

Научная статья

УДК537.226

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16302>

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ИОДИДА ДИИЗОПРОПИЛАММОНИЯ И НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

А. В. Сахненко¹, А. Ю. Милинский², С. В. Барышников²,

Е. В. Стукова¹✉, И. В. Егорова²

¹ Амурский государственный университет, г. Благовещенск, Россия;

² Благовещенский государственный педагогический университет, г. Благовещенск, Россия

✉ lenast@bk.ru

Аннотация. В работе синтезированы нанокomпозиты на основе иодида диизопропиламмония (DIPAI) и наночастиц Al_2O_3 (размер наночастиц 100 нм) с варьированием объемной доли последнего (0,05; 0,10; 0,20). Исследованы температурные зависимости диэлектрической проницаемости и сигнала дифференциального термического анализа синтезированных соединений (в интервале 300 – 400 К) в режимах нагрева и охлаждения. Зарегистрированы также их инфракрасные спектры при комнатной температуре. Анализ измеренных температурных зависимостей указывает на изменение последовательности фазовых переходов в композитах по сравнению с чистым DIPAI. Совокупность полученных результатов позволяет сделать вывод, что в структуре нанокomпозита проявляется изменение водородных связей с участием аминогрупп, что может приводить к появлению сегнетоэлектрического состояния в DIPAI.

Ключевые слова: сегнетоэлектрик, диэлектрическая проницаемость, нанокomпозит, фазовый переход, DIPAI, оксид алюминия

Для цитирования: Сахненко А. В., Милинский А. Ю., Барышников С. В., Стукова Е. В., Егорова И. В. Диэлектрические и тепловые свойства нанокomпозитов на основе иодида диизопропиламмония и наночастиц оксида алюминия // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2023. Т. 16. № 3. С. 19–28. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16302>

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

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16302>

DIELECTRIC AND THERMAL PROPERTIES OF NANOCOMPOSITES BASED ON DIISOPROPYLAMMONIUM IODIDE AND ALUMINA NANOPARTICLES

A. V. Sakhnenko¹, A. Yu. Milinskiy², S. V. Baryshnikov²

E. V. Stukova¹✉, I. V. Egorova²

¹ Amur State University, Blagoveshchensk, Russia;

² Blagoveshchensk State Pedagogical University, Blagoveshchensk, Russia

✉ lenast@bk.ru

Abstract. In the paper, nanocomposites based on diisopropylammonium iodide (DIPAI) and Al_2O_3 nanoparticles (sized 100 nm) have been synthesized with varying a volume fraction of the latter (0.05, 0.10, 0.20). Temperature dependences of the permittivity and a signal of differential thermal analysis of the samples (in the range of 300 – 400 K) were studied in heating and cooling modes. Their infrared spectra were recorded at room temperature as well. An analysis of the measured temperature dependences indicated a change in the sequence of phase transitions in nanocomposites compared with the pure DIPAI. The totality of the results obtained allowed us to conclude that a change in hydrogen bonds with the participation of amino groups manifested itself in the nanocomposite structure took place. This can lead to the appearance of a ferroelectric state in the DIPAI.

Keywords: ferroelectric, permittivity, nanocomposite, phase transition, DIPAI, alumina

For citation: Sakhnenko A. V., Milinskiy A. Yu., Baryshnikov S. V., Stukova E. V., Egorova I. V., Dielectric and thermal properties of nanocomposites based on diisopropylammonium iodide and alumina nanoparticles, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 16 (3) (2023) 19–28. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16302>

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

Введение

Сегнетоэлектрики, спонтанную поляризацию P_s которых можно переключить внешним электрическим полем, исследуются уже более 100 лет [1]. За это время были открыты тысячи неорганических и органических материалов, обладающих спонтанной поляризацией. Однако практическое применение в основном получили неорганические оксидные перовскиты, в связи с их высокой стабильностью, большой диэлектрической проницаемостью и спонтанной поляризацией. Несмотря на это, сегодня ведется активный поиск органических сегнетоэлектриков, ввиду их низкой стоимости, простоты обработки, экологичности и биосовместимости. В качестве примеров такого успешного поиска можно привести кроконовую кислоту [2], хлорид и бромид диизопропиламмония [3, 4]. Эти вещества конкурируют с неорганическими перовскитными сегнетоэлектриками по значениям спонтанной поляризации и температуры Кюри. Относительно иодида диизопропиламмония (DIPAI), который является третьим представителем сегнетоэлектриков на основе диизопропиламина, в литературе имеются противоречивые сведения [5, 6]. В исследовании [5] были выращены кристаллы DIPAI, спонтанная поляризация которых равна примерно $33 \text{ мКл}\cdot\text{см}^{-2}$. Однако авторы [6] при изучении синтезированных ими кристаллов DIPAI не выявили в них полярного состояния. В работе [7] было показано, что для перевода DIPAI в сегнетоэлектрическое состояние его необходимо нагреть выше температуры 423 К.

Известно, что одним из способов модификации свойств сегнетоэлектрических материалов является создание на их основе композитов [8]. Поскольку DIPAI представляет собой органический сегнетоэлектрик со сложной молекулярной структурой, добавление в него наночастиц оксида алюминия Al_2O_3 может привести к взаимодействию на молекулярном уровне, способствующему закреплению поляризации молекул сегнетоэлектрика (это было показано, например, для триглицинсульфата [9]).

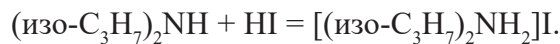
В настоящей статье приводятся результаты исследования диэлектрических и тепловых свойств нанокompозитов $(\text{DIPAI})_{1-x}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_x$, полученных при смешивании порошка DIPAI с наночастицами оксида алюминия размером 100 нм. Проведено также сравнение с объемными образцами DIPAI.

Образцы и методика эксперимента

Кристаллы DIPAI обладают орторомбической неполярной симметрией с пространственной группой $P2_12_12_1$ [5, 6]. При их нагревании выше комнатных температур в DIPAI возникают один или два фазовых перехода (в зависимости от технологии получения и температурной предыстории). В работе [5], в которой сообщалось о сегнетоэлектричестве

в DIPAI, было показано, что при нагревании кристаллов DIPAI до 369 К формируется сегнетоэлектрическая моноклинная фаза с симметрией $P2_1$, стабильная до 415 К. Выше этой температуры структура DIPAI трансформируется в неполярную моноклинную фазу $P2_1/m$. При дальнейшем охлаждении от температуры свыше 415 К, в области около 407 К наблюдается переход в моноклинную сегнетоэлектрическую фазу, обладающую симметрией $P2_1$. Авторы другой работы [6] не обнаружили сегнетоэлектрической фазы в полученных ими кристаллах DIPAI. При 376 К в кристаллах DIPAI наблюдали переход из орторомбической фазы $P2_12_12_1$ в моноклинную фазу $P2_1/m$.

В нашем эксперименте получение DIPAI (иодид диизопропиламмония [(изо- C_3H_7)₂NH₂]I) основывалось на взаимодействии эквимольных количеств диизопропиламина (изо- C_3H_7)₂NH (Sigma) и иодоводородной кислоты (57 %, AcrosOrganics) в водном растворе [8]. В общем виде реакция протекает по следующему уравнению:



При проведении синтеза 0,1 моль гидроиодида HI растворяли в 10 мл дистиллированной воды. К полученному раствору медленно, при охлаждении добавляли 0,1 моль диизопропиламина. После испарения растворителя при комнатной температуре были получены крупные бесцветные прозрачные игольчатые кристаллы, которые перекристаллизовывали из горячего этанола. Кристаллы промывали диэтиловым эфиром и сушили в темном месте в эксикаторе над хлоридом кальция. Выход составил 68 %.

Образцы композитов $(DIPAI)_{1-x}/(Al_2O_3)_x$ ($x = 0,05; 0,10; 0,20$; x – объемные доли) были получены с использованием порошков DIPAI (~10 мкм) и Al_2O_3 с размером частиц 100 нм. Композиты приготавливали путем тщательного перемешивания указанных порошков в агатовой ступке. Для исследования диэлектрических свойств полученный порошок прессовали в виде дисков размером $\varnothing 10 \times 1,5$ мм под давлением 7500 кг/см².

Для измерения диэлектрических свойств (диэлектрической проницаемости ϵ') использовали иммитансметр E7-25 с частотным диапазоном от 20 до 10^6 Гц. Перед измерениями для создания электродов на образец наносили серебряную пасту. Температура фиксировалась с точностью 0,1 К при помощи термометра ТС-6621. Измерения проводили в температурном интервале от 300 до 440 К, в автоматическом режиме со скоростью 1 К/мин. Погрешность определения диэлектрической проницаемости исследуемых образцов не превышала 5 %. Измерения температурных зависимостей сигнала ДТА проводили на синхронном термоанализаторе Linsies STA PT 1600, производства США (максимальное разрешение – 0,3 мкВт). В нашем эксперименте скорость нагрева и охлаждения образцов составляла 1 К/мин.

Инфракрасные (ИК) спектры образцов DIPAI, Al_2O_3 и композита $(DIPAI)_{0,80}/(Al_2O_3)_{0,20}$ в виде таблеток, запрессованных с KBr, регистрировали на интерференционном ИК-спектрометре с Фурье-преобразованием ФСМ-2202 (отечественного производства) в диапазоне 400 – 4000 см⁻¹. Управление прибором и обработку спектров осуществляли по программе FSpec (версия 4.0.0.2 для Windows, ООО «Мониторинг», Россия).

Экспериментальные результаты и обсуждение

Полученный в данной работе образец DIPAI, согласно температурным зависимостям ϵ' и сигналу ДТА, обнаруживает один фазовый переход при нагревании и один при охлаждении (рис. 1). Это позволяет заключить, что сегнетоэлектрическая фаза не формируется, а переход происходит между двумя параэлектрическими фазами при температурах 376 и 360 К при нагреве и охлаждении. Значения температуры переходов согласуются с данными статьи [7]. На температурных зависимостях тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ имеются минимумы при 381 и 361 К в режимах нагрева и охлаждения соответственно. С увеличением частоты уменьшаются величины $\epsilon'(\omega)$ и $\text{tg}\delta(\omega)$, что согласуется с данными, полученными для монокристаллов [6]. Дальнейшие исследования показали, что температурная предыстория не меняет последовательность фазовых переходов в DIPAI, в отличие от образцов, полученных в работе [7].

Для композитов $(DIPAI)_{0,95}/(Al_2O_3)_{0,05}$ результаты исследования диэлектрической проницаемости и сигнала ДТА также указывают на наличие двух фазовых переходов (рис. 2). В режиме нагрева максимум сигнала ДТА наблюдается при температуре 360 К, а при охлаждении – около 358 К.

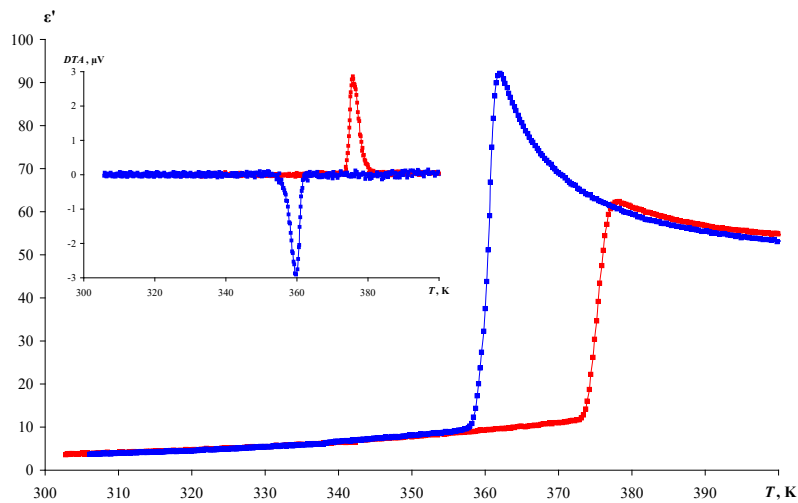


Рис. 1. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости ϵ' и сигнала DTA (на вставке), полученные на частоте 10 кГц для образца DIPAI при нагреве (символы красного цвета) и охлаждении (синего цвета)

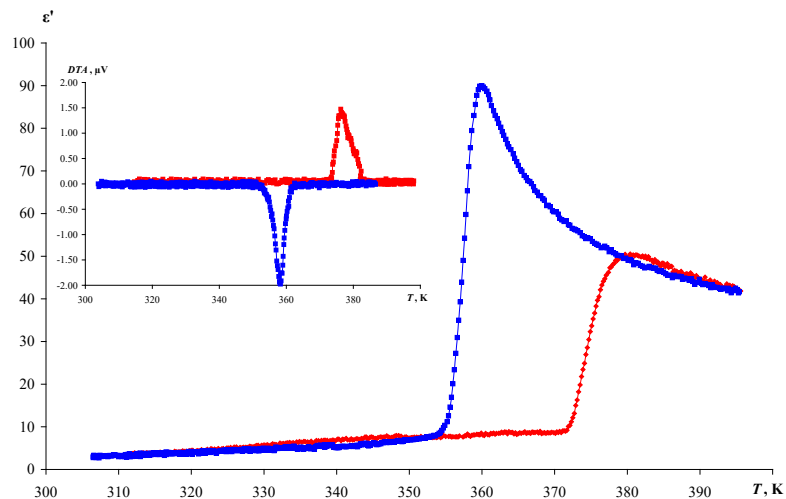


Рис. 2. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости ϵ' и сигнала DTA (на вставке), полученные на частоте 10 кГц для образца композита $(\text{DIPAI})_{0,95}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_{0,05}$ при нагреве (символы красного цвета) и охлаждении (синего цвета)

При увеличении содержания наночастиц Al_2O_3 до 10%, по данным сигнала DTA и диэлектрической проницаемости $\epsilon'(T)$, в режиме нагрева прослеживаются два фазовых перехода: при 362 и 376 К (рис. 3). Это соответствует формированию сегнетоэлектрической фазы, согласно данным работы [7]. В режиме охлаждения наблюдается один фазовый переход при 358 К.

В композите $(\text{DIPAI})_{0,80}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_{0,20}$ также наблюдаются два фазовых перехода при нагревании: около 363 и 378 К; и один при охлаждении, при температуре примерно 358 К (рис. 4).

Оксид алюминия относится к линейным диэлектрикам, и частицы Al_2O_3 не обладают дипольными моментами, которые могли бы индуцировать появление сегнетоэлектрической фазы в DIPAI. Поэтому единственным возможным механизмом взаимодействия наночастиц DIPAI и Al_2O_3 является их взаимодействие на молекулярном уровне. Для проверки этого предположения были получены ИК-спектры чистого DIPAI и композита $(\text{DIPAI})_{0,80}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_{0,20}$.

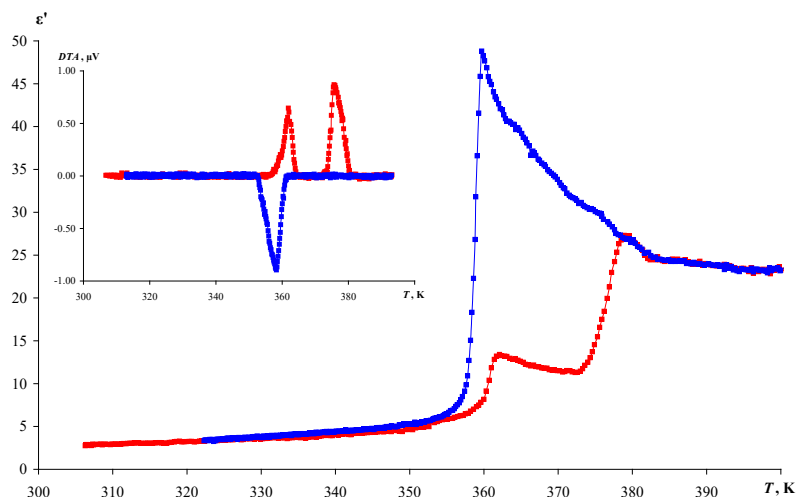


Рис. 3. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости ϵ' и сигнала DTA (на вставке), полученные на частоте 10 кГц для образца композита $(\text{DIPAI})_{0,90}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_{0,10}$ при нагреве (символы красного цвета) и охлаждении (синего цвета)

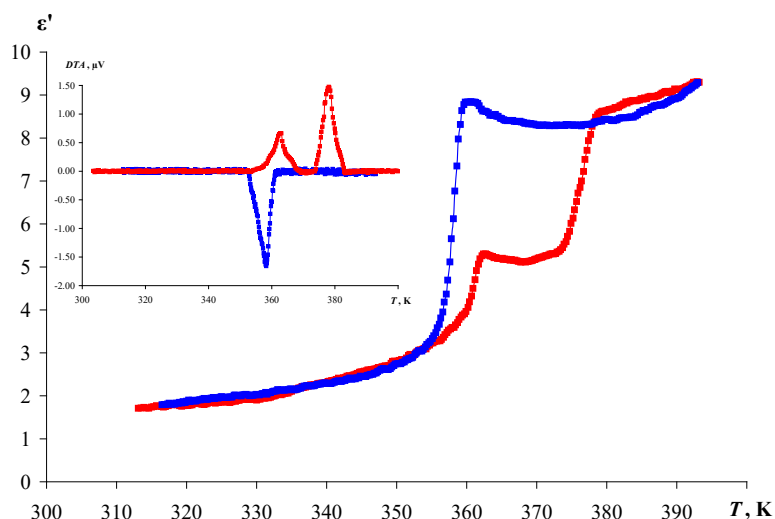


Рис. 4. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости ϵ' и сигнала DTA (на вставке), полученные на частоте 10 кГц для образца композита $(\text{DIPAI})_{0,80}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_{0,20}$ при нагреве (символы красного цвета) и охлаждении (синего цвета)

Супрамолекулярная структура галогенидов диизопропиламмония обусловлена водородными связями $\text{N}-\text{H}\cdots\text{Hg}$, где $\text{Hg} = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$. В ряду галогенид-ионов $\text{Cl}^-, \text{Br}^-, \text{I}^-$ расстояние $\text{H}\cdots\text{Hg}$ увеличивается с соответствующим ростом атомного радиуса галогена. В кристалле DIPAI иодид-ионы I^- , выполняя мостиковую роль, объединяют катионы диизопропиламмония. Фазовый переход, наблюдаемый при нагревании кристаллов DIPAI, сопровождается их сложной структурной перестройкой, которая обусловлена образованием оптических изомеров катионами DIPAI, их перегруппировкой в кристалле, изменением упаковки цепей. Прочность водородных связей $\text{N}-\text{H}\cdots\text{I}$ в двух фазах существенно различна.

Расстояния $\text{N}-\text{H}\cdots\text{I}$ в кристалле DIPAI моноклинной сингонии (комнатная температура) составляют $2,81 \text{ \AA}$ (поперек цепей) и $2,67 \text{ \AA}$ (вдоль цепей), а в орторомбической сингонии (405 K) – $3,03$ и $2,82 \text{ \AA}$ [9, 6]. Водородные связи $\text{N}-\text{H}\cdots\text{I}$ в DIPAI намного длиннее и, как следствие, лабильнее, чем в хлоридном и бромидном аналогах.

Полосы поглощения в ИК-спектрах соединений были нами идентифицированы в соответствии с данными работ [10, 11]. В ИК-спектре DIPAI валентным симметричным и асимметричным колебаниям связей C–H структурного фрагмента C(CH₃) соответствуют полосы поглощения при 2810,3, 2833,3 и 2967,7 см⁻¹, деформационным симметричным и асимметричным колебаниям связей C–H – полосы поглощения при 1379,6 и 1469,6 см⁻¹. Валентные колебания связей N–H проявляются группой полос поглощения при

$$3296,8, 3385,0, 3410,4, 3424,4, 3438,8, 3447,8 \text{ см}^{-1}.$$

Полосы при 1573,9 см⁻¹ (1579,1 см⁻¹, плечо) и 1325,4 см⁻¹ обусловлены деформационными колебаниями связей N–H. В ИК-спектрах образцов DIPAI–Al₂O₃ и DIPAI имеется полоса поглощения в области симметричных валентных колебаний структурного фрагмента CNC с максимумом при 1182,7 см⁻¹.

Лабильность водородных связей в структуре DIPAI способствует их перегруппировке и образованию новых связей в композите (DIPAI)_{0,80}/(Al₂O₃)_{0,20}. В ИК-спектре оксида алюминия полоса поглощения при 3770–3730 см⁻¹ (рис. 5,а) соответствуют льюисовскому основному центру [12]. Значительное сглаживание и исчезновение полосы поглощения 3760,0 см⁻¹ в данной области спектра может свидетельствовать об образовании в системе DIPAI–Al₂O₃ водородных связей N–H...O–Al между атомами водорода NH₂-групп и координационно-ненасыщенными атомами кислорода, являющимися основными центрами. Присутствие в оксиде алюминия кислотных льюисовских центров – атомов алюминия – предполагает возможность их участия в (Al...O)-взаимодействиях, которые приводят к значительному снижению интенсивности полос поглощения при 3566,8 и 3588,1 см⁻¹. Взаимодействия такого типа посвящены публикации [13, 14].

Частоты валентных колебаний NH₂ – и *i*-Pr-групп зависят от степени их участия в водородной связи. Образование водородных связей проявляется сдвигом полос, соответствующих ν(N–H) и ν(C–H) в сторону низких частот [10, 11]. В спектре DIPAI–Al₂O₃ полоса поглощения валентных колебаний N–H (3424,4 см⁻¹) смещена в низкочастотную

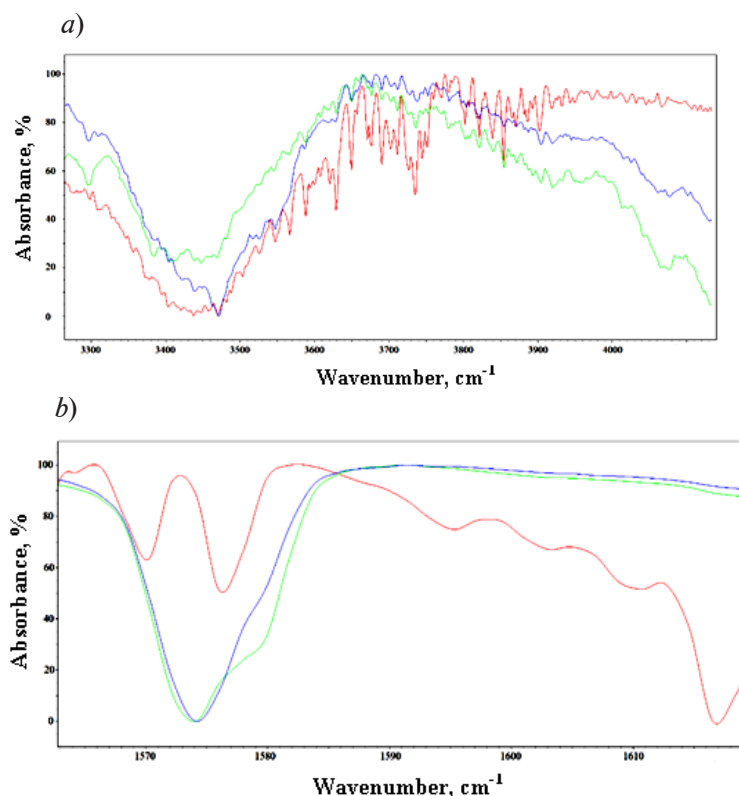


Рис. 5. Спектры ИК-поглощения для образцов Al₂O₃ (красная кривая) DIPAI (зеленая кривая) и композита (DIPAI)_{0,80}/(Al₂O₃)_{0,20} (синяя кривая) в интервалах волновых чисел 4000–3100 см⁻¹ (а) и 1610–1560 см⁻¹ (б)



область спектра ($3422,5 \text{ см}^{-1}$). Кроме того, полоса поглощения деформационных колебаний ($1573,9 \text{ см}^{-1}$) смещена и проявляется при $1574,3 \text{ см}^{-1}$, плечо при $1579,1 \text{ см}^{-1}$ не выражено, что указывает на подавление деформационных колебаний N–H связей (рис. 5, *b*). Это подтверждает предположение об упрочнении водородных связей, в образовании которых участвуют аминогруппы. В то же время не наблюдается смещения полосы поглощения валентных и деформационных колебаний (C–H)-связей *i*-Pr-групп.

Совокупность обсуждаемых результатов позволяет сделать вывод, что в структуре образца $\text{DIPAI}-\text{Al}_2\text{O}_3$ проявляется изменение водородных связей с участием аминогрупп, что может приводить к появлению сегнетоэлектрического состояния в DIPAI.

Заключение

Как было показано в статье [6], фазовый переход в кристаллах DIPAI обусловлен перестройкой катионной субструктуры, в которой ионы $i-(\text{C}_3\text{H}_7)_2\text{NH}_2^+$ переориентируются примерно на 90° вдоль длинной оси и вращаются в орторомбическом направлении [100]. Одновременно эти ионы разделяются на два эквивалентных положения, связанных между собой как зеркальная плоскость. Это приводит к ориентации дипольных моментов иона $i-(\text{C}_3\text{H}_7)_2\text{NH}_2^+$ вдоль одного из метастабильных направлений. Этот процесс изменяет упаковку цепей и вызывает деформацию анионной структуры.

DIPAI и DIPAB при комнатной температуре изоструктурны и имеют аналогичную кристаллическую упаковку. Более крупные ионы вызывают увеличение межзатомных расстояний и увеличение объема элементарной ячейки, что, в свою очередь, влияет на силу взаимодействия водородных связей. Наряду с увеличением ионных радиусов наблюдается увеличение всех расстояний от донора до акцептора. В DIPAI происходит фазовый переход в неупорядоченное состояние $P2_1/m$, и фаза сдвинута примерно на 50 К в сторону более низких температур, по сравнению с DIPAB; это указывает на существенно более слабые связи N–H–I, по сравнению со связями N–H–Br.

Анализ всей совокупности полученных нами результатов позволяет сделать вывод, что в структуре образца $\text{DIPAI}-\text{Al}_2\text{O}_3$ проявляется изменение водородных связей N–H–I с участием аминогрупп, что может стабилизировать сегнетоэлектрическое состояние в соединении DIPAI.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физика сегнетоэлектриков: современный взгляд. Под ред. Рабе К. М., Ана Ч. Г., Трискона Ж.-М. Пер. с англ. М.: Изд-во «Лаборатория знаний», 2020. 443 с.
2. Horiuchi S., Tokunaga Y., Giovannetti G., Picozzi S., Itoh H., Shimano R., Kumai R., Tokura Y. Above-room-temperature ferroelectricity in a single-component molecular crystal // Nature. 2010. Vol. 463. No. 7282. Pp. 789–792.
3. Fu D.-W., Zhang W., Cai H.-L., Ge J.-Z., Zhang Y., Xiong R.-G. Diisopropylammonium 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.
4. Fu D.-W., Cai H.-L., Liu Y., Zhang W., Zhang Y., Chen X., Giovannetti G., Capone M., Li J., Xiong R. Diisopropylammonium bromide is a high-temperature molecular ferroelectric crystal // Science. 2013. Vol. 339. No. 6118. Pp. 425–428.
5. Ravi K. S., Diptikanta S., Siva P., Hariharan N., Handady L.B., Tayur N. G. R., Suja E. Observation of ferroelectric phase and large spontaneous electric polarization in organic salt of diisopropylammonium iodide // Journal of Applied Physics. 2017. Vol. 121. No. 11. Pp. 114101–114105.
6. Piecha-Bisiorek A., Gągor A., Isakov D., Zieliński P., Gałazka M., Jakuba R. Phase sequence in diisopropylammonium iodide: avoided ferroelectricity by the appearance of a reconstructed phase // Inorganic Chemistry Frontiers. 2017. Vol. 4. No. 3. Pp. 553–558.
7. Milinskiy A. Yu., Baryshnikov S. V., Egorova I. V., Nguyen H. T. Dielectric properties of ferroelectric diisopropylammonium iodide // Phase Transitions. 2019. Vol. 92. No. 4. Pp. 406–410.
8. Jiang C., Tong W.-Y., Lin H., Luo C., Peng H., Duan C.-G. Effect of counter anions on ferroelectric properties of diisopropylammonium-cation based molecular crystals // Physica Status Solidi. A. 2017. Vol. 214. No. 6. P. 1700029.

9. Cambridge Structural Database System, Version 5.43, 2021. <https://www.ccdc.cam.ac.uk>.
10. **Smith B. C.** Infrared spectral interpretation: A systematic approach. Florida, USA: Boca Raton: CRC Press, 1998. 288 p.
11. **Nakamoto K.** Infrared and Raman spectra of inorganic and coordination compounds. New York: J. Wiley & Sons, 1986. 484 p.
12. **Чукин Г. Д.** Строение оксида алюминия и катализаторов гидрообессеривания. Механизмы реакций. М.: Типография Паладин, ООО «Принта», 2010. 288 с.
13. **Epstein L. M., Shubina E. S.** New types of hydrogen bonding in organometallic chemistry // Coordination Chemistry Reviews. 2002. Vol. 231. No. 1–2. Pp. 165–181.
14. **Brammer L.** Metals and hydrogen bonds // Dalton Transactions. 2003. No. 16. Pp. 3145–3157.

REFERENCES

1. **Rabe K. M., Ahn C. H., Triscone J.-M.**, Physics of ferroelectrics: A modern perspective, Springer Science & Business Media, Florida, USA, 2007.
2. **Horiuchi S., Tokunaga Y., Giovannetti G., et al.**, Above-room-temperature ferroelectricity in a single-component molecular crystal, Nature. 463 (7282) (2010) 789–792.
3. **Fu D.-W., Zhang W., Cai H.-L., et al.**, Diisopropylammonium chloride: a ferroelectric organic salt with a high phase transition temperature and practical utilization level of spontaneous polarization, Adv. Mater. 23 (47) (2011) 5658–5662.
4. **Fu D.-W., Cai H.-L., Liu Y., et al.**, Diisopropylammonium bromide is a high-temperature molecular ferroelectric crystal, Science. 339 (6118) (2013) 425–428.
5. **Ravi K. S., Diptikanta S., Siva P., et al.**, Observation of ferroelectric phase and large spontaneous electric polarization in organic salt of diisopropylammonium iodide, J. Appl. Phys. 121 (11) (2017) 114101–114105.
6. **Piecha-Bisiorek A., Gaḡor A., Isakov D., et al.**, Phase sequence in diisopropylammonium iodide: avoided ferroelectricity by the appearance of a reconstructed phase, Inorg. Chem. Front. 4 (3) (2017) 553–558.
7. **Milinskiy A. Yu, Baryshnikov S. V., Egorova I. V, Nguyen H. T.**, Dielectric properties of ferroelectric diisopropylammonium iodide, Ph. Transit. 92 (4) (2019) 406–410.
8. **Jiang C., Tong W.-Y., Lin H., et al.**, Effect of counter anions on ferroelectric properties of diisopropylammonium-cation based molecular crystals, Phys. Status Solidi. A. 214 (6) (2017) 1700029.
9. Cambridge Structural Database System, Version 5.43, 2021. <https://www.ccdc.cam.ac.uk>.
10. **Smith B. C.**, Infrared spectral interpretation: A systematic approach, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 1998.
11. **Nakamoto K.**, Infrared and Raman spectra of inorganic and coordination compounds, J. Wiley & Sons, New York, 1986.
12. **Chukin G. D.**, Stroyeniye oksida alyuminiya i katalizatorov gidroobesserivaniya. Mekhanizmy reaktsiy [The structure of alumina and hydrodesulfurization catalysts. The reaction mechanisms], “Paladin” Printing House, “Printa” Ltd., Moscow, 2010 (in Russian).
13. **Epstein L. M., Shubina E. S.**, New types of hydrogen bonding in organometallic chemistry, Coord. Chem. Rev. 231 (1–2) (2002) 165–181.
14. **Brammer L.**, Metals and hydrogen bonds, Dalton Trans. (16) (2003) 3145–3157.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

САХНЕНКО Анна Владиславовна – аспирантка кафедры физики Амурского государственного университета, г. Благовещенск, Россия.
675027, Россия, Амурская область, г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, 21
anna_izbickaya@mail.ru
ORCID: 0009-0005-7943-1229

МИЛИНСКИЙ Алексей Юрьевич — доктор физико-математических наук, профессор кафедры физического и математического образования Благовещенского государственного педагогического университета, г. Благовещенск, Россия.

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

a.milinskiy@mail.ru

ORCID: 0000-0001-7525-4396

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

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

svbar2003@list.ru

ORCID:0000-0002-3362-8975

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

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

lenast@bk.ru

ORCID:0000-0002-7981-7456

ЕГОРОВА Ирина Владимировна — доктор химических наук, профессор, заведующая кафедрой химии Благовещенского государственного педагогического университета, г. Благовещенск, Россия.

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

bgpu.chim.egorova@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8799-608X

THE AUTHORS

SAKHNENKO Anna V.

Amur State University

21 Ignatievskoe Ave., Blagoveshchensk, 675027, Russia

anna_izbickaya@mail.ru

ORCID: 0009-0005-7943-1229

MILINSKIY Alexey Yu.

Blagoveshchensk State Pedagogical University

104 Lenin St., Blagoveshchensk, 675000, Russia

a.milinskiy@mail.ru

ORCID: 0000-0001-7525-4396

BARYSHNIKOV Sergey V.

Blagoveshchensk State Pedagogical University

104 Lenin St., Blagoveshchensk, 675000, Russia

svbar2003@list.ru

ORCID: 0000-0002-3362-8975

STUKOVA Elena V.

Amur State University

21 Ignatievskoe Ave., Blagoveshchensk, 675027, Russia

lenast@bk.ru

ORCID: 0000-0002-7981-7456

EGOROVA Irina V.

Blagoveshchensk State Pedagogical University

104 Lenin St., Blagoveshchensk, 675000, Russia

bgpu.chim.egorova@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8799-608X

*Статья поступила в редакцию 13.06.2023. Одобрена после рецензирования 06.07.2023.
Принята 06.07.2023.*

Received 13.06.2023. Approved after reviewing 06.07.2023. Accepted 06.07.2023.