

ФАЗООБРАЗОВАНИЕ СЛОИСТЫХ ТИТАНАТНИОБАТОВ $\text{KA}_2\text{Ti}_2\text{NbO}_{10}$, $\text{A}=\text{Bi(III)}$, Pr(III)

А.В. Митрофанова[✉], **М.Д. Крутая**, **И.С. Пузиков**, **Ч. Хуан**,
Е.А. Фортальнова, **М.Г. Сафроненко**
Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы,
Москва, Россия
[✉] chemistann@gmail.com

Аннотация. Слоистые перовскитоподобные соединения, относящиеся к фазам Диона – Якобсона, обладают уникальными структурными особенностями и имеют потенциальное применение в различных областях науки и техники, что делает данные материалы предметом активного изучения и исследований в последние годы. Синтез фаз Диона – Якобсона осуществляется разными способами, включая стандартный твердофазный синтез, гидротермальный синтез, золь-гель метод, синтез из расплава и другие. На сегодняшний день наиболее распространённым методом является твердофазный синтез ввиду простоты проведения взаимодействия компонентов и легкости контроля состава исходной шихты. Однако сообщается, что не каждое соединение со структурой Диона – Якобсона удастся получить данным способом, что указывает на необходимость корректного подбора условий термообработки и прекурсоров. Таким образом, целью данного исследования было изучение возможности формирования слоистых перовскитоподобных фаз со структурой Диона – Якобсона состава $\text{KA}_2\text{Ti}_2\text{NbO}_{10}$, $\text{A}=\text{Bi(III)}$, Pr(III) в процессе твердофазного синтеза из исходной шихты различного состава при термообработке в муфельной печи. Подобраны условия высокотемпературного обжига на основании данных дифференциально-термического и термогравиметрического анализа. Показано, что при замене оксида висмута(III) в исходной шихте на более тугоплавкий смешанный оксид празеодима(III, IV) повышается температура получения однофазного образца. Выявлено, что уменьшение радиуса катиона в позиции А структуры фазы Диона – Якобсона приводит к понижению симметрии элементарной ячейки с тетрагональной в случае $\text{A}=\text{Bi(III)}$ на ромбическую для $\text{A}=\text{Pr(III)}$. Уточнены параметры элементарных ячеек синтезированных фаз, установлено уменьшение объёма ячейки при снижении ионного радиуса катиона в позиции А. Полученные фазы исследованы дифракционными и спектроскопическими методами.

Ключевые слова: фазообразование, слоистые перовскитоподобные соединения, фаза Диона – Якобсона

Для цитирования: Фазообразование слоистых титанатниобатов $\text{KA}_2\text{Ti}_2\text{NbO}_{10}$, $\text{A}=\text{Bi(III)}$, Pr(III) / А.В. Митрофанова, М.Д. Крутая, И.С. Пузиков и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2025. Т. 17, № 1. С. 118–125. DOI: 10.14529/chem250110

Original article
DOI: 10.14529/chem250110

PHASE FORMATION OF LAYERED TITANATE-NIOBATES $\text{KA}_2\text{Ti}_2\text{NbO}_{10}$, $\text{A}=\text{Bi(III)}$, Pr(III)

A.V. Mitrofanova[✉], **M.D. Krutaya**, **I.S. Puzikov**, **Z. Huang**,
E.A. Fortalnova, **M.G. Safronenko**
RUDN University, Moscow, Russia
[✉] chemistann@gmail.com

Abstract. Layered perovskite-like compounds related to Dion–Jacobson phases with unique structural features have potential applications in various fields of science and technology, which makes these

materials the subject of active research in recent years. Synthesis of Dion–Jacobson phases is carried out in various ways, including standard solid-state synthesis, hydrothermal synthesis, sol-gel method, molten salt synthesis, and others. At present, the most common method is the solid-state synthesis, due to simple interaction of compounds and an easy way to control the composition of the initial mixture. However, it is reported that not every compound with the Dion–Jacobson structure can be obtained by this method, which indicates the need for correct selection of heat treatment conditions and precursors. Thus, the aim of this study is to investigate the possibility of forming layered perovskite-like phases with the Dion–Jacobson structure of the $KA_2Ti_2NbO_{10}$ composition, $A=Bi(III), Pr(III)$, using the solid-state synthesis from the initial mixture of different compositions during heat treatment in a muffle furnace. The conditions of high-temperature annealing have been selected based on the data of differential thermal and thermogravimetric analysis. It has been shown that replacing bismuth(III) oxide in the initial mixture with a high-melting praseodymium(III, IV) mixed oxide increases the temperature of obtaining a single-phase sample. It has been found that a decrease in the radius of the A-site cation in the Dion–Jacobson phase structure leads to a decrease in the symmetry of the unit cell from a tetragonal one, in the case of $A=Bi(III)$, to orthorhombic one for $A=Pr(III)$. The decrease of the unit cell volume with a decrease of the A-cation ionic radius has been established. The obtained phases have been studied using diffraction and spectroscopic methods.

Keywords: phase formation, layered perovskite-like compounds, Dion–Jacobson phase

For citation: Mitrofanova A.V., Krutaya M.D., Puzikov I.S., Huang Z., Fortalnova E.A., Safronenko M.G. Phase formation of layered titanate-niobates $KA_2Ti_2NbO_{10}$, $A=Bi(III), Pr(III)$. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chem.* 2025;17(1):118–125. (In Russ.) DOI: 10.14529/chem250110

Введение

Перовскитоподобные фазы являются одними из самых многообещающих материалов в современной науке и технологиях. Эти фазы представляют интерес для исследователей, так как обладают широким спектром свойств, включая сверхпроводимость, каталитические и фотокаталитические свойства [1–4], люминесценцию [5], высокую ионную проводимость [6], колоссальное магнетосопротивление и другие [7]. В последнее время проводятся исследования по использованию этих материалов для разработки высокоэффективных фотогальванических элементов [8, 9]. Большое количество работ по изучению свойств перовскитоподобных соединений очерчивает широкий круг их практического применения от высокотемпературных ионных проводников в топливных элементах, запоминающих устройств, аккумуляторов и датчиков в микроэлектронике до катализаторов в промышленных реакциях и материалов для очистки воды и воздуха [10–12]. Новым направлением применения таких структур является солнечная энергетика, о чём свидетельствует рост количества проводимых исследований [13–15]. Развитие возобновляемой энергетики считается одной из главных задач в решении проблем сохранения природных ресурсов и загрязнения окружающей среды.

Слоистые перовскиты представляют особый интерес среди перовскитоподобных соединений. Известны три типа слоистых перовскитов, различающиеся составом межслоевого пространства: фазы Диона – Якобсона, фазы Раддлсдена – Поппера и фазы Ауривилиллиуса. Варьирование их состава путем катионных замещений в структуре может привести к созданию новых соединений, а также к улучшению свойств исходных фаз, что позволит расширить спектр направлений применения слоистых структур [16].

Титанатниобаты, относящиеся к фазам Диона – Якобсона с общей формулой $A'[A_{n-1}B_nO_{3n+1}]$, в последнее время стали объектами многочисленных исследований [17–23]. Их слоистая структура состоит из межслоевого пространства, в котором находится ион щелочного металла A'^{+} , а слои $[A_{n-1}B_nO_{3n+1}]^{-}$ представляют собой перовскитные блоки, состоящие, в свою очередь, из n слоев октаэдров BO_6 . В литературе достаточно широко представлены методы получения и результаты исследований свойств фаз Диона – Якобсона, содержащих катионы Cs^{+} и Rb^{+} в позиции A' [21–24]. Например, в работе [17] были синтезированы новые титанатниобаты со структурой Диона – Якобсона состава $RbPr_2Ti_2NbO_{10}$ и $RbNd_2Ti_2NbO_{10}$, которые показали высокую эффективность в фотокаталитических экспериментах по разложению метиленового синего под действием УФ излучения, что открывает новые возможности в решении экологической проблемы загрязнения поверхностных и грунтовых вод органическими красителями [18]. Литературные

данные об исследованиях аналогичных титанатниобатов, содержащих катионы K^+ в межслоевом пространстве, немногочисленны [19–21]. Цель данной работы состояла в исследовании процессов, протекающих при образовании слоистых фаз семейства Диона – Якобсона состава $KA_2Ti_2NbO_{10}$ ($A = Bi^{3+}, Pr^{3+}$) в ходе твердофазного синтеза и исследовании их физико-химических свойств.

Экспериментальная часть

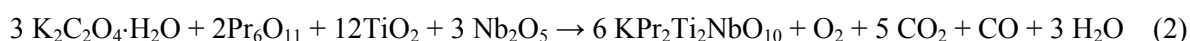
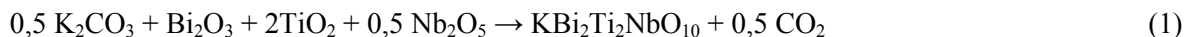
Получение слоистых титанатниобатов состава $KBi_2Ti_2NbO_{10}$ и $KPr_2Ti_2NbO_{10}$ проводили по керамической технологии из соответствующих оксидов Bi_2O_3 , Pr_6O_{11} , TiO_2 , Nb_2O_5 и солей K_2CO_3 , $K_2C_2O_4 \cdot H_2O$. Содержание калиевых солей в исходных смесях превышало стехиометрическое на 50 мол. %. Согласно литературным данным, использование сверхстехиометрических количеств калий содержащих компонентов необходимо ввиду волатильности соединений калия и их потерь в ходе высокотемпературного синтеза [21–23]. Обжиг смесей проводили постадийно с промежуточными пережигами в этиловом спирте (табл. 1).

Таблица 1

Температура синтеза $KA_2Ti_2NbO_{10}$, $A=Bi(III), Pr(III)$

Фаза	Температура, °C				
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
$KBi_2Ti_2NbO_{10}$	800	900	1000	–	–
$KPr_2Ti_2NbO_{10}$	800	900	1000	1100	1200

Карбонат калия K_2CO_3 использовали для получения $KBi_2Ti_2NbO_{10}$, так как фазообразование в данном случае не сопровождается окислительно-восстановительными процессами (реакция 1). При использовании смешанного оксида празеодима(III,IV) Pr_6O_{11} ($Pr_2O_3 \cdot 4PrO_2$) для формирования фазы $KPr_2Ti_2NbO_{10}$ необходимо полное восстановление оксида празеодима(IV), которое на воздухе частично обратимо и протекает в несколько стадий при температурах выше 400 °C. Присутствие восстановителя в реакционной смеси способствует более полному восстановлению катионов $Pr(IV)$. Поэтому в качестве калийсодержащего прекурсора был выбран $K_2C_2O_4 \cdot H_2O$, в результате разложения которого образуется оксид углерода(II), проявляющий восстановительные свойства (реакция 2).



Для изучения процесса фазообразования и определения условий синтеза $KBi_2Ti_2NbO_{10}$ и $KPr_2Ti_2NbO_{10}$ был проведен дифференциально-термический и термогравиметрический анализ (ДТА/ТГА) неотожжённых исходных смесей. ДТА/ТГА проведен на термоанализаторе SDT Q600 (TA Instruments, США), $\Delta T = 20\text{--}1200$ °C, $\nu = 10$ °/мин, в атмосфере воздуха.

На кривых ДТА обеих смесей в области температур до ~200 °C наблюдаются эндотермические эффекты, сопровождающиеся потерей массы, что обусловлено удалением сорбированной и кристаллизационной воды.

Взаимодействие исходных компонентов в шихте, содержащей K_2CO_3 (реакция 1), происходит в области температур ~600–800°C и сопровождается потерей массы, связанной с удалением CO_2 при разложении карбоната в присутствии компонентов шихты.

Разложение $K_2C_2O_4$ (реакция 2) в другой исходной смеси сопровождается ярко выраженным экзотермическим эффектом при температуре ~570 °C, обусловленным выделением оксида углерода(II) и его окислением в воздушной атмосфере. В этой смеси, содержащей также Pr_6O_{11} , потеря массы завешается при более высоких температурах ~1100 °C, что связано с удалением кислорода в ходе разложения оксида празеодима(IV).

По результатам ДТА/ТГА исходных смесей для изучения процессов, протекающих при образовании твёрдых растворов $KBi_2Ti_2NbO_{10}$ и $KPr_2Ti_2NbO_{10}$ были выбраны следующие температуры термообработки шихты (см. табл. 1). Время термообработки шихты на каждой стадии составляло 6 часов.

Обсуждение результатов

Рентгенофазовый анализ (РФА)

Дифрактограммы были получены на дифрактометре ДРОН-7 (НПП «Буревестник», Россия), $\lambda_{CuK\alpha} = 1,54056 \text{ \AA}$, $\Delta 2\theta = 0,02^\circ$, диапазон углов $2\theta = 5 \div 70^\circ$.

На дифрактограмме смеси состава $KBi_2Ti_2NbO_{10}$ после первой термообработки ($T_1=800^\circ\text{C}$) проявляются рефлексы, относящиеся к фазам ниобата висмута Bi_3NbO_7 со структурой флюорита и титаната висмута $Bi_4Ti_3O_{12}$ – слоистого перовскита со структурой Ауривиллиуса с $n=3$ (рис. 1, табл. 2). Индивидуальные калий содержащие фазы в составе этой смеси не обнаружены. Очевидно, что выявленные фазы являются твёрдыми растворами, в состав которых входят катионы K^+ .

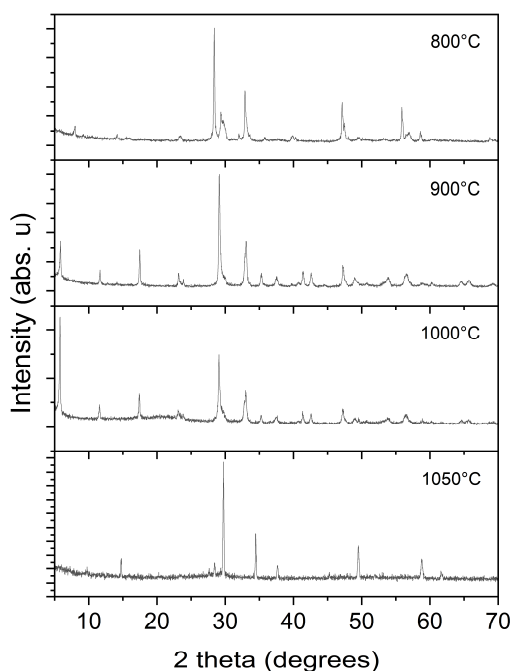


Рис. 1. Дифрактограммы образцов $KBi_2Ti_2NbO_{10}$ на разных стадиях термообработки

Таблица 2

Фазовый состав образцов $KA_2Ti_2NbO_{10}$, где $A=Bi(III), Pr(III)$, на разных стадиях термообработки

Температура, $^\circ\text{C}$	$KBi_2Ti_2NbO_{10}$		$KPr_2Ti_2NbO_{10}$	
	Фаза	JC-PDS #	Фаза	JC-PDS #
800	Bi_3NbO_7 $Bi_4Ti_3O_{12}$ Bi_3NbTiO_9	50–87 65–2527 39–233	Pr_6O_{11} $KNbO_3$ $K_2Ti_4O_9$	42–1121 71–947 32–861
900	$KBi_2Ti_2NbO_{10}$	49–794*	Pr_6O_{11} $KPr_2Ti_2NbO_{10}$ Pr_3NbO_7 $K_2Ti_4O_9$	42–1121 49–742** 82–1904 32–861
1000	$KBi_2Ti_2NbO_{10}$	49–794*	Pr_6O_{11} Pr_3NbO_7 $KPr_2Ti_2NbO_{10}$ $K_2Ti_4O_9$	42–1121 82–1904 49–742** 32–861
1100	—	—	$KPr_2Ti_2NbO_{10}$ Pr_3TiNbO_9	49–742** 39–233***
1200	—	—	$KPr_2Ti_2NbO_{10}$	49–742**

* фаза Диона – Якобсона $RbLa_2Ti_2NbO_{10}$, изоструктурна $KBi_2Ti_2NbO_{10}$.

** фаза Диона – Якобсона $KLa_2Ti_2NbO_{10}$, изоструктурна $KPr_2Ti_2NbO_{10}$.

*** фаза Ауривиллиуса Bi_3TiNbO_9 , изоструктурна Pr_3TiNbO_9 .

Фаза твёрдого раствора $\text{KBi}_2\text{Ti}_2\text{NbO}_{10}$ со структурой Диона-Якобсона образуется на второй стадии термообработки шихты ($T_2=900^\circ\text{C}$). Другие фазы в составе образца на этой стадии не выявлены. $\text{KBi}_2\text{Ti}_2\text{NbO}_{10}$ устойчив до температур $\sim 1000^\circ\text{C}$ (T_3). Элементарная ячейка полученного соединения характеризуется тетрагональным типом симметрии с параметрами $a = b = 3,840(2) \text{ \AA}$, $c = 15,26(1) \text{ \AA}$, $V = 225,1(1) \text{ \AA}^3$.

Плавление $\text{KBi}_2\text{Ti}_2\text{NbO}_{10}$ происходит при повышении температуры термообработки до 1050°C (см. рис. 1). При кристаллизации расплава формируется пироклорная структура на основе $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ (JC-PDS # 32-118), что связано с потерями катионов калия и висмута, обусловленными волатильностью их соединений при высоких температурах.

На ход фазообразования в смеси состава $\text{KPr}_2\text{Ti}_2\text{NbO}_{10}$, по сравнению с $\text{KBi}_2\text{Ti}_2\text{NbO}_{10}$, в большей степени влияет то, что оксид празеодима(III) Pr_2O_3 более тугоплавкий, в отличие от оксида висмута Bi_2O_3 , и его образование в исходной смеси из смешанного оксида Pr_6O_{11} ($\text{Pr}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{PrO}_2$) частично обратимо в окислительной воздушной атмосфере, чем использование более легкоплавкого калийсодержащего прекурсора (см. реакции 1, 2).

Присутствие исходного смешанного оксида Pr_6O_{11} фиксируется на дифрактограммах этой смеси вплоть до предпоследней стадии термообработки $T_4 = 1100^\circ\text{C}$, наряду с образующимся ниобатом празеодима(III) Pr_3NbO_7 со структурой флюорита (рис. 2, см. табл. 2). Остальные компоненты смеси вступают в реакцию уже на первой стадии термообработки $T_1 = 800^\circ\text{C}$, образуя ниобат и титанат калия.

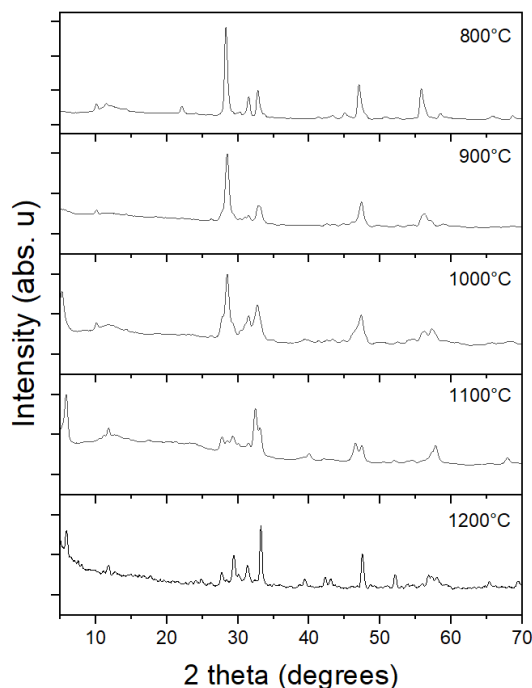


Рис. 2. Дифрактограммы образцов $\text{KPr}_2\text{Ti}_2\text{NbO}_{10}$ на разных стадиях термообработки

Рефлексы фазы со структурой Диона-Якобсона $\text{KPr}_2\text{Ti}_2\text{NbO}_{10}$ появляются на дифрактограмме после обжига смеси при $T_2 = 900^\circ\text{C}$. Однако после повышения температуры обжига до $T_3 = 1000^\circ\text{C}$ образец сохраняет многофазность и, как следствие присутствия PrO_2 , тёмно-коричневый цвет. Полное восстановление PrO_2 происходит в смеси после обжига при 1100°C , о чём свидетельствуют изменение окраски образцов на светло-зелёную и отсутствие рефлексов исходного оксида лантаноида на дифрактограмме смеси. Интенсивность рефлексов фазы Диона-Якобсона $\text{KPr}_2\text{Ti}_2\text{NbO}_{10}$ увеличивается, но фиксируются рефлексы примесной фазы слоистого перовскита со структурой Ауривиллиуса (см. табл. 2).

Завершение фазовых взаимодействий в смеси с образованием одной фазы со структурой Диона – Якобсона $\text{KPr}_2\text{Ti}_2\text{NbO}_{10}$ зафиксировали по результатам РФА после обжига

при $T_5 = 1200$ °С. Элементарная ячейка полученной фазы относится к ромбической сингонии и характеризуется параметрами $a = 3,85(1)$ Å, $b = 3,73(1)$ Å, $c = 15,35(9)$ Å, $V = 220,5(2)$ Å³.

Спектральные методы исследования

ИК-спектроскопический анализ проведен на ИК-Фурье спектрометре IRSpirit iS50 (Shimadzu, Япония), $4000\text{--}350$ см⁻¹ с использованием приставки нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО, материал – алмаз). КР-спектры получены с помощью спектрометра EnSpectr R532 с длиной волны $\lambda = 532$ нм в диапазоне волновых чисел $100\text{--}4000$ см⁻¹.

Для слоистых структур семейства фаз Диона-Якобсона характерно искажение перовскитных октаэдров BO_6 , находящихся на границе перовскитного блока, рядом с межслоевым пространством [25]. Искажение связано с взаимодействием кислородного окружения ионов в позициях В с большими по радиусу катионами щелочного металла в межслоевом пространстве (в позициях А'). В результате происходит укорачивание связей В–О в приграничных октаэдрах BO_6 . Поэтому в ИК-спектрах фаз Диона-Якобсона проявляются две полосы, относящиеся к колебаниям связей В–О на границах и в объеме перовскитных блоков.

В спектрах полученных фаз $KBi_2Ti_2NbO_{10}$ и $KPr_2Ti_2NbO_{10}$ колебаниям укороченных связей В–О в приграничных слоях октаэдров BO_6 соответствуют полосы поглощения в области $\sim 950\text{--}830$ см⁻¹ (рис. 3). Полосы поглощения в диапазоне $\sim 740\text{--}470$ см⁻¹ относятся к валентным колебаниям связей В–О в объеме перовскитных блоков.

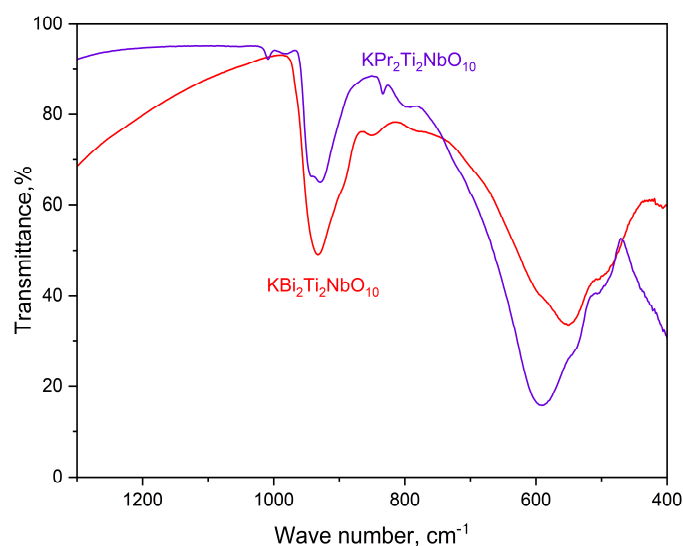


Рис. 3. ИК-спектры образцов $KA_2Ti_2NbO_{10}$ ($A=Bi, Pr$)

В КР-спектрах обеих фаз тоже проявляется полоса в области $\sim 950\text{--}830$ см⁻¹, отвечающая колебаниям укороченных связей В–О в октаэдрах BO_6 на границах перовскитных блоков (рис. 4). Увеличение её интенсивности, а также усложнение общего вида КР-спектра при уменьшении радиуса катиона в позиции А кристаллической структуры фаз $KA_2Ti_2NbO_{10}$, где $A=Bi^{3+}$ ($R_{KЧ=8}=1.61$ Å), Pr^{3+} ($R_{KЧ=8}=1.126$ Å), обусловлено понижением симметрии элементарной ячейки с тетрагональной до ромбической, соответственно [26].

Уменьшение радиуса катиона в позиции А структуры фаз Диона-Якобсона $KBi_2Ti_2NbO_{10}$, $KPr_2Ti_2NbO_{10}$ также проявляется и в ИК-спектрах (см. рис. 3). В спектре фазы $KPr_2Ti_2NbO_{10}$ максимумы всех полос поглощения смещены в сторону более высоких частот, что указывает на уменьшение длин связей В–О в перовскитных блоках. Смещение ярко выражено для полос, относящихся к валентным колебаниям связей В–О в объеме перовскитных блоков в области $\sim 740\text{--}470$ см⁻¹. Это согласуется с данными РФА о меньшем объеме элементарной ячейки фазы $KPr_2Ti_2NbO_{10}$, по сравнению с $KBi_2Ti_2NbO_{10}$. На более низкий класс симметрии элементарной ячейки $KPr_2Ti_2NbO_{10}$ указывают плечи на низкочастотном склоне полосы, проявляющейся в диапазоне $\sim 740\text{--}470$ см⁻¹.

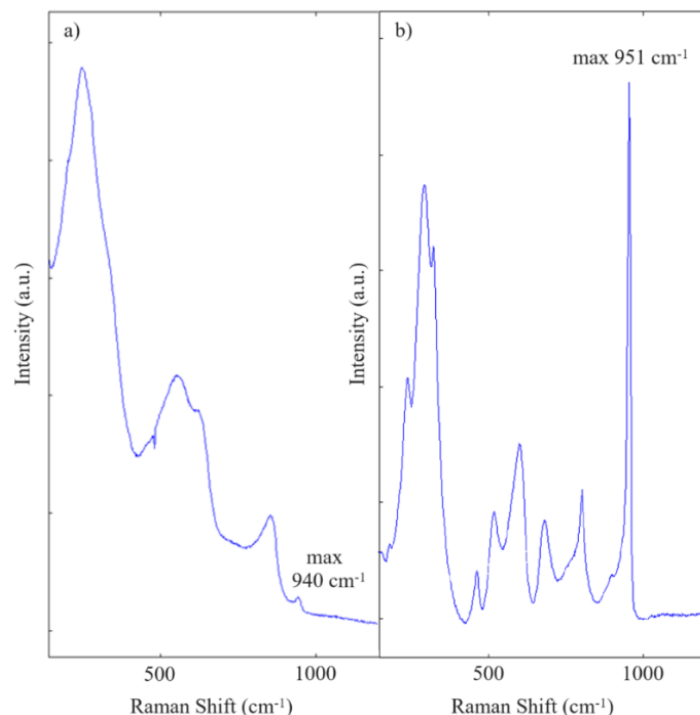


Рис. 4. КР-спектры образцов $\text{KBi}_2\text{Ti}_2\text{NbO}_{10}$ (a) и $\text{KPr}_2\text{Ti}_2\text{NbO}_{10}$ (b)

Заключение

В результате проведенного исследования показано, что формирование фазы слоистого перовскита со структурой Диона – Якобсона состава $\text{KA}_2\text{Ti}_2\text{NbO}_{10}$, где $\text{A} = \text{Bi(III)}, \text{Pr(III)}$ в ходе твердофазного синтеза протекает при $T \geq 900^\circ\text{C}$, независимо от температуры плавления/разложения солевого калий содержащего компонента, из промежуточных флюоритоподобных и перовскитоподобных фаз твердых растворов на основе титанатов и ниобатов различного состава. Температура завершения фазообразования и термическая устойчивость фазы $\text{KA}_2\text{Ti}_2\text{NbO}_{10}$ зависят от термических свойств оксидного компонента, содержащего катион А.

Уменьшение радиуса катиона в позиции А кристаллической структуры $\text{KA}_2\text{Ti}_2\text{NbO}_{10}$ приводит не только к уменьшению объема, но и к понижению класса симметрии элементарной ячейки фазы Диона-Якобсона с тетрагональной, в случае $\text{A} = \text{Bi(III)}$, до ромбической при $\text{A} = \text{Pr(III)}$.

Список источников

1. Zhang J., Xie K., Gan Y. et al. // New J. Chem. 2014. V. 38, No. 8. P. 3434. DOI: 10.1039/C3NJ01367G.
2. Jeyalakshmi V., Mahalakshmy R., Krishnamurthy K.R. et al. // Catal. Today. 2018. V. 300. P. 152. DOI: 10.1016/j.cattod.2017.02.050.
3. Zou Z., Ye J., Sayama K. et al. // Nature. 2001. V. 414, No. 6864. P. 625. DOI: 10.1038/414625a.
4. Ghorbani Z., Ehsani M.H. // Heliyon. 2024. V. 10, No. 10. P. e29792. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e29792.
5. Huang D., Zhao P., Wang Z. et al. // Solid State Sci. 2024. V. 152. P. 107553. DOI: 10.1016/j.solidstatesciences.2024.107553.
6. Kong Y., Liu Y., Hu G. // Ceram. Int. 2022. V. 48, No. 24. P. 36136. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.08.168.
7. Hopper H.A., Wildman E.J., Macphee D.E. et al. // J. Solid State Chem. 2017. V. 253. P. 313. DOI: 10.1016/j.jssc.2017.06.010.
8. Bu T., Li J., Lin Q. et al. // Nano Energy. 2020. V. 75. P. 104917. DOI: 10.1016/j.nanoen.2020.104917.
9. Shrivastav N., Madan J., Hossain M.K. et al. // Mater. Lett. 2024. V. 362. P. 136169. DOI: 10.1016/j.matlet.2024.136169.

10. Osada M., Sasaki T. // Dalton Trans. 2018. V. 47. P. 2841. DOI: 10.1039/C7DT03719H.
11. Prachi P. // C&EN. 2014. V. 92, No. 16. P. 7.
12. Muddelwar R.K., Pani J., Lad A.B. et al. // J. Solid State Chem. 2024. V. 329. P. 124455. DOI: 10.1016/j.jssc.2023.124455.
13. Mohanty P.P., Ahuja R., Chakraborty S. // Nanotechnology. 2022. V. 33, No. 29. P. 292501. DOI: 10.1088/1361-6528/ac6529.
14. Malouangou M.D., Yang Y., Zhang Y.J. et al. // Energy Technol. 2022. V. 10, No. 5. P. 2101155. DOI: 10.1002/ente.202101155.
15. Wendari T.P., Zulhadjri, Emriadi // J. Solid State Chem. 2023. V. 325. P. 124150. DOI: 10.1016/j.jssc.2023.124150.
16. Thomas C.I., Yip T.W.S., Cussen S.A. et al. // J. Solid State Chem. 2022. V. 314. P. 123354. DOI: 10.1016/j.jssc.2022.123354.
17. Krashenninnikova O.V., Syrov E.V., Smirnov S.M. et al. // J. Solid State Chem. 2022. V. 315. P. 123445. DOI: 10.1016/j.jssc.2022.123445.
18. Teng X., Li J., Wang Z. et al. // RSC Adv. 2020. V. 10, No. 41. P. 24712. DOI: 10.1039/D0RA03963B.
19. Syrov E.V., Krashenninnikova O.V., Knyazev A.V. et al. // J. Phys. Chem. Solids. 2021. V. 156. P. 110184. DOI: 10.1016/j.jpcs.2021.110184.
20. Kim J.K., Ok K.M. // J. Alloys Compd. 2023. V. 937. P. 167602. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.167602.
21. Kim H.G., Tran T.T., Choi W. et al. // Chem. Mater. 2016. V. 28, No. 7. P. 2424. DOI: 10.1021/acs.chemmater.6b00778.
22. Im M., Kim D-H., Kweon S-H. et al. // Mater. Res. Bull. 2018. V. 105. P. 246. DOI: 10.1016/j.materresbull.2018.04.056.
23. Czech B., Hojamberdiev M. // J. Photochem. Photobiol., A. 2016. V. 324. P. 70. DOI: 10.1016/j.jphotochem.2016.03.020.
24. Nakajima T., Tsuchiya T., Kumagai T. // Cryst. Growth Des. 2010. V. 10, No. 11. P. 4861. DOI: 10.1021/cg100853h.
25. Brito A., Bouquet V., Demange V. et al. // Mater. Lett. 2019. V. 253. P. 392. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.07.006.
26. Shannon R.D., Prewitt C.T. // Acta Crystallogr., Sect. B: Struct. Sci. 1969. V. 25, No. 5. P. 925. DOI: 10.1107/S0567740869003220.

Митрофанова Анна Владимировна – ассистент, кафедра общей и неорганической химии, факультет физико-математических и естественных наук, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия. E-mail: chemistann@gmail.com.

Крутая Мария Дмитриевна – студент магистратуры, кафедра общей и неорганической химии, факультет физико-математических и естественных наук, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия. E-mail: krutaam083@gmail.com.

Пузиков Илья Сергеевич – студент магистратуры, кафедра общей и неорганической химии, факультет физико-математических и естественных наук, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия. E-mail: puzikov.mega@mail.ru.

Хуан Чжибинь – аспирант, кафедра общей и неорганической химии, факультет физико-математических и естественных наук, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия. E-mail: 1042245169@rudn.ru.

Фортальнова Елена Александровна – доцент, кафедра общей и неорганической химии, факультет физико-математических и естественных наук, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия. E-mail: fortalnova_ea@rudn.ru.

Сафроненко Марина Геннадьевна – доцент, кафедра общей и неорганической химии, факультет физико-математических и естественных наук, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия. E-mail: safronenko_mg@rudn.ru.

Статья поступила в редакцию 30 августа 2024 г.

The article was submitted 30 August 2024.