



Краткие сообщения

Краткое сообщение

УДК 538.95

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13565>

Научная специальность ВАК – 1.3.8. Физика конденсированного состояния

Бессвинцовые интеллектуальные материалы на основе ниобатов щелочных металлов: фазообразование, кристаллическая структура, макроотклики

С. И. Дудкина¹, Д. И. Зорин¹, Е. В. Глазунова^{1,2}, Л. А. Шилкина¹, И. Н. Андрюшина¹✉,
К. П. Андрюшин^{1,2}, И. А. Вербенко¹, Л. А. Резниченко¹

¹Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета,
пр. Стачки, 194, Ростов-на-Дону 344090, Российская Федерация

²Комплексный научно-исследовательский институт им. Х. И. Ибрагимова РАН,
пр. В. Алиева (Старопромысловое шоссе) 21а, Грозный 364020, Чеченская республика, Российская Федерация

Аннотация

Цель статьи: В мировой практике исследований различных материалов для устройств пьезотехники одно из первых мест занимают функциональные (интеллектуальные) материалы на основе свинецсодержащих композиций. Однако переход к экологически чистой продукции, обусловленный формированием новой Российской и Европейской законодательных баз, заставил искать другие материаловедческие решения путём исключения свинца из элементной базы материалов. Альтернативой известным композициям выступили твердые растворы на основе ниобатов щелочных металлов из морфотропных гетерофазных областей соответствующих бинарных и тройных систем, характеризующиеся экстремальностью свойств вблизи межфазных границ. Но они не нашли широкого применения в практике из-за трудностей фазообразования при синтезе и формирования плотного керамического каркаса при спекании.

Экспериментальная часть: В работе с использованием ранее не применяемых в таких средах процедур механоактивации и горячего прессования удалось получить бессвинцовые нетоксичные сегнетопьезокерамики с улучшенными макрооткликами за счет трансформации областей сосуществования фаз.

Выводы: В результате исследований разработаны и созданы разночастотные материалы, в том числе, с повышенной температурой Кюри, пьезочувствительностью, термостабильностью и пирозэффектом для различных пьезотехнических применений.

Ключевые слова: бессвинцовая пьезокерамика, ниобаты щелочных металлов, твердые растворы, межфазные границы, механоактивация, горячее прессование

Источник финансирования: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание в сфере научной деятельности), в рамках научного проекта № FENW-2026-0022

Для цитирования: Дудкина С. И., Зорин Д. И., Глазунова Е. В., Шилкина Л. А., Андрюшина И. Н., Андрюшин К. П., Вербенко И. А., Резниченко Л. А. Бессвинцовые интеллектуальные материалы на основе ниобатов щелочных металлов: фазообразование, кристаллическая структура, макроотклики. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2026;28(1): 137–142. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13565>

For citation: Dudkina S. I., Zorin D. I., Glazunova E. V., Shilkina L. A., Andryushina I. N., Andryushin K. P., Verbenko I. A., Reznichenko L. A. Lead-free smart materials based on alkali metal niobates: phase formation, crystal structure, macroscopic responses. *Condensed Matter and Interphases*. 2026;28(1): 137–142. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13565>

✉ Андрюшина Инна Николаевна, e-mail: futur6@mail.ru

© Дудкина С. И., Зорин Д. И., Глазунова Е. В., Шилкина Л. А., Андрюшина И. Н., Андрюшин К. П., Вербенко И. А., Резниченко Л. А., 2026



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

В последнее время в практике использования различных материалов реальными секторами мировых экономик на одно из первых мест выдвигаются функциональные материалы, прежде всего, интеллектуальные (ИМ), «способные активно противодействовать внешним факторам и адаптироваться к ним после оценки характера внешнего воздействия и собственного состояния» [1]. Среди них весьма востребованы те, действие которых основано на пьезоэлектрическом эффекте – преобразовании механического усилия в электрический сигнал и наоборот. Основным их недостатком является присутствие в составах свинца – элемента первой группы опасности [2, 3]. Начавшийся в настоящее время переход к экологически чистой продукции, обусловленный формированием новой Российской [4] и Европейской [5, 6] законодательных баз, заставил искать другие материаловедческие решения путём исключения свинца из элементной базы ИМ. Анализ библиографических сведений и патентной литературы [7-17] показал, что бесспорной альтернативой мировым материаловедческим брендам выступают ИМ на основе ниобатов щелочных металлов (НЩМ) из морфотропных гетерофазных областей соответствующих бинарных и тройных систем, характеризующиеся экстремальностью свойств вблизи межфазных границ: ромбически-ромбоэдрических в системе $(\text{Na}, \text{Li})\text{NbO}_3$ и ромбически-ромбических разной мультиплетности, свойственной различным конфигурациям поворотов кислородных октаэдров, в системах на основе $(\text{Na}, \text{K})\text{NbO}_3$ [18]. Но они до сих пор не нашли широкого применения в практике. Это в значительной мере обусловлено невозможностью их получения традиционными методами, что, в свою очередь, связано со сложностью их кристаллической структуры; наличием обширного полиморфизма, дестабилизирующего структуру материалов; легкостью нарушения стехиометрии заданного состава из-за повышенной летучести щелочных катионов; поляризационным электролизом; сильной зависимостью свойств от термодинамической предыстории (условий приготовления) [19].

В представленной работе, инициированной современными трендами экологизации элементной базы электронной техники, ставится цель – показать возможность улучшения свойств таких ИМ со сниженными массоёмкостью и массогабаритностью для использования в устройствах, в которых весовые характеристики являют-

ся решающими; расширенным частотным рабочим диапазоном, обеспечивающим возможность применения ИМ в системах цифровой обработки информации; высокой рабочей предельной температурой для создания контактных тепловых датчиков; повышенной термостабильностью свойств и, как следствие, их улучшенной надёжностью и устойчивостью к воздействию факторам.

2. Экспериментальная часть

Объектами исследования выступили ниобаты натрия, калия, лития и твёрдые растворы (ТР) на их основе, в том числе, модифицированные различными элементами. Объекты получены одно/двухстадийным твердофазным синтезом с последующим спеканием по обычной керамической технологии (ОКТ) или горячим прессованием (ГП) с одновременным приложением к заготовке из пресс-порошка температуры и давления. Технологические регламенты получения объектов приведены в таблице: температуры T_1, T_2 и время изотермической выдержки τ_1, τ_2 первого и второго синтеза соответственно, температура спекания, $T_{\text{сп}}$, и время выдержки при спекании, $\tau_{\text{сп}}$. Во всех случаях применялись механоактивирующие (МА) процедуры в течение 10 мин на стадиях подготовки исходных прекурсоров или приготовления шихт. Механоактивация (механическое воздействие на объекты путём их измельчения) осуществлялась в шаровой планетарной мельнице высокоэнергетического помола АГО-2 производства компании «Новиц» (г. Новосибирск). Помол производился в среде этилового спирта, частота вращения барабана – 1050 об/мин. В качестве сырьевых реагентов использовались гидрокарбонаты, карбонаты и оксиды соответствующих элементов квалификации не ниже «чда» (чистые для анализа). Спекание методом ГП осуществлялось на установке УГП-1 (диски размерами $\varnothing 10 \times 1$ мм²) при давлении, P , равном 200 кг/см², разработанной и сконструированной в НИИ физики [20]. Выбор режимов ГП производился по усадочным кривым и корректировался в соответствии с данными микроструктурного анализа. Поляризация образцов производилась в полиэтиленсилоксановой жидкости ПЭС-5 при 413 К в течение (15–20) мин в поле напряженностью (5–6) кВ/мм.

Рентгенографические исследования проводили методом порошковой дифракции с использованием дифрактометра ДРОН-3 (отфильтрованное $\text{CoK}\alpha$ - излучение, схема фокусировки по

Таблица. Элементные составы, условия получения и электрофизические характеристики исследуемых объектов – основ разрабатываемых материалов

№№ п/п	Элементный состав, мас. %	Условия получения ($T_1, T_2, T_{\text{сн}}$) К $\tau_1 = \tau_2 = 5$ час $\tau_{\text{сн}} = 1.5$ час	Электрофизические характеристики (с МА и ГП; без МА и ГП*)			
			$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	K_p	$ d_{31} $, пКл/Н	Q_M
низкочастотные материалы						
1	Na ₂ O = 8.75–9.72; K ₂ O = 5.32–5.37; Nb ₂ O ₅ = 75.05–75.76; CdO = 9.15–10.88	ГП $T_1 = 1220$ К; $T_2 = 1240$ К; $T_{\text{сн}} = 1240$ К;	1360–2020 (1280–1930)*	0.32–0.33 (0.30–0.31)*	67–70 (62–64)*	1000–1090 (960–1040)*
среднечастотные материалы						
2	Na ₂ O = 8.49–8.67; K ₂ O = 11.00–11.25; Li ₂ O = 0.49–0.65; NiO = 0.82–0.83; Nb ₂ O ₅ = 60.68–61.98; Ta ₂ O ₅ = 11.20–11.44; Sb ₂ O ₅ = 5.35–7.15	ГП $T_1 = 1223$ К; $T_{\text{сн}} = 1393$ К;	1095–1097 (1040–1045)*	0.42–0.43 (0.415–0.42)*	80–84 (72–76)*	45–49 (55–60)*
высокочастотные материалы						
3	Na ₂ O = 16.20–16.68; Li ₂ O = 1.12–1.15; Nb ₂ O ₅ = 81.25–81.98; SrO = 0.19–1.43	ГП $T_1 = 1143$ К; $T_2 = 1193$ К; $T_{\text{сн}} = 1433$ К;	110–125 (114–135)*	0.136–0.225 (0.125–0.193)*	7.1–11.3 (7.0–11.0)*	904–1338 (855–1060)*
4	Na ₂ O = 8.56–8.75; K ₂ O = 12.75–13.04; Nb ₂ O ₅ = 77.28–77.35; CuO = 1.16–1.17	ГП $T_1 = 1223$ К; $T_{\text{сн}} = 1373$ К;	240–355 (290–370)*	0.20–0.32 (0.18–0.29)*	20.0–30.0 (19.0–27.0)*	215–500 (205–400)*
высокотемпературные материалы						
5	Li ₂ O = 21.15–21.65; Nb ₂ O ₅ = 76.11–77.89; NiO = 0.22–1.32; TiO ₂ = 1.24–1.41	ГП $T_1 = 1050$ К; $T_{\text{сн}} = 1240$ К;	48–51 $T_K > 1273$ К (50–52)*	0.015–0.020 (0.010–0.012)*	0.37–0.51 (0.30–0.35)*	60–70 (50–57)*
высокочувствительные материалы						
6	Na ₂ O = 8.69–8.91; K ₂ O = 13.20–13.53; Nb ₂ O ₅ = 74.51–76.37; CdO = 3.60–3.61	ГП $T_1 = 1043$ К; $T_2 = 1093$ К; $T_{\text{сн}} = 1233$ К;	510–610 (540–650)*	0.27–0.34 (0.25–0.32)*	$ g_{31} = 5.9–6.2$ мВ·м/Н (26–29)* ($ g_{31} = 5.0–5.4$ мВ·м/Н)*	115–123 (115–125)*
термостабильные материалы						
7	Na ₂ O = 8.54–8.67; K ₂ O = 11.06–11.22; Li ₂ O = 0.32–0.33; Sb ₂ O ₅ = 3.44–3.49; Ta ₂ O ₅ = 11.28–11.44; Nb ₂ O ₅ = 61.05–61.95; NiO = 1.94–2.87; B ₂ O ₃ = 0.97–1.44	ГП $T_1 = 1223$ К; $T_{\text{сн}} = 1273$ К;	1194–1200 ($\Delta\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0 = 2–3$ %) (1140–1150)* ($\Delta\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0 = 4–5$ %)*	0.30–0.32 ($\Delta K_p = 5–6$ %) (0.28–0.30)* ($\Delta K_p = 6–7$ %)*	59–62 ($\Delta d_{31} = 5–6$ %) (53–58)* ($\Delta d_{31} = 6–7$ %)*	80–82 ($\Delta Q_M = 3$ %) (72–76)* ($\Delta Q_M = 4$ %)*
пироэлектрические материалы						
8	Na ₂ O = 18.38–18.73; Nb ₂ O ₅ = 78.79–80.32; TiO ₂ = 0.49–1.46; CoO = 0.46–1.37	ГП $T_1 = 1070$ К; $T_2 = 1120$ К; $T_{\text{сн}} = 1380$ К	180–220 $\gamma = (1.44–1.5) \cdot 10^{-4}$ Кл/м ² ·К (205–240)* ($\gamma = (1.3–1.4) \cdot 10^{-4}$ Кл/м ² ·К)*	0.16–0.168 (0.145–0.150)*	11–12 (10–11)*	340–390 (280–320)*
9	Na ₂ O = 16.21–18.73; Nb ₂ O ₅ = 69.52–80.32; TiO ₂ = 0.49–7.37; NiO = 0.46–6.90	ГП $T_1 = 1070$ К; $T_2 = 1120$ К; $T_{\text{сн}} = 1380$ К	170–250 $\gamma = (1.6–1.7) \cdot 10^{-4}$ Кл/м ² ·К (195–230)* ($\gamma = (1.5–1.6) \cdot 10^{-4}$ Кл/м ² ·К)*	0.13–0.16 (0.12–0.14)*	9–10 (8–9)*	320–380 (250–310)*

Брэггу–Брентано). Исследовали измельченные керамические объекты, что позволило исключить влияние поверхностных эффектов, напряжений и текстур, возникающих в процессе изготовления керамик. Расчёт структурных параметров проводился по методике, представленной в работе [20]. Погрешности измерений структурных параметров имеют следующие величины: линейных $\Delta a = \Delta b = \Delta c = \pm(0.002-0.004) \text{ \AA}$; угловых $\Delta\alpha(\beta) = 0.05^\circ$; объема $\Delta V = \pm 0.05 \text{ \AA}^3$.

Рентгеновскую плотность рассчитывали по формуле: $\rho_{\text{рент}} = MZ / (N_A V)$, где M – молекулярная масса, Z – количество формульных единиц на элементарную ячейку, N_A – число Авогадро, V – объем элементарной ячейки. Определение экспериментальной, $\rho_{\text{эксп}}$, плотности образцов осуществляли методом гидростатического взвешивания в октане. Относительную плотность, $\rho_{\text{отн}}$, рассчитывали по формуле $(\rho_{\text{эксп}}/\rho_{\text{рент}}) \cdot 100 \%$.

Для аттестации электрофизических свойств исследованных ТР проведены измерения их диэлектрических, пьезоэлектрических и электроупругих параметров при комнатной температуре в соответствии с [21]. При этом определяли относительную диэлектрическую проницаемость поляризованных образцов, $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$, пьезомодуль, $|d_{31}|$, коэффициент электромеханической связи планарной моды колебаний, K_p , механическую добротность, Q_M , в том числе, специфические параметры разработанных материалов (температуру Кюри, T_K , пьезочувствительность, $|g_{31}|$, пьезокоэффициент, γ , термостабильность – $\Delta\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$, ΔK_p , $\Delta|d_{31}|$, ΔQ_M).

3. Результаты и обсуждение

В таблице приведены оптимизированные элементные составы исследуемых объектов – основ разрабатываемых материалов, технологические условия их получения, основные электрофизические характеристики.

Как видно из таблицы, применение на двух основных стадиях (синтеза и спекания) получения керамик операций МА и ГП привело к существенному улучшению макросвойств объектов. Причиной наблюдаемого может выступать трансформация их внутренней структуры (кристаллической, зеренной) в результате воздействия внешних факторов. Так, измельчение шихт при МА привело к ускорению диффузионных явлений в процессе синтеза, а спекание под давлением синтезированных порошков – к активизации массопереноса при рекристаллизации. Это обеспечило снижение температур синтеза и спе-

кания и, как следствие, сокращение протяженностей морфотропных гетерофазных областей в соответствующих системах ТР и «сдвиг» выбранных объектов в однофазные области.

На рис. 1 для иллюстрации показаны рентгенограммы некоторых из приведенных материалов. Рентгенографически установлена беспри-

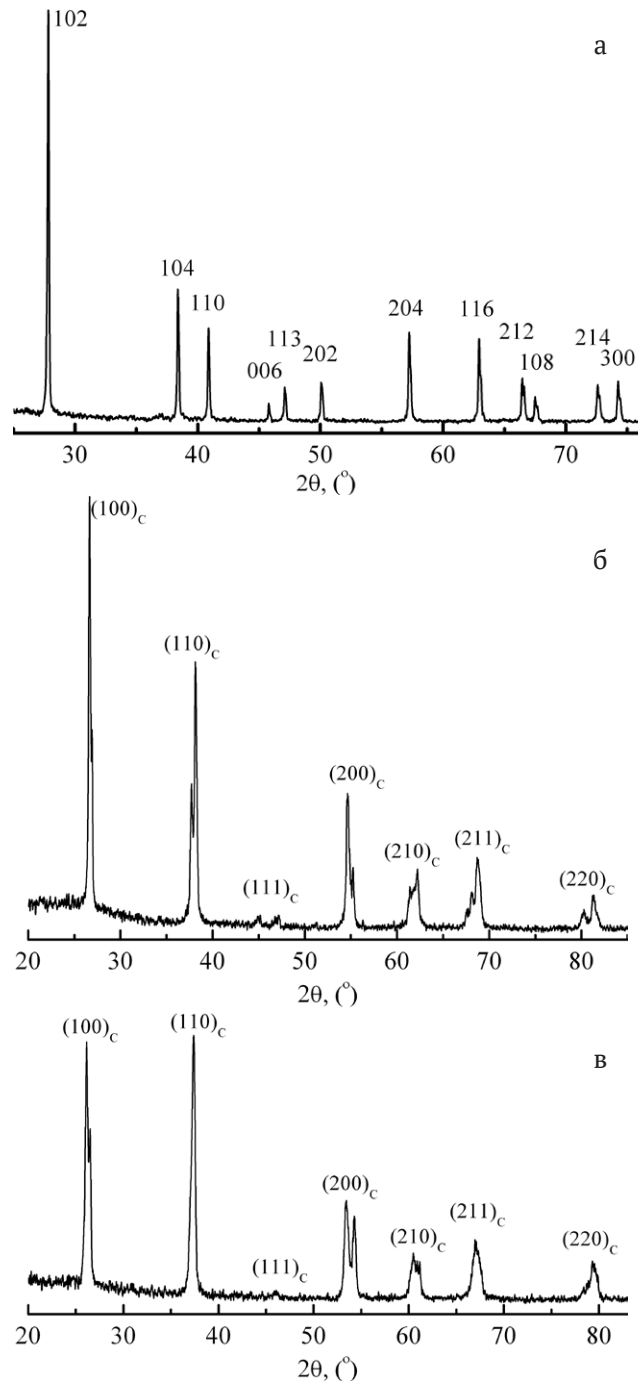


Рис. 1. Рентгенограммы материалов: высокотемпературного (структура типа ильменита) – а; высокочастотного (структура типа перовскита) – б; высокочувствительного (структура типа перовскита) – в

мечность образующихся керамических композиций с плотностью выше 95 % от теоретической, что характерно для применяемых технологий [22]. На рентгенограммах видно, что все материалы хорошо структурированы без примесных фаз. Такая реализация более благоприятных условий для протекания диффузионных и рекристаллизационных процессов обеспечивает формирование более совершенной микроструктуры керамик [23] и, как следствие, улучшение их диэлектрических и пьезоэлектрических свойств.

Удельный вес всех разрабатываемых материалов порядка 4 г/см³, что вдвое меньше, чем в известных Pb-содержащих аналогах. И это позволяет, как говорилось выше, использовать данные материалы в устройствах, в которых весовые характеристики являются решающими.

Полученные низкочастотные материалы могут быть применимы в низкочастотных приёмных устройствах – гидрофонах, микрофонах, сейсмоприёмниках. Среднечастотные материалы могут быть использованы в радиоэлектронных устройствах, работающих в режиме приёма, в том числе, в трансдукторах ультразвуковых (УЗ) передатчиков.

Область применения высокочастотных материалов – УЗ линии задержки на объёмных и поверхностных волнах, устройства медицинской диагностики. Высокочувствительные материалы могут быть полезными, например, в устройствах измерения механических воздействий (давления). Высокотемпературные материалы могут быть использованы для создания пьезоэлектрических датчиков многоразового использования генераторного типа для контроля оборудования (атомные реакторы, ракетно-ядерные комплексы), испытывающих экстремальные термические воздействия. Термостабильные материалы найдут применение при создании датчиков детонации двигателей внутреннего сгорания. Пирозлектрические материалы будут полезны для создания высокоэффективных термоэлементов в устройствах пирометрии излучения, основанных на явлениях пирозлектричества.

4. Заключение

Таким образом, анализ вышеприведенных сведений показал, что возможно использованием механоактивации при синтезе с последующим спеканием горячим прессованием улучшить свойства не содержащих токсичных элементов бессвинцовых сегнетокерамических материалов с низким удельным весом для при-

менений в устройствах, где весовые характеристики являются решающими, а также в разноточных системах в качестве термоэлементов и в других устройствах электроники.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Михайлин Ю. А. Интеллектуальные материалы. *Полимерные материалы. Изделия. Оборудование. Технологии*. 2004;8(63): 6–8.
2. *Перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды* / Утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 08.07.2015 г., № 1316-Р.
3. *О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации* / Федеральный закон от 21.07.2014, №219-ФЗ.
4. *Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации* / Утв. УК Президента РФ от 1 декабря 2016 г., № 642.
5. Directive 2002/95/EU of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electronic equipment. *Official Journal of the European Union L*. 37. 2003;46: 19–23.
6. Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. *Official Journal of the European Union. L*. 174. 2011;54: 88–110.
7. Saito Y., Takao H., Tani T., Tatsuhiko N., Kazumasa T., Takahiko H., Toshiatsu N., ... Masaya N. Lead-free piezoceramics. *Nature*. 2004;432: 84–87. <https://doi.org/10.1038/nature03028>
8. Zhang S., Lee H. J., Ma C., Tan X. Sintering effect on microstructure and properties of (K,Na)NbO₃ ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*. 2011;94: 3659–3665. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2011.04833.x>
9. Liu L. J., Huang Y. M., Li Y. H., ... Thi M. P. Orthorhombic to tetragonal structural phase transition in Na_{0.5}K_{0.5}NbO₃-based ceramics. *Materials Letters*. 2012;68: 300–302. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2011.10.103>
10. Bomlai P. Sintering, microstructure and electrical properties of MnO₂ and CuO doped [Na_{0.515}K_{0.485}]_{0.94}Li_{0.06}(Nb_{0.99}Ta_{0.01})O₃ ceramics. *Advanced Materials Research*. 2013;770: 258. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.770.258>
11. Koruza J., Bell A. J., Frömling T., Webber K. G., Wang K., Rödel J. Requirements for the transfer of lead-free

piezoceramics into application. *Journal of Materiomics*. 2018;4: 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2018.02.001>

12. Zhang Y., Li M., Yang S., Zhai J. Low-temperature sintering of KNN-based lead free ceramics. *Solid State Communications*. 2021;324: 114133. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2020.114133>

13. Zhao Y., Liu J., Yan D. Improved piezoelectric and strain performance of $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ -doped (Li,K,Na) NbO_3 lead-free piezoceramics. *Journal of Materials Science*. 2019;54: 1126–1135. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2906-z>

14. Yu Z., Chen X., Su Y., ... Liu P. Hot-press sintering $\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3$ -0.5 mol % Al_2O_3 ceramics with enhanced ferroelectric and piezoelectric properties. *Journal of Materials Science*. 2019;54: 13457–13466. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03850-9>

15. Пономарев С. Г., Смирнов А. В., Резниченко А. В., ... Соловьев, И. С. Виброуплотнение бессвинцового пьезокерамического материала на основе твердых растворов ниобатов калия и натрия. *Стекло и керамика*. 2019;(9): 31–36. <https://doi.org/10.1007/s10717-020-00197-5>

16. Shi W., Du J., Zhai Y., ... Fu P. Intrinsic and extrinsic dielectric contributions to the electrical properties in CaZrO_3 -doped KNN-based electrical/optical multifunctional ceramics. *Journal of Materials Science*. 2020;55: 5741–5749. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-04444-6>

17. Lu Y., Zhang J., Zhou K., He L. Capacitive energy storage performance of lead-free sodium niobate-based antiferroelectric ceramics. *Journal of Materials Science*. 2023;58: 11886–11893. <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08769-w>

18. Резниченко Л. А., Шилкина Л. А., Разумовская О. Н., Дудкина С. И., Гагарина Е. С., Бородин А. В. Диэлектрические и пьезоэлектрические свойства твердых растворов на основе ниобата натрия. *Неорганические материалы*. 2003;39(2): 187–199. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17286888>

19. Вербенко И. А., Резниченко Л. А. Бессвинцовая сегнетоэлектрическая керамика на основе ниобатов щелочных металлов: история, технология, перспективы. *Физика бессвинцовых пьезоактивных и родственных материалов. (Анализ современного состояния и перспективы развития): Сборник трудов Второго Международного молодежного симпозиума, 6-7 сентября 2013, Ростов-на-Дону – г. Туапсе*. Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН; 2013. Вып. 2, Т. 1. с. 52–64.

20. Фесенко Е. Г. *Семейство перовскита и сегнетоэлектричество*. М.: Атомиздат; 1972. 248 с.

21. *IEEE Standard on Piezoelectricity ANSI/IEEE Std. 176-1987*. New-York: IEEE; 1988. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1988.79638>

22. Okazaki K. *Ceramic engineering for dielectrics*. Токуо: Gakken Sha Publishing Co. Ltd; 1969. 332 p.

23. Данцигер А. Я., Разумовская О. Н., Резниченко Л. А., ... Рыбьянец А. Н. *Многокомпонентные системы сегнетоэлектрических сложных оксидов: физика, кристаллохимия, технология. Аспекты дизайна пьезоэлектрических материалов*. Т. 1, 2. Ростов-на-Дону: МП «Книга»; 2001–2002. 800 с.

Информация об авторах

Дудкина Светлана Ивановна, с. н. с. отдела интеллектуальных материалов и нанотехнологий НИИ физики Южного федерального университета (Ростов-на-Дону, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-3525-6973>
s.i.dudkina@yandex.ru

Зорин Денис Игоревич, аспирант, лаборант-исследователь отдела интеллектуальных материалов и нанотехнологий НИИ физики Южного федерального университета (Ростов-на-Дону, Российская Федерация).

dezorin@sfedu.ru

Глазунова Екатерина Викторовна, к. ф.-м. н., н. с. отдела интеллектуальных материалов и нанотехнологий НИИ физики Южного федерального университета (Ростов-на-Дону, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-2596-2471>
kate93g@mail.ru

Шилкина Лидия Александровна, с. н. с. отдела интеллектуальных материалов и нанотехнологий НИИ физики Южного федерального университета (Ростов-на-Дону, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-8048-3617>
lid-shilkina@yandex.ru

Андрюшина Инна Николаевна, к. ф.-м. н., с. н. с. отдела интеллектуальных материалов и нанотехнологий НИИ физики Южного федерального университета (Ростов-на-Дону, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-8058-4381>
fatur6@mail.ru

Андрюшин Константин Петрович, д. ф.-м. н., вед. н. с. отдела интеллектуальных материалов и нанотехнологий НИИ физики Южного федерального университета (Ростов-на-Дону, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-0147-8359>
e-mail: kpandryushin@gmail.com

Вербенко Илья Александрович, д. ф.-м. н., директор НИИ физики Южного федерального университета (Ростов-на-Дону, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-6229-9691>
iaverbenko@sfedu.ru

Резниченко Лариса Андреевна, д. ф.-м. н., профессор, заведующая отделом интеллектуальных материалов и нанотехнологий НИИ физики Южного федерального университета (Ростов-на-Дону, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-4591-1601>
lareznichenko@sfedu.ru

Поступила в редакцию 15.01.2026; одобрена после рецензирования 09.02.2026; принята к публикации 16.02.2026; опубликована онлайн 01.04.2026.