

Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 537.226

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9859>**Влияние размеров пор на фазовые переходы в наночастицах тетрахлорцинка рублидия в пористых стеклянных матрицах**Л. С. Стекленева^{1,3✉}, А. А. Брянская¹, М. А. Панкова², С. В. Попов³, Л. Н. Коротков¹¹Воронежский государственный технический университет,
ул. 20-летия Октября, 84, Воронеж 394006, Российская Федерация²Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации,
пр-т Патриотов, 53, Воронеж 394065, Российская Федерация³Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»,
ул. Старых Большевиков, 54а, Воронеж 394064, Российская Федерация**Аннотация**

Известно, что в сегнетоэлектрических кристаллах с несоизмерными фазами ниже определенной температуры (T_i) развиваются локальные смещения отдельных атомов из исходных положений, образующие пространственную волну с длиной λ , которая несоизмерима с периодом решетки a , т. е. отношение λ/a иррационально. Длина волны возрастает с понижением температуры, достигая вблизи температуры сегнетоэлектрического фазового перехода T_c величины сопоставимой с размерами сегнетоэлектрических доменов, как, например, в модельном кристалле тетрахлорцинка рублидия (Rb_2ZnCl_4).

В ультрадисперсных кристаллах Rb_2ZnCl_4 увеличению λ препятствуют размеры кристаллита. В связи с этим можно ожидать, что физические свойства нанокристаллического тетрахлорцинка рублидия будут существенно отличаться от свойств объемного образца.

Одним из способов получения наноразмерных сегнетоэлектриков является метод, основанный на внедрении материала в пористые матрицы с нанометровым размером сквозных пор из раствора. Этот метод был применен в данной работе, целью которой стало изучение влияния размеров кристаллитов ультрадисперсного тетрахлорцинка рублидия на его диэлектрические свойства и реализующиеся в нанокристаллитах фазовые состояния.

Для эксперимента использовали образцы поликристаллического Rb_2ZnCl_4 и композитов, полученных инкорпорацией соли Rb_2ZnCl_4 из водного раствора в матрицы пористого оксида кремния со средним диаметром сквозных пор 46 и 5 нм (RS-46 и RS-5 соответственно). В пределах интервала 100–350 К изучены зависимости их диэлектрической проницаемости от температуры. Определены значения температур переходов в несоизмерную (T_i) и сегнетоэлектрическую (T_c) фазы, а также температуры замедления подвижности границ сегнетоэлектрических доменов в нанокристаллитах тетрахлорцинка рублидия в составе композита RS-46. В частицах Rb_2ZnCl_4 в составе композита RS-5 реализуется только переход в несоизмерную фазу, который в отличие от объемного материала демонстрирует черты фазового перехода первого рода.

Ключевые слова: несоизмерная фаза, композит, пористое стекло, сегнетоэлектрический фазовый переход, диэлектрическая проницаемость

Источник финансирования: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90164.

Благодарности: авторы благодарны Rysiakiewicz–Pasek E. за любезно предоставленные пористые стеклянные матрицы, а также Каширину М.А. за помощь при проведении рентгено-дифракционного эксперимента.

✉ Стекленева Любовь Сергеевна, e-mail: lubov_stekleneva@mail.ru

© Стекленева Л. С., Брянская А. А., Панкова М. А., Попов С. В., Коротков Л. Н., 2021



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Стекленева Л. С., Брянская А. А., Панкова М. А., Попов С. В., Коротков Л. Н. Влияние размеров пор на фазовые переходы в наночастицах тетрахлорцинка рубидия в пористых стеклянных матрицах. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2022;24(3): 362–368. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9859>

For citation: Stekleneva L. S., Bryanskaya A. A., Pankova M. A., Popov S. V., Korotkov L. N. Effect of pore sizes on phase transitions in rubidium tetrachlorozincate nanoparticles in porous glass matrices. *Condensed Matter and Interphases*. 2022;24(3): 362–368. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9859>

1. Введение

Кристаллы с несоизмерными фазами представляют собой кристаллические структуры, в которых при определенной температуре развиваются локальные смещения отдельных атомов из исходных положений, образующие пространственную волну с длиной λ , которая несоизмерима с периодом решетки a , т. е. отношение λ/a иррационально. В более общем смысле любой материал можно считать несоизмеримым, если присутствуют два или более элемента трансляционной симметрии, которые взаимно несоизмеримы [1, 2].

Интерес к кристаллам с несоизмерными фазами связан с тем, что несоизмерная модуляция нарушает трансляционную симметрию, так что кристалл не находится в истинном кристаллическом состоянии. Форма волны пространственной модуляции, изначально описываемая как синусоидальная, эволюционирует с температурой. Ее период увеличивается по мере удаления от температуры несоизмерного фазового перехода (T_i), а сама она превращается в структуру, называемую солитонной.

Модельным сегнетоэлектриком с несоизмерной фазой является тетрахлорцинка рубидия (Rb_2ZnCl_4) [1–3].

Переход из нормальной параэлектрической в несоизмерную фазу в нем реализуется при температуре, называемой температурой Лифшица $T_i \approx 303$ К, а из несоизмерной в соразмерную сегнетоэлектрическую – при температуре $T_C \approx 192$ К [1, 3].

Ниже T_i длина волны λ в тетрахлорцинка рубидия возрастает с понижением температуры, достигая вблизи T_C величины сопоставимой с размерами сегнетоэлектрических доменов [3].

Однако в ультрадисперсных кристаллах неограниченному увеличению длины λ , очевидно, препятствуют размеры кристаллита. Естественно ожидать, что это обстоятельство может заметно повлиять на фазовые состояния, реализующиеся в материале и существенно изменить его физические свойства.

Следует заметить, что свойства «обычных» наноразмерных сегнетоэлектриков интенсив-

но изучаются уже продолжительное время [4–10], тогда как физические процессы, реализующиеся в наноразмерных сегнетоэлектриках с несоизмерными фазами, до сих пор практически не исследованы.

Среди различных способов получения нанокристаллических материалов, пожалуй, наиболее простым является метод инкорпорации вещества в пористые матрицы с нанометровым размером сквозных пор из жидкого состояния [11].

Этот метод и был использован в данной работе, целью которой стало изучение влияния размеров кристаллитов ультрадисперсного тетрахлорцинка рубидия на его диэлектрические свойства и реализующиеся в нем фазовые состояния.

2. Методика эксперимента и образцы

Для экспериментов использовали нанокристаллический Rb_2ZnCl_4 , входящий в состав композитов, полученных инкорпорацией соли тетрахлорцинка рубидия из водного раствора в пластины пористого диоксида кремния с внешними размерами $10 \times 10 \times 0.5$ и $8.5 \times 4.5 \times 0.65$ мм и средними диаметрами сквозных пор ~ 46 и 5 нм, соответственно. (Для обозначения этих композитов далее приняты аббревиатуры: RS-46 и RS-5.)

Технология изготовления пористых стекол с развитой сетью сквозных пор подробно изложена в [12]. Используемые в данной работе пористые стекла в исходном состоянии имели относительный объем незаполненных пор 55 и 36 % для RS-46 и RS-5 соответственно.

Внедрение соли тетрахлорцинка рубидия в подвергшиеся предварительной термообработке пористые стеклянные пластины осуществляли из насыщенного раствора соли Rb_2ZnCl_4 в воде при температурах 90–98 °С около 3.5 часов. По завершению этой процедуры образцы высушивали в термостате с постепенным повышением температуры до 350 °С для удаления остаточной влаги. Продолжительность сушки составляла около 10 часов.

Методом взвешивания было найдено, что относительный объем внедренного вещества в пористой матрице со средним диаметром пор

около 46 нм составил $\approx 19\%$, а в матрице с средним диаметром пор около 5 нм – $\approx 15\%$. Доля Rb_2ZnCl_4 по отношению к объёму всего образца в обоих случаях была около 8 %.

Рентгенофазный анализ синтезированных композитов был проведен с помощью рентгеновского дифрактометра Bruker «D2 PHASER» (Cu-K α -излучение). Полученная для композита RS-5 дифрактограмма изображена на рис. 1. Видно, что угловая зависимость интенсивности рентгеновского рассеяния может быть представлена в виде характерного для стекол размытого максимума в окрестностях угла $2\theta \approx 24$ град и отчетливых пиков интенсивности, соответствующих кристаллической решетке объемного тетрахлорцинка рубидия.

По данным рентгенодифракционного анализа с помощью специализированной программы TOPAS 4.2 [13] были определены средние размеры частиц (d) Rb_2ZnCl_4 , входящих в состав композитов. Сделанные оценки дали $d \approx 51$ и 18 нм для RS-46 и RS-5 соответственно.

Наряду с композиционными материалами в эксперименте для проведения сравнительного анализа был использован образец объемного (поликристаллического) тетрахлорцинка рубидия, изготовленный методом компактирования из соли Rb_2ZnCl_4 .

Идентификация структурных фазовых переходов проводилась с посредством анализа результатов измерений диэлектрического отклика в интервале температур 100–350 К.

Перед проведением измерений на большие поверхности образцов наносили токопроводящую пасту, которая после высыхания образовывала электроды «плоского конденсатора». Образцы устанавливали во вмонтированную в криостат измерительную ячейку, содержащую платиновый термометр сопротивления, позволяющий контролировать температуру образца с погрешностью, не превышающей ± 0.2 К. Измерения диэлектрической проницаемости (ϵ) проводили с помощью измерителя иммитанса E7-20 на частоте 10 кГц в ходе охлаждения/нагрева образца со скоростью 1–2 К/мин.

Каждый измерительный цикл предварялся прогревом образца вместе с измерительной ячейкой в вакууме при температуре около 380 К для удаления адсорбированной из воздуха влаги.

3. Результаты эксперимента и дискуссия

Результаты эксперимента в виде графиков температурных зависимостей ϵ представлены на рис. 2. В случае поликристаллического тетрахлорцинка рубидия (рис. 2а), на кривых $\epsilon(T)$ можно выделить два максимума. Максимум

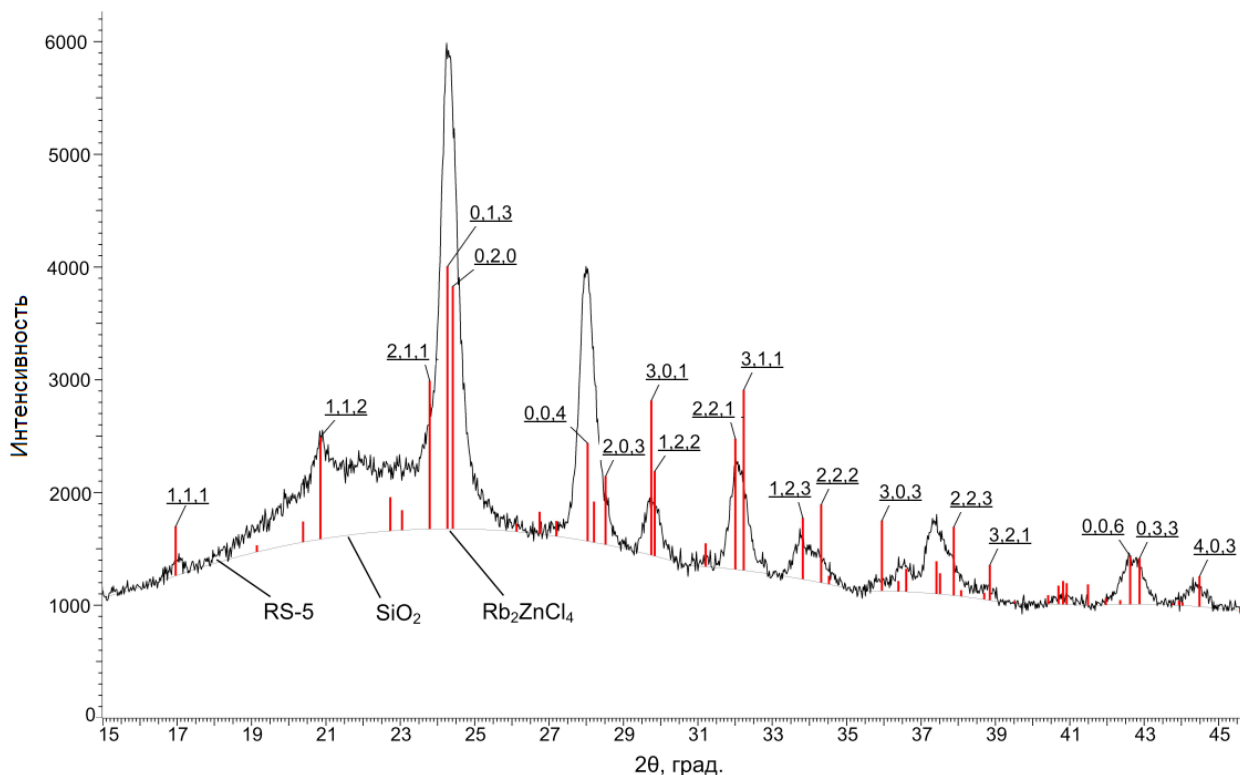


Рис. 1. Рентгенограмма образца композита RS-5

диэлектрической проницаемости, локализованный в окрестностях температуры $T_i \approx 307$ К, обусловлен переходом из нормальной параэлектрической фазы в несоразмерную. Его позиция на зависимостях $\epsilon(T)$ при нагреве и охлаждении образца остается практически неизменной, что является характерным признаком структурного фазового перехода второго рода.

Положение второго максимума ϵ наблюдается при охлаждении образца при температуре $T_{cc} \approx 187$ К, а при нагреве – при $T_{ch} \approx 196$ К. Этот максимум ϵ соответствует сегнетоэлектрическому фазовому переходу. Его смещение в зависимости от режима измерения (нагрев/охлаждение) показывает, что сегнетоэлектрический фазовый переход в объемном Rb_2ZnCl_4 относится к фазовым переходам первого рода, что согласуется с известными литературными данными [1, 2].

Диэлектрические свойства композита RS-46 отчасти уже обсуждались ранее в [14]. На зависимостях $\epsilon(T)$ обнаружены особенности около 160, 245 и 307 К (рис. 2 б). Максимум ϵ около 307 К, как и в поликристаллическом образце, обусловлен переходом из несоразмерной в параэлектрическую фазу в частицах внедренного Rb_2ZnCl_4 . Вблизи этого максимума наблюдается размытый пик теплоемкости C_p (вставка к рис. 2). Надо заметить, что соответствующая ему температура (≈ 285 К) несколько ниже T_i . Выяснение этого обстоятельства требует дополнительных исследований.

Ступенькообразной аномалии ϵ около 240 К, регистрируемой при охлаждении образца, соответствует максимум теплоемкости, наблюдаемый вблизи 232 К, что проиллюстрировано на вставке к рис. 2. Данный максимум C_p имеет специфическую форму, характерную для монокристаллического Rb_2ZnCl_4 в области температур, соответствующих сегнетоэлектрическому фазовому переходу [15].

На температурных зависимостях диэлектрической проницаемости, измеренных в ходе нагрева образца, каких-либо особенностей диэлектрического отклика, указывающих на сегнетоэлектрический фазовый переход, выявлено не было.

Наряду с этим размытый максимум ϵ наблюдается при температуре $T^* \approx 160$ К (на кривой охлаждения его позиция смещается к 158 К). Он имеет почти симметричную форму, при этом температурный гистерезис образует только его правый склон. Примечательно, что какие-либо

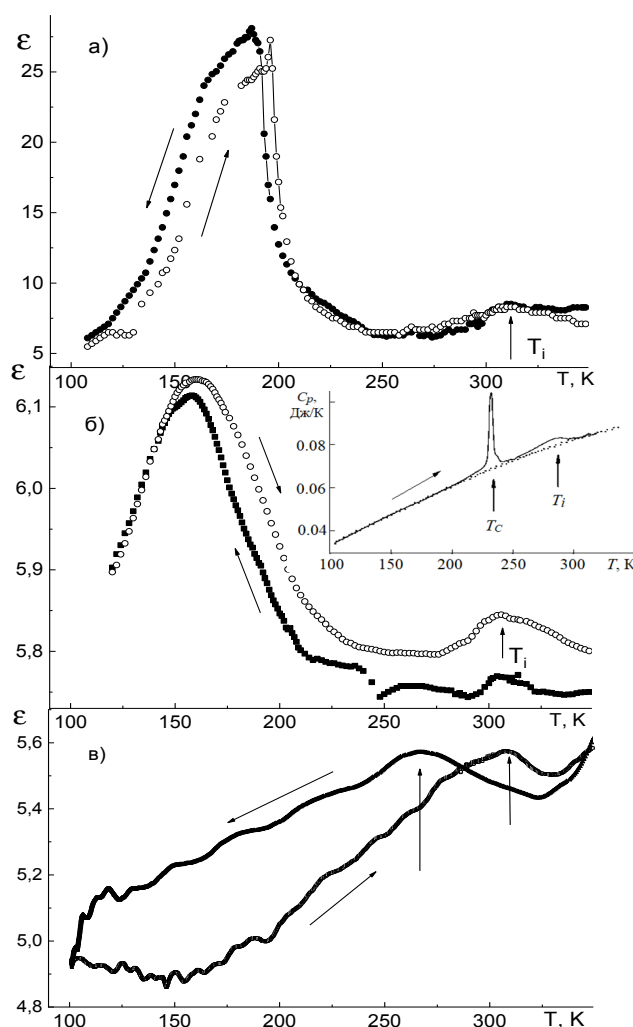


Рис. 2. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости для кристаллического образца Rb_2ZnCl_4 (а) и композитов RS-46 (б) и RS-5 (в), полученные в ходе нагрева и охлаждения. На вставке показана температурная зависимость удельной теплоемкости композита RS-46 [11]

особенности на зависимости $C_p(T)$ в окрестностях T^* не были выявлены.

Это обстоятельство позволяет предположить, что обсуждаемый максимум ϵ обусловлен фазовым переходом в границах сегнетоэлектрических доменов и связанным с этим замораживанием их подвижности. Данное явление известно для монокристаллического тетрахлорцинка рубидия [15-17]. При этом, в случае кристаллов с высоким содержанием дефектов кристаллической решетки, в окрестностях температуры замораживания T^* наблюдается размытый максимум диэлектрического отклика [15].

Следует отметить, что температурные зависимости диэлектрической проницаемости,

полученные при нагреве и охлаждении исследуемого материала не совпадают, образуя температурный гистерезис ϵ в широком интервале температур, лежащем выше температуры замораживания подвижности доменных границ T^* . Однако при $T < T^*$ температурный гистерезис ϵ не наблюдаются.

В случае монокристаллического образца наблюдается аналогичное поведение диэлектрического отклика [15–17]. Но в отличие от обсуждаемого композиционного материала в монокристалле Rb_2ZnCl_4 температурный гистерезис ϵ ограничен снизу температурой T^* , а сверху температурой Лифшица T_l . По мнению авторов, исследовавших это явление в Rb_2ZnCl_4 [15–17] аномально широкий температурный гистерезис диэлектрической проницаемости вызван закреплением доменных границ и солитонов на дефектах решетки.

Благодаря сильному взаимодействию с дефектами полярные области могут быть «затянуты» в неполярную фазу в ходе нагрева образца из сегнетоэлектрической фазы [18]. Вероятно, по этой причине зависимость $\epsilon(T)$ при нагреве композита RS-46 проходит выше температурной зависимости ϵ , полученной в ходе его охлаждения.

Рассмотрим теперь диэлектрические свойства композита RS-5 (рис. 2в). В окрестностях T_l виден небольшой максимум диэлектрической проницаемости. На кривой охлаждения его позиция соответствует температуре ≈ 268 К, а на кривой нагрева ≈ 307 К. Обнаруженный температурный гистерезис T_l говорит в пользу того, что в кристаллитах тетрахлорцинка рубидия, инкорпорированных в пористый диоксид кремния со средним диаметром пор около 5 нм, переход из нормальной параэлектрической фазы в несоразмерную приобрел черты фазового перехода первого рода. По-видимому, гистерезис T_l обусловлен закреплением несоразмерной волны атомных смещений дефектами решетки, включая дефекты, локализованные на поверхности частиц, и последующим ее отрывом от стопоров при «перегреве», или «переохлаждении» образца относительно температуры фазового равновесия.

Каких-либо особенностей диэлектрического отклика, свидетельствующих о сегнетоэлектрическом фазовом переходе, или переходе в доменной структуре на зависимостях $\epsilon(T)$ в условиях эксперимента не выявлено. Поэтому можно заключить, что сегнетоэлектрическая фаза в частицах Rb_2ZnCl_4 в составе композита RS-5 не реализуется.

Наряду с этим заметим, что температурный гистерезис ϵ для композита RS-5 распространяется на всю область температур, доступных в эксперименте, что указывает на наличие метастабильных состояний в материале и их релаксацию в широком интервале температур. По-видимому, существование столь широкого температурного гистерезиса ϵ является общим свойством сегнетоэлектриков с несоразмерными фазами, инкорпорированных в пористые матрицы [19].

В отличие от композита RS-46, зависимость $\epsilon(T)$ при нагреве, проходит ниже температурной зависимости ϵ , полученной в ходе охлаждения образца. Это косвенно говорит в пользу того, что области сегнетоэлектрической фазы, дающие обычно значительный вклад в диэлектрический отклик, в случае композита RS-5 не формируются.

4. Выводы

На основании результатов проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Температура Лифшица $T_l \approx 307$ К в кристаллитах тетрахлорцинка рубидия Rb_2ZnCl_4 , локализованных в порах диоксида кремния, средний диаметр которых составляет 46 и 5 нм, слабо изменяется по сравнению с температурой T_l в массивном образце. Вместе с тем, фазовый переход приобретает черты фазового перехода первого рода, которые наиболее отчетливо выражены в случае частиц Rb_2ZnCl_4 , входящих в состав композита RS-5. Для этого материала температура перехода из несоразмерной в параэлектрическую фазу остается приблизительно такой же, как и у массивного образца. Однако при обратном ходе температуры значение T_l понижается до ≈ 268 К. Это показывает, что взаимодействие частиц тетрахлорцинка рубидия с матрицей стабилизирует неполярную соразмерную фазу. Данное взаимодействие, по-видимому, носит преимущественно химический характер, поскольку переход в несоразмерную фазу не сопровождается ни появлением поляризации, ни заметной деформацией решетки Rb_2ZnCl_4 .

2. Переход из несоразмерной в соразмерную сегнетоэлектрическую фазу в нанокристаллитах Rb_2ZnCl_4 , входящих в состав композита RS-5 условиях эксперимента не наблюдается.

3. В частицах тетрахлорцинка рубидия, локализованных в пористой матрице из диоксида кремния со средним размером пустот ≈ 46 нм, реализуется переход в сегнетоэлектрическую фазу. Температура этого перехода по совокуп-

ным данным диэлектрических и калориметрических измерений составляет около 240 К. Это приблизительно на 50 К выше по сравнению с аналогичным переходом в монокристаллическом материале.

4. Максимум диэлектрической проницаемости, наблюдаемый около 160 К для композита RS-46 соответствует аномалии диэлектрической проницаемости, обусловленной перестройкой в доменной структуре монокристаллического Rb_2ZnCl_4 с высокой концентрацией дефектов [15]. Это позволяет утверждать, что при низких температурах в кристаллитах тетрахлорцинка рубидия, инкорпорированных в диоксид кремния, содержащий сквозные поры со средним диаметром около 46 нм, образуются сегнетоэлектрические домены, подвижность которых существенно замедляется вблизи температуры ≈ 160 К, как и в объемном монокристалле Rb_2ZnCl_4 .

Заявленный вклад авторов

Коротков Л. Н. – идея научного исследования. Стеклёнева Л. С. – проведение эксперимента. Брянская А. А. – подготовка образцов к эксперименту. Панкова М. А. – подготовка рукописи. Попов С. В. – аттестация образцов, обработка экспериментальных данных и подготовка рисунков.

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. Cummins H. Z. Experimental studies of structurally incommensurate crystal phases. *Physics Reports*. 1990;185(5-6): 211–409. [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(90\)90058-a](https://doi.org/10.1016/0370-1573(90)90058-a)

2. Гриднев С. А., Коротков Л. Н. *Неупорядоченные полярные диэлектрики. От кристалла к дипольному стеклу и хаосу*. Palmarium Akademik Publishing; 2013. 170 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26049698>

3. Багаутдинов Б. Ш., Шехтман В. Ш. Эволюция структуры Rb_2ZnCl_4 в температурном диапазоне 4.2–310 К. *Физика твердого тела*. 1999;41(6): 1084–1090. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20500966>

4. 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;9(11): 593. <https://doi.org/10.3390/cryst9110593>

5. Mikhaleva E. A., Flerov I. N., Kartashev A. V., Gorev M. V., Molokeyev M. S., Bogdanov E. V., Bondarev V. S., Korotkov L. N., Rysiakiewicz-Pasek E. Effect of restricted geometry and external pressure on the phase transitions in ammonium hydrogen sulfate confined in a nanoporous glass matrix. *Journal of Materials Science*. 2018;53(17): 12132–12144. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2467-1>

6. Набережнов А. А., Стукова Е. В., Алексеева О. А., Новикова С. А., Franz A.. Эффекты, связанные с ограниченной геометрией, в нанокompозитах на основе мезопористых матриц 2D-SBA-15 и 3D-SBA-15, содержащих наночастицы нитрита натрия. *Журнал технической физики*. 2019;89(12): 1965–1970. <https://doi.org/10.21883/jtf.2019.12.48497.207-19>

7. Бескровный А. И., Василовский С. Г., Вахрушев С. Б., Курдюков Д. А., Зворыкина О. И., Набережнов А. А., Окунева Н. М., Товар М., Rysiakiewicz-Pasek E., Jagus P. Температурные зависимости параметра порядка для нитрита натрия, внедренного в пористые стекла и опалы. *Физика твердого тела*. 2010;52(5): 1021–1025. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20321240>

8. Naberezhnov A. A., Vakhrushev S. B., Kumzerov Y. A., Fokin A. V. Mechanism of ferroelectric phase transition in ultra-dispersed sodium nitrite particles. *Ferroelectrics*. 2021;575(1): 75–83. <https://doi.org/10.1080/00150193.2021.1888229>

9. Nguyen H. T., Chau M. T. Structural and dielectric studies of three-phase composite containing multi-walled carbon nanotubes, nanodispersed silica AND KDP. *Phase Transitions*. 2020;93(10-11): 1080–1088. <https://doi.org/10.1080/01411594.2020.1839753>

10. Mikhaleva E. A., Flerov I. N., Bogdanov E. V., Bondarev V. S., Gorev M. V., Rysiakiewicz-Pasek E. Size effect on sensitivity to external pressure and caloric effects in TGS: ceramics and nanocomposites. *Materials Today Communications*. 2020;25: 101463. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101463>

11. Kumzerov Y., Vakhrushev S. Nanostructures within porous materials. In: *Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology. Volume 10*. H. S. Nalwa (ed.). New York: American Scientific Publishers; 2003. pp. 811–849.

12. Андреева О. В., Обыкновенная И. Е. Нанопористые матрицы НПС-7 и НПС-17 – возможности использования в оптическом эксперименте. *Наносистемы: физика, химия, математика*. 2010;1(1): 37–53. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15648759>

13. Bruker AXS TOPAS V4. *General profile and structure analysis software for powder diffraction data*. User’s Manual. Karlsruhe, Germany: Bruker AXS; 2008.

14. Коротков Л. Н., Стеклёнева Л. С., Флеров И. Н., Михалева Е. А., Рыськевич-Пасек Е.,

Молокеев М. С., Бондарев В. С., Горев М. В., Сысов О. И. Структура, диэлектрические и тепловые свойства тетрахлорцинка рубидия в пористых стеклах. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2019;83(9): 1179–1183. <https://doi.org/10.1134/s0367676519090138>

15. Струков Б. А., Белов А. А., Горшков С. Н., Кожевников М. Ю. Теплопроводность и теплоемкость кристаллов Rb_2ZnCl_4 в области несоответственной фазы. *Известия Академии наук СССР. Серия физическая*. 1991;55(3): 470–473.

16. Гриднев С. А., Горбатенко В. В., Прасолов Б. Н. О фазовом переходе в доменной стенке в Rb_2ZnCl_4 вблизи 150 К. *Кристаллография*. 1997;42(4): 730–734. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32554036>

17. Gridnev S. A., Shuvalov L. A., Gorbatenko V. V., Prasolov B. N. “Freezing” of domain structure in Rb_2ZnCl_4 . *Ferroelectrics*. 1993;140(1): 145–149. <https://doi.org/10.1080/00150199308008277>

18. Гриднев С. А., Горбатенко В. В., Прасолов Б. Н. Диэлектрическая релаксация в несоответственной фазе Rb_2ZnCl_4 . *Известия Академии наук СССР. Серия физическая*. 1993;57(3): 97–100. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=31988409>

19. Korotkov L. N., Stekleneva L. S., Logoshina E. M., Pankova M. A. Dielectric response of Rb_2ZnCl_4 within porous aluminum oxide. *Ferroelectrics*. 2020;567(1): 74–81. <https://doi.org/10.1080/00150193.2020.1791589>

Информация об авторах

Стекленева Любовь Сергеевна, учебный мастер II категории кафедры физики твердого тела, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация; преподаватель кафедры физики и химии, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-5460-2870>
lubov_stekleneva@mail.ru

Брянская Александра Александровна, студентка кафедры физики твердого тела, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-1848-0554>
Aleksbrianskaya@yandex.ru

Панкова Маргарита Александровна, к. т. н., старший преподаватель кафедры математики и моделирования систем, Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации, Воронеж, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-5985-9018>
m_a_pankova@mail.ru

Попов Сергей Викторович, к. ф.-м. н., доцент кафедры физики и химии, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0003-2218-5811>
nikiforovatl@yandex.ru

Коротков Леонид Николаевич, д. ф.-м. н., профессор, профессор кафедры физики твердого тела, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-5350-5841>
l_korotkov@mail.ru

Поступила в редакцию 11.04.2021; одобрена после рецензирования 10.08.2021; принята к публикации 15.08.2021; опубликована онлайн 25.09.2021.