

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТОВ $\text{Rb}_2\text{ZnCl}_4\text{-Al}_2\text{O}_3^*$

Л. С. Стекленева¹, М. А. Панкова², Л. Н. Коротков¹

¹ – Воронежский государственный технический университет;

² – Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации

Поступила в редакцию 01.03.2022 г.

Аннотация. В интервале температур 110 – 370 К изучены диэлектрические свойства композиционных материалов, полученных внедрением сегнетоэлектрика с несоизмерной фазой Rb_2ZnCl_4 в пористые пленки оксида алюминия со средним диаметром пор 30, 90 и 300 нм (аббревиатуры - RA-30, RA-90 и RA-300, соответственно). Обнаружено, что данные материалы характеризуются температурным гистерезисом диэлектрической проницаемости во всем доступном для эксперимента диапазоне температур. Наряду с этим установлено, что в частицах Rb_2ZnCl_4 в составе композита RA-300 реализуются как сегнетоэлектрическая, так и несоизмерная фазы. Для образцов RA-90 и RA-30 признаков возникновения сегнетоэлектрической фазы не выявлено. В частицах тетрахлорцинката рубидия в составе композитов RA-90 и RA-300 около 300 К происходит переход из несоизмерной в соизмерную параэлектрическую фазу, при этом данный переход приобретает черты фазового перехода первого рода. В случае композита RA-30 четко выраженной аномалии диэлектрического отклика, ассоциирующейся с фазовым переходом из параэлектрической в несоизмерную фазу в условиях эксперимента, не обнаружено.

Ключевые слова: несоизмерная фаза, композит, пористый оксид алюминия, сегнетоэлектрический фазовый переход, диэлектрическая проницаемость.

DIELECTRIC PROPERTIES OF $\text{Rb}_2\text{ZnCl}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$ NANOCOMPOSITES

L. S. Steklneva, M. A. Pankova, L. N. Korotkov

Abstract. Dielectric properties of composite materials obtained by embedding a ferroelectric with an incommensurate phase Rb_2ZnCl_4 into porous aluminum oxide films with an average pore diameter of 30, 90, and 300 nm (abbreviations RA-30, RA-90 and RA-300, respectively) were studied within the temperature range of 110–370 K. It was found that these materials are characterized by a temperature hysteresis of dielectric permittivity over the entire temperature range available for experiment. Along with this, it was found that both ferroelectric and incommensurate phases are realized in the Rb_2ZnCl_4 particles in the RA-300 composite. For samples RA-90 and RA-30, no evidences of a ferroelectric phase appearance were revealed. In particles of rubidium tetrachlorozincate in the RA-90 and RA-300 composites the first order phase transition from an incommensurate to a commensurate paraelectric phase near 300 K is realized. In the case of RA-30, clearly pronounced anomaly of dielectric response associated with the phase transition from the paraelectric to the incommensurate phase under experimental conditions was not found.

Keywords: Incommensurate phase, composite, porous aluminum oxide, ferroelectric phase transition, dielectric permittivity.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90164. Авторы выражают благодарность Каширину М. А. за помощь в проведении рентгеновского эксперимента
© Стекленева Л. С., Панкова М. А., Коротков Л. Н., 2022

ВВЕДЕНИЕ

Монокристалл тетрахлорцинка рублидия (Rb_2ZnCl_4) представляет собой сегнетоэлектрик с несоизмеримой фазой [1]. Переход из соизмеримой параэлектрической фазы в несоизмеримую реализуется при температуре $T_i \approx 303$ К, ниже которой в кристалле развиваются локальные смещения атомов решетки и формируется пространственная волна их смещений с длиной λ , которая несоизмерима параметру решетки a . С понижением температуры длина волны λ возрастает, достигая вблизи температуры перехода в соизмеримую сегнетоэлектрическую фазу $T_C \approx 192$ К величины, сопоставимой с размерами сегнетоэлектрических доменов [2]. В кристаллах нанометровых размеров возрастанию периода волны λ препятствуют размеры кристаллита, поэтому очевидно, что физические свойства нанокристаллического Rb_2ZnCl_4 будут существенно отличаться от свойств, наблюдаемых для моно- или объемного поликристаллического тетрахлорцинка рублидия.

Существуют различные методы получения нанокристаллических материалов [3], каждый из которых наряду с определенными достоинствами обладает специфическими недостатками. Известным методом изготовления наноразмерных сегнетоэлектриков является метод, основанный на внедрении сегнетоэлектрика в пористые матрицы с нанометровым размером сквозных пор из раствора или расплава [4]. Его основным достоинством является сравнительная простота. Наряду с этим, частицы сегнетоэлектрика, внедренные в пористую матрицу, испытывают влияние неоднородных механических напряжений, деполяризующих электрических полей, химического взаимодействия между частичками внедренного материала и матрицей и т. д. [5, 6]. Поэтому для выделения вкладов влияющих факторов целесообразно использовать различные диэлектрические матрицы.

Особенности диэлектрического отклика наноконкомпозитов, полученных внедрением соли Rb_2ZnCl_4 в пористые матрицы диоксида кремния (SiO_2), ранее обсуждались в работах [7, 8]. Сообщения об исследованиях физических свойств тетрахлорцинка рублидия в других пористых матрицах в настоящее время практически отсутствуют.

В связи с этим целью данной работы стало изучение особенностей диэлектрических свойств композитных материалов, полученных внедрением соли Rb_2ZnCl_4 в пористые матрицы оксида алюминия (Al_2O_3).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАЗЦЫ

Для экспериментов были использованы монокристаллический образец тетрахлорцинка рублидия, а также композиционные материалы, приготовленные внедрением Rb_2ZnCl_4 в пористые матрицы оксида алюминия в виде пластин с внешними размерами приблизительно $10 \times 10 \times 0.25$ мм и средними диаметрами сквозных пор $\sim 30, 90$ и 300 нм, приобретенных коммерческим путем. Их изображение представлено на рис. 1. (Для обозначения исследуемых композитов в дальнейшем будем использовать аббревиатуры: RA-30, RA-90 и RA-300.)

Можно увидеть, что реальные размеры пор несколько отличаются от заявленных и соответственно составляют $\sim 40, 60$ и 270 нм.

Используемые в данной работе пористые матрицы в исходном состоянии имели относительный объем незаполненных пор 42, 56 и 52% для RA-300, RA-90 и RA-30, соответственно.

Внедрение соли тетрахлорцинка рублидия в предварительно отожженные матрицы осуществляли из насыщенного водного раствора при температуре около 100 °С в течение 3.5 часов. Затем образцы вынимали из раствора и тщательно высушивали при температуре 150 °С в течение 10 часов.

Объемная доля Rb_2ZnCl_4 в порах композита RA-300 составила ≈ 6 %, также как и для RA-30, а в порах композита RA-90 ≈ 4 %. Доля внедренного материала по отношению к

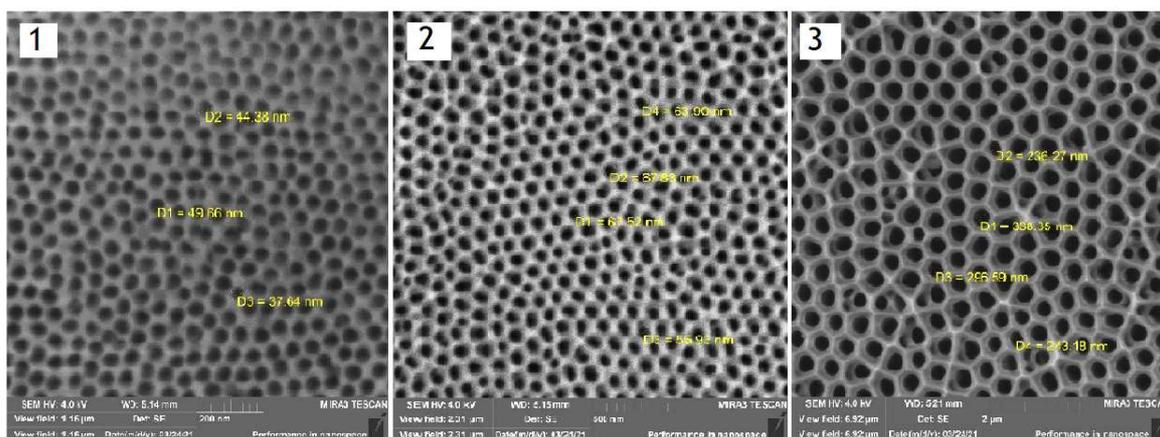


Рис. 1. РЭМ изображения пористых Al_2O_3 матриц с заявленным диаметром пор 30 нм (1), 90 нм (2) и 300 нм (3).

объему всего образца во всех трех случаях была около 3 %.

Результаты рентгенодифракционного эксперимента, проведенного с использованием рентгеновского дифрактометра “Bruker D2 PHASER” ($\text{Cu-K}\alpha$ - излучение) показаны на рис. 2. На фоне характерного для аморфной матрицы размытого максимума интенсивности рентгеновского рассеяния (галло) в окрестностях угла $2\theta \approx 24$ град, отчетливо видны линии, соответствующие кристаллической решетке объемного Rb_2ZnCl_4 .

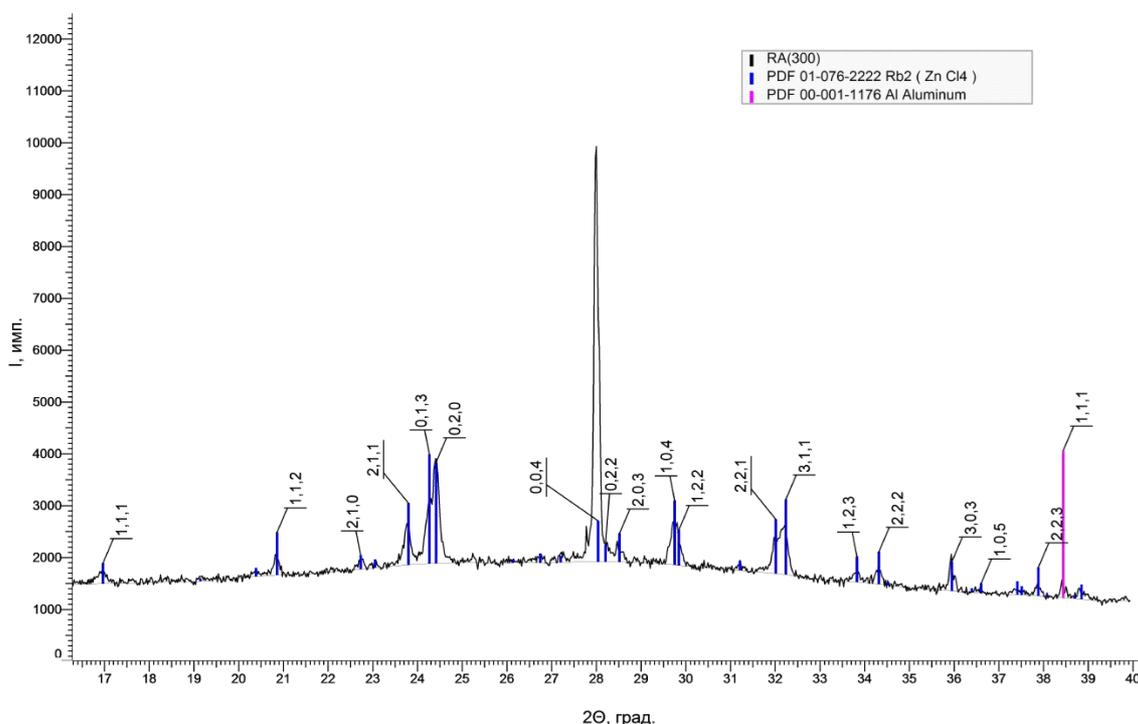


Рис. 2. Рентгеновская дифрактограмма для образца RA-300.

Для проведения диэлектрических измерений использовали прижимные медные электроды в форме плоскопараллельных пластин. Образцы помещали в криостат, где температура

изменялась от 100 до 375 К и контролировалась с помощью платинового термометра сопротивления с погрешностью не превышающей $\pm 0,2$ К. Измерения диэлектрической проницаемости (ϵ) и тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) осуществляли с помощью измерителя иммитанса Е7-20 на частоте 10 кГц в ходе охлаждения и нагрева образца со скоростью около 1 - 2 К/мин. Перед каждым измерением для удаления адсорбированной из воздуха влаги осуществляли отжиг образцов в измерительной ячейке при температуре ≈ 375 К.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Предваряя рассмотрение диэлектрических свойств композиционных материалов, целесообразно обсудить диэлектрический отклик в монокристалле тетрахлорцинка рубидия. Температурные зависимости ϵ для монокристалла Rb_2ZnCl_4 (рис. 3) имеют характерный для него вид [8]. Кривая $\epsilon(T)$ проходит через узкий максимум в окрестности температуры сегнетоэлектрического фазового перехода $T_C \approx 192$ К. Положения максимумов диэлектрической проницаемости вблизи T_C , наблюдаемые при охлаждении и нагреве образца, не совпадают. Пик ϵ на кривой охлаждения, соответствует температуре перехода из несоизмерной в сегнетоэлектрическую фазу при $T_{Cc} \approx 192$ К, пик на кривой нагрева - переходу из сегнетоэлектрической в несоизмеримую фазу, при $T_{Ch} \approx 196$ К.

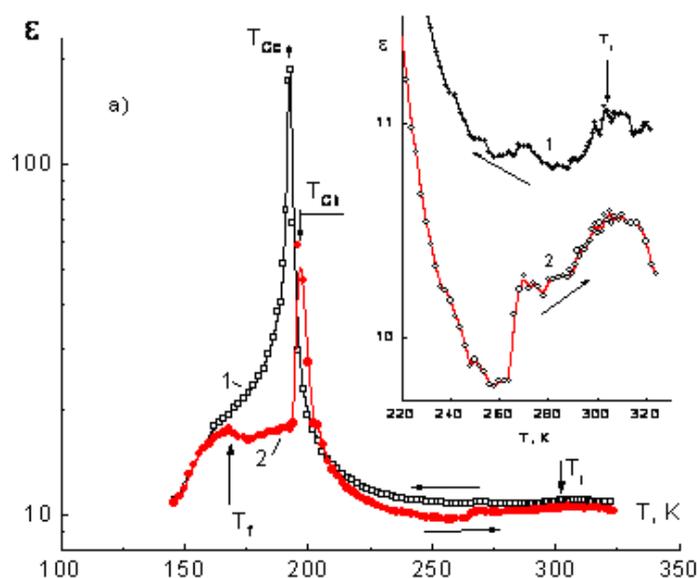


Рис. 3. Температурные зависимости ϵ для монокристалла Rb_2ZnCl_4 на частоте 10 кГц при охлаждении (1) и нагреве (2). На вставке показаны температурные зависимости ϵ в окрестности T_i .

Размытый максимум диэлектрической проницаемости в окрестности $T_i \approx 303$ К (вставка на рис. 3) связан с переходом из параэлектрической фазы в несоизмеримую.

Видно, что значения ϵ при температурах выше T_C заметно меньше, чем в сегнетоэлектрической фазе. Высокий диэлектрический отклик в полярной фазе обусловлен вкладом доменного механизма. Ниже температуры $T_f \approx 170$ К подвижность доменов замораживается [9–11], что приводит к уменьшению ϵ . Температуре T_f соответствует небольшой максимум на температурной зависимости ϵ (рис. 3).

Температурные зависимости диэлектрической проницаемости, полученные в ходе нагрева и охлаждения образца, не совпадают, образуя широкий температурный гистерезис ϵ в диапазоне температур $T_f - T_i$. Выше T_i и ниже T_f кривые $\epsilon(T)$ асимптотически сближаются.

Рассмотрим теперь диэлектрические свойства композитов.

При охлаждении композита RA-300 из параэлектрической фазы зависимость $\epsilon(T)$ проходит через размытый максимум в окрестности температуры $T_{mc} \approx 293$ К (рис. 4). В ходе нагрева образца из сегнетоэлектрической фазы этот максимум ϵ появляется вблизи $T_{mh} \approx 240$ К. Природа этих максимумов не установлена. Данные максимумы не сопровождаются заметными пиками $\text{tg}\delta$ (рис. 4 б). Это говорит о том, что они не связаны с процессами Максвелл – Вагнеровской поляризации, которая может приводить к появлению мощных максимумов ϵ в параэлектрической фазе некоторых сегнетоэлектриков [12, 13].

Вместе с тем положение диэлектрических аномалий при T_{mc} и T_{mh} на оси температур существенно зависит от термической предыстории материала [14], что позволяет предполагать их связь с метастабильными состояниями, возникающими в исследуемом материале. Существование таких состояний подтверждается наличием широкого гистерезиса диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь во всем доступном в эксперименте диапазоне температур (110 - 350 К), свидетельствующего о неравновесном состоянии исследуемого материала.

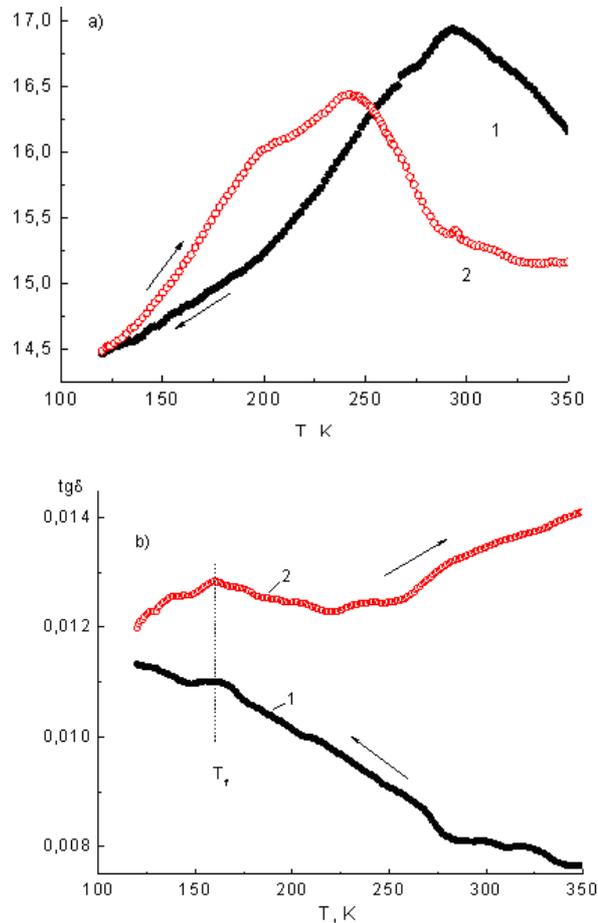


Рис. 4. Температурные зависимости ϵ (панель а) и $\text{tg}\delta$ (панель б) для композита RA-300 на частоте 10 кГц при охлаждении (1) и нагреве (2).

Еще один пик диэлектрической проницаемости, обусловленный переходом из несоизмери-

мой фазы в параэлектрическую, наблюдается в окрестностях $T_{ih} \approx 295$ К. На кривой охлаждения он не виден, вероятно, из-за его наложения на мощный максимум диэлектрической проницаемости при $T_{mc} \approx 293$ К.

Зависимость $\text{tg}\delta(T)$, полученная для композита RA-300 в ходе охлаждения возрастает с понижением температуры, тогда как при нагреве образца диэлектрические потери растут с повышением температуры. Вместе с тем, на обеих зависимостях $\text{tg}\delta(T)$ наблюдается максимум тангенса угла диэлектрических потерь в окрестности характерной температуры $T_f \approx 160$ К. Найденное значение T_f практически совпадает с температурой замораживания подвижности доменных границ в монокристаллическом образце (рис. 3) и в частицах тетрахлорцинката рубидия в составе композита $\text{Rb}_2\text{ZnCl}_4 - \text{SiO}_2$ [7].

Таким образом, совокупность изложенных результатов позволяет говорить о том, что при низких температурах во внедренных частицах Rb_2ZnCl_4 реализуется сегнетоэлектрическое состояние.

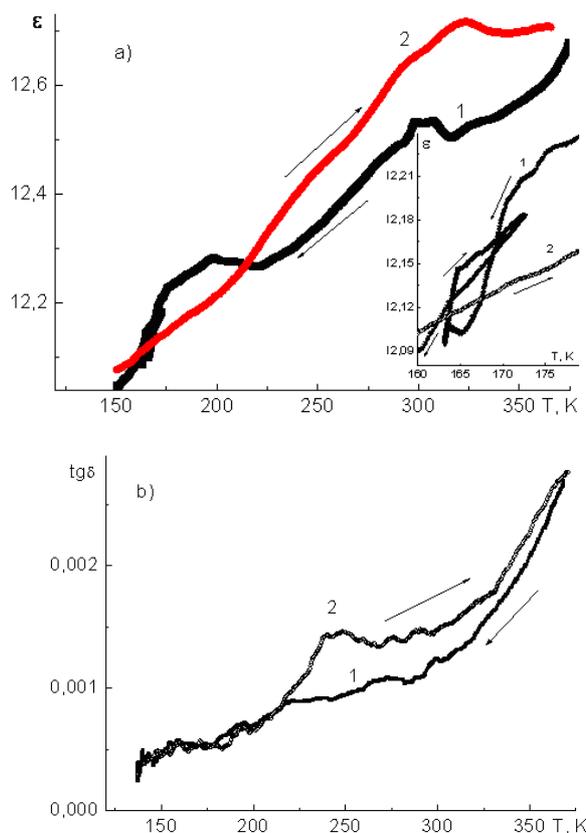


Рис. 5. Температурные зависимости ε (панель a) и $\text{tg}\delta$ (панель b) для композита RA-90 на частоте 10 кГц при охлаждении (1) и нагреве (2).

Зависимости $\varepsilon(T)$ и $\text{tg}\delta(T)$, полученные для композита RA-90 в условиях нагрева и охлаждения образца (рис. 5), являются возрастающими функциями температуры. На зависимостях $\varepsilon(T)$ отчетливо виден максимум, соответствующий переходу в несоизмерную фазу. В случае нагрева он наблюдается при $T_{ih} \approx 323$ К, а при охлаждении при $T_{ic} \approx 303$ К.

При охлаждении образца около 200 К кривая $\varepsilon(T)$ проходит через размытый максимум, природа которого не очевидна. Диэлектрическая проницаемость в этой области температур существенно неравновесна. Об этом свидетельствует, как широкий температурный гистерезис ε , захватывающий всю область температур, доступных в эксперименте, так и необратимое

поведение зависимости $\varepsilon(T)$ при циклическом изменении температуры (вставка к рис. 5).

Кривая $\text{tg}\delta(T)$, в ходе нагрева композита проходит выше кривой охлаждения, образуя широкий температурный гистерезис $\text{tg}\delta$ в интервале температур $\approx 225 - 375$ К. При этом в окрестностях 240 К на зависимости $\text{tg}\delta(T)$, полученной в ходе нагрева, наблюдается максимум, который не проявляется при охлаждении образца.

Можно предположить, что обнаруженный при нагреве композита RA-90 максимум диэлектрических потерь связан с релаксацией полярных микро- (или нано-) областей. По-видимому, эти области являются термодинамически неравновесными и формируются при температурах, соответствующих сегнетоэлектрической фазе монокристаллического Rb_2ZnCl_4 .

В пользу этого предположения говорит то обстоятельство, что и диэлектрическая проницаемость, и тангенс угла диэлектрических потерь композита RA-90 в ходе нагрева имеют более высокие значения чем при охлаждении.

Для композита RA-30 также как и в случае RA-90 зависимости $\varepsilon(T)$ и $\text{tg}\delta(T)$, как при нагреве, так и при охлаждении образца, являются возрастающими функциями температуры (рис. 6). При этом они образуют температурный гистерезис, отчетливо видимый в интервале температур 225 - 370 К. При этом зависимости $\varepsilon(T)$ и $\text{tg}\delta(T)$, регистрируемые в ходе нагрева образца, проходят выше соответствующих кривых, полученных при охлаждении.

Наряду с этим каких-либо отчетливых аномалий, которые можно связать с сегнетоэлектрическим фазовым переходом, либо переходом в несоизмерную фазу для композита RA-30 в ходе эксперимента не обнаружено.

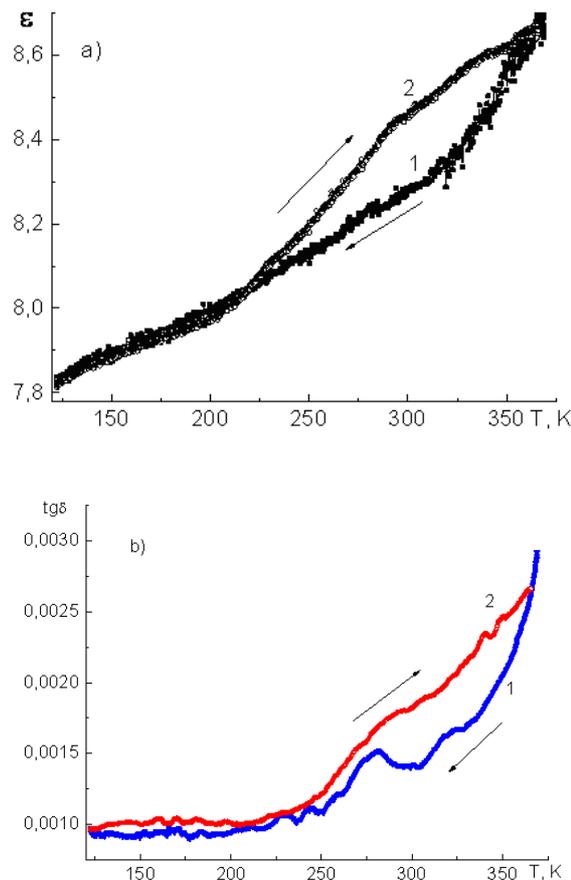


Рис. 6. Температурные зависимости ε (панель a) и $\text{tg}\delta$ (панель b) для композита RA-30 на частоте 10 кГц при охлаждении (1) и нагреве (2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования диэлектрических свойств композиционных материалов, полученных внедрением соли тетрахлорцинка рублидия в пористые пленки оксида алюминия с диаметром пор 30, 90 и 300 нм позволяют сделать следующие выводы.

1. Наблюдаемый для всех исследованных композитов широкий температурный гистерезис диэлектрической проницаемости указывает на крайне медленное установление в них состояния термодинамического равновесия.

2. Характерный максимум $\text{tg}\delta$, регистрируемый вблизи 165 К для композита RA-300, обусловленный замораживанием подвижности доменных границ в частицах Rb_2ZnCl_4 , свидетельствует о существовании сегнетоэлектрических доменов, а следовательно, и сегнетоэлектрической фазы в частицах Rb_2ZnCl_4 . Вместе с тем, какой-либо отчетливой аномалии диэлектрической проницаемости, которую можно было бы однозначно связать с сегнетоэлектрическим фазовым переходом во включениях Rb_2ZnCl_4 не обнаружено. Это позволяет предположить, что сегнетоэлектрическая фаза образуется постепенно с понижением температуры.

Для образцов RA-90 и RA-30 признаков возникновения сегнетоэлектрической фазы в частицах Rb_2ZnCl_4 в условиях эксперимента не выявлено.

3. В частицах тетрахлорцинка рублидия, входящих в состав композитов RA-90 и RA-300 обнаружен переход из несоизмерной в соизмерную параэлектрическую фазу, температура которого незначительно отличается от температуры несоизмерного фазового перехода в монокристалле тетрахлорцинка рублидия.

Судя по температурному гистерезису T_i в композите RA-90, несоизмерный фазовый переход, который в монокристаллическом Rb_2ZnCl_4 является переходом второго рода, приобретает черты фазового перехода первого рода.

В случае композита RA-30 четко выраженной аномалии диэлектрического отклика, ассоциирующейся с переходом в несоизмерную фазу в условиях эксперимента не выявлено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cummins, H. Z. Experimental studies of structurally incommensurate crystal phases / H. Z. Cummins // Physics reports (Review Section of Physics Letters). — 1990. — № 185 (5–6). — P. 211–409.
2. Багаутдинов, Б. Ш. Эволюция структуры Rb_2ZnCl_4 в температурном диапазоне 4.2 – 310 К / Б. Ш. Багаутдинов, В. Ш. Шехтман // Физика твердого тела. — 1999. — № 41(6). — С. 1084–1090.
3. Глинчук, М. Д. Наноферроики / М. Д. Глинчук, А. В. Рагуля. — Киев : Наукова Думка, 2010. — 312 с.
4. Kumzerov, Y. Nanostructures within porous materials / Y. Kumzerov, S. Vakhrushev // Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology. V. 10. / American Scientific Publishers. — 2003. — P. 811–849.
5. “Restricted Geometry” Effect on Phase Transitions in KDP, ADP, and CDP Nanocrystals / V. V. Tarnavich et. al. // Crystals. — 2019. — № 9(11). — С. 593.
6. ИК-спектроскопия сегнетоэлектрических композитов / Н. Г. Поправко, А. С. Сидоркин, С. Д. Миловидова, О. В. Рогазинская // Физика твердого тела. — 2015. — Т. 57, № 3. — С. 510–514.
7. Структура, диэлектрические и тепловые свойства тетрахлорцинка рублидия в пористых стеклах / Л. Н. Коротков и др. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2019. — № 83(9). — С. 1179–1183.
8. Диэлектрические свойства нанокompозитов Rb_2ZnCl_4 - SiO_2 / Т. Н. Короткова, Л. С. Стекленева, Е. Рысякиевич-Пасек, Л. Н. Коротков // Вестник Воронежского госу-

дарственного технического университета. — 2017. — Т. 13, № 5. — С. 127–132.

9. Gridnev, S. A. Phase transition in domain wall in Rb_2ZnCl_4 near 150 K / S. A. Gridnev, V. V. Gorbatenko, B. N. Prasolov // *Crystallogr. Rep.* — 1997. — V. 42, № 4. — P. 670.

10. Теплопроводность и теплоемкость кристаллов Rb_2ZnCl_4 в области несоизмерной фазы / Б. А. Струков, А. А. Белов, С. Н. Горшков, Н. Ю. Кожевников // *Изв. АН СССР. Сер. физ.* — 1991. — Т. 55, № 3. — С. 470–473.

11. “Freezing” of domain structure in Rb_2ZnCl_4 / S. A. Gridnev, L. A. Shuvalov, V. V. Gorbatenko, B. N. Prasolov // *Ferroelectrics.* — 1993. — V. 140. — P. 145–149.

12. Baranov, A. I. Relaxor-Like Dielectric Relaxation: Artifacts and Intrinsic Properties / A. I. Baranov // *Ferroelectrics.* — 2003. — V. 285. — P. 225–241.

13. Kang, B. S. Diffuse dielectric anomaly in perovskite-type ferroelectric oxides in the temperature range of 400–700 °C / B. S. Kang, S. K. Choi, C. H. Park // *J. Appl. Phys.* — 2003. — № 94. — P. 1904–1911.

14. Dielectric response of Rb_2ZnCl_4 within porous aluminum oxide / L. N. Korotkov, L. S. Stekleneva, M. A. Pankova, E. M. Logoshina // *Ferroelectrics.* — 2020. — V. 567:1. — P. 74–81.

REFERENCES

1. Cummins H.Z. Experimental studies of structurally incommensurate crystal phases. *Physics reports (Review Section of Physics Letters)*, 1990, no. 185 (5–6), pp. 211–409.

2. Bagautdinov B., Shekhtman V. Evolution of the structure of Rb_2ZnCl_4 over the temperature range 4.2–310 K. [Bagautdinov B.S.H., Shekhtman V.S.H. Evolyuciya struktury Rb_2ZnCl_4 v temperaturnom diapazone 4.2 – 310 K]. *Fizika tverdogo tela – Physics of the Solid State*, 1999, vol. 41, pp. 987–993.

3. Glinchuk M.D., Rugulya A.V. Nanoferroics. [Glinchuk M.D., Ragulya A.V. Nanoferroiki]. Kiev: Naukova Dumka, 2010, 312 p.

4. Kumzerov Y., Vakhrushev S. Nanostructures within porous materials *Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology*. Vol. 10. American Scientific Publishers, 2003, pp. 811–849.

5. Tarnavich V.V., Sidorkin A.S., Korotkova T.N., Rysiakiewicz-Pasek E., Korotkov L.N., Popravko N.G. “Restricted Geometry” Effect on Phase Transitions in KDP, ADP, and CDP Nanocrystals. *Crystals*, 2019, no. 9(11), p. 593.

6. Popravko N.G., Sidorkin A.S., Milovidova S.D., Rogazinskaya O.V. IR spectroscopy of ferroelectric composites. [Popravko N.G., Sidorkin A.S., Milovidova S.D., Rogazinskaya O.V. ИК-спектроскопия сегнетоэлектрических композитов]. *Fizika tverdogo tela – Physics of the Solid State*, 2015, vol. 57, pp. 522–526.

7. Korotkov L.N., Stekleneva L.S., Flerov I.N., Mikhaleva E.A., Rysiakiewicz-Pasek E., Molokeyev M.S., Bondarev V.S., Gorev M.V., Sysoev O.I. X-Ray, Dielectric, and Thermophysical Studies of Rubidium Tetrachlorozincate inside Porous Glasses. [Korotkov L.N., Stekleneva L.S., Flerov I.N., Mikhaleva E.A., Rysyakevich-Pasek E., Molokeyev M.S., Bondarev V.S., Gorev M.V., Sysoev O.I. Структура, диэлектрические и тепловые свойства тетрахлорцинка рубидия в пористых стеклах]. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya fizicheskaya – Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2019, vol. 83, no. 9, pp. 1072–1076.

8. Korotkova T.N., Stekleneva L.S., Rysyakevich-Pasek E., Korotkov L.N. Dielectric Properties of $\text{Rb}_2\text{ZnCl}_4\text{-SiO}_2$ Nanocomposites. [Korotkova T.N., Stekleneva L.S., Rysyakevich-Pasek E., Korotkov L.N. Диэлектрические свойства нанокomпозитов $\text{Rb}_2\text{ZnCl}_4\text{-SiO}_2$]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Vestnik VGTU*, 2017, vol. 13, no. 5, pp. 127–132.

9. Gridnev, S.A., Gorbatenko V.V., Prasolov B.N. Phase transition in domain wall in Rb_2ZnCl_4 near 150 K. *Crystallogr. Rep.* 1997, vol. 42, no. 4, p. 670.

10. Strukov B.A., Belov A.A., Gorshkov S.N., Kozhevnikov M.J. Heat-conductivity and specific-heat of Rb_2ZnCl_4 crystals in the region of incommensurate phase. [Strukov B.A., Belov A.A.,

Gorshkov S.N., Kozhevnikov N.YU. Teploprovodnost' i teploemkost' kristallov Rb_2ZnCl_4 v oblasti nesorazmernoj fazy]. *Изв. АН СССР. Сер. физ. — Izvestiya akademii nauk SSSR. Seriya fizicheskaya*, 1991, vol. 55, no. 3, pp. 470–473.

11. Gridnev S.A., Shuvalov L.A., Gorbatenko V.V., Prasolov B.N. “Freezing” of domain structure in Rb_2ZnCl_4 . *Ferroelectrics*, 1993, vol. 140, pp. 145–149.

12. Baranov, A.I. Relaxor-Like Dielectric Relaxation: Artifacts and Intrinsic Properties. *Ferroelectrics*, 2003, vol. 285, pp. 225–241.

13. Kang B.S., Choi S.K., Park C.H. Diffuse dielectric anomaly in perovskite-type ferroelectric oxides in the temperature range of 400–700 °C. *J. Appl. Phys.*, 2003, no. 94, pp. 1904–1911.

14. Korotkov L.N., Stekleneva L.S., Pankova M.A., Logoshina E.M. Dielectric response of Rb_2ZnCl_4 within porous aluminum oxide. *Ferroelectrics*, 2020, vol. 567:1, pp. 74–81.

Стекленева Любовь Сергеевна, учебный мастер II категории кафедры физики твердого тела, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация
E-mail: lubov_stekleneva@mail.ru

Stekleneva Lyubov S., Educational Master at the Department of Solid State Physics, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
E-mail: lubov_stekleneva@mail.ru

Панкова Маргарита Александровна, к. т. н., старший преподаватель кафедры Старший преподаватель кафедры математики и моделирования систем, Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации, Воронеж, Российская Федерация
E-mail: m_a_pankova@mail.ru

Pankova Margarita A., Candidate of engineering sciences, Senior Lecturer at the Department of Mathematics and Modeling of Systems, Voronezh Institute of the Russian Federation Ministry of Internal Affairs, Voronezh, Russian Federation
E-mail: m_a_pankova@mail.ru

Коротков Леонид Николаевич, д. ф.-м. н., профессор, профессор кафедры физики твердого тела, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация
E-mail: l_korotkov@mail.ru

Korotkov Leonid N., DSc in Physics and Mathematics, Professor at the Department of Solid State Physics, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
E-mail: l_korotkov@mail.ru