

Физика конденсированного состояния

Научная статья

УДК 537.226.4

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16201>

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ НИТРАТА ЦЕЗИЯ, ВНЕДРЕННОГО В НАНОПРИСТЫЕ ПЛЕНКИ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

А. В. Павлов¹, Е. В. Стукова¹✉, С. В. Барышников²

¹ Амурский государственный университет, г. Благовещенск, Россия;

² Благовещенский государственный педагогический университет,
г. Благовещенск, Россия

✉ lenast@bk.ru

Аннотация. С целью создания материала с улучшенными сегнетоэлектрическими свойствами были изготовлены наноконпозиты на основе нанопористых пленок Al_2O_3 (с разным размером пор), заполненных сегнетоэлектриком – нитратом цезия $CsNO_3$, и изучены их электрофизические свойства. Поверхность пленок контролировалась методом электронной микроскопии. Были измерены температурные зависимости эффективной диэлектрической проницаемости ϵ' и коэффициента третьей гармоники для наноконпозитов. Температура фазовых переходов определялась по максимальному значению производной $d\epsilon'/dT$. Обнаружено, что уменьшение размера пор ведет к снижению температуры Кюри (более чем на 30 К) и размытию фазового перехода, что связано с влиянием собственных размерных эффектов.

Ключевые слова: сегнетоэлектрик, нитрат цезия, диэлектрическая проницаемость, фазовый переход, наноконпозит

Для цитирования: Павлов А. В., Стукова Е. В., Барышников С. В. Фазовые переходы нитрата цезия, внедренного в нанопористые пленки оксида алюминия // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2023. Т. 16. № 2. С. 9–18. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16201>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16201>

PHASE TRANSITIONS OF CAESIUM NITRATE EMBEDDED IN NANOPOROUS ALUMINA FILMS

A. V. Pavlov¹, E. V. Stukova¹✉, S. V. Baryshnikov²

¹ Amur State University, Blagoveshchensk, Russia;

² Blagoveshchensk State Pedagogical University, Blagoveshchensk, Russia

✉ lenast@bk.ru

Abstract. In order to make material with improved properties, nanocomposites based on nanoporous Al_2O_3 films (having different pore sizes) filled with ferroelectric, namely, caesium nitrate $CsNO_3$, have been fabricated, and their electrophysical characteristics have been investigated. The film surfaces were tested by electron microscopy. Temperature dependences of the effective permittivity ϵ' and of the third harmonic coefficient were measured for the nanocomposites. The phase-transition points were determined by the maximum value of the $d\epsilon'/dT$ derivative. The reduction in pore was found to lead to a decrease in the Curie temperature

(by more than 30 K) and a phase transition blur. This phenomenon is associated with the influence of intrinsic size effects.

Keywords: ferroelectric, caesium nitrate, permittivity, phase transition, nanocomposite

For citation: Pavlov A. V., Stukova E. V., Baryshnikov S. V., Phase transitions of caesium nitrate embedded in nanoporous alumina films, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 16 (2) (2023) 9–18. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16201>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Композитные материалы на основе пористых наноразмерных матриц, таких как опал, пористое стекло, оксидные пленки металлов и другие, заполненных сегнетоэлектриками, представляют интерес для практического применения с целью получения разнообразных элементов нанoeлектроники [1 – 3]. При этом важное значение приобретают свойства частиц материалов, внедренных в матрицы, ввиду заметного влияния размерного эффекта, а также взаимодействия таких включений со стенками пор матрицы; эти частицы, как правило, отличаются от свойств объемных сегнетоэлектриков. Анализ экспериментальных данных показывает, что для нанокompозитов, полученных путем внедрения сегнетоэлектрика в нанопористые матрицы, размерные эффекты особенно заметно проявляются вблизи структурных сегнетоэлектрических фазовых переходов.

Изучению полярных наноразмерных структур, полученных путем внедрения частиц сегнетоэлектриков в поры оксидной пленки Al_2O_3 , посвящены статьи [4 – 11]. В работах [4, 5] сообщалось об обнаружении стабилизации сегнетоэлектрической фазы в наноразмерном композите сегнетовой соли $KNaC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$, внедренной в пористую пленку оксида алюминия Al_2O_3 . Сегнетоэлектрическая фаза в композите удерживается вплоть до температуры разложения сегнетовой соли (328 K), которая в свою очередь выше температуры Кюри (примерно на 30 градусов) для фазового перехода сегнетовой соли (297 K). В исследовании [6] обнаружено, что для композита сегнетовой соли в пористой матрице Al_2O_3 наблюдается увеличение сегнетоэлектрической фазы за счет одновременного снижения температуры Кюри для первого фазового перехода (255 K), сопровождающегося увеличением температуры Кюри второго фазового перехода (297 K). У сегнетоэлектрических нанокompозитов в пористых матрицах наблюдалось смещение температур фазовых переходов для KNO_3 [8], TGS [4], $SC(NH_2)_2$ [7], $NaNO_2$ [9], KIO_3 [10], $C_6H_{16}NBr$ [11] и ряда других сегнетоэлектриков.

Нитрат цезия $CsNO_3$ обладает сегнетоэлектрическими свойствами с температурой Кюри $T_C = 425$ K. Величина спонтанной поляризации нитрата цезия невелика и, по разным данным, составляет от 2 мкКл/см² [12] до 3,23 мкКл/см² [13]. Исследованию сегнетоэлектрических свойств композитных структур на основе нитрата цезия посвящено на сегодняшний день несколько публикаций [14, 15]. Так, в работе [15] был получен и исследован нанокompозит нитрат цезия – пористое стекло. Для частиц нитрата цезия, внедренных в поры стекла, поверхностные механические напряжения, возникающие в нанокompозите со стороны матрицы, привели к повышению значения температуры Кюри композита на 3 K. Кроме того, в работе указывается на расширение на 9 K температурного гистерезиса фазового перехода в этом нанокompозите.

В настоящей работе представлены результаты исследования коэффициента третьей гармоники и диэлектрической проницаемости нанокompозитов, полученных путем внедрения частиц нитрата цезия $CsNO_3$ в пленки нанопористого оксида алюминия Al_2O_3 с размерами пор 300 и 240 нм.

Образцы и методика эксперимента

Нитрат цезия при комнатной температуре имеет тригональную решеточную структуру с параметрами $a = 10,950$ Å и $c = 7,716$ Å [12]. При температуре $T = 427$ K нитрат цезия



переходит в кубическую фазу с параметром решетки $a = 8,980 \text{ \AA}$. Стоит отметить, что, в отличие от нитрата калия, температурная предыстория не оказывает влияния на характер протекания структурного фазового перехода в нитрате цезия.

Наноконпозиты были получены с использованием химически чистого нитрата цезия и нанопористых пленок оксида алюминия (производство китайской фирмы TopMembranes Technology). Размеры ячеек составляли 450 нм, толщина пленок – 50 мкм. В эксперименте использовались два вида пленок с разными диаметрами пор: 300 и 240 нм. Рис. 1 показывает электронные микрофотографии поверхностей исследуемых пленок Al_2O_3 .

Внедрение нитрата цезия в поры производилось из насыщенного раствора CsNO_3 при температуре 343 – 353 К. Растворимость нитрата цезия значительно ниже, чем у других нитратов, поэтому степени заполнения пор после 5 циклов внедрения и сушки составляли около 15 и 12 % соответственно для пленок с размерами пор 300 и 240 нм. В качестве эталонов использовали цилиндрические образцы поликристаллического нитрата цезия (их диаметр и толщина составляли 10,0 и 1,5 мм соответственно), которые получали путем прессования под давлением $8 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$.

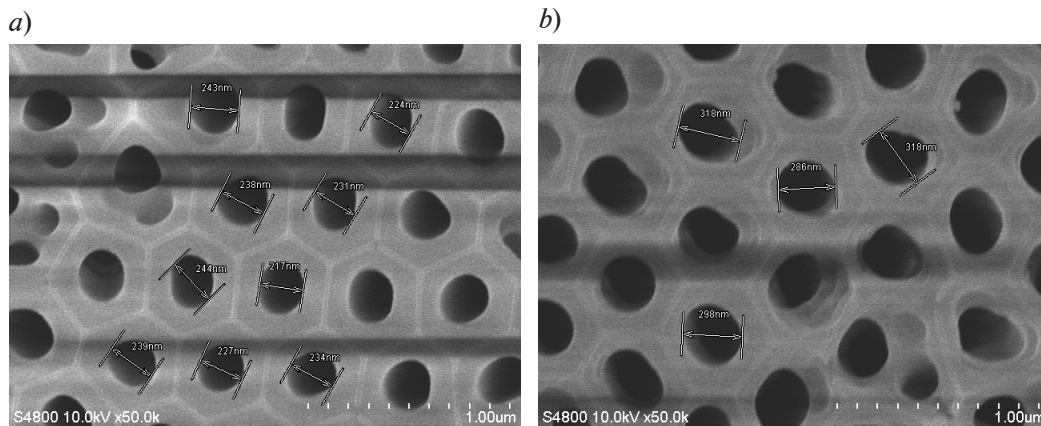


Рис. 1. Электронные микрофотографии пленок Al_2O_3 с размерами пор 330 нм (a) и 240 нм (b)

Для измерения эффективной диэлектрической проницаемости применялся цифровой иммитанс-метр E7-25. Для обнаружения полярной фазы в нитрате цезия использовали методы нелинейной диэлектрической спектроскопии. На образец подавался гармонический сигнал частотой 2 кГц, и с помощью анализатора спектра фиксировались и записывались на компьютере сигналы кратных частот. По амплитуде и температурному ходу последних можно определять наличие полярной фазы. Напряженность электрического поля основного сигнала составляла примерно 10 В/мм для объемных образцов и порядка 10^4 В/мм для пленок.

Для дальнейшего анализа мы использовали коэффициент третьей гармоники ($\gamma_{3\omega} = U_{3\omega}/U_{\omega}$), который наиболее чувствителен к появлению сегнетоэлектрического состояния. Принципы измерений нелинейных диэлектрических свойств подробно изложены в статьях [15, 16].

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Графики на рис. 2 и 3 представляют температурные зависимости диэлектрической проницаемости и коэффициента третьей гармоники для объемного нитрата цезия и наноконпозитного образца на основе пористой оксидной пленки (размер пор 300 нм) с внедренным нитратом цезия. Температура фазовых переходов, определенных по максимальному значению производной $d\varepsilon'/dT$, составляет 428 К при нагреве и 426 К при охлаждении. Коэффициент третьей гармоники проявляет аномалии при этих же температурах, что свидетельствует о переходе образца CsNO_3 из сегнетоэлектрической в параэлектрическую фазу.

Как следует из графиков на рис. 3, для наноконпозитного образца фазовый переход существенно размывается. Несмотря на данный факт, по аномалиям на зависимости $\gamma_{3\omega}(T)$ можно оценить значения температуры исчезновения и появления спонтанной

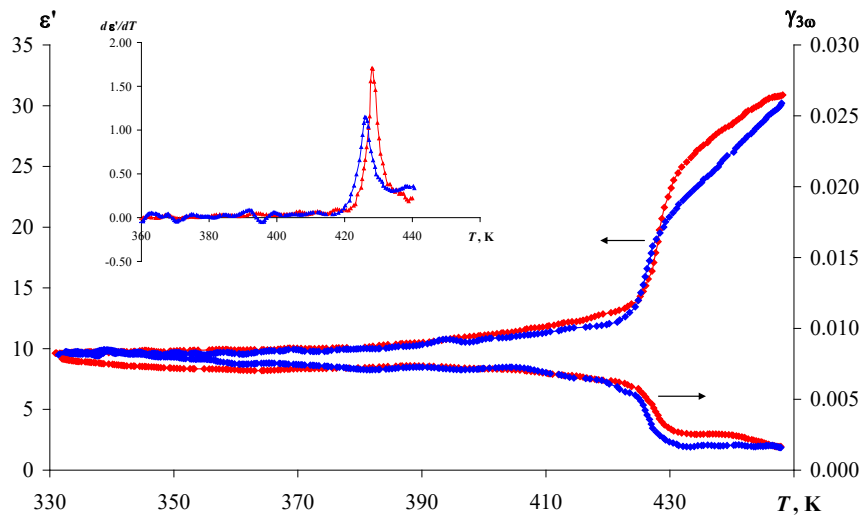


Рис. 2. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости и коэффициента третьей гармоники для объемного образца CsNO_3 при нагреве и охлаждении (красные и синие маркеры соответственно).

На вставке показаны температурные зависимости скорости изменения диэлектрической проницаемости при указанных условиях

поляризации в нитрате цезия. Для пленки с порами 300 нм они составляют 416 К при нагреве и 405 К при охлаждении. Таким образом, наблюдается увеличение температурного гистерезиса фазового перехода с 2 до 11 К.

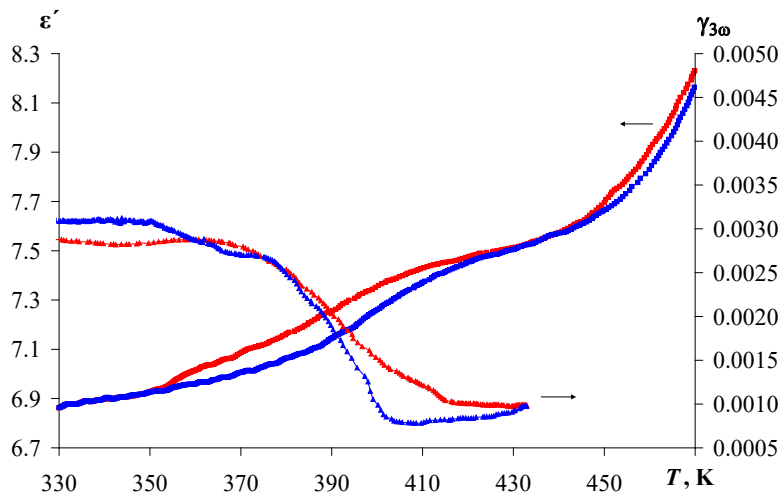


Рис. 3. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости и коэффициента третьей гармоники для образца нанокompозита $\text{CsNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ с размером пор нанопористой пленки 300 нм при нагреве и охлаждении (красные и синие маркеры соответственно)

Сигнал третьей гармоники у нанокompозита $\text{CsNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ с размером пор пленки 240 нм находился на уровне шумов в связи с меньшей долей нитрата цезия. Процесс фазового перехода размывался даже сильнее, но температура перехода, определенная по максимуму производной $d\epsilon'/dT$, смещалась в низкотемпературную область (рис. 4). Как можно видеть на графиках, для пленки с размером пор 240 нм температура фазового перехода при нагреве составляет около $(393 \pm 1)\text{K}$, а при охлаждении – примерно $(387 \pm 1)\text{K}$.

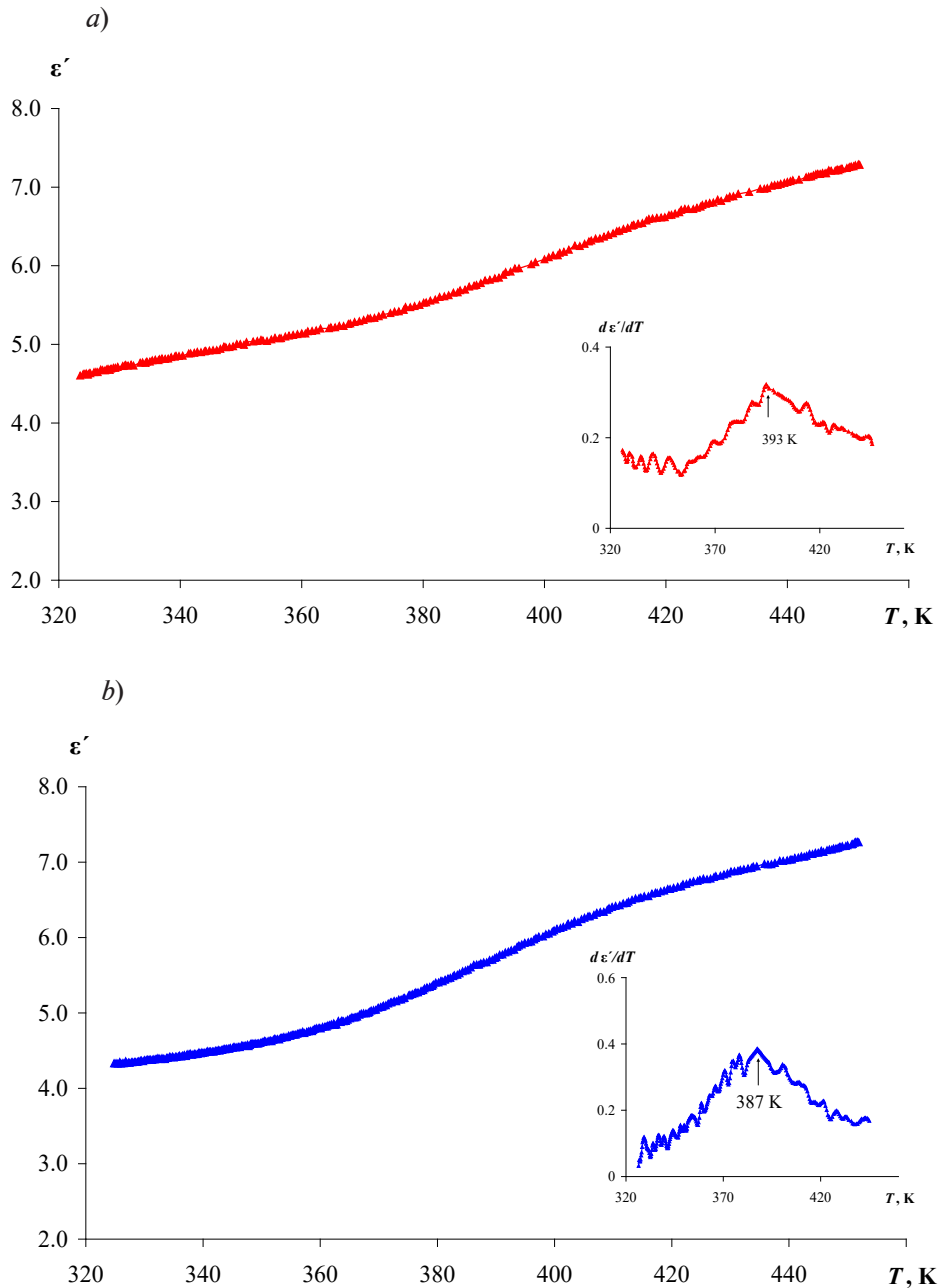


Рис. 4. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости для образца $\text{CsNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ с размером пор пленки 240 нм при нагреве (a) и охлаждении (b).

На вставках показаны соответствующие температурные зависимости $d\epsilon'/dT$

Размытие и смещение температуры фазового перехода в область более низких температур было ранее обнаружено у тонких пленок $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$, что авторы объясняли наличием в пленках непереклюаемых диэлектрических «мертвых слоев» [17, 18], вызванных пиннингом доменных стенок, т. е. экранированием внутреннего поля обедненным слоем [19 – 23]. Снижение температуры Кюри и размытие фазового перехода отмечались также для DTGS в пленках Al_2O_3 с порами 300 и 100 нм [24], где этот эффект объясняли собственным размерным эффектом. Для композита $\text{CsNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (300 и 240 нм), вероятно, реализуется подобная ситуация.

Уменьшение температуры фазового перехода в CsNO_3 , внедренного в пленку Al_2O_3 , соответствует предсказаниям, выведенным из теоретических моделей Ландау и Изинга

[25 – 27]. Эти модели основаны на концепции корреляционного объема, определяющего количество упорядоченных диполей, необходимых для возникновения сегнетоэлектричества. Сильные взаимодействия вдоль полярной оси и менее сильные перпендикулярно к ней ведут к анизотропии корреляционного объема.

Ранее в работах [25 – 27] было предсказано снижение температуры фазовых переходов с уменьшением размеров частиц. Эти утверждения были выведены из теоретических моделей Ландау и Изинга, базирующихся на концепции корреляционного объема. Последний задает число упорядоченных диполей, которое формирует сегнетоэлектрическое состояние.

Полученные нами экспериментальные данные для CsNO_3 , внедренного в пленку Al_2O_3 , доказывают правоту этих предсказаний. Наши результаты можно объяснить появлением анизотропии корреляционного объема ввиду того, что сильные взаимодействия направлены вдоль полярной оси, а менее сильные – перпендикулярно к ней.

Когда размеры частиц уменьшаются ниже критического значения, баланс между дальнедействующими и короткодействующими силами нарушается и происходит разрушение сегнетоэлектрического состояния; как следствие, имеет место формирование параэлектрической фазы. Эти модели указывают на смещение температуры фазового перехода вглубь сегнетоэлектрической фазы по мере уменьшения размеров изолированных сферических либо цилиндрических наночастиц. Подтверждением представленного объяснения могут служить результаты, полученные для изолированных малых частиц титаната бария (см. работу [28] и ссылки в ней).

Взаимодействия между полярными частицами и стенками пор, а также диполь-дипольные взаимодействия между частицами в соседних порах могут оказывать влияние на температуру фазового перехода сегнетоэлектрика, наряду с его собственным размерным эффектом [28 – 33]. Направления дипольных моментов частиц, находящихся в соседних порах матрицы, могут способствовать как повышению, так и понижению температуры Кюри.

В работах [29 – 31] рассматривалось влияние механических напряжений на сегнетоэлектрические свойства наночастиц. Было показано, что взаимодействие внедренного вещества со стенками матрицы, как правило, приводит к повышению температуры сегнетоэлектрического фазового перехода. В связи с этим можно предположить, что роль механических напряжений в нанокompозите $\text{CsNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ минимальна из-за частичного заполнения пор (не более 12 – 15 %). С другой стороны, низкий уровень спонтанной поляризации и значительные расстояния между порахми ослабляют влияние диполь-дипольного взаимодействия. Таким образом, можно исключить действие механических напряжений и роль диполь-дипольного взаимодействия на изменение температуры фазового перехода в композите $\text{CsNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$. Если же допустить, что в порах частицы внедренного вещества находятся в виде некоей совокупности мелких кристаллитов, размеры которых существенно меньше диаметра пор, то можно предположить, что снижение температуры фазового перехода в $\text{CsNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ вызвано собственным размерным эффектом.

Для сегнетоэлектрических наночастиц, внедренных в матричные материалы, характерно существенное размытие максимума фазового перехода, что обсуждалось в ряде теоретических исследований. Данное явление может быть вызвано целым рядом причин, связанных с неоднородностью распределения упругих деформаций и внутренних электрических полей. Аналогичные процессы характерны для разупорядоченных сегнетоэлектрических структур и твердых растворов. В широком температурном диапазоне, называемом областью Кюри, наблюдается постепенный переход от неупорядоченной к упорядоченной фазе. Для указанной области характерно постепенное изменение таких сегнетоэлектрических свойств, как спонтанная поляризация, значения пьезокоэффициентов, аномалия удельной теплоемкости и других.

Заключение

Результаты диэлектрических исследований частиц нитрата цезия, внедренных в нанопористые пленки оксида алюминия, показывают, что уменьшение размера пор ведет к снижению температуры Кюри и размытию фазового перехода, что скорее всего связано с влиянием собственных размерных эффектов.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Stadlober B., Zirkel M., Irimia-Vladu M.** Route towards sustainable smart sensors: ferroelectric polyvinylidene fluoride-based materials and their integration in flexible electronics // *Chemical Society Reviews*. 2019. Vol. 48. No. 6. Pp. 1787–1825.
2. **Jin R. B., Cai N., Huang Y., Hao X.-Y., Wang S., Li F., Song H.-Zh., Zhou Q., Shimizu R.** Theoretical investigation of a spectrally pure-state generation from isomorphs of KDP crystal at near-infrared and telecom wavelengths // *Physical Review Applied*. 2019. Vol. 11. No. 3. P. 034067.
3. **Kasap S., Capper P.** (Eds.) Springer handbook of electronic and photonic materials. New York: Springer-Verlag, USA, 2007. 1407 p.
4. **Рогазинская О. В., Миловидова С. Д., Сидоркин А. С., Чернышев В. В., Бабичева Н. Г.** Свойства нанопористого оксида алюминия с включениями триглицинсульфата и сегнетовой соли // *Физика твердого тела*. 2009. Т. 51. № 7. С. 1430–1432.
5. **Yadlovker D., Berger S.** Uniform orientation and size of ferroelectric domains // *Physical Review B*. 2005. Vol. 71. No. 18. P. 184112.
6. **Baryshnikov S. V., Stukova E. V., Milinskiy A. Yu., Charnaya E. V., Tien C.** Ferroelectricity in Rochelle salt nanoparticles confined to porous alumina // *Ferroelectrics*. 2010. Vol. 396. No. 1. Pp. 3–9.
7. **Милинский А. Ю., Барышников С. В., Антонов А. А.** Исследование фазовых переходов сегнетоэлектрика $SC(NH_2)_2$ в нанопористых матрицах на основе Al_2O_3 // *Физика твердого тела*. 2017. Т. 59. № 9. С. 1759–1764.
8. **Rogazinskaya O. V., Sidorkin A. S., Popravko N. G., Milovidova S. D., Naberezhnov A. A., Grokhotova E. V.** Dielectric and repolarization properties of nanocomposites based on porous matrix with sodium nitrite // *Ferroelectrics*. 2014. Vol. 469. No. 1. Pp. 138–143.
9. **Alekseeva O. A., Naberezhnov A. A., Stukova E. V., Baryshnikov S. V., Franz A.** Temperature range broadening of the ferroelectric phase in KNO_3 nanoparticles embedded in the pores of the nanoporous Al_2O_3 matrix // *Ferroelectrics*. 2021. Vol. 574. No. 1. Pp. 8–15.
10. **Милинский А. Ю., Барышников С. В.** Исследование фазовых переходов сегнетоэлектрика KIO_3 в нанопористых матрицах на основе пленок Al_2O_3 // *Физика твердого тела*. 2018. Т. 60. № 3. С. 543–546.
11. **Milinskiy A. Yu., Baryshnikov S. V., Egorova I. V., Charnaya E. V., Nguyen H. T.** Dielectric properties of an organic ferroelectrics of bromide diisopropylammonium embedded into the pores of nanosized Al_2O_3 films // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2019. Vol. 31. No. 48. P. 485704.
12. **Lucas B. W.** The structure (neutron) of phase II caesium nitrate at 298 K, $CsNO_3$ // *Acta Crystallographica. Section C: Structural Chemistry*. 1983. Vol. C39. Part 12. Pp. 1591–1594.
13. **Nautiyal A., Sekhar K. C., Pathak N. P., Nath R.** Study of ferroelectric properties of spray pyrolysis deposited cesium nitrate films // *Thin Solid Films*. 2010. Vol. 518. No. 24, Supplement. Pp. e143–e145.
14. **Rao M. V. M., Reddy S. N., Chary A. S.** Enhancement of DC ionic conductivity in dispersed solid electrolyte system $CsNO_3:\gamma-Al_2O_3$ // *Physica B: Condensed Matter*. 2007. Vol. 389. No. 2. Pp. 292–295.
15. **Милинский А. Ю., Барышников С. В., Чернечкин И. А.** Диэлектрические и тепловые свойства нанокompозита нитрат цезия – пористое стекло // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2022. Т. 65. № 9. С. 15–19.
16. **Ikeda S., Kominami H., Koyama K., Wada Y. J.** Nonlinear dielectric constant and ferroelectric-to-paraelectric phase transition in copolymers of vinylidene fluoride and trifluoroethylene // *Journal of Applied Physics*. 1987. Vol. 62. No. 8. Pp. 3339–3342.
17. **Vendik O. G., Zubko S. P.** Ferroelectric phase transition and maximum dielectric permittivity of displacement type ferroelectrics ($Ba_xSr_{1-x}TiO_3$) // *Journal of Applied Physics*. 2000. Vol. 88. No. 9. Pp. 5343–5350.
18. **Lookman A., Bowman R. M., Gregg J. M., Kut J., Rios S., Dawber M., Ruediger A., Scott J. F.** Thickness independence of true phase transition temperatures in barium strontium titanate films // *Journal of Applied Physics*. 2004. Vol. 96. No. 1. Pp. 555–562.
19. **Larsen P. K., Dormans G. J. M., Taylor D. J., van Yeldhoven P. J.** Ferroelectric properties and fatigue of $PbZr_{0.51}Ti_{0.49}O_3$ thin films of varying thickness: Blocking layer model // *Journal of Applied Physics*. 1994. Vol. 76. No. 4. Pp. 2405–2413.

20. Miller S. L., Nasbv R. D., Schwank J. R., Rodgers M. S., Dressendorfer P. V. Device modeling of ferroelectric capacitors // *Journal of Applied Physics*. 1990. Vol. 68. No. 12. Pp. 6463–6471.
21. Tagantsev A. K., Landivar M., Colla E., Setter N. Identification of passive layer in ferroelectric thin films from their switching parameters // *Journal of Applied Physics*. 1995. Vol. 78. No. 4. Pp. 2623–2630.
22. Lebedev N. I., Sigov A. S. Surface inhomogeneties and coercive field of thin ferroelectric film // *Integrated Ferroelectrics*. 1994. Vol. 4. No. 1. Pp. 21–24.
23. Tagantsev A. K. Size effects in polarization switching in ferroelectric thin films // *Integrated Ferroelectrics*. 1997. Vol. 16. No 1–4. Pp. 237–244.
24. Stukova E., Baryshnikov S., Baryshnikova T., Solnyshkin A. Linear and non-linear dielectric properties of DTGS in porous Al_2O_3 films // *Ferroelectrics*. 2019. Vol. 543. No. 1. Pp. 184–190.
25. Zhong W. L., Wang Y. G., Zhang P. L., Qu B. D. Phenomenological study of the size effect on phase transitions in ferroelectric particles // *Physical Review B*. 1994. Vol. 50. No. 2. Pp. 698–703.
26. Wang Y. G., Zhong W. L., Zhang P. L. Size driven phase transition in ferroelectric particles // *Solid State Communications*. 1994. Vol. 90. No. 5. Pp. 329–332.
27. Wang C. L., Xin Y., Wang X. S., Zhong W. L. Size effects of ferroelectric particles described by the transverse Ising model // *Physical Review B*. 2000. Vol. 62. No. 17. Pp. 11423–11427.
28. Sedykh P., Michel D. Ferroelectric phase transition in barium titanate nanoparticles // *Physical Review B*. 2009. Vol. 79. No. 13. P. 134119.
29. Shchukin V. A., Bimberg D. Spontaneous ordering of nanostructures on crystal surfaces // *Review of Modern Physics*. 1999. Vol. 71. No. 4. Pp. 1125–1171.
30. Morozovska A. N., Glinchuk M. D., Eliseev E. A. Phase transitions induced by confinement of ferroic nanoparticles // *Physical Review B*. 2007. Vol. 76. No. 1. P. 014102.
31. Morozovska A. N., Eliseev E. A., Glinchuk M. D. Size effects and depolarization field influence on the phase diagrams of cylindrical ferroelectric nanoparticles // *Physica B: Condensed Matter*. 2007. Vol. 387. No. 1–2. Pp. 358–366.
32. Charnaya E. V., Pirozerskii A. L., Tien C., Lee M. K. Ferroelectricity in an array of electrically coupled confined small particles // *Ferroelectrics*. 2007. Vol. 350. No. 1. Pp. 75–80.

REFERENCES

1. Stadlober B., Zirkl M., Irimia-Vladu M., Route towards sustainable smart sensors: ferroelectric polyvinylidene fluoride-based materials and their integration in flexible electronics, *Chem. Soc. Rev.* 48 (6) (2019) 1787–1825.
2. Jin R. B., Cai N., Huang Y., et al., Theoretical investigation of a spectrally pure-state generation from isomorphs of KDP crystal at near-infrared and telecom wavelengths, *Phys. Rev. Appl.* 11 (3) (2019) 034067.
3. Kasap S., Capper P. (Eds.), *Springer handbook of electronic and photonic materials*, Springer-Verlag, USA, New York, 2007.
4. Rogazinskaya O. V., Milovidova S. D., Sidorkin A. S., et al., Properties of nanoporous aluminum oxide with triglycine sulfate and Rochelle salt inclusions, *Phys. Solid State*. 51 (7) (2009) 1518–1520.
5. Yadlovker D., Berger S., Uniform orientation and size of ferroelectric domains, *Phys. Rev. B*. 71 (18) (2005) 184112.
6. Baryshnikov S. V., Stukova E. V., Milinskiy A. Yu., et al., Ferroelectricity in Rochelle salt nanoparticles confined to porous alumina, *Ferroelectrics*. 396 (1) (2010) 3–9.
7. Milinskii A. Y., Baryshnikov S. V., Antonov A. A., Phase transitions of $SC(NH_2)_2$ ferroelectrics in Al_2O_3 -based nanoporous matrices, *Phys. Solid State*. 59 (9) (2017) 1783–1788.
8. Rogazinskaya O. V., Sidorkin A. S., Popravko N. G., et al., Dielectric and repolarization properties of nanocomposites based on porous matrix with sodium nitrite, *Ferroelectrics*. 469 (1) (2014) 138–143.
9. Alekseeva O. A., Naberezhnov A. A., Stukova E. V., et al., Temperature range broadening of the ferroelectric phase in KNO_3 nanoparticles embedded in the pores of the nanoporous Al_2O_3 matrix, *Ferroelectrics*. 574 (1) (2021) 8–15.
10. Milinskii A. Y., Baryshnikov S. V., Phase transitions of KIO_3 ferroelectrics in Al_2O_3 -based nanoporous matrices, *Phys. Solid State*. 60 (3) (2018) 549–552.

11. Milinskiy A. Yu., Baryshnikov S. V., Egorova I. V., et al., Dielectric properties of an organic ferroelectrics of bromide diisopropylammonium embedded into the pores of nanosized Al_2O_3 films, *J. Phys. Condens.* 31 (48) (2019) 485704.
12. Lucas B. W., The structure (neutron) of phase II caesium nitrate at 298 K, CsNO_3 , *Acta Crystallogr. C. Struct. Chem.* C39 (12) (1983) 1591–1594.
13. Nautiyal A., Sekhar K. C., Pathak N. P., Nath R., Study of ferroelectric properties of spray pyrolysis deposited cesium nitrate films, *Thin Solid Films.* 518 (24, Suppl.) (2010) e143–e145.
14. Rao M. V. M., Reddy S. N., Chary A. S., Enhancement of DC ionic conductivity in dispersed solid electrolyte system CsNO_3 : $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, *Phys. B Condens.* 389 (2) (2007) 292–295.
15. Milinskiy A. Y., Baryshnikov S. V., Chernechkin I. A., Dielectric and thermal properties of cesium nitrate – porous glass nanocomposite, *Russ. Phys. J.* 65 (9) (2023) 1431–1435.
16. Ikeda S., Kominami H., Koyama K., Wada Y. J., Nonlinear dielectric constant and ferroelectric-to-paraelectric phase transition in copolymers of vinylidene fluoride and trifluoroethylene, *J. Appl. Phys.* 62 (8) (1987) 3339–3342.
17. Vendik O. G., Zubko S. P., Ferroelectric phase transition and maximum dielectric permittivity of displacement type ferroelectrics ($\text{BaSr}_{1-x}\text{TiO}_3$), *J. Appl. Phys.* 88 (9) (2000) 5343–5350.
18. Lookman A., Bowman R. M., Gregg J. M., et al., Thickness independence of true phase transition temperatures in barium strontium titanate films. *J. Appl. Phys.* 96 (1) (2004) 555–562.
19. Larsen P. K., Dormans G. J. M., Taylor D. J., van Yeldhoven P. J., Ferroelectric properties and fatigue of $\text{PbZr}_{0.51}\text{Ti}_{0.49}\text{O}_3$ thin films of varying thickness: Blocking layer model, *J. Appl. Phys.* 76 (4) (1994) 2405–2413.
20. Miller S. L., Nasbv R. D., Schwank J. R., et al., Device modeling of ferroelectric capacitors, *J. Appl. Phys.* 68 (12) (1990) 6463–6471.
21. Tagantsev A. K., Landivar M., Colla E., Setter N., Identification of passive layer in ferroelectric thin films from their switching parameters, *J. Appl. Phys.* 78 (4) (1995) 2623–2630.
22. Lebedev N. I., Sigov A. S., Surface inhomogeneties and coercive field of thin ferroelectric film, *Integr. Ferroelectr.* 4 (1) (1994) 21–24.
23. Tagantsev A. K., Size effects in polarization switching in ferroelectric thin films, *Integr. Ferroelectr.* 16 (1–4) (1997) 237–244.
24. Stukova E., Baryshnikov S., Baryshnikova T., Solnyshkin A., Linear and non-linear dielectric properties of DTGS in porous Al_2O_3 films, *Ferroelectrics.* 543 (1) (2019) 184–190.
25. Zhong W. L., Wang Y. G., Zhang P. L., Qu B. D., Phenomenological study of the size effect on phase transitions in ferroelectric particles, *Phys. Rev. B.* 50 (2) (1994) 698–703.
26. Wang Y. G., Zhong W. L., Zhang P. L., Size driven phase transition in ferroelectric particles, *Solid State Commun.* 90 (5) (1994) 329–332.
27. Wang C. L., Xin Y., Wang X. S., Zhong W. L., Size effects of ferroelectric particles described by the transverse Ising model, *Phys. Rev. B.* 62 (17) (2000) 11423–11427.
28. Sedykh P., Michel D., Ferroelectric phase transition in barium titanate nanoparticles, *Phys. Rev. B.* 79 (13) (2009) 134119.
29. Shchukin V. A., Bimberg D., Spontaneous ordering of nanostructures on crystal surfaces, *Rev. Modern Phys.* 71 (4) (1999) 1125–1171.
30. Morozovska A. N., Glinchuk M. D., Eliseev E. A., Phase transitions induced by confinement of ferroic nanoparticles, *Phys. Rev. B.* 76 (1) (2007) 014102.
31. Morozovska A. N., Eliseev E. A., Glinchuk M. D., Size effects and depolarization field influence on the phase diagrams of cylindrical ferroelectric nanoparticles, *Phys. B. Cond.* 387 (1–2) (2007) 358–366.
32. Charnaya E. V., Pirozerskii A. L., Tien C., Lee M. K., Ferroelectricity in an array of electrically coupled confined small particles, *Ferroelectrics.* 350 (1) (2007) 75–80.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПАВЛОВ Алексей Владимирович – аспирант кафедры физики Амурского государственного университета, г. Благовещенск, Россия.
 675027, Россия, Амурская область, г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, 21
 katal75@yandex.ru
 ORCID:0000-0002-7287-2006

СТУКОВА Елена Владимировна — доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Амурского государственного университета, г. Благовещенск, Россия.

675027, Россия, Амурская область, г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, 21

lenast@bk.ru

ORCID:0000-0002-7981-7456

БАРЫШНИКОВ Сергей Васильевич — доктор физико-математических наук, профессор кафедры физического и математического образования Благовещенского государственного педагогического университета, г. Благовещенск, Россия.

675000, Россия, Амурская область, г. Благовещенск, ул. Ленина, 104

svbar2003@list.ru

ORCID:0000-0002-3362-8975

THE AUTHORS

PAVLOV Aleksei V.

Amur State University

21 Ignatievskoe Ave., Blagoveshchensk, 675027, Russia

katal75@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-7287-2006

STUKOVA Elena V.

Amur State University

21 Ignatievskoe Ave., Blagoveshchensk, 675027, Russia

lenast@bk.ru

ORCID: 0000-0002-7981-7456

BARYSHNIKOV Sergey V.

Blagoveshchensk State Pedagogical University

104 Lenin St., Blagoveshchensk, 675000, Russia

svbar2003@list.ru

ORCID: 0000-0002-3362-8975

Статья поступила в редакцию 09.03.2023. Одобрена после рецензирования 12.04.2023. Принята 12.04.2023.

Received 09.03.2023. Approved after reviewing 12.04.2023. Accepted 12.04.2023.