

РАДИОФИЗИКА

УДК 621.382

DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).807-814

ГРНТИ 47.09.29

Специальность ВАК 1.3.4

Научная статья

ВЛИЯНИЕ МАГНИТОСТРИКЦИОННОЙ ФАЗЫ НА МУЛЬТИКАЛОРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В МАГНИТОСТРИКЦИОННО-СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ КОМПОЗИТЕ

Петров В. М., Саплев А. Ф., Гаврушко В. В.

*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого
(Великий Новгород, Россия)*

Аннотация Изучена зависимость мультикалорического эффекта в двухслойной структуре на основе титаната бария и феррита кобальта от объемной доли сегнетоэлектрика при использовании термодинамического подхода Ландау-Гинзбурга. Показано, что электрокалорический эффект можно регулировать с помощью объемной доли сегнетоэлектрика. Приложение магнитного поля является эффективным подходом для повышения мультикалорического эффекта в магнитоэлектрично-сегнетоэлектрической структуре. Выбор магнитной компоненты оптимального состава, позволяющей создать в сегнетоэлектрическом слое необходимое механическое напряжение и обладающей магнитокалорическим эффектом в соответствующем диапазоне температур, позволит повысить мультикалорический эффект в двухслойной структуре.

Ключевые слова: математическое моделирование, электрокалорический эффект, магнитокалорический эффект, эластокалорический эффект, мультиферроик

Для цитирования: Петров В. М., Саплев А. Ф., Гаврушко В. В. Влияние магнитоэлектрично-сегнетоэлектрической фазы на мультикалорический эффект в магнитоэлектрично-сегнетоэлектрическом композите // Вестник НовГУ. 2023. 5(134). 807-814. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).807-814

Research Article

MAGNETOSTRICTIVE PHASE INFLUENCE ON MULTICALORIC EFFECT IN MAGNETOSTRICTIVE-FERROELECTRIC COMPOSITE

Petrov V. M., Saplev A. F., Gavrushko V. V.

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract The ferroelectric volume fraction dependence of the multicaloric effect in a bilayer of barium titanate and cobalt ferrite was studied using the Landau-Ginzburg thermodynamic approach. It is shown that the electrocaloric effect can be controlled using the volume fraction of the ferroelectric. Magnetic field application is an effective tool to enhance the multicaloric effect in a magnetostrictive-ferroelectric structure. The choice of an optimal magnetic component which has a magnetocaloric effect in the appropriate temperature range and enables generating the necessary mechanical stress in ferroelectric layer, will increase the multicaloric effect in a bilayer.

Keywords: mathematical modeling, electrocaloric effect, magnetocaloric effect, elastocaloric effect, multiferroic

For citation: Petrov V. M., Saplev A. F., Gavrushko V. V. Magnetostrictive phase influence on multicaloric effect in magnetostrictive-ferroelectric composite // Vestnik NovSU. 2023. 5(134). 807-814. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).807-814

Введение

В качестве альтернативы используемого в настоящее время метода охлаждения, основанного на циклическом сжатии и расширении газа, исследуются

эффекты в твердом теле. Эти эффекты связаны с изменением энтропии, обусловленным переходом из упорядоченного в неупорядоченное состояние. При этом указанный переход происходит под влиянием внешних полей. К таким эффектам относится магнитокалорический эффект (МКЭ) [1-4], заключающийся в изменении намагниченности магнитоупорядоченного материала во внешнем магнитном поле. Это приводит к нагреву или охлаждению магнитного материала в условиях адиабатического процесса.

Известен также электрокалорический эффект (ЭКЭ) [6], который состоит в том, что внешнее электрическое поле вызывает изменение поляризации сегнетоэлектрического материала. Кроме того, существует барокалорический эффект (БКЭ) заключается в изменении энтропии при воздействии на материал гидростатического давления и эластокалорический эффект (ЭлКЭ) при воздействии на материал одноосного механического напряжения [7]. При воздействии на материал гидростатического давления или одноосного механического напряжения наблюдается повышение температуры, если имеет место переход в упорядоченное состояние.

Для достижения больших значений ЭКЭ необходимо использовать фазовые переходы, так как наиболее сильный ЭКЭ наблюдается в области фазового перехода. Для дополнительного увеличения ЭКЭ могут быть использованы такие приемы, как подбор толщины пленки [6, 8-11], модифицирование химического состава, изменение анизотропии материала, приложение механического напряжения [10, 12].

Моделирование электрострикционного слоя

Рассмотрим слоистую магнитоэлектрично-сегнетоэлектрическую структуру, слои которой имеют идеальный механический контакт. Будем считать, что внешние электрическое и магнитное поля приложены вдоль оси Z .

Обозначим через F_f энергию сегнетоэлектрического упорядочения, через F_e упругую энергию, через F_{es} энергию электрострикции и через F_E энергию сегнетоэлектрика во внешнем электрическом поле. Плотность свободной энергии сегнетоэлектрика определяется следующим выражением [2, 12-14]:

$$F = F_f + F_e + F_{es} + F_E, \quad (1)$$

В качестве примера рассмотрим бессвинцовый сегнетоэлектрический материал – титанат бария. Энергия сегнетоэлектрического упорядочения титаната бария может быть представлена в виде разложения по четным степеням компонентов поляризации:

$$F_f = a_1 P_3^2 + a_{11} P_3^4 + a_{111} P_3^6 + a_{1111} P_3^8 \quad (2)$$

В уравнении (2) используются обозначения: P – поляризация, $a_1, a_{11}, a_{111}, a_{1111}$ – коэффициенты диэлектрической жесткости.

Будем использовать для записи упругой энергии стандартное выражение:

$$F_e = \frac{c_{11}}{2}(S_1^2 + S_2^2 + S_3^2) + c_{12}(S_1S_2 + S_1S_3 + S_2S_3) \quad (3)$$

где S_i – компонента тензора напряжений, c_{11} и c_{12} – коэффициенты жесткости.

Энергия электрострикции сегнетоэлектрического слоя определяется известным соотношением

$$F_{es} = -q_{11}S_3P_3^2 - q_{12}(S_1 + S_2)P_3^2, \quad (4)$$

В уравнении (4) через q_{11} и q_{12} обозначены коэффициенты электрострикции.

Энергия сегнетоэлектрика во внешнем электрическом поле E_3 определяется выражением:

$$F_E = -P_3 E_3. \quad (5)$$

Компоненты механических напряжений и деформаций можно определить, используя граничные условия:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial S_1} &= \sigma_{p1}, \\ \frac{\partial F}{\partial S_2} &= \sigma_{p2}, \\ \frac{\partial F}{\partial S_3} &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

В выражениях (6) через σ_p обозначен тензор механического напряжения в сегнетоэлектрической фазе двухслойной структуры.

Подстановка решений системы уравнений (6) в уравнение (1) приводит к следующему выражению:

$$F = a_1P_3^2 + b P_3^4 + a_{111}P_3^6 + a_{1111}P_3^8 - E_3P_3, \quad (7)$$

где

$$b = \frac{2a_{11}c_{11}^2 + 2c_{11}a_{11}c_{12} - c_{11}q_{11}^2 - 2c_{11}q_{12}^2 + 4q_{12}c_{12}q_{11} - q_{11}^2c_{12} - 4a_{11}c_{12}^2}{2(c_{11} + 2c_{12})(c_{11} - c_{12})}.$$

Из уравнения (7) видно, что учет граничных условий ведет к перенормировке коэффициента сегнетоэлектрической жесткости для четвертого порядка поляризации в плотности свободной энергии.

Для нахождения равновесной поляризации следует использовать уравнение:

$$\frac{\partial F}{\partial P_3} = -E_3. \quad (8)$$

В уравнении (8) F определяется выражением (7).

Моделирование магнитоэлектрического слоя

Энергия ферритового кристалла записывается в виде

$$W = W_H + W_a + W_S + W_m + W_K. \quad (9)$$

Первый член в правой части выражения (9) – это энергия Зеемана

$$W_H = -\mathbf{M} \times \mathbf{H}_i, \quad (10)$$

где \mathbf{H}_i – внутреннее магнитное поле, включающее в себя размагничивающие поля.

Второй член представляет собой обменную энергию, которая для кубических кристаллов имеет вид

$$W_a = \frac{1}{2M_s} q \sum_i (\nabla M_i)^2, \quad (11)$$

где M_i – компоненты вектора намагниченности, q – константа неоднородного обмена, задаваемая выражением

$$q = H_a a^2, \quad (12)$$

где a – постоянная решетки, H_a – феноменологическое обменное поле.

Третий член в (9) соответствует упругой энергии

$$W_S = \frac{1}{2} {}^m c_{ijkl} {}^m S_{ij} {}^m S_{kl}. \quad (13)$$

Магнитоупругая энергия

$$W_m = \frac{1}{M_s^2} (b_{ij})_{\nu\mu} M_\nu M_\mu {}^m S_{ij}, \quad (14)$$

где b – константы магнитоупругой связи.

Будем считать, что кристаллическая решетка магнитоупругого слоя имеет кубическую симметрию. В этом случае для констант магнитоупругой связи и модулей упругости с целью упрощения вычислений можно ввести обозначения

$$B_1 = \frac{1}{3} b_{iiii}, \quad B_2 = \frac{1}{6} b_{ijij}, \quad c_{11} = \frac{1}{3} c_{iiii}, \quad c_{12} = \frac{1}{6} c_{iijj}, \quad c_{44} = \frac{1}{6} c_{ijij} \quad (15)$$

Для случая, когда оси координат направлены вдоль ребер куба, сумма энергии анизотропии W_K , магнитоупругой и упругой энергии запишется в виде:

$$\begin{aligned} W_S + W_m + W_K = & \frac{K_1}{M_s^4} (M_x^2 M_y^2 + M_y^2 M_z^2 + M_z^2 M_x^2) + \frac{K_2}{M_s^6} M_x^2 M_y^2 M_z^2 + \\ & \frac{B_1}{M_s^2} (M_x^2 {}^m S_1 + M_y^2 {}^m S_2 + M_z^2 {}^m S_3) + \\ & + \frac{B_2}{M_s^2} (M_y M_z {}^m S_4 + M_z M_x {}^m S_5 + M_x M_y {}^m S_6) + \\ & + \frac{1}{2} {}^m c_{11} ({}^m S_1^2 + {}^m S_2^2 + {}^m S_3^2) + \frac{1}{2} {}^m c_{44} ({}^m S_4^2 + {}^m S_5^2 + {}^m S_6^2) + \\ & {}^m c_{12} ({}^m S_1 {}^m S_2 + {}^m S_2 {}^m S_3 + {}^m S_3 {}^m S_1). \end{aligned} \quad (16)$$

В этом выражении симметричный тензор деформации ${}^m S_{ij}$ преобразован к виду 1×6 .

Нужно подчеркнуть, что в уравнениях магнитоупругого материала считается однородно намагниченным монокристаллом кубической симметрии, грани которого параллельны координатным осям и поверхностям композита. Именно в

этой связи тензор анизотропии формы имеет диагональный вид. Это используется при нахождении равновесной намагниченности.

Применение модели для расчета мультикалорического эффекта в двухслойной магнитоэлектрической структуре

Уравнения (7) и (16) представляют собой систему, описывающую двухслойный композит. Математически связь между слоями реализуется в граничных условиях для слоистой структуры. В нашей задаче эти условия заключаются в равенствах смещений и усилий на границе раздела фаз:

$$\begin{aligned} {}^m\mathbf{U}|_{\Omega_0} &= {}^p\mathbf{U}|_{\Omega_0}, \\ {}^m\mathbf{T}|_{\Omega_0} &= {}^p\mathbf{T}|_{\Omega_0}, \\ {}^m\mathbf{T}|_{\Omega_m} &= 0, \\ {}^p\mathbf{T}|_{\Omega_p} &= 0, \end{aligned} \tag{17}$$

где Ω_0 , Ω_m , Ω_p – граничные поверхности, соответственно, раздела фаз, ферритовой фазы и пьезоэлектрической фазы.

Уравнения (17) с учетом (7) и (16) позволяют определить компоненты механических напряжения в магнитоэлектрическом и сегнетоэлектрическом слоях, индуцируемые при приложении внешних электрического и магнитного полей. Механические напряжения могут оказывать существенное влияние на ЭКЭ в сегнетоэлектрике [15, 16] и МКЭ в магнитоэлектрическом слое. Таким образом, наличие механического контакта между компонентами слоистой структуры может привести к усилению мультикалорического эффекта.

В качестве примера рассмотрим слоистую структуру, состоящую из бесвинцового сегнетоэлектрика титаната бария и феррита кобальта. Численные оценки выполнены для температуры $T=25^\circ\text{C}$. Полученные оценки основаны на следующих значениях коэффициентов в выражении для плотности свободной энергии в единицах СИ [10, 12, 14]: $a_1=4.124 \cdot 10^5 \cdot (T - 115)$, $a_{11}=5.328 \cdot 10^8$, $a_{111}=1.294 \cdot 10^9$, $a_{1111}=3.863 \cdot 10^{10}$, $c_{11}=1.755 \cdot 10^{11}$, $c_{12}=8.464 \cdot 10^{10}$, $q_{11}=1.203 \cdot 10^{10}$, $q_{12}=-1.878 \cdot 10^9$, $M_s = 2800$ Гс, ${}^m c_{44} = 0,25 \cdot 10^{11}$ Дж/м³, $B_2 = 7,4 \cdot 10^6$ Э².

$$\Delta T_E = - \int_0^E \frac{T}{C_E} \frac{\partial P_3}{\partial T} dE,$$

где C_E – теплоемкость при постоянном электрическом поле. Производная от поляризации по температуре вычисляется при постоянных электрическом поле и механическом напряжении.

Из данных рисунка 1 следует, что механический контакт в двухслойной структуре на основе титаната бария и феррита кобальта приводит к увеличению ЭКЭ приблизительно в 7 раз по сравнению со свободно стоящим слоем титаната

бария. К сожалению, МКЭ в феррите кобальта имеет максимум на другой температуре, не совпадающей с максимумом ЭКЭ в титанате бария. Подбор параметров магнестрикционного слоя с частичным замещением кобальта позволит получить увеличение мультикалорического эффекта за счет повышения вклада МКЭ в ферритовом слое.

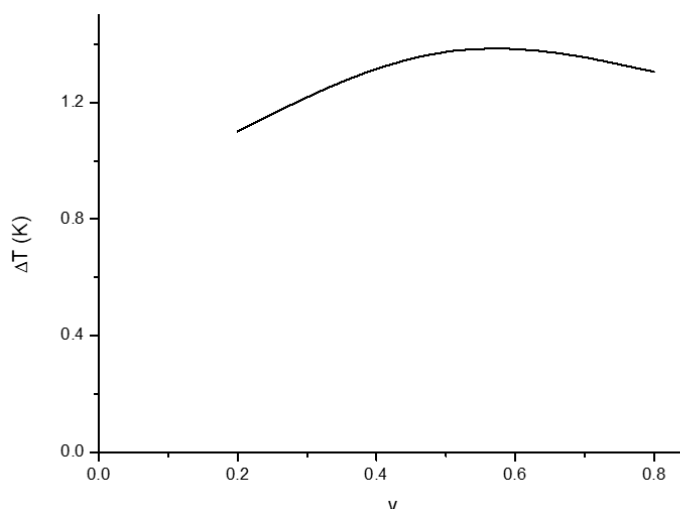


Рисунок 1. Электрокалорический эффект в двухслойной структуре на основе титаната бария и феррита кобальта как функция объемной доли сегнетоэлектрической компоненты. Напряженность электрического поля равна 100 кВ/см, напряженность магнитного поля равна 4000 Э, температура равна 320 К

Заключение

Влияние объемной доли сегнетоэлектрика на мультикалорический эффект в двухслойной структуре на основе титаната бария и феррита кобальта изучено при помощи термодинамического подхода Ландау-Гинзбурга. Показано, что электрокалорический эффект можно регулировать с помощью объемной доли сегнетоэлектрика. Сжимающее напряжение в рассматриваемой двухслойной магнестрикционно-сегнетоэлектрической структуре является следствием механически связанных слоев сегнетоэлектрика и магнестрикционного материала. Выбор магнитной компоненты оптимального состава, позволяющей создать в сегнетоэлектрическом титанате бария необходимое механическое напряжение и обладающей магнитокалорическим эффектом в соответствующем диапазоне температур, позволит повысить мультикалорический эффект в двухслойной структуре.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-20119, <https://rscf.ru/project/22-21-20119/>.

Список литературы

1. De Oliveira N. A., von Ranke P. J. Theoretical aspects of the magnetocaloric effect // Physics Reports. 2010. 489(4/5). 89-159. DOI: 10.1016/j.physrep.2009.12.006

2. Planes A., Castán T., Saxena A. Thermodynamics of multicaloric effects in multiferroic materials: application to metamagnetic shape-memory alloys and ferrotoroidics // *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*. 2016. 374(2074). 20150304. DOI: 10.1098/rsta.2015.0304
3. Hou H., Qian S., Takeuchi I. Materials, physics and systems for multicaloric cooling // *Nature Reviews Materials*. 2022. 7. 633-652. DOI: 10.1038/s41578-022-00428-x
4. Hao J.-Z., Hu F.-X., Yu Z.-B., Shen F.-R., Zhou H.-B., Gao Y.-H., Qiao K.-M., Li J., Zhang C., Liang W.-H., Wang J., He J., Sun J.-R., Shen B.-G. Multicaloric and coupled-caloric effects // *Chinese Physics B*. 2020. 29(4). 047504. DOI: 10.1088/1674-1056/ab7da7
5. Vopson M. M. The multicaloric effect in multiferroic materials // *Solid State Communications*. 2012. 152(23). 2067-2070. DOI: 10.1016/j.ssc.2012.08.016
6. *Electrocaloric Materials*. Springer, Berlin, 2014. 253 p.
7. Старков А. С., Старков И. А. Мультикалорический эффект в твердом теле: новые аспекты // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2014. 146(2). 297-303. DOI: 10.7868/S0044451014080082
8. Cui J., Wu Y., Muehlbauer J., Hwang Y., Radermacher R., Fackler S., Wuttig M., Takeuchi I. Demonstration of high efficiency elastocaloric cooling with large ΔT using NiTi wires // *Applied Physics Letters*. 2012. 101(7). 073904. DOI: 10.1063/1.4746257
9. Bechtold C., Chluba C., Lima de Miranda R., Quandt E. High cyclic stability of the elastocaloric effect in sputtered TiNiCu shape memory films // *Applied Physics Letters*. 2012. 101(9). 091903. DOI: 10.1063/1.4748307
10. Mañosa L., Jarque-Farnos S., Vives E., Planes A. Large temperature span and giant refrigerant capacity in elastocaloric Cu-Zn-Al shape memory alloys // *Applied Physics Letters*. 2013. 103(21). 211904. DOI: 10.1063/1.4832339
11. Lisenkov S., Mani B. K., Chang C.-M., Almand J., Ponomarev I. Multicaloric effect in ferroelectric PbTiO₃ from first principles // *Physical review. B, Condensed matter*. 2013. B 87(22). 224101. DOI: 10.1103/PhysRevB.87.224101
12. Es'kov A. V., Anokhin A. S., Pakhomov O. V., Semenov A. Multiferroic properties of barium strontium titanate ceramics doped with gadolinium and iron // *Ferroelectrics*. 2021. 574(1). 109-114. DOI: 10.1080/00150193.2021.1888054
13. Sokolovskiy R. R., Fayzullin V. D., Buchelnikov S. V., Taskaev S., Drobosyuk M., Khovaylo V. Theoretical treatment and direct measurements of magnetocaloric effect in Ni_{2.19-x}Fe_xMn_{0.81}Ga Heusler alloys // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2013. 343. 6-12. DOI: 10.1016/j.jmmm.2013.04.069
14. Bichurin M., Petrov V., Zakharov A., Kovalenko D., Yang S. C., Maurya D., Bedekar V., Priya S. Magnetolectric Interactions in Lead-Based and Lead-Free Composites // *Materials*. 2011. 4(4). 651-702. DOI: 10.3390/ma4040651
15. Xiao F., Fukuda T., Kakeshita T. Significant elastocaloric effect in a Fe-31.2Pd (at. %) single crystal // *Applied Physics Letters*. 2013. 102(16). 161914. DOI: 10.1063/1.4803168
16. Liu Y., Infante I. C., Lou X. J., Bellaiche L., Scott J. F., Dkhil B. Giant room-temperature elastocaloric effect in ferroelectric ultrathin films // *Advanced Materials*. 2014. 26(35). 6132-6137. DOI: 10.1002/adma.201401935

References

1. De Oliveira N. A., von Ranke P. J. Theoretical aspects of the magnetocaloric effect // *Physics Reports*. 2010. 489(4/5). 89-159. DOI: 10.1016/j.physrep.2009.12.006
2. Planes A., Castán T., Saxena A. Thermodynamics of multicaloric effects in multiferroic materials: application to metamagnetic shape-memory alloys and ferrotoroidics

- // Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences. 2016. 374(2016). 20150304. DOI: 10.1098/rsta.2015.0304
3. Hou H., Qian S., Takeuchi I. Materials, physics and systems for multicaloric cooling // Nature Reviews Materials. 2022. 7. 633-652. DOI: 10.1038/s41578-022-00428-x
 4. Hao J.-Z., Hu F.-X., Yu Z.-B., Shen F.-R., Zhou H.-B., Gao Y.-H., Qiao K.-M., Li J., Zhang C., Liang W.-H., Wang J., He J., Sun J.-R., Shen B.-G. Multicaloric and coupled-caloric effects // Chinese Physics B. 2020. 29(4). 047504. DOI: 10.1088/1674-1056/ab7da7
 5. Vopson M. M. The multicaloric effect in multiferroic materials // Solid State Communications. 2012. 152(23). 2067-2070. DOI: 10.1016/j.ssc.2012.08.016
 6. Electrocaloric Materials. Springer, Berlin, 2014. 253 p.
 7. Starkov A. S., Starkov I. A. Multicaloric effect in a solid: New aspects // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2014. 119(2). 258-263. DOI: 10.1134/S1063776114070097
 8. Cui J., Wu Y., Muehlbauer J., Hwang Y., Radermacher R., Fackler S., Wuttig M., Takeuchi I. Demonstration of high efficiency elastocaloric cooling with large ΔT using NiTi wires // Applied Physics Letters. 2012. 101(7). 073904. DOI: 10.1063/1.4746257
 9. Bechtold C., Chluba C., Lima de Miranda R., Quandt E. High cyclic stability of the elastocaloric effect in sputtered TiNiCu shape memory films // Applied Physics Letters. 2012. 101(9). 091903. DOI: 10.1063/1.4748307
 10. Mañosa L., Jarque-Farnos S., Vives E., Planes A. Large temperature span and giant refrigerant capacity in elastocaloric Cu-Zn-Al shape memory alloys // Applied Physics Letters. 2013. 103(21). 211904. DOI: 10.1063/1.4832339
 11. Lisenkov S., Mani B. K., Chang C.-M., Almand J., Ponomarev I. Multicaloric effect in ferroelectric PbTiO₃ from first principles // Physical review. B, Condensed matter. 2013. B 87(22). 224101. DOI: 10.1103/PhysRevB.87.224101
 12. Es'kov A. V., Anokhin A. S., Pakhomov O. V., Semenov A. Multiferroic properties of barium strontium titanate ceramics doped with gadolinium and iron // Ferroelectrics. 2021. 574(1). 109-114. DOI: 10.1080/00150193.2021.1888054
 13. Sokolovskiy R. R., Fayzullin V. D., Buchelnikov S. V., Taskaev S., Drobosyuk M., Khovaylo V. Theoretical treatment and direct measurements of magnetocaloric effect in Ni₂19-xFexMn0.81Ga Heusler alloys // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2013. 343. 6-12. DOI: 10.1016/j.jmmm.2013.04.069
 14. Bichurin M., Petrov V., Zakharov A., Kovalenko D., Yang S. C., Maurya D., Bedekar V., Priya S. Magnetolectric Interactions in Lead-Based and Lead-Free Composites // Materials. 2011. 4(4). 651-702. DOI: 10.3390/ma4040651
 15. Xiao F., Fukuda T., Kakeshita T. Significant elastocaloric effect in a Fe-31.2Pd (at. %) single crystal // Applied Physics Letters. 2013. 102(16). 161914. DOI: 10.1063/1.4803168
 16. Liu Y., Infante I. C., Lou X. J., Bellaiche L., Scott J. F., Dkhil B. Giant room-temperature elastocaloric effect in ferroelectric ultrathin films // Advanced Materials. 2014. 26(35). 6132-6137. DOI: 10.1002/adma.201401935

Информация об авторах

Петров Владимир Михайлович – доктор технических наук, профессор, профессор, главный научный сотрудник, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-7733-1030, Vladimir.Petrov@novsu.ru

Саплев Алексей Фёдорович – преподаватель, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0008-9052-7987, Alexey.Saplev@novsu.ru

Гаврушко Валерий Владимирович – доктор технических наук, профессор, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-8704-6751, Valery.Gavrushko@novsu.ru