

УДК 544.6.018.42-16

ИОННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ И КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СПЕКТРЫ КОМПОЗИТОВ $\text{LiNO}_3\text{--KNO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ¹

© 2019 г. К. Ш. Рабаданов^{a, *}, М. М. Гафуров^a, З. Ю. Кубатаев^a, А. М. Амиров^a,
М. А. Ахмедов^a, Н. С. Шабанов^a, М. Б. Атаев^a

^aДагестанский научный центр РАН, Аналитический центр коллективного пользования
ул. М. Гаджиева, 45, Махачкала, Республика Дагестан, 367001 Россия

*e-mail: rksh83@mail.ru

Поступила в редакцию 12.09.2018 г.

После доработки 25.10.2018 г.

Принята к публикации 22.01.2019 г.

Синтезированы композиционные твердые электролиты на основе эвтектической нитратной смеси $0.42\text{LiNO}_3\text{--}0.58\text{KNO}_3$, допированной наноразмерным порошком оксида алюминия. Методом импедансной спектроскопии исследована проводимость полученных композитов. Гетерогенное допирование приводит к увеличению ионной проводимости и уменьшению энергии активации. Методом КР-спектроскопии показано, что допирование оксидом алюминия приводит к образованию аморфной фазы. При низких концентрациях нанопорошка аморфизация происходит за счет фазы нитрата лития.

Ключевые слова: нитраты щелочных металлов, эвтектика, электропроводность, композиционные электролиты, спектры комбинационного рассеяния, колебательная релаксация

DOI: 10.1134/S0424857019060173

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших направлений ионики твердого тела является поиск новых твердотельных материалов с высокой проводимостью. В настоящее время синтезировано и исследовано много соединений, в которых ионный перенос осуществляется различными катионами и анионами. Однако большинство твердых электролитов обладают низкой проводимостью по сравнению с жидкими электролитами. Известно, что композитные твердые электролиты на основе солей щелочных металлов и порошков оксидов характеризуются более высокой электропроводностью по сравнению с проводимостью исходной соли [1–3]. Это обстоятельство открывает широкие технологические перспективы для синтеза новых композитных ионопроводящих систем с использованием ионных солей и оксидов различного состава, размера, условий получения и т.д. Также использование многокомпонентных эвтектических солевых систем позволяет получать относительно низкотемпературные электролиты, тем самым расширяя возможности использования композиционных электролитов.

В настоящей работе исследовалось влияние наноразмерного наполнителя Al_2O_3 на структурные и ионопроводящие особенности эвтектической смеси $\text{LiNO}_3\text{--KNO}_3$ методами импедансной и колебательной спектроскопии. Исследование электропроводности композитов на основе нитратов щелочных металлов, допированных наноксидом алюминия, показало, что это приводит к возрастанию проводимости. Композиты $\text{KNO}_3\text{--NaNO}_3\text{--Al}_2\text{O}_3$, $\text{KNO}_3\text{--NaNO}_3\text{--LiNO}_3\text{--Al}_2\text{O}_3$ имеют высокую проводимость при температурах выше температуры плавления солевой фазы [4–6]. Однако, основываясь только на данных по ионной проводимости, трудно судить о механизмах переноса заряда и структурных особенностях многокомпонентных композитов. Очевидно, для этого необходим более детальный анализ микроструктуры, динамических взаимодействий ионов, молекул и наночастиц в них. Ранее было показано [7, 8], что параллельное исследование электропроводности и колебательных спектров позволяет выявить довольно интересные корреляции между спектральными данными и электропроводностью композиционных систем. Важной особенностью спектров конденсированных сред является их чувствительность к фазовым переходам и к структурным трансформациям, проявляющимся в существенных изменениях спектраль-

¹ Публикуется по докладу на XIV Международном Совещании “Фундаментальные проблемы ионики твердого тела”. (Черноголовка, 9–13 сентября 2018 г.).

ных параметров. Поэтому исследования композитов в различных фазовых и агрегатных состояниях с привлечением спектроскопических методов, направленных на получение информации об их структуре, элементарных динамических процессах, позволяют более детально выявить механизмы ионной проводимости.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для получения композиционной системы были использованы: нитрат лития (“ч. д. а.”, “Экрос”), нитрат калия (“х. ч.”, “Экрос”), нанокристаллический γ - Al_2O_3 (99%, “ABCRC”) со средним размером частиц 15–20 нм и величиной удельной поверхности 120 м²/г (БЭТ). Нитрат лития сушили в вакууме при помощи форвакуумного насоса при 150°C в течение не менее 24 ч.

В качестве солевой фазы композита была выбрана смесь эвтектического состава 0.42LiNO₃–0.58KNO₃ (соотношения взяты в мольных долях). Для удаления адсорбированной воды порошок оксида алюминия предварительно прокаливали в течение 2 ч при температуре 500°C. Для приготовления композитов готовую эвтектическую смесь и оксид нагревали при 250°C, затем тщательно перемешивали в инертной атмосфере. После остывания полученный композит измельчали в агатовой ступке и запаивали в ампулы из пирекса. Все работы проводили в сухом перчаточном боксе.

Измерения электропроводности проводили по двухэлектродной схеме на импедансомере RLC E7-20 в области частот 20 Гц–1 МГц. Значения проводимости рассчитывали из частотных зависимостей проводимости с помощью метода комплексного импеданса. Температуру системы измеряли термопарой хромель–алюмель и поддерживали с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$. Образцы для измерения электропроводности были получены путем прессования порошков между графитовыми обкладками. Полученные таким образом образцы представляли собой цилиндрические таблетки диаметром 13 мм и толщиной 2 мм. При измерении электропроводности учитывали сопротивление электродов и подводящих проводов. Все исследования проводили в атмосфере сухого аргона.

Для регистрации спектров комбинационного рассеяния (КР) использовали конфокальный КР-микроскоп Senterra (“Брукер”, Германия). Технические характеристики конфокального КР-спектрометра-микроскопа SENTERRA-785: лазер 532 нм (мощность – до 20 мВт); спектральный диапазон – 50–1600 см⁻¹; разрешение – 2 см⁻¹; используемые объективы микроскопа – 10× и 50×; время на регистрацию одного спектра – до 10 мин.

Специально изготовленная ячейка обеспечивала проведение измерений КР-спектров в интервале температур от комнатной до 250°C.

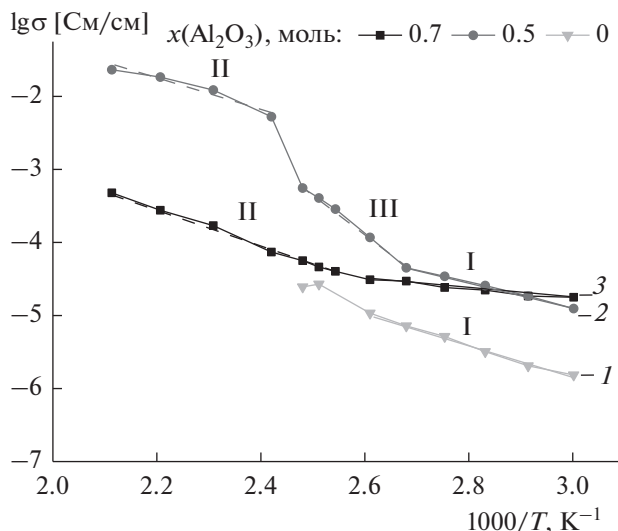


Рис. 1. Зависимость логарифма удельной электропроводности от обратной температуры композитов $(1-x)[0.42\text{LiNO}_3-0.58\text{KNO}_3] + x\text{Al}_2\text{O}_3$, где (1) $x = 0$; (2) $x = 0.5$; (3) $x = 0.7$.

Разложение сложных контуров полос в экспериментальных спектрах на компоненты проводили путем подгонки расчетных кривых и исходного спектра с минимизацией абсолютной ошибки по методу Левенберга–Маркварта. При этом форма контуров индивидуальных полос аппроксимировали кривыми вида свертки функций Гаусса и Лоренца. Расхождение между расчетной и экспериментальной кривой составляла не более 5% в зависимости от отношения сигнал/шум исходного спектра. Все эти процедуры реализованы в программном пакете OPUS 6.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены зависимости логарифма удельной электропроводности от обратной температуры композитов на основе 0.42LiNO₃–0.58KNO₃ с различным содержанием наноразмерного оксида алюминия. Полученные экспериментальные данные хорошо описываются аррениусовыми зависимостями

$$\sigma = (A/T) \exp(-E_{\text{акт}}/kT). \quad (1)$$

Рассчитанные по температурным зависимостям энергии активации проводимости, $E_{\text{акт}}$, приведены в табл. 1.

Смесь нитратов лития и калия обладает низкой электропроводностью. При температуре 130°C происходит фазовый переход. К сожалению, в связи с неконтролируемым изменением геометрии образца дальнейшее исследование удельной электропроводности для солевой смеси становится невозможным. Допирование эвтекти-

Таблица 1. Энергия активации в зависимости от интервала температур (50–200°C) в системе $(1-x)[0.42\text{LiNO}_3-0.58\text{KNO}_3] + x\text{Al}_2\text{O}_3$

$x(\text{Al}_2\text{O}_3)$, моль	Участок I			Участок III			Участок II		
	ΔT , К	$E_{\text{акт}}$, кДж/моль	$E_{\text{акт}}$, эВ	ΔT , К	$E_{\text{акт}}$, кДж/моль	$E_{\text{акт}}$, эВ	ΔT , К	$E_{\text{акт}}$, кДж/моль	$E_{\text{акт}}$, эВ
0		42.37	0.44		–	–	–	–	–
0.5	333–373	33.03	0.34	383–403	100.48	1.04	413–473	39.80	0.41
0.7		12.13	0.17				383–473	44.43	0.46

ческой смеси частицами Al_2O_3 приводит к заметному увеличению проводимости. Значения проводимости хорошо воспроизводятся в циклах нагрев–охлаждение. При повышении температуры в системе $[0.42\text{LiNO}_3-0.58\text{KNO}_3] + 0.5\text{Al}_2\text{O}_3$ наблюдается значительное увеличение проводимости, обусловленное переходом солевой фазы в расплавленное состояние (участок II). Этот участок кривой характеризует проводимость системы оксидная матрица–солевой расплав. При таких концентрациях открывается возможность сочетания механических и электрических свойств компонентов. Можно также отметить, что в данной системе в области температуры плавления наблюдается еще один участок (III), при котором ход температурной зависимости заметно отличается от остальных участков. При более высоких концентрациях оксида ($x = 0.7$) характер кривой существенно меняется (рис. 1, кривая 3) и на кривых излом, присущий фазовому переходу, не зафиксирован, а проводимость композита такого состава существенно затруднена.

Физико-химические свойства системы во многом определяются строением и характером поведения нитрат-иона. Для более полной интерпретации эффектов влияния наноксида алюминия на структуру и ионопроводящие свойства были исследованы спектры КРС композита.

Нитрат-ион в свободном состоянии имеет точечную группу симметрии D_{3h} и его внутримолекулярное колебательное представление имеет следующий вид:

$$\Gamma(D_{3h}) = A_1' + A_2'' + 2E', \quad (2)$$

где $\nu_1(A_1')$ – симметричное валентное колебание ($\sim 1050 \text{ см}^{-1}$), $\nu_2(A_2'')$ – внеплоскостное деформационное колебание ($\sim 820 \text{ см}^{-1}$), $\nu_3(E)$ – дважды вырожденное асимметричное валентное колебание ($\sim 1300 \text{ см}^{-1}$), $\nu_4(E)$ – дважды вырожденное деформационное колебание ($\sim 720 \text{ см}^{-1}$) и A_1' и E' активны в КР, а A_2'' и E' активны в инфракрасном (ИК) поглощении [9].

Из зарегистрированных нами спектров КР следует, что трансформации в композитах при допировании оксидом алюминия наиболее четче

наблюдаются в области полносимметричного колебания $\nu_1(A_1')$ (рис. 2). Также эта колебательная полоса наиболее интенсивная и не перекрывается контурами других колебательных мод, что упрощает интерпретацию изменений ее формы при изменении температуры и концентрации наполнителя.

По спектру КР для бинарной системы видно, что в твердом состоянии она представляет собой смесь индивидуальных солей KNO_3 и LiNO_3 . Контур колебательной полосы, соответствующий колебаниям NO_3^- в подрешетке KNO_3 солевой смеси, при комнатной температуре состоит из двух компонент, которые могут быть приписаны колебаниям упорядоченных (1050 см^{-1}) и разупорядоченных анионов (1047 см^{-1}) [10]. Это же колебание для подсистемы LiNO_3 в спектре КР регистрируется в виде симметричной полосы ($\sim 1070 \text{ см}^{-1}$). Допирование оксидом алюминия эвтектической смеси приводит к заметному усложнению спектра. Разделение колебательного контура на индивидуальные полосы показало, что помимо колебаний, присущих индивидуальным солям, обнаруживается дополнительная компонента с максимумом при 1060 см^{-1} , интенсивность которой возрастает по мере увеличения температуры и концентрации Al_2O_3 . Ранее нами было показано, что данная полоса может отнесена к аморфной фазе нитрата лития [11].

Дальнейшее увеличение концентрации наполнителя приводит к полной аморфизации фазы нитрата лития. Помимо этого, как было показано в работе [12], в которой исследовались композиты $\text{KNO}_3-\text{Al}_2\text{O}_3$, в системе может образоваться высокотемпературная фаза KNO_3 – фаза III (тригональная $R3m$), которая является наноразмерной и достаточно стабильной.

На рис. 3 представлены температурно-фазовые зависимости частот и полуширин компонент $\nu_1(A_1')$ нитрат-иона композита. С ростом температуры наблюдается сдвиг максимума полосы компоненты LiNO_3 в сторону меньших волновых чисел и скачкообразное уменьшение при температуре фазового перехода. Предельное содержание оксида алюминия приводит к заметному измене-

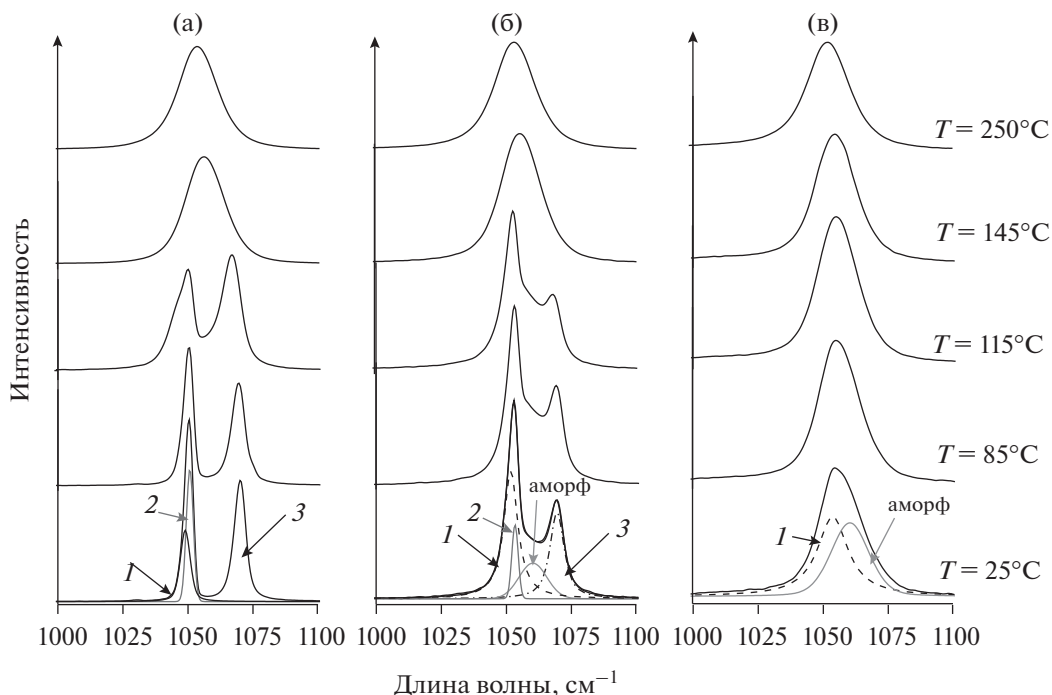


Рис. 2. Спектры комбинационного рассеяния композитов $(1-x)[0.42\text{LiNO}_3-0.58\text{KNO}_3] + x\text{Al}_2\text{O}_3$, при различных температурах и концентрациях: (а) $x = 0$; (б) $x = 0.5$; (в) $x = 0.7$, в области колебания $\nu_1(A'_1)$ нитрат-иона и результаты их разложения на компоненты: (1) 1047; (2) 1052; (3) 1070 cm^{-1} .

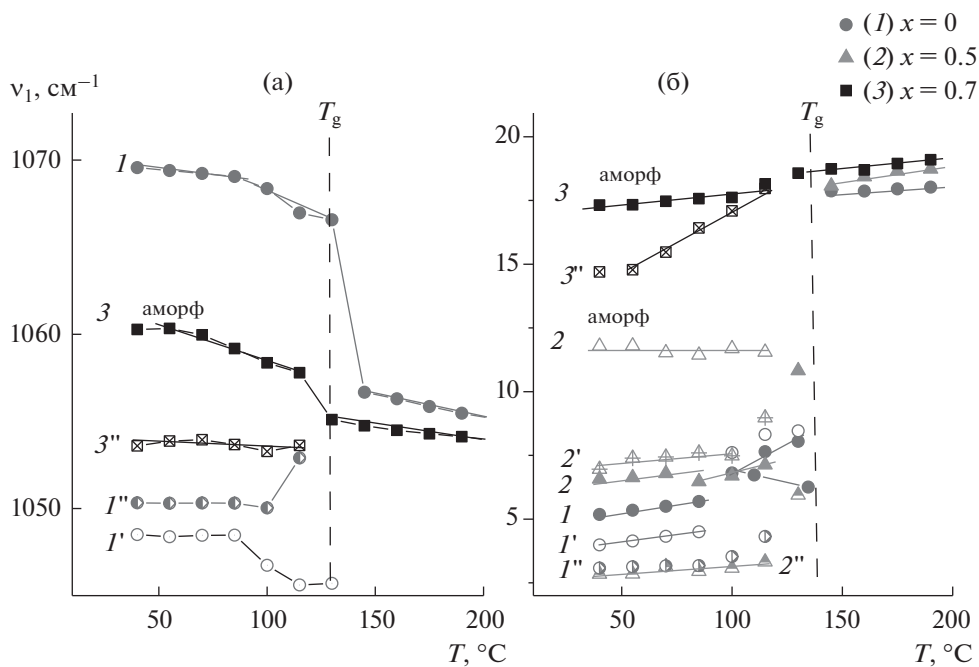


Рис. 3. Температурно-фазовая зависимость частот ν_1 (а) и полуширин δ (б) компонент полностью симметричного валентного колебания $\nu_1(A'_1)$ нитрат-иона в спектрах КР композита $(1-x)[0.42\text{LiNO}_3-0.58\text{KNO}_3] + x\text{Al}_2\text{O}_3$, где $\gamma = 1070$; $\gamma' = 1048$; $\gamma'' = 1050 \text{ cm}^{-1}$; $\gamma^{\text{аморф}}$ – аморфная фаза ($\gamma = 1, 2, 3$).

Таблица 2. Спектральные и релаксационные характеристики колебания $\nu_1(A_1')$ нитрат-иона в композитах

$x(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$T, ^\circ\text{C}$	ν, cm^{-1}	δ, cm^{-1}	M_2, cm^{-2}	$\tau_v, \text{пс}$	$\tau_c, \text{пс}$	δ_h, cm^{-1}	δ_i, cm^{-1}
0	25	1048.5	4	56.56	2.59	0.15	3.13	1.69
		1050.3	3.08	1.7	3.97	—	0	3.08
		1069.6	5.18	88.8	2.2	0.11	3.59	2.86
	115	1045.6	8.31	274.168	1.37	0.071	7.29713	2.93
		1052.9	4.32	3.36	3.3	—	0	4.32
		1066.97	7.64	190.5	1.59	0.073	5.15	4.33
200	1054.89	17.95	820.10	0.73	0.04	12.53	7.24	
0.5	25	1051.85	7	217.55	1.52	0.086	7.05	0.45
		1053.3	2.84	1.45	4.1	—	0	2.84
		1061	11.78	68.6302	1.3	0.099	1.85	10.28
		1069.46	6.57	168.32	1.705	0.089	5.6	2.56
	115	1052.5	7.5	260.33	1.4	0.082	8.1	0
		1053.3	3.32	1.99	3.85	—	—	3.32
		1060.26	11.6	82.9	1.31	0.086	2.11	9.9
		1068.88	7.13	187.2	1.62	0.08	5.59	3.35
		1055.32	18.6	1000.3	0.68	0.037	14	6.7
200	1053.6	14.7	999.38	0.74	0.041	15.46	0	
	1060.27	17.31	238.3	0.87	0.096	7.93	10.3	
	1053.6	16.97	1123.87	0.69	0.036	15.2	4.1	
	1057.8	18.14	375.122	0.8	0.069	9.3	9.7	
0.7	200	1053.93	19.4	1136.47	0.65	0.035	14.9	6.5

нию значений частот. Как известно, основной причиной смещения частот колебаний является изменение энергии межчастичных взаимодействий и колебательный — ангармонизм, вызванный изменением энергии внутримолекулярного взаимодействия [13]. Следовательно, допирование нанооксидом алюминия приводит к существенному изменению, в первую очередь, фазы нитрата лития.

При больших концентрациях оксида алюминия исчезают характерные для фазового перехода скачкообразные изменения спектральных характеристик (рис. 3), наблюдаются только незначительные изломы, характерные для аморфных систем [7].

Известно, что форма и ширина линий в спектрах КР чувствительны к колебательно-релаксационным процессам, протекающим в пикосекундных временных интервалах [14]. Основной вклад в контуры полос вносят процессы колебательной и ориентационной релаксации. Колебательная полоса $\nu_1(A_1')$ является сильно поляризованной, не чувствительной к реориентационным движениям нитрат-иона, и, следовательно, его форма обусловлена процессами колебательной релаксации [15]. Существуют различные механизмы колебательной релаксации, среди которых

колебательная дефазировка, резонансный перенос и энергетическая релаксация (снижение заселенности).

Колебательная дефазировка считается универсальной причиной уширения колебательных линий, а потому ее теория разработана наиболее детально. Движущей силой дефазировки являются зависящие от времени межчастичные взаимодействия, модулирующие колебательную частоту $\Delta\omega = f(t)$ и приводящие к сбою фазы колебаний.

Для количественной оценки особенностей релаксационных характеристик различных типов нитрат-ионов в композиционной системе мы провели соответствующие расчеты на основе анализа формы контуров компонент колебательной полосы $\nu_1(A_1')$ в спектрах КР с использованием аппарата временных корреляционных функций (ВКФ) [16–18].

Рассчитанные из наших экспериментальных данных значения времен колебательной релаксации моды $\nu_1(A_1')$ τ_v , второго спектрального момента (M_2), времени модуляции τ_c , вклады однородного δ_h и неоднородного уширения δ_i компонент спектра КР систематизированы в табл. 2.

Для обоснованных выводов о характере межчастичных взаимодействий в жидкости наряду со временем дефазировки особенно важно анализи-

ровать времена модуляции и вторые спектральные моменты колебательных линий — те параметры, которые входят в модели, описывающие явления дефазировки. Время модуляции определяет продолжительность возмущений в жидкости и является особенно чувствительным к изменениям во взаимодействиях между рассматриваемой частицей и ее окружением. Если время модуляции мало, то система характеризуется подвижным окружением со слабым, неспецифичным взаимодействием (однородное уширение). При медленной модуляции ($\tau_c \rightarrow \infty$) для системы характерна жесткая квазирешетка; сильные, специфические, направленные взаимодействия (неоднородное уширение).

Второй спектральный момент возрастает, если столкновения между частицами среды быстрые и сильные и возмущения затрагивают отталкивательную ветвь потенциала межчастичных взаимодействий. Уменьшение второго спектрального момента означает доминирование сил притяжения в результате образования (кратковременной) связи между частицами [19].

Из таблицы видно, что допирование наночастицами Al_2O_3 приводит к заметному изменению молекулярно-релаксационных характеристик для всех фаз, определенных в исследуемом композите. Примечательно отметить, что параметры колебательной релаксации (второй спектральный момент M_2 , скорость дефазировки $1/\tau_c$) для аморфной фазы несколько ниже, чем для фазы LiNO_3 и разупорядоченной фазы KNO_3 . Это говорит о том, что при низких температурах на поверхности оксида, где локализована аморфная фаза, анионная решетка “заморожена”. В то же время скорости релаксации для фазы LiNO_3 и разупорядоченной фазы KNO_3 с ростом концентрации увеличиваются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании исследования электропроводности и спектров комбинационного рассеяния композитов $(1-x)[0.42\text{LiNO}_3-0.58\text{KNO}_3] + x\text{Al}_2\text{O}_3$ показано, что введение гетерогенной добавки приводит к изменению структуры солевой системы. Допирование наноразмерным оксидом алюминия приводит к резкому увеличению ионной проводимости композита и уменьшению энергии активации. Показано, что наличие нанопорошка оксида алюминия в композите приводит к появлению в системе аморфной фазы за счет разрушения фазы нитрата лития. Характер изменений релаксационных параметров колебания ν_1 нитрат-иона аморфной фазы свидетельствует о “замороженности” анионной подрешетки.

Работа выполнена на оборудовании Аналитического центра коллективного пользования ДНЦ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liang, C.C., Conduction characteristics of the lithium iodide-aluminum oxide solid electrolytes, *J. Electrochem. Soc.*, 1973, vol. 120, p. 1289.
2. Poulsen, F.W., Andersen, N.H., Kindl, B., and Schoonman, J., Properties of LiI-alumina composite electrolytes, *Solid State Ionics*, 1983, no. 9/10, p. 119.
3. Улихин, А.С., Уваров, Н.Ф. Электрохимические свойства композиционных твердых электролитов $\text{LiClO}_4\text{-MgO}$. *Электрохимия*. 2009. Т. 45. С. 755. [Ulihin, A.S. and Uvarov, N.F., Electrochemical properties of composition solid electrolytes $\text{LiClO}_4\text{-MgO}$, *Russ. J. Electrochem.*, 2009, vol. 45, p. 707].
4. Uvarov, N.F., Hairetdinov, E.F., and Skobelev, I.V., Composite solid electrolytes $\text{MeNO}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Me = Li, Na, K), *Solid State Ionics*, 1996, vol. 86–88, p. 577.
5. Chen, L., Cros, C., Castagnet, R., and Hagenmuller, P., Electrical conductivity enhancement in an eutectic system containing dispersed second phase particles, *Solid State Ionics*, 1988, vol. 31, p. 209.
6. Liu, W., Zhu, S., Wang, D., et al., New solid electrolyte materials of nitrate-ceramic composites. Property and application in intermediate temperature fuel cells, *Extended Abstracts: Tenth International Conference on Solid State Ionics, Singapore*, 1995, p. 102.
7. Рабаданов, К.Ш., Гафуров, М.М., Алиев, А.Р., Амиров, А.М., Какагасанов, М.Г. Спектры комбинационного рассеяния света и молекулярно-релаксационные свойства гетерофазных стекол и расплавов $\text{K,Ca/CH}_3\text{COO}$, $\text{Li,K,Cs/CH}_3\text{COO}$. *Журн. прикл. спект.* 2018. Т. 85. С. 69. [Rabadanov, K.Sh, Gafurov, M.M., Aliev, A.R., Amirov, A.M., and Kakagasanov, M.G., The raman spectra and molecular relaxation properties of heterophase glasses and the melts of $\text{K,Ca/CH}_3\text{COO}$, $\text{Li,K,Cs/CH}_3\text{COO}$, *J. Appl. Spectroscopy*, 2018, vol. 85, p. 70].
8. Косов, Ю.В., Присяжный, В.Д., Гафуров, М.М., Яремчук, Г.Г. Спектры комбинационного рассеяния и электропроводность гетерофазных расплавов и стекол систем K,Ca/NO_3 и K,Mg/NO_3 . *Укр. хим. журн.* 1989. Т. 55. С. 19. [Kosov, Yu.V., Prisyazhnyy, V.D., Gafurov, M.M., and Yaremchuk, G.G., Raman spectra and electrical conductivity of heterophase melts and glass systems K,Ca/NO_3 and K,Mg/NO_3 , *Ukr. khim. zhurnal.* (in Russian), 1989, vol. 55, p. 19.]
9. Накамото, К. *ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений*. Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 536 с. [Nakamoto, K., *Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds*. Wiley-Interscience, 1991, 536 p.]
10. Brooker, M.Y., Raman spectroscopic investigations of structural aspects of the different phases of lithium sodium and potassium nitrate, *J. Phys. and Chem. Solids*, 1978, vol. 39, p. 657.
11. Гафуров, М.М., Рабаданов, К.Ш., Атаев, М.Б. и др. Структурно-динамические свойства нанокompозитов $\text{LiNO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$. *ФТТ*. 2015. Т. 57. № 10. С. 2011. [Gafurov, M.M., Rabadanov, K.S., Ataev, M.B., Amirov, A.M., Kubataev, Z.Y., and Kakagasanov, M.G., Structural and dynamic properties of $\text{LiNO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$

- nanocomposites, *Phys. Solid State*, 2015, vol. 57, no. 10, p. 2066.]
12. Атаев, М.Б., Гафуров, М.М., Эмиров, Р.М., Рабаданов, К.Ш., Амиров, А.М. Исследование фазового состава и структуры нанокompозитов $(1-x)\text{KNO}_3 + x\text{Al}_2\text{O}_3$ методом рентгеновской дифракции. *ФТТ*. 2016. Т. 58. С. 2336. [Ataev, M.B., Gafurov, M.M., Rabadanov, K.S., Amirov, A.M., and Emirov, R.M., Phase composition and the structure of $(1-x)\text{KNO}_3 + x\text{Al}_2\text{O}_3$ nanocomposites by X-ray diffraction, *Physics of the Solid State*, 2016, vol. 58, p. 2423.]
 13. Гаджиев, А.З., Кириллов, С.А. К вопросу о температурной зависимости частот линий в молекулярных спектрах. *Журн. прикл. спектроскопии*. 1974. Т. 21. С. 929. [Gadzhiev, A.Z and Kirillov, S.A., On temperature dependence of line frequencies in molecular spectra, *J. Appl. Spectroscopy* (in Russian), 1974, vol. 21, p. 929.]
 14. Погорелов, В.Е., Лизенгевич, А.И., Кондиленко, И.И., Буян, Г.П. Колебательная релаксация в конденсированных средах. *УФН*. 1979. Т. 127. С. 683. [Pogorelov, V.E, Lizengevich, AI, Kondilenko, II, and Buyan, G.P., Vibrational relaxation in condensed media *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* (in Russian), 1979, vol. 22, p. 270.]
 15. Wang, C.H., *Spectroscopy of condensed media. Dynamics of molecular interactions*. Orlando: Academic, 1985.
 16. Rothschild, W.G., *Dynamics of Molecular Liquids*; New York: Wiley, 1984.
 17. Oxtoby, D.W., Vibrational relaxation in liquids, *Annu. Rev. Chem. Phys.*, 1981, vol. 32, p. 77.
 18. Kato, T. and Takenaka, T., Raman spectral studies of the dynamics of ions in molten $\text{LiNO}_3\text{--RbNO}_3$ mixtures. II. Vibrational dephasing: Roles of fluctuations of coordination number and concentration, *Molec. Physics*, 1982, vol. 46, p. 257.
 19. Рабаданов, К.Ш., Гафуров, М.М., Алиев, А.Р., Ахмедов, И.Р., Какагасанов, М.Г., Кириллов, С.А. Колебательная дефазировка перхлорат-иона в расплаве LiClO_4 . *Расплавы*. 2011. № 3. С. 67. [Rabadanov, K.S., Gafurov, M.M., Aliev, A.R., Akhmedov, I.R., Kakagasanov, M.G., and Kirillov, S.A., Vibrational dephasing of the perchlorate ion in an LiClO_4 melt, *Russ. metallurgy (Metally)*, 2011, vol. 8, p. 760.]