

DOI: 10.18721/JPM.14201

УДК 537.956

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА (R)-3-ХИНУКЛИДИНОЛА В ПОРИСТОЙ МАТРИЦЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

С.В. Барышников¹, А.Ю. Милинский¹, Е.В. Стукова², А.А. Антонов¹

¹ Благовещенский государственный педагогический университет,
г. Благовещенск, Российская Федерация;

² Амурский государственный университет,
г. Благовещенск, Российская Федерация

Представлены результаты исследований линейных и нелинейных диэлектрических свойств (R)-3-хинуклидинола, внедренного в пористый оксид алюминия (размер пор – 300 нм), в сравнении со свойствами объемного (R)-3-хинуклидинола. Выявлено понижение температуры Кюри в нанокompозите как при нагреве, так и охлаждении, по сравнению с объемным образцом. Понижение температуры фазового перехода допускает интерпретацию на основе известных теоретических моделей для сегнетоэлектрических малых частиц.

Ключевые слова: (R)-3-хинуклидинол, оксид алюминия, сегнетоэлектрик, диэлектрическая проницаемость, нанокompозит, фазовый переход

Ссылка при цитировании: Барышников С.В., Милинский А.Ю., Стукова Е.В., Антонов А.А. Диэлектрические свойства (R)-3-хинуклидинола в пористой матрице оксида алюминия // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2021. Т. 14. № 2. С. 7–15. DOI: 10.18721/JPM.14201

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

DIELECTRIC PROPERTIES OF (R)-3-QUINUCLIDINOL IN THE POROUS MATRIX OF ALUMINUM OXIDE

S.V. Baryshnikov¹, A.Yu. Milinskiy¹, E.V. Stukova², A.A. Antonov¹

¹ Blagoveshchensk State Pedagogical University,
Blagoveshchensk, Russian Federation;

² Amur State University,
Blagoveshchensk, Russian Federation

The paper presents findings of an investigation of the linear and nonlinear dielectric properties of (R)-3-quinuclidinol embedded in porous aluminum oxide (pores of size 300 nm), in comparison with the properties of bulk (R)-3-quinuclidinol. A decrease in the Curie temperature in the nanocomposite, both upon heating and cooling, in comparison with a bulk sample is revealed. A decrease in the phase transition temperature allows for interpretation on the basis of the known theoretical models for ferroelectric small particles.

Keywords: (R)-3-quinuclidinol, aluminum oxide, ferroelectric, dielectric constant, nanocomposite, phase transition

Citation: Baryshnikov S.V., Milinskiy A.Yu., Stukova E.V., Antonov A.A., Dielectric properties of (R)-3-quinuclidinol in the porous matrix of aluminum oxide, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 14 (2) (2021) 7–15. DOI: 10.18721/JPM.14201

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

Введение

Сегнетоэлектрические материалы обладают уникальными свойствами и широко используются на практике. Наличие спонтанной поляризации и большие значения диэлектрической проницаемости, а также их зависимость от внешних воздействий (электрические поля, механические напряжения и т. п.) делает сегнетоэлектрики востребованными для создания различных функциональных электронных устройств. В последнее время ведется постоянный поиск органических материалов, обладающих высокими значениями диэлектрической проницаемости ϵ' , спонтанной поляризации P_s и температуры Кюри T_C ; кроме того, такие материалы дешевы и экологически безопасны ввиду отсутствия в их структуре тяжелых металлов.

Недавно были обнаружены сегнетоэлектрические свойства у органических солей $C_6H_{16}NHal$, где галогены Hal включают Cl, Br и I [1 – 3]: хлорид диизопропиламмония (DIPAC) с температурой Кюри примерно 440 К и спонтанной поляризацией около 8,2 мкКл/см²; бромид диизопропиламмония (DIPAB) с температурой Кюри примерно 426 К и спонтанной поляризацией около 23 мкКл/см²; иодид диизопропиламмония (DIPAI) с температурой Кюри примерно 378 К и спонтанной поляризацией около 5,17 мкКл/см².

В связи с перспективами практического применения органических сегнетоэлектриков в наноэлектронике, значительный интерес вызывают исследования влияния размеров частиц на свойства материалов. Сегнетоэлектрические фазовые переходы в нанокompозитах, полученных на основе DIPAC, DIPAB и DIPAI и нанопористых матриц, изучались в работах [4 – 7].

В статьях [8, 9] сообщалось об открытии сегнетоэлектрических свойств в однокомпонентных гомохиральных органических кристаллах (R)-3- и (S)-3-хинуклидинола ($C_7H_{13}NO$). Эти кристаллы существуют в двух зеркально-изомерных (энантиоморфных)

формах: гомохиральных (R)- и (S)-3-хинуклидинолов. При комнатной температуре они кристаллизуются в энантиоморфно-полярной точечной группе 6 (*C6*), показывающей зеркальное отображение в колебательных спектрах. Температура Кюри, определенная методом дифференциального термического анализа (DTA) для монокристаллических образцов составляла $T_{C1} \approx 398$ К при нагреве и $T_{C2} \approx 360$ К при охлаждении [8]. Диэлектрическая проницаемость при фазовом переходе имеет резкую ступенчатую аномалию, меняясь примерно от 5 до 17. Спонтанная поляризация при $T \approx 300$ К составляет примерно 7 мкКл/см², коэрцитивное поле – 15 кВ/см. Было также обнаружено, что их рацемическая смесь (Rac)-3-хинуклидинол кристаллизуется в centrosymmetricной точечной группе $2/m$ (*C2h*), не являясь сегнетоэлектриком.

Это открытие показывает значительную роль гомохиральности при возникновении сегнетоэлектрического состояния в органических сегнетоэлектриках. Как было обнаружено в работе [9], температуры фазовых переходов понижаются до $T_{C1} \approx 338$ К при нагреве и $T_{C2} \approx 324$ К при охлаждении для пленок (R)-3-хинуклидинола (толщина – 150 нм) на подложке.

В настоящей статье приводятся результаты исследований диэлектрических свойств (R)-3-хинуклидинола, внедренного в пористые пленки оксида алюминия Al_2O_3 с размером пор 300 нм. Для сравнения были изучены аналогичные свойства объемного поликристаллического (R)-3-хинуклидинола.

Образцы и методика эксперимента

Для получения нанокompозитов был использован (R)-3-хинуклидинол производства фирмы Acros Organics (Бельгия). Температуры фазовых переходов, по паспортным данным, составляли $T_{C1} \approx 390$ К при нагреве и $T_{C2} \approx 364$ К при охлаждении. Образцы для исследования представляли собой пленки оксида алюминия толщиной 50 мкм, с диаметром пор 300 нм. Фотогра-

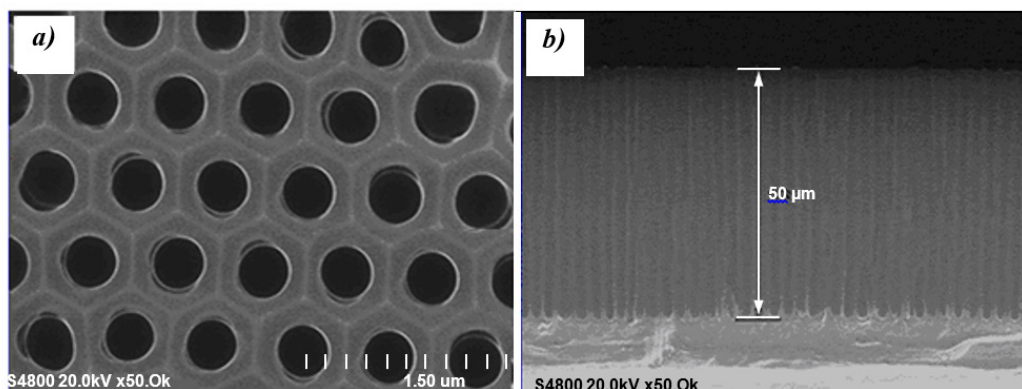


Рис. 1. Микрофотографии пленки Al_2O_3 : *a* – поверхность, *b* – вид с торца

фии пленок, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа, приведены на рис. 1. Для заполнения пленок оксида алюминия сегнетоэлектриком использовался насыщенный раствор (R)-3-хинуклидинола в метаноле. Образец оксида помещали в нагретый до температуры 320 К раствор и медленно охлаждали. Удаление оставшегося метанола производили при помощи вакуумной сушки. После трехкратного повторения описанной процедуры степень заполнения пор, определенная по изменению массы пленок при помощи весов AND VM-252G (точность 10^{-6} г), составляла 53 – 55 %.

Диэлектрические свойства объемного и наноструктурированного (R)-3-хинуклидинола измеряли на частоте 100 кГц при рабочем напряжении 0,7 В при помощи измерителя иммитанса E7-25. Для нанесения электродов на поверхность образцов использовали индий-галлиевую пасту. Температура определялась с точностью 0,1 К электронным термометром ТС-6621 на основе хромель-алюмелевой термопары. В процессе измерений образцы нагревали от 300 до 440 К и затем охлаждали. Скорость изменения температуры составляла 1 град/мин.

Для определения амплитуды сигналов кратных частот на образец с последовательно включенным резистором подавали синусоидальное напряжение частотой несколько килогерц и напряженностью поля порядка

10^2 В/мм. Для определения области существования сегнетоэлектрической фазы использовали коэффициент третьей гармоники ($\gamma_{3\omega} = U_{3\omega}/U_{\omega}$). Более подробно методика исследования сегнетоэлектриков с использованием нелинейной диэлектрической спектроскопии описана в статьях [10, 11].

Экспериментальные результаты и их обсуждение

По результатам исследований диэлектрических характеристик образцов (R)-3-хинуклидинола в объеме и (R)-3-хинуклидинолом в пленке оксида алюминия были проанализированы температурные зависимости $\epsilon'(T)$ (рис. 2). Переход в параэлектрическую фазу из сегнетоэлектрической происходит при температуре 390 К, чему соответствует максимум диэлектрической проницаемости на температурной зависимости $\epsilon'(T)$. Для объемного образца при повышении температуры наблюдается аномалия ϵ' при 390 К, соответствующая переходу из сегнетоэлектрической в параэлектрическую фазу. При охлаждении температура фазового перехода зависит от температуры, до которой был прогрет образец, и от скорости охлаждения. Для температуры прогрева 420 К и скорости охлаждения 1 К/мин она составляет 372 К. Для эффективной диэлектрической проницаемости нанокompозита (R)-3-хинуклидинол/ Al_2O_3 (измерены при тех же условиях) аномалии

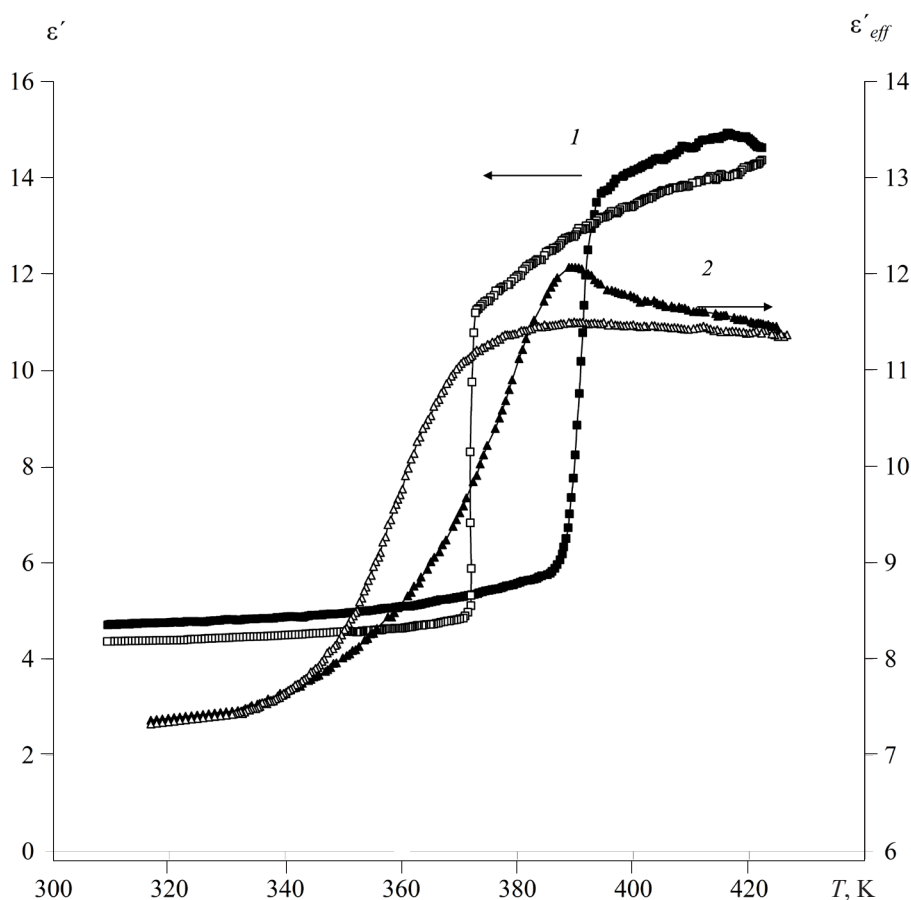


Рис. 2. Зависимости $\epsilon'(T)$ для объемного (1) и для композитного в Al_2O_3 (2) образцов (R)-3-хинуклидинола на частоте 100 кГц (затушеванные символы – нагрев, не затушеванные – охлаждение)

вблизи фазовых переходов сильно размыты и смещены в область более низких температур. Как показывает сравнение результатов для объемного и наноструктурированного (R)-3-хинуклидинола, для (R)-3-хинуклидинола в порах пленок Al_2O_3 при нагреве температура перехода снижается на 10 К, в то время как при охлаждении – на 25 К.

На следующем этапе исследований, с целью более точного определения температурного интервала сегнетоэлектрической фазы в наноразмерном (R)-3-хинуклидиноле, измеряли нелинейные диэлектрические характеристики объемного и наноструктурированного (R)-3-хинуклидинола. Температуры фазовых переходов определяли по температурным зависимостям коэффициента третьей гармоники $\gamma_{3\omega}$ в цикле нагрев-охлаждение

(рис. 3). В ходе процесса нагрева оба образца имеют высокие значения коэффициента $\gamma_{3\omega}$ от комнатной температуры до 391 К (для объемного образца) и 380 К (для нанокompозитного образца). Выше указанных температур коэффициент третьей гармоники меняется незначительно, что связано с переходом образцов в параэлектрическое состояние. При охлаждении рост коэффициента $\gamma_{3\omega}$ начинается около 372 и 347 К для объемного и нанокompозитного (R)-3-хинуклидинолов соответственно.

Изменение температуры Кюри для сегнетоэлектриков, находящихся в нанопористых матрицах, может происходить под действием нескольких факторов. В первую очередь это связано с размерными эффектами, наблюдаемыми для изолированных наночастиц. При

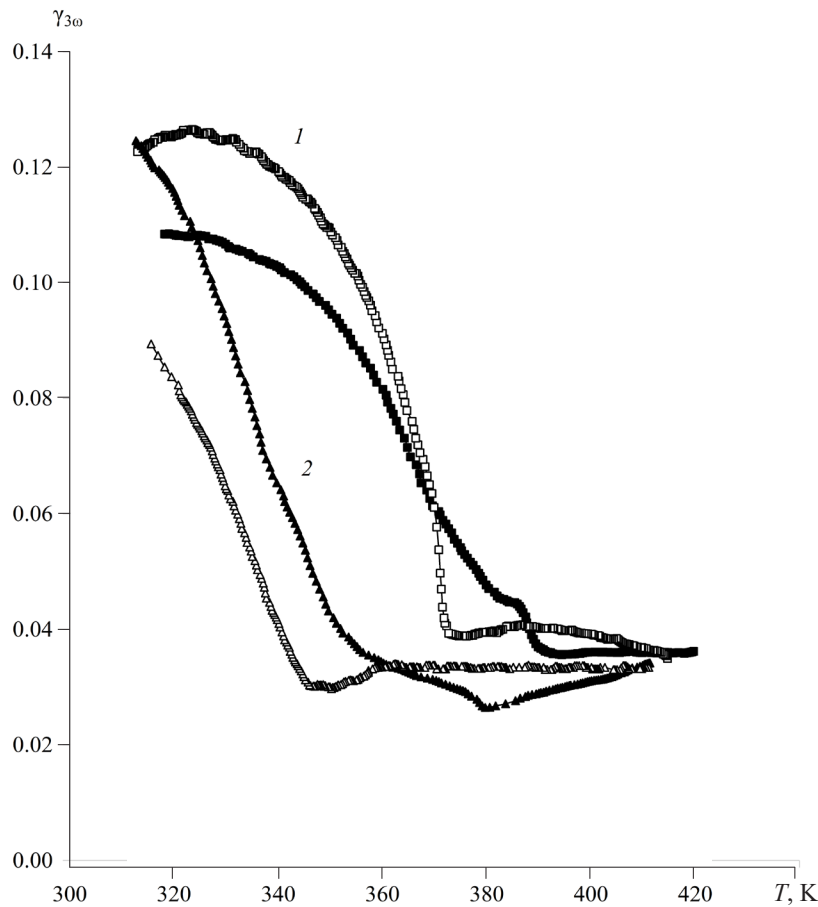


Рис. 3. Температурные зависимости коэффициента третьей гармоники для объемного (1) и композитного в Al_2O_3 (2) образцов (R)-3-хинуклидинола в циклах нагрев-охлаждение (затушеванные символы – нагрев, не затушеванные – охлаждение)

уменьшении размеров частиц доля поверхностных атомов растет. Свободная энергия F наночастиц представляет собой сумму объемного (F_v) и поверхностного (F_s) вкладов:

$$F = F_v + F_s.$$

Понижение температуры фазового перехода (R)-3-хинуклидинола, введенного в поры оксида алюминия, согласуется с выводами теоретических моделей, разработанных на основе феноменологической теории Ландау и модели Изинга [12 – 14]. Эти модели предсказывают, что температура структурного фазового перехода для малых изолированных частиц сферической или цилиндрической формы смещается в глубь сегнетоэлектрической фазы при уменьше-

нии размеров частиц. Выводы этих моделей были экспериментально подтверждены также для отдельных малых частиц сегнетоэлектриков типа титаната бария (см. работу [15] и ссылки в ней).

Для матричных нанокомпозитов, в отличие от отдельных сегнетоэлектрических частиц, необходимо учитывать взаимодействие включений с матрицей. В этом случае изменение поверхностной энергии будет определяться как

$$\tilde{F}_s = F_s + \sum_{S_i} \int \sigma_i dS_i + \sum_{S_i} \int \varphi_i \delta_i dS_i,$$

где σ_i – поверхностное натяжение; S_i – площадь поверхности частицы; φ_i – электрический потенциал; δ_i – плотность поверхностного заряда.

Слагаемое σdS может давать значительный вклад в общую энергию систем с высоко развитой поверхностью межфазных границ. Образование на межфазной границе двойного электрического слоя в результате эмиссии электронов или экранирования спонтанной поляризации приводит к появлению поверхностной проводимости и возникновению поляризации Максвелла – Вагнера. Деполяризующее поле, которое зависит от диэлектрической проницаемости, проводимости, формы и размера частиц, дает дополнительный вклад в размерный эффект, приводя к понижению температуры Кюри.

Кроме того, в статье [16] указывалось, что на сдвиг фазового перехода в матричных нанокompозитах может влиять электрическое взаимодействие между сегнетоэлектрическими частицами в соседних порах. Однако в нашем случае электрическое взаимодействие между частицами в соседних порах существенной роли не играет в связи с малой величиной спонтанной поляризации (R)-3-хинуклидинола ($P_s \approx 7$ мкКл/см²) и значительными расстояниями между соседними порами (около 200 нм). Учет механических напряжений для наночастиц при расчетах необходим в плане сохранения полярных свойств сегнетоэлектрика. В таком случае давление под кривой поверхностью будет определяться тензором поверхност-

ных напряжений μ . Зависимость полярных свойств сегнетоэлектрических наночастиц от поверхностного натяжения оценивалась в работах [17 – 19]. Так, в статье [19] было показано, что при $\mu = 0,5 - 50$ Н/м эффект сдвига температуры перехода за счет электрострикции начинает работать при радиусе кривизны наночастицы $R = 5 - 50$ нм, что значительно меньше размера пор в исследуемом композите.

Таким образом, понижение температуры сегнетоэлектрического фазового перехода (R)-3-хинуклидинола в пористых матрицах оксида алюминия, обнаруженное в данной работе, обусловлено влиянием размерных эффектов, характерных для свободных частиц.

Заключение

Результаты исследования (R)-3-хинуклидинола, внедренного в поры оксида алюминия, представленные в данной работе, выявили понижение температуры Кюри и при нагреве, и при охлаждении образцов, по сравнению с объемными образцами. Понижение температуры фазового перехода допускает интерпретацию на основе известных теоретических моделей для сегнетоэлектрических малых частиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-29-03004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fu D.-W., Zhang W., Cai H.-L., Ge J.-Z., Zhang Y., Xiong R.-G. Diisopropyl ammonium chloride: a ferroelectric organic salt with a high phase transition temperature and practical utilization level of spontaneous polarization // *Advanced Materials*. 2011. Vol. 23. No. 47. Pp. 5658–5662.
2. Fu D.-W., Cai H.-L., Liu Y., Ye Q., Zhang W., Zhang Y., Chen X.-Y., Giovannetti G., Capone M., Li J., Xiong R.-G. Diisopropyl ammonium bromide is a high-temperature molecular ferroelectric crystal // *Science*. 2013. Vol. 339. No. 6118. Pp. 425–428.
3. Piecha A., Gaḡor A., Jakubas R., Szklarz P. Room-temperature ferroelectricity in diisopropyl ammonium bromide // *CrystEngComm*. 2013. Vol. 15. No. 5. Pp. 940–944.
4. Baryshnikov S.V., Charnaya E.V., Milinskiy A.Yu., Parfenov V.A., Egorova I.V. Impact of nanoconfinement on the diisopropyl ammonium chloride (C₆H₁₆ClN) organic ferroelectric // *Phase Transitions*. 2018. Vol. 91. No. 3. Pp. 293–300.
5. Milinskiy A.Yu., Baryshnikov S.V., Charnaya E.V., Egorova I.V., Nguyen H.T. Dielectric properties of an organic ferroelectric of bromide diisopro-



pyl ammonium embedded into the pores of nano-sized Al_2O_3 films // Journal of Physics: Condensed Matter. 2019. Vol. 31. No. 48. P. 485704.

6. **Nguyen H.T., Baryshnikov S.V., Milinskiy A.Yu., Charnaya E.V., Egorova I.V.** Linear and nonlinear dielectric properties of nanocomposites based on the organic ferroelectric of diisopropyl ammonium bromide // Phase Transitions. 2019. Vol. 92. No. 10. Pp. 899–906.

7. **Milinskiy A.Y., Baryshnikov S.V., Charnaya E.V., Egorova I.V., Sarnatskii V.M.** Phase transitions in bulk and confined organic ferroelectric DIPAI // Results in Physics. 2020. Vol. 17. June. P. 103069.

8. **Li P.-F., Liao W.-Q., Tang Y.-Y., Qiao W., Zhao D., Ai Y., Yao Y.-F., Xiong R.-G.** Organic enantiomeric high- T_c ferroelectrics // Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS). 2019. Vol. 116. No. 13. Pp. 5878–5885.

9. **Li P.-F., Tang Y.-Y., Wang Z.-X., Ye H.-Y., You Y.-M., Xiong R.-G.** Anomalous rotary polarization discovered in homochiral organic ferroelectrics // Nature Communications. 2016. Vol. 7. P. 13635.

10. **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 // Applied Physics. 1987. Vol. 62. No. 8. Pp. 3339–3342.

11. **Юдин С.Г., Блинов Л.М., Петухова Н.Н., Палто С.П.** Сегнетоэлектрический фазовый переход в пленках Ленгмюра – Блуджетт фталоцианина меди // Письма в ЖЭТФ. 1999. Т. 70. Вып. 9. С. 625–631.

12. **Zhong W.L., Wang Y.G., Zhang P.L., Qu D.B.** Phenomenological study of the size effect on phase transition in ferroelectric particles // Phys. Rev. B. 1994. Vol. 50. No. 2. Pp. 698–703.

13. **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. 2000. Vol. 62. No. 17. Pp. 11423–11427.

14. **Uskov A.V., Charnaya E.V., Pirozerskii A.L., Bugaev A.S.** The transverse Ising model of the ferroelectric phase transition in a system of coupled small particles // Ferroelectrics. 2015. Vol. 482. No. 1. P. 70–81.

15. **Sedykh P., Michael D.** Ferroelectric phase transition in barium titanate nanoparticles // Phys. Rev. B. 2009. Vol. 79. No. 13. P. 134119.

16. **Пирозерский А.Л., Чарная Е.В.** Модель Изинга сегнетоэлектрического фазового перехода в системе взаимодействующих малых частиц // Физика твердого тела. 2010. Т. 52. Вып. 3. С. 572–576.

17. **Shchukin V.A., Bimberg D.** Spontaneous ordering of nanostructures on crystal surfaces // Rev. Mod. Phys. 1999. Vol. 71. No. 4. Pp. 1125–1171.

18. **Morozovska A.N., Glinchuk M.D., Eliseev E.A.** Phase transitions induced by confinement of ferroic nanoparticles // Phys. Rev. B. 2007. Vol. 76. No. 1. P. 014102.

19. **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. 2006. Vol. 387. No. 1–2. Pp. 358–366.

Статья поступила в редакцию 30.03.2021, принята к публикации 11.05.2021.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

675000, Российская Федерация, г. Благовещенск, ул. Ленина, 104
svbar2003@list.ru

МИЛИНСКИЙ Алексей Юрьевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Благовещенского государственного педагогического университета, г. Благовещенск, Российская Федерация.

675000, Российская Федерация, г. Благовещенск, ул. Ленина, 104
a.milinskiy@mail.ru

СТУКОВА Елена Владимировна – доктор физико-математических наук, профессор, заведующая кафедрой физики Амурского государственного университета, г. Благовещенск, Российская Федерация.

675027, Российская Федерация, г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, 21
lenast@bk.ru

АНТОНОВ Антон Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физического и математического образования Благовещенского государственного педагогического университета, г. Благовещенск, Российская Федерация.

675000, Российская Федерация, г. Благовещенск, ул. Ленина, 104
antonov.lit@bgpu.ru

REFERENCES

1. Fu D.-W., Zhang W., Cai H.-L., et al., Diisopropyl ammonium chloride: a ferroelectric organic salt with a high phase transition temperature and practical utilization level of spontaneous polarization, *Advanced Materials*. 23 (47) (2011) 5658–5662.
2. Fu D.-W., Cai H.-L., Liu Y., et al., Diisopropyl ammonium bromide is a high-temperature molecular ferroelectric crystal, *Science*. 339 (6118) (2013) 425–428.
3. Piecha A., Gaḡor A., Jakubas R., Szklarz P., Room-temperature ferroelectricity in diisopropyl ammonium bromide, *CrystEngComm*. 15 (5) (2013) 940–944.
4. Baryshnikov S.V., Charnaya E.V., Milinskiy A.Yu., et al., Impact of nanoconfinement on the diisopropyl ammonium chloride (C₆H₁₆ClN) organic ferroelectric, *Phase Transitions*. 91 (3) (2018) 293–300.
5. Milinskiy A.Yu., Baryshnikov S.V., Charnaya E.V., et al., Dielectric properties of an organic ferroelectric of bromide diisopropyl ammonium embedded into the pores of nanosized Al₂O₃ films, *Journal of Physics: Condensed Matter*. 31 (48) (2019) 485704.
6. Nguyen H.T., Baryshnikov S.V., Milinskiy A.Yu., et al., Linear and nonlinear dielectric properties of nanocomposites based on the organic ferroelectric of diisopropyl ammonium bromide, *Phase Transitions*. 92 (10) (2019) 899–906.
7. Milinskiy A.Y., Baryshnikov S.V., Charnaya E.V., et al., Phase transitions in bulk and confined organic ferroelectric DIPAI, *Results in Physics*. 17 (2020) 103069.
8. Li P.-F., Liao W.-Q., Tang Y.-Y., et al., Organic enantiomeric high- T_C ferroelectrics, *PNAS*. 116 (13) (2019) 5878–5885.
9. Li P.-F., Tang Y.-Y., Wang Z.-X., et al., Anomalous rotary polarization discovered in homochiral organic ferroelectrics, *Nature Communications*. 7 (2016) 13635.
10. 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, *Applied Physics*. 62 (8) (1987) 3339–3342.
11. Yudin S.G., Blinov L.M., Petukhova N.N., Palto S.P., Ferroelectric phase transition in Langmuir – Blodgett films of copper phthalocyanine, *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*. 70 (9) (1999) 633–640.
12. Zhong W.L., Wang Y.G., Zhang P.L., Qu D.B., Phenomenological study of the size effect on phase transition in ferroelectric particles, *Phys. Rev. B*. 50 (2) (1994) 698–703.
13. 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.
14. Uskov A.V., Charnaya E.V., Pirozerskii A.L., Bugaev A.S., The transverse Ising model of the ferroelectric phase transition in a system of coupled small particles, *Ferroelectrics*. 482 (1) (2015) 70–81.
15. Sedykh P., Michael D., Ferroelectric phase transition in barium titanate nanoparticles, *Phys. Rev. B*. 79 (13) (2009) 134119.
16. Pirozerskii, A.L. Charnaya E.V., Ising model



for a ferroelectric phase transition in a system of interacting small particles, *Physics of the Solid State*. 52 (3) (2010) 620–624.

17. **Shchukin V.A., Bimberg D.**, Spontaneous ordering of nanostructures on crystal surfaces, *Reviews of Modern Physics*. 71 (4) (1999) 1125–1171.

18. **Morozovska A.N., Glinchuk M.D., Elise-**

ev E.A., Phase transitions induced by confinement of ferroic nanoparticles, *Phys. Rev. B*. 76 (1) (2007) 014102.

19. **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*. 387 (1–2) (2006) 358–366.

Received 30.03.2021, accepted 11.05.2021.

THE AUTHORS

BARYSHNIKOV Sergey V.

Blagoveshchensk State Pedagogical University

104 Lenin St., Blagoveshchensk, 675000, Russian Federation
svbar2003@list.ru

MILINSKIY Alexey Yu.

Blagoveshchensk State Pedagogical University

104 Lenin St., Blagoveshchensk, 675000, Russian Federation
a.milinskiy@mail.ru

STUKOVA Elena V.

Amur State University

21 Ignatievskoe Ave., Blagoveshchensk, 675027, Russian Federation
lenast@bk.ru

ANTONOV Anton A.

Blagoveshchensk State Pedagogical University

104 Lenin St., Blagoveshchensk, 675000, Russian Federation
antonov.lit@bgpu.ru