.
2. Vidal J.V., Turutin A.V., Kubasov I.V., Kislyuk A.M., Kiselev D.A., Malinkovich M.D., Parkhomenko Y.N., Kobeleva S.P., Sobolev N.A., Kholkin A.L.// IEEE Transactions on Ultrasonics and Ferroelectrics, Frequency Control. – 2020. – V. 67. – P. 1219.
3. Pereira N., Lima A.C., Correia V., Perinka N., Lanceros-Mendez S., Martins P. //Materials. – 2020. – V. 13. – Art. no. 1729.
4. Omelyanchik A., Antipova V., Gritsenko C., Kolesnikova V., Murzin D., Han Y., Turutin A.V., Kubasov I.V., Kislyuk A.M., Пина Т.С., et al. //Nanomaterials. – 2020. – V. 11. – Art. no. 1154.
5. Stolbov O.V., Raikher Yu.L.// Nanomaterials. – 2024. – V. 14. – Art. no. 31.

УДК 537.633.9

Влияние небольших добавок кальция на магнитоэлектрические свойства композиционных структур на основе титаната бария

Лалетин В.М.

к.ф.-м. н., ведущий научный сотрудник ГНУ ИТА НАН Беларуси, Витебск, Беларусь

Кудыбин М.В.

младший научный сотрудник ГНУ ИТА НАН Беларуси, Витебск, Беларусь

Поддубная Н.Н.

к.ф.-м. н., заведующий лабораторией ГНУ ИТА НАН Беларуси, Витебск, Беларусь

***Аннотация.** Представлены результаты исследования магнитоэлектрического взаимодействия объемной композиционной структуры $\text{Ba}_{(1-x)}\text{Ca}_x\text{TiO}_3 : \text{NiFe}_{1.9}\text{Co}_{0.02}\text{O}_4$ от добавок кальция ($x=0..0.15$) при соотношении ферромагнитной и пьезоэлектрической компонент как 50:50%. Полученные в бессвинцовом объемном композите для низкочастотной полевой зависимости значения магнитоэлектрического коэффициента по напряжению, превосходящие 100 мВ(см·Э), сопоставимы с магнитоэлектрическими характеристиками аналогичных структур на основе свинец содержащей керамики.*

Ключевые слова: магнитоэлектрический эффект, композиционная структура, титанат бария

The influence of small calcium additions on the magnetoelectric properties of composite structures based on barium titanate

Laletin V.M.,

PhD Sc., leading researcher, State Scientific Institution ITA NAS of Belarus, Vitebsk, Belarus

Kudybin M.V.,

Junior Researcher, State Scientific Institution ITA NAS of Belarus, Vitebsk, Belarus

Poddubnaya N.N.,

PhD Sc., Head of Laboratory, State Scientific Institution ITA NAS of Belarus, Vitebsk, Belarus

Annotation. The magnetoelectric interaction of the bulk composition structure $Ba_{(1-x)}Ca_xTiO_3 : NiFe_{1.9}Co_{0.02}O_4$ from calcium additives ($x=0..0.15$) with a ratio of ferromagnetic and piezoelectric components as 50:50% are presented. The values of the magnetoelectric voltage coefficient exceeding $100\text{ mV}/(\text{cm}\cdot\text{Oe})$ obtained in a lead-free bulk composite for low-frequency field dependence are comparable with the magnetoelectric characteristics of similar structures based on lead-containing ceramics.

Key words: magnetoelectric effect, compositional structure, barium titanate

В настоящее время одними из наиболее распространенных пьезоэлектриков при производстве композиционных материалов являются пьезокерамики на основе цирконата - титаната свинца (ЦТС). МЭ-конструкции с использованием таких материалов обладают высокими диэлектрическими, пьезоэлектрическими и МЭ характеристиками. Однако экологическая направленность современных технологий, высокая токсичность свинца и его способность накапливаться в организме человека налагают требования по ограничению использования свинецсодержащих материалов. Целью настоящей работы было исследование МЭ-эффекта в объемных композиционных структурах, состоящих из феррита никеля и бессвинцовой пьезокерамики титаната бария, легированной кальцием. Перспективность настоящих исследований основана на результатах исследований, представленных в работах [1, 2].

Титанат бария получали по традиционной керамической технологии с использованием карбоната бария $BaCO_3$ и оксида титана TiO_2 марки чда. Состав смеси рассчитывали с учетом содержания основного вещества. Исходные компоненты взвешивали на аналитических весах ВЛР-200. Их смешивание и измельчение осуществляли в шаровой мельнице в присутствии жидкой среды (этиловый спирт) в течение 30 минут. Полученную массу прессовали в брикеты под давлением $5 \cdot 10^7$ Па. Синтез проводили на воздухе при температуре 1200°C в течение двух часов. Дробление и измельчение полученного материала осуществляли в яшмовой ступке с последующим просеиванием через сито с размером ячеек 7 микрон. Феррит никеля получали по аналогичной технологии из оксидов железа Fe_2O_3 и никеля NiO марки чда. Его синтез проводился на воздухе в течение двух часов при температуре 1100°C . Композиционный материал получали из навески исходных компонентов в количестве 1:1 по массе титаната бария и феррита никеля. Их смешивание осуществляли в яшмовой ступке в жидкой среде (этиловый спирт) в течение часа. Полученную смесь прессовали в брикеты под давлением

2 10^8 Па, используя в качестве пластификатора водный раствор поливинилового спирта. Заготовки спекались на воздухе при температуре 1240°C в течение двух часов. Скорость охлаждения печи не превышала 50 градусов в час. Полученные керамические заготовки подвергались плоскопараллельному шлифованию. Электроды наносились путем вжигания серебряной пасты при температуре 750°C в течение 30 минут. Образцы поляризовали при температуре 100°C в течение часа в электрическом поле напряженностью 1000 В/мм с последующим охлаждением в этом поле до комнатной температуры в течение получаса.

Для исследования линейного МЭ эффекта измеряли напряжение, возникающее на образце под действием небольшого переменного и постоянного магнитных полей [3]. Постоянное магнитное поле генерировалось электромагнитом. Напряженность переменного магнитного поля H_{ac} , создаваемого катушками Гельмгольца, составляла 1 Э. Измерения проводились на частоте 1 кГц. МЭ-сигнал, генерируемый образцом, подавался на предусилитель, который служил для согласования импеданса и усиления сигнала. Для его регистрации использовался осциллограф. Измерения проводили при сонаправленной ориентации внешних магнитных полей и поляризации (продольный эффект) и при их ортогональной ориентации (поперечный эффект). Результаты исследования представлены в таблице.

Таблица. Диэлектрические и магнитоэлектрические параметры композиционных структур $Ba_{(1-x)}Ca_xTiO_3 : NiFe_{1.9}Co_{0.02}O_4$

x, %	ϵ	ρ , г/см ³	$\alpha_{E\perp}$, мВ/(см·Э)	$\alpha_{E\parallel}$, мВ/(см·Э)
0	131	4,36	27,4	20,7
0,05	136	4,74	100,5	72,0
0,1	148	4,77	106,7	80,0
0,15	152	4,81	116,9	87,7

Полученные значения МЭ характеристик композитов сравнимы по величине с аналогичными материалами на основе свинец содержащей ЦТС-керамики, что позволяет рассчитывать на использование полученных композитов для проектирования различных электронных устройств, принцип действия которых основан на МЭ преобразовании – датчиков магнитного поля, записывающих устройств, сборщиков и т.д., устройств спинтроники.

Список использованной литературы:

1. Filipović, S., Obradović, N., Andjelković, Lj., Olćan, D., Petrović, J., Mirković, M., Pavlović, V., Jeremić, D., Vlahović, B., Đorđević A. Multiferroic Heterostructure $BaTiO_3/\epsilon\text{-Fe}_2O_3$ Composite Obtained by in situ Reaction// Science of Sintering. – 2021 – 53 – 1-8.
2. Laletin V., Kudybin M., Poddubnaya N., Filippov D. Magnetolectric Properties of Lead-Free Three-Layer Structure Barium–Titanate–Piezoceramic Nickel.// J. Compos. Sci. – 2023. – 7 – 211.
3. Гелясин А.Е., Лалетин В.М. Установка для исследования магнитоэлектрического эффекта // ГНУ ИТА НАН Беларуси. 1988. – Деп. В ЦНИИ «Электроника» –Р – 5126, 1988. – 7с. // Электронная техника – 1989. – Сер. 6, Вып. 7(244) – С. 75.

УДК 537.39

Температурные, частотные и концентрационные зависимости импеданса и микроструктура композитных плёнок (CoFeB+SiO₂)**Котов Л.Н.**

д.ф.-м. н., профессор, зав. кафедрой радиофизики и электроники,
Сыктывкарский государственный университет

Ласёк М.П.

к.ф.-м. н., доцент кафедры радиофизики и электроники,
Сыктывкарский государственный университет

Калинин Ю.Е.

д.ф.-м. н., профессор, профессор кафедры твердотельной электроники,
Воронежский государственный технический университет

Ситников А.В.

д.ф.-м. н., профессор, профессор кафедры твердотельной электроники,
Воронежский государственный технический университет

Аннотация. Были исследованы температурные, частотные и концентрационные зависимости импеданса и тангенса угла потерь композитных плёнок (CoFeB+SiO₂) с концентрацией металлического сплава $x=0.48-0.88$ в интервале температур 180-400 K и диапазоне частот 10 Гц-10 МГц. Анализ изображений поверхности плёнок, полученных на атомно-силовом микроскопе (АСМ) показал, что композитные плёнки с малой концентрацией $x=0.48-0.51$ имеют гранулированную структуру, а плёнки с $x=0.52-0.75$ имеют гранулярно-перколяционную структуру. Структура плёнок с большой $x=0.78-0.88$ представляет из себя металлическую матрицу с включениями диэлектрических частиц и микрообластей. Плёнки с $x=0.62-0.75$ имеют полосовую магнитную структуру. Анализ температурных и частотных зависимостей импеданса и тангенса потерь проведён с учётом микроструктуры композитных плёнок. Определены интервалы температур, частот, концентраций, при которых наблюдаются максимумы импеданса и тангенса угла диэлектрических потерь композитных плёнок.

Ключевые слова: импеданс, тангенс угла потерь, микроструктура, композитные металл-диэлектрические плёнки, температурные зависимости, спектры

Temperature, frequency and concentration dependences of impedance and microstructure of composite films (CoFeB+SiO₂)**Kotov L.N.**

Dr.Sc., professor, head. Department of Radiophysics and Electronics,
Syktyvkar State University

Lasek M.P.

PhD Sc., Associate Professor, Department of Radiophysics and Electronics,
Syktyvkar State University

Kalinin Yu.E.

Dr.Sc., professor, professor of the department of solid-state electronics,
Voronezh State Technical University

Sitnikov A.V.

Dr.Sc., professor, professor of the department of solid-state electronics,
Voronezh State Technical University

Annotation. *The temperature, frequency and concentration dependences of the impedance loss tangent of composite films (CoFeB+SiO₂) with metal alloy concentration $x=0.48-0.88$ were studied in the temperature range 180-400 K and frequency range. Analysis of film surface images obtained with an atomic force microscope (AFM) showed that composite films with low concentration $x = 0.48-0.51$ have a granular structure, and films with $x = 0.52-0.75$ have a granular-percolation structure. The structure of films with large $x=0.78-0.88$ is a metal matrix with inclusions of dielectric particles and microregions. Films with $x=0.62-0.75$ have a stripe magnetic structure. An analysis of the temperature and frequency dependences of impedance and loss tangent was carried out taking into account the microstructure of composite films. The ranges of temperatures, frequencies, and concentrations at which the maximum impedance and dielectric loss tangent of composite films are determined.*

Keywords: *impedance, loss tangent, microstructure, composite metal-dielectric films, temperature dependences, spectra*

Исследование магнитных структур и электрических спектров тонких композитных пленок с магнитными металлическими и диэлектрическими фазами в зависимости от концентрации и температуры необходимо проводить, поскольку их результаты позволят для объяснить механизмы электропереноса, поглощения электромагнитных волн, а также понимания вклада нано- и микроструктуры композитных плёнок в эти свойства. Механизмы электрического переноса, наблюдаемые в композитных пленках, нелинейные эффекты, изменение температур фазовых превращений и другие эффекты могут стать ключевыми для развития наноэлектроники [1–3]. Исследование спектров импеданса при прохождении переменных сигналов тока и распространении электромагнитного поля в плёнках позволяет выявить особенности поведения электродинамических свойств для использования магнитных композитных плёнок в современной радиотехнике и связи.

Плёнки для исследований были изготовлены в Воронежском государственном техническом университете путём ионной бомбардировки мишеней в виде пластинок из металлического сплава CoFeB и диэлектрика SiO₂. Вылетающие частицы из металлического сплава и диэлектрика попадали и осаждались на лавсановой подложке. Лавсановая подложка в виде листа имела размеры 295×195 мм². Давление в вакуумной установке при напылении составляло 10⁻⁴ Торр. На электронно-сканирующем микроскопе TESCAN MIRA 3 определялись средние доли атомов химических элементов и толщины плёнок. Концентрация 48 томов металлической фазы x возрастала от 0.2 до 0.92 вдоль подложки. Плёнки с подложкой нарезались на образцы, в которых изменение концентрации металла вдоль подложки было порядка единиц процентов. Толщины плёнок лежали в диапазоне от 0.5 до 0.85 нм. Структуры рельефа и магнитного фазового контраста поверхности плёнок были получены на атомно-силовом микроскопе NT-MDT (Россия). В микроскопе использовался силиконовый зонд, покрытый магнитным сплавом CoCr. Радиус закругления кончика зонда составлял 20 нм. Частота колебаний внешней силы, действующей на кантилевер с зондом, подбиралась в

диапазоне частот 47 – 90 кГц. В микроскопе регистрировалась разность фаз $\Delta\phi$, которая изменялась в зависимости от силы магнитного взаимодействия зонда с поверхностью плёнок. Температурные и частотные исследования импеданса и тангенса угла потерь плёнок проводились в Центре диагностики функциональных материалов для медицины, фармакологии и нанoeлектроники Научного парка СПбГУ методом диэлектрической спектроскопии (импеданс спектроскопии) с применением криосистемы Quatro в диапазоне частот от 10 Гц до 10 МГц и в интервале температур от -150 до 150 °С.

В результате исследований рельефа и магнитной структуры с помощью магнито-силовой микроскопии было обнаружено, что для композитных плёнок с концентрацией металлического сплава $x=0.46 - 0.50$ свойственна гранулированная микроструктура с размерами гранул 20 – 50 нм, а для плёнок с $x=0.52 - 0.75$ наблюдалась гранулярно-перколяционная структура [1, 2]. Для плёнок с концентрацией $x=0.60 - 0.75$ была обнаружена полосовая магнитная структура с шириной полос 0.2 мкм и длиной более 3 мкм [1, 2]. Структура композитных плёнок с большой концентрацией $x=0.76 - 0.88$ представляла собой металлическую матрицу с включениями диэлектрических наночастиц и микро- областей. В результате исследований плёнок методом диэлектрической спектроскопии были получены температурные, частотные и концентрационные зависимости мнимой и вещественной части импеданса и тангенса угла диэлектрических потерь композитных плёнок. Для плёнок с концентрациями металлического сплава x от 0.62 до 0.72, для которых наблюдалась полосовая магнитная структура, на спектрах тангенса диэлектрических потерь наблюдался частотный максимум во всём исследуемом интервале температур от -150 до 150 °С (рис. 1).

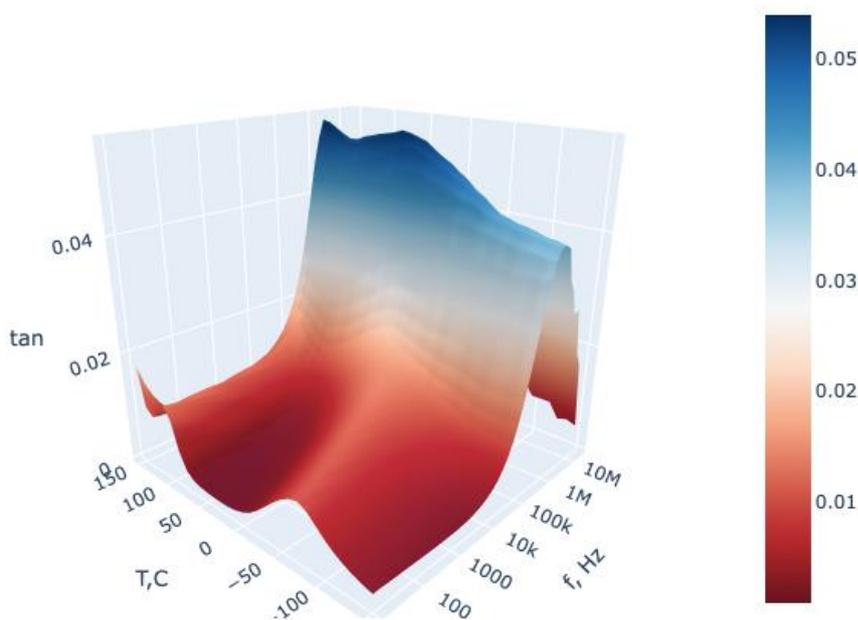


Рис. 1. Зависимость тангенса угла потерь от температуры и частоты для композитной плёнки ($\text{CoFeB}+\text{SiO}_2$) с концентрацией металлического сплава $x=0.66$.

При концентрации металлического сплава 0.62 тангенс угла диэлектрических потерь принимает максимальное значение 0.1. Максимум смещается в сторону больших частот с ростом концентрации металлического сплава x и температуры. На температурных зависимостях тангенса угла диэлектрических потерь при концентрациях x от 0.72 до 0.92 при температурах -70 и 120 °С при частотах от 10 Гц наблюдалось два пика. С ростом частоты эти пики сдвигались в сторону больших температур с разной скоростью и сливались в один пик в мегагерцовом диапазоне частот (рис. 1). Также были обнаружены ещё два пика вещественной части импеданса на температурных зависимостях на низких частотах 10 – 100 Гц для композитных плёнок с $x=0.46 - 0.5$, обладающих гранулированной структурой, амплитуда

которых убывала с ростом частоты. Наклон температурной кривой зависимости мнимой части импеданса монотонно убывала ростом температуры для композитных плёнок в широком интервале концентраций металлического сплава $x=0.48 - 0.92$.

Исследования выполнены за счёт гранта Российского научного фонда, проект № 21-72-20048

Список использованной литературы:

1. L. Kotov, M. Lasek, V. Vlasov, Y. Kalinin, A. Sitnikov and V. Temnov, Influence of Magnetic Field on Microwave Impedance of Composite Films (CoFeB+SiO₂) // International Conference on Next Generation Electronics (NEleX), Vellore, India. – 2023. – pp. 1-4.
2. L.N. Kotov, M.P. Lasek, V.S. Vlasov, et al. Effect of Magnetic Fields on the Microwave Impedance of FeCoB + SiO₂ Composite Films // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. –2022. – Vol. 86. – pp. 588–591.
3. V.S. Vlasov, L.N. Kotov, V.G. Shavrov, et al. Specific features of static and dynamic conduction of a composite film containing metal nanogranules in dielectric matrix // J. Commun. Technol. Electron. – 2014. – Vol. 59. – pp. 920–932.

УДК 537.636

Магнитоэлектрический эффект в двухслойной структуре на основе магнитных эластомеров в градиентном магнитном поле**Макарова Л.А.**

к.ф.-м. н., кафедра магнетизма физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Малиновский Д.Н.

Кафедра магнетизма физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Макарьин Р.А.

Кафедра магнетизма физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Исаев Д.А.

Кафедра магнетизма физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Перов Н.С.

д.ф.-м.н., профессор кафедры магнетизма физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

***Аннотация.** Исследования магнитоэлектрического эффекта, наблюдаемого в мультиферроиках, активно развиваются. Улучшенные характеристики и новые эффекты в новых типах мультиферроиках позволяют расширить область их применений, например, при создании гибких электронных устройств и устройств для преобразования энергии. Магнитоэлектрический эффект в двухслойной структуре на основе пьезополимера и магнитного эластомера наблюдается при изгибе структуры в градиентном магнитном поле. Использование в качестве наполнителя магнитного эластомера различных ферромагнитных нано- или микрочастиц изменяет полевую зависимость магнитной проницаемости эластомера и, как следствие, величину эффекта при различных внешних магнитных полях смещения.*

***Ключевые слова:** магнитный эластомер, мультиферроик, пьезополимер, магнитоэлектрический эффект*

Magnetoelectric effect in the two-layered structure based on magnetic elastomers in gradient magnetic field**Makarova L.A.,**

PhD, Physical Faculty, Lomonosov MSU

Malinovski D.N.,

Physical Faculty, Lomonosov MSU

Makarın R.A.,

Physical Faculty, Lomonosov MSU

Isaev D.A.,

Physical Faculty, Lomonosov MSU

Perov N.S.,

Dr.Sc., Professor, Physical Faculty, Lomonosov MSU

Annotation. *Research on the magnetoelectric effect observed in multiferroics is actively developing. Improved characteristics and new effects in new types of multiferroics allow to expand the field of their applications, for example, in the creation of flexible electronic and energy conversion devices. The magnetoelectric effect in a bilayer structure based on a piezopolymer and a magnetic elastomer is observed when the structure is bent in a gradient magnetic field. Filling the magnetic elastomer with different ferromagnetic nano- or microparticles changes the field dependence of the magnetic permeability of the elastomer and, consequently, the magnitude of the effect at different external magnetic bias fields.*

Keywords: *magnetic elastomer, multiferroics, piezopolymer, magnetoelectric effect*

Магнитоэлектрики, подкласс мультиферроиков, относятся к «умным» материалам и широко используются в сенсорах, устройствах магнитной памяти, преобразователях энергии, фильтрах, антеннах и т.д. Магнитоэлектрические композитные материалы содержат ферромагнитную и сегнетоэлектрическую компоненты. Магнитоэлектрическое преобразование заключается в способности индуцировать электрическую поляризацию при действии внешнего магнитного поля, и наоборот, изменять намагниченность под действием электрического поля.

Гибкие магнитоэлектрические элементы основаны на полимерных компонентах, и это позволяет расширить область их применения в качестве гибкой электроники, мягких магнитоактивных элементов в робототехнике, в биомедицинских приложениях. Самый часто используемый пьезополимер – поливинилиденфторид (ПВДФ), электроактивное состояние которого может быть реализовано в β -фазе. До недавнего времени в качестве ферромагнитного слоя использовались различные металлы, обладающие наибольшей магнитострикцией. Магнитные эластомеры стали альтернативой магнитострикционному слою в слоистых композитах.

Магнитный эластомер представляет собой мягкую полимерную матрицу с внедренными нано- или микрочастицами. Используя магнитный эластомер в качестве слоя в композите, в котором вторым слоем является пьезополимер, можно получить магнитоэлектрическое преобразование. Такой композит исследуется в конфигурации кантилевера, когда образец закреплен с одного конца. В зависимости от того, однородным или градиентным является внешнее магнитное поле, были исследованы механизмы изгиба структуры, в том числе в переменном магнитном поле. Недавно было показано, что уникальные магнитодеформационные свойства магнитного эластомера с микрочастицами позволяют получить магнитоэлектрический эффект в однородных магнитных полях [1]. При этом выраженный эффект магнитодеформации наблюдается в эластомерах с микрочастицами, поскольку частицы такого размера могут смещаться в упругой матрице, в отличие от наночастиц. Поэтому предполагается, что слоистый композит с магнитным эластомером на основе наночастиц в однородных магнитных полях не проявит магнитоэлектрического эффекта.

В градиентном магнитном поле изгиб магнитного эластомера происходит из-за силы, действующей на каждую магнитную частицу со стороны градиентного поля. При этом такая сила зависит только от величины градиента и величины магнитного момента. Смещение микрочастиц также может происходить, однако оно не является необходимым условием для изгиба слоя и, соответственно, всего образца. Поэтому предполагается, что

магнитоэлектрическое преобразование наблюдается в композитах с эластомерами с микро- и наночастицами.

В данной работе представлены экспериментальные результаты исследования двухслойных композитов на основе коммерчески доступной ПВДФ пленки с нанесенными обкладками и защитным покрытием и магнитными эластомерами различного состава. В качестве магнитных наполняющих частиц были использованы: микрочастицы железа, микрочастицы магнетита, наночастицы магнетита, наночастицы феррита кобальта. Магнитные свойства эластомеров и исходных магнитных частиц были измерены с помощью вибрационного магнитометра LakeShore 7400 при комнатной температуре. Магнитоэлектрический эффект был исследован с помощью установки, обеспечивающей зажим слоистого образца с одного конца, в градиентном переменном магнитном поле. Магнитное поле создавалось электромагнитом. Величина тока в электромагните, величина индуцируемого в ПВДФ слое напряжения синхронно контролировались с помощью системы микроконтроллеров Ардуино.

Было проведено численное моделирование изгиба двухслойной структуры в градиентном магнитном поле. Моделирование проводилось в среде Comsol Multiphysics. В модели была использована гибкая упругая пленка, закрепленная с одного конца. Статическая деформация пленки была исследована в градиентном магнитном поле, в зависимости от модуля упругости пленки, ее магнитной проницаемости и величины внешнего магнитного поля. Наглядно изгиб такой пленки в градиентном поле представлен на Рисунке 1.

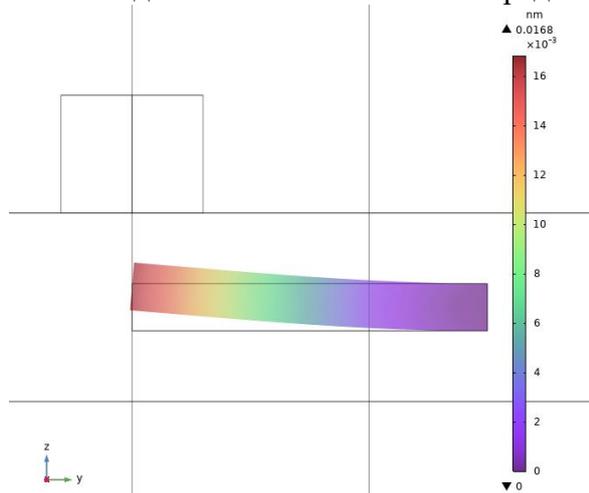


Рис. 1. Изгиб упругой магнитной пленки в градиентном магнитном поле, результат численного моделирования.

Было экспериментально подтверждено наличие магнитоэлектрического эффекта в структуре с магнитным эластомером на основе наночастиц. Результаты моделирования качественно согласуются с экспериментальными данными. Также моделирование позволило получить зависимость эффекта от типа магнитного наполнителя в магнитном эластомере.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-72-10137.

Список использованной литературы:

1. D.V. Savelev et al.// Polymers – 2024. – V. 16(7) – P. 928.

УДК 537.633.9

**Влияние направления намагниченности на магнитоэлектрические свойства структуры
«бидоменный $\text{LiNbO}_3/\text{Fe}_{77}\text{Co}_4\text{Si}_8\text{B}_{11}$ »****Турутин А.В.**к.ф.-м. н., зав. лаборатории «Функциональные низкоразмерные структуры» НИТУ
МИСИС**Кубасов И.В.**

к.ф.-м. н., доцент кафедры МПид НИТУ МИСИС

Темиров А.А.

н.с. лаборатории Физики оксидных сегнетоэлектриков НИТУ МИСИС

Куц В.В.

м.н.с. лаборатории Физики оксидных сегнетоэлектриков НИТУ МИСИС

Кислюк А.М.

с.н.с. лаборатории Физики оксидных сегнетоэлектриков НИТУ МИСИС

Максумова Э.Э.лаборант-исследователь лаборатории Физики оксидных сегнетоэлектриков НИТУ
МИСИС**Малинкович М.Д.**

к.ф.-м. н., доцент кафедры МПид НИТУ МИСИС

Пархоменко Ю.Н.

д.ф.-м.н., научный руководитель кафедры МПид НИТУ МИСИС

Аннотация. Миниатюризация и создание магнитоэлектрических (МЭ) МЭМС устройств требует изучения свойств тонких слоёв метгласа, которые получают методом магнетронного распыления мишени. В работе были изготовлены МЭ композитные структуры на основе бидоменного кристалла ниобата лития ($b\text{-LN}$) $y+128^\circ$ -среза и метгласа ($\text{Fe}_{77}\text{Co}_4\text{Si}_8\text{B}_{11}$). Плёнка метгласа толщиной 1,4 мкм была получена методом высокочастотного магнетронного распыления мишени. Проведено исследование влияния намагничивания МЭ структуры на квазистатическую зависимость МЭ коэффициента. Показана возможность управления МЭ коэффициентом и характером его зависимости от приложенного малого постоянного магнитного поля при предварительном намагничивании структуры в больших постоянных магнитных полях под разным углом. При намагничивании образца вдоль его длины квазистатическая зависимость МЭ коэффициента приобретает гистерезис с положением минимумов при ± 15 Э. Также возрастает значение не нулевого МЭ коэффициент до 18 мВ/(см·Э) при $H_{DC} = 0$ Э.

Ключевые слова: тонкая плёнка метгласа, магнитоэлектрик, бидоменный ниобат лития, магнетронное распыление

**Influence of magnetization direction on the magnetoelectric properties of the
“bidomain LiNbO₃/Fe₇₇Co₄Si₈B₁₁” structure**

Turutin A.V.

PhD, head. laboratory "Functional low-dimensional structures" NUST MISIS

Kubasov I.V.

PhD, Associate Professor, Department of Medical and Pedagogical Studies, NUST MISIS

Temirov A.A.

researcher Laboratory of Physics of Oxide Ferroelectrics NUST MISIS

Kuts V.V.

junior researcher Laboratory of Physics of Oxide Ferroelectrics NUST MISIS

Kislyuk A.M.

senior researcher Laboratory of Physics of Oxide Ferroelectrics NUST MISIS

Maksumova E.E.

Laboratory Assistant-Researcher, Laboratory of Physics of Oxide Ferroelectrics, NUST MISIS

Malinkovich M.D.

PhD Sc., Associate Professor of the Department of MPiD, NUST MISIS

Parkhomenko Yu.N.

Doctor of Physics and Mathematics, Scientific Director of the Department of MP&D, NUST MISIS

Annotation. *Miniaturization and creation of magnetoelectric (ME) MEMS devices requires studying the properties of thin layers of metglas, which are obtained by magnetron sputtering. In this work, ME composite structures were fabricated based on a bidomain crystal of lithium niobate (b-LN) $y+128^\circ$ -cut and metglas (Fe₇₇Co₄Si₈B₁₁). A 1.4- μ m-thick metal glass film was deposited using RF magnetron sputtering. A study was carried out of the influence of magnetization of the ME structure on the quasi-static dependence of the ME coefficient. It is possible to control the ME coefficient and the nature of its dependence on the applied small constant magnetic field by pre-magnetizing the structure in large constant magnetic fields at different angles. When a sample is magnetized along its length, the quasi-static dependence of the ME coefficient acquires hysteresis with the position of the minima at ± 15 Oe. The value of the non-zero ME coefficient also increases to 18 mV/(cm Oe) at $H_{DC} = 0$ Oe.*

Keywords: *metglas thin film, magnetoelectric, bidomain lithium niobate, magnetron sputtering.*

Композитные магнитоэлектрические (МЭ) материалы объединяют в себе магнитострикционный и пьезоэлектрический эффекты, что позволяет создавать на их основе приборы, способные с высокой эффективностью преобразовывать магнитный сигнал в электрический и наоборот. Уникальные свойства МЭ композитов могут быть применены для создания новых электронных устройств, например памяти с произвольным доступом, микромеханических МЭ антенн, СВЧ-фильтров, управляемых напряжением, резонаторов и фазовращателей, а также сверхчувствительных сенсоров магнитных полей [1]. В последние годы интенсивно развивается направление миниатюризации МЭ структур с применением микроэлектромеханических систем (МЭМС) и востребованных в этой области технологий: напыление тонких плёнок пьезоэлектрических и магнитострикционных материалов, утончение подложек и др. [2,3]. Важными задачами на пути получения МЭМС МЭ структур

являются: обработка технологии получения аморфных плёнок метгласа, изучение влияния параметров их получения и внешних воздействий (магнитного поля, температуры) на МЭ свойства композитных структур. Этому уделено мало внимания в современной периодической литературе. В настоящей работе мы изучили влияние приложенного постоянного магнитного поля под разным углом к МЭ структуре на квазистатический МЭ коэффициент. МЭ образец был получен при помощи напыления тонкой пленки метгласа на пьезоэлектрическую подложку.

В работе были изготовлены МЭ композитные структуры на основе бидоменного кристалла ниобата лития (b-LN) $y+128^\circ$ -среза и метгласа ($\text{Fe}_{77}\text{Co}_4\text{Si}_8\text{B}_{11}$). Размеры b-LN: длина 25 мм, ширина 5 мм, толщина 0,5 мм. Плёнка аморфного метгласа состава $\text{Fe}_{77}\text{Co}_4\text{Si}_8\text{B}_{11}$ осаждалась на верхнюю грань кристалла b-LN методом высокочастотного магнетронного распыления мишени $\text{Fe}_{77}\text{Co}_4\text{Si}_9\text{B}_{10}$. Толщина синтезируемого покрытия составила 1,4 мкм. Скорость осаждения метгласа составила 46,6 нм/мин. На нижнюю грань кристалла b-LN в качестве контактного слоя был нанесен Ti толщиной 100 нм методом постоянного магнетронного распыления мишени. Осаждение проводили в вакуумной технологической камере SUNPLA-40TM. Синтез метгласа проходил в атмосфере аргона с рабочим давлением 0,5 Па при мощности магнетрона 200 Вт, а температура подложки не превышала 40°C , что позволило избежать формирования кристаллических фаз. Для характеристики структуры и состава пленок метгласа применялись методики рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (VersaProbe II spectrometer ULVAC-PHI) и просвечивающей электронной микроскопии (JEM 2100 JEOL).

В работе были проведены квазистатические измерения МЭ коэффициента для композитной структуры «Ti/b-LN/ $\text{Fe}_{77}\text{Co}_4\text{Si}_8\text{B}_{11}$ ». В зависимости от направления намагничивания структуры внешним постоянным магнитным полем проведены измерения квазистатического МЭ коэффициента. Процесс намагничивания происходил в электромагните при постоянном магнитном поле 300 мТл. Угол φ задавался между направлением постоянного магнитного поля в электромагните и положением длинной стороны кристалла к приложенному полю. Для исследования были выбраны три угла: вдоль линий магнитного поля (0°), перпендикулярно к ним (90°) и под углом $\varphi = 60^\circ$.

Квазистатические измерения МЭ коэффициента были проведены для образца сразу после осаждения метгласа и для каждого намагничивания под разным углом φ . Внешнее магнитное поле создавалось с помощью двух пар соосных катушек Гельмгольца, позволяющих одновременно прикладывать постоянное и переменное магнитные поля. При измерениях сигнал с генератора синхронного детектора MFLI (Zurich Instruments, Швейцария) усиливался при помощи широкополосного усилителя мощности (AETechron 7224) и передавался на катушки Гельмгольца, отклик с образца детектировался измерительным входом синхронного детектора. Квазистатические измерения проводились в диапазоне амплитуд от -35 Э до $+35 \text{ Э}$ с шагом $0,25 \text{ Э}$ при приложении переменного магнитного поля амплитудой $0,1 \text{ Э}$ на частоте 117 Гц. Результаты измерения представлены на рисунке 1.

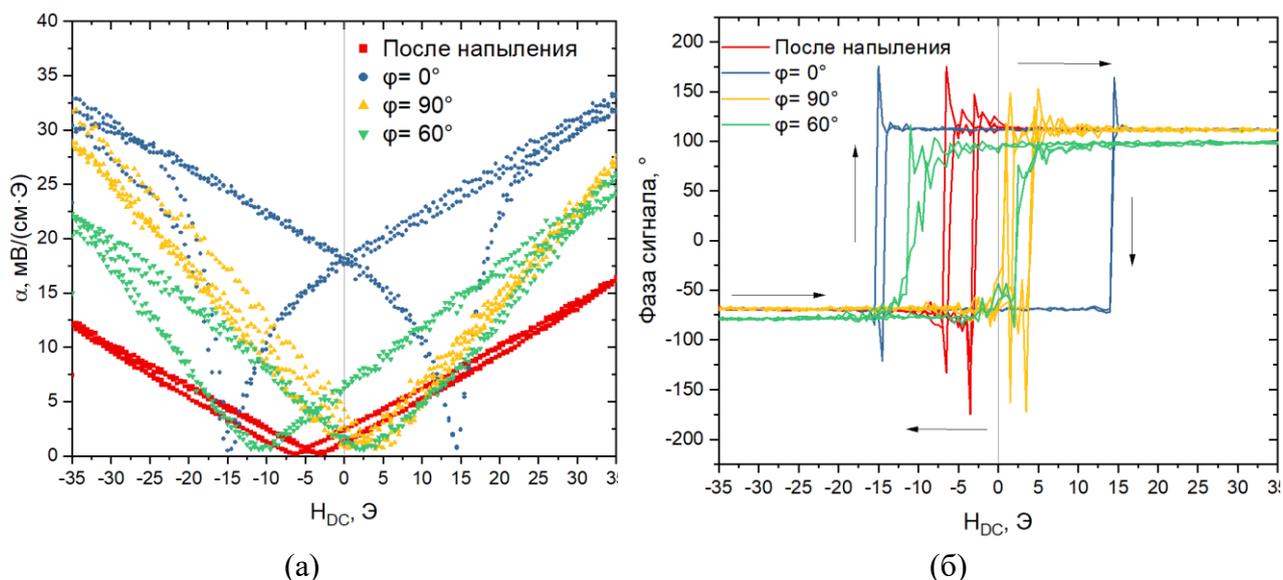


Рис. 1 – (а) Квазистатическая зависимость МЭ коэффициента от приложенного постоянного магнитного поля при разных углах намагничивания структуры. (б) Зависимость фазы МЭ сигнала от приложенного постоянного магнитного поля. Черные стрелки показывают направления прохода при измерение квазистатического МЭ коэффициента.

Зависимость МЭ коэффициента для образца после напыления не имеет выраженного гистерезиса, есть смещение характеристики по магнитному полю (около 5 Э). Смещение относительно нуля координат МЭ коэффициента возможно из-за механических напряжений, которые возникают при достаточно большой скорости роста плёнки метгласа. При таких скоростях может происходить образование столбчатой структуры [4]. При намагничивании образца вдоль его длины ($\phi = 0^\circ$) зависимость МЭ коэффициента от приложенного постоянного магнитного поля приобретает гистерезис с положением минимумов при ± 15 Э. Также возрастает значение МЭ коэффициент до 18 мВ/(см·Э) при $H_{DC} = 0$ Э. Приложив постоянного магнитное поле перпендикулярно длинной стороне образца ($\phi = 90^\circ$), возможно уменьшить гистерезис зависимости МЭ коэффициента от приложенного постоянного магнитного поля, практически до состояния после напыления метгласа. Величину гистерезиса для зависимости МЭ коэффициента от приложенного магнитного поля наглядно показывает график фазы МЭ сигнала на рис. 1(б). Намагничивая образец под углом $\phi = 60^\circ$, было получено промежуточное состояние зависимости МЭ коэффициента от постоянного магнитного поля между начальным (после напыления) и при намагничивании образца под углом $\phi = 0^\circ$. Значение не нулевого МЭ коэффициент составило 7 мВ/(см·Э).

Таким образом, возможно управление МЭ коэффициентом и характером его зависимости от приложенного малого постоянного магнитного поля при предварительном намагничивание структуры в постоянных магнитных полях под разным углом. Такое свойство может быть интересно при создании элементов МЭ памяти или для МЭ сенсоров магнитных полей, т. к. структуры обладают гистерезисом, которым возможно управлять и имеют МЭ коэффициент без внешнего подмагничивания. Возникновение магнитного гистерезиса в слое аморфного метгласа не характерно для магнитомягких магнитострикционных плёнок. Подобная зависимость МЭ коэффициента типична для структур на основе кристаллического никеля [5], который обладает магнитным гистерезисом. Однако, структурный анализ показал, что полученная пленка $Fe_{77}Co_4Si_8B_{11}$ полностью аморфна. Появление гистерезиса в аморфных пленках метгласа возможно из-за высокой скорости роста структуры, что приводит к уменьшению плотности метгласа. Требуется более детальное исследование структуры полученных плёнок и магнитных свойств от технологических параметров осаждения метгласа.

Благодарность:

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00808, <https://rscf.ru/project/22-19-00808/>.

Список использованной литературы:

1. Liang X. et al. Roadmap on Magnetoelectric Materials and Devices // IEEE Trans Magn. – 2021. –Vol. 57. – № 8. – P. 1–57.
2. Liang X. et al. A review of thin-film magnetoelastic materials for magnetoelectric applications // Sensors (Switzerland). – 2020. –Vol. 20 – № 5.
3. Turutin A. V et al. Magnetoelectric MEMS Magnetic Field Sensor Based on a Laminated Heterostructure of Bidomain Lithium Niobate and Metglas // Materials. –2023. –Vol. 16. – № 2. – P. 484.
4. Shimada Y., Hasegawa T., Kojima H. Sputtering of FeCo-B amorphous films with soft magnetic properties // IEEE Trans Magn. – 1981. – Vol. 17. – № 2. – P. 1199–1203.
5. Huang T. et al. Self-Biased Magnetoelectric Ni/LiNbO₃/Ni Trilayers for Body-Embedded Electronic Energy Harvesters // Phys Rev Appl. – 2023. – Vol. 20. – № 3. – P. 034059.