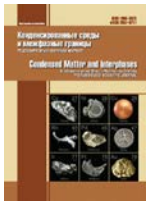


ISSN 1606-867X (Print)
ISSN 2687-0711 (Onine)

Конденсированные среды и межфазные границы

https://journals.vsu.ru/kcmf/

Оригинальные статьи

Научная статья
УДК 546.78
https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3306

Новые соединения $Li_3Ba_2Bi_3(XO_4)_8$ (X = Mo, W): синтез и свойства

Т. С. Спиридонова[1]✉, А. А. Савина[1,2], Ю. М. Кадырова[1,3], Е. П. Белых[3], Е. Г. Хайкина[1,3]

[1]*Байкальский институт природопользования СО РАН,*
ул. Сахьяновой, 6, Улан-Удэ 670047, Республика Бурятия, Российская Федерация

[2]*Сколковский институт науки и технологий,*
Большой бульвар, д.30, стр.1, Москва 121205, Российская Федерация

[3]*Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова,*
ул. Смолина, 24а, Улан-Удэ 670000, Республика Бурятия, Российская Федерация

Аннотация

Направленным синтезом по керамической технологии получены новые соединения $Li_3Ba_2Bi_3(XO_4)_8$ (X = Mo, W) – первые представители семейства тройных молибдатов и вольфраматов $Li_3Ba_2R_3(XO_4)_8$, содержащие в своем составе отличный от редкоземельного элемента трехвалентный металл. Установлена последовательность химических превращений, протекающих при образовании $Li_3Ba_2Bi_3(WO_4)_8$. Проведена первичная характеризация полученных фаз и изучены их ионопроводящие свойства. Показано, что соединения плавятся инконгруэнтно, изоструктурны лантаноидсодержащим аналогам (структурный тип $BaNd_2(MoO_4)_4$, пр. гр. $C2/c$) и кристаллизуются в моноклинной сингонии с параметрами элементарных ячеек a = 5.2798(1), b = 12.8976(4), c = 19.2272(5) Å, β = 90.978(2)° (X = Mo), a = 5.2733(2), b = 12.9032(4), c = 19.2650(6) Å, β = 91.512(3)° (X = W). При 441 °C (молибдат) и 527 °C (вольфрамат) претерпевают размытые фазовые переходы первого рода, после которых их проводимость достигает значений 10^{-3}–10^{-4} См/см.

Ключевые слова: тройные молибдаты и вольфраматы, твердофазный синтез, рентгенография, термические свойства, ионная проводимость

Благодарности: исследование выполнено в соответствии с государственным заданием БИП СО РАН и при частичной поддержке РФФИ (проект № 20-03-00533).

Для цитирования: Спиридонова Т. С., Савина А. А., Кадырова Ю. М., Белых Е. П., Хайкина Е. Г. Новые соединения $Li_3Ba_2Bi_3(XO_4)_8$ (X = Mo, W): синтез и свойства. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2021;23(1): 73–80. https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3306

For citation: Spiridonova T. S., Savina A. A., Kadyrova Yu. M., Belykh E. P., Khaikina E. G. New compounds $Li_3Ba_2Bi_3(XO_4)_8$ (X = Mo, W): synthesis and properties. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2021;23(1): 73–80. https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3306

✉ Спиридонова Татьяна Сергеевна, e-mail: spiridonova-25@mail.ru
© Спиридонова Т. С., Савина А. А., Кадырова Ю. М., Белых Е. П., Хайкина Е. Г., 2021

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

К настоящему времени класс тройных молибдатов насчитывает более 700 представителей, характеризующихся большим стехиометрическим и структурным разнообразием, и принадлежит к наиболее динамично пополняемым группам сложнооксидных соединений, содержащих тетраэдрический анион и три различных катиона. Тройные молибдаты разновалентных металлов не только имеют высокий материаловедческий потенциал, но и благодаря широким возможностям варьирования элементного и количественного составов являются удобными модельными объектами для установления генетических взаимосвязей в ряду состав – структура – свойства вещества – свойства материалов. Значительное место среди них занимает семейство тройных молибдатов состава $Li_3Ba_2R_3(MoO_4)_8$, полученных для всех лантаноидов и иттрия, принадлежащих к структурному типу $BaNd_2(MoO_4)_4$ (пр. гр. $C2/c$, Z = 2) и проявляющих родство с шеелитом. Показано, что эти соединения обладают перспективными люминесцентными, генерационными свойствами [1–3], а также свойствами твердых электролитов [1, 4]. В частности, результаты исследования $Li_3Ba_2R_3(MoO_4)_8$ (R = La, Gd, Y), допированных Eu^{3+}, Tb^{3+}, Er^{3+}, Nd^{3+}, свидетельствуют о перспективности их использования в качестве новых фото-, ИК-люминофоров и лазерных материалов [2, 5–7]. Начиная с 2009 г. стали появляться сообщения о получении тройных вольфраматов лития-бария-лантаноидов, изоформульных и изоструктурных $Li_3Ba_2Ln_3(MoO_4)_8$ и представляющих, как и они, большой не только научный, но и практический интерес [8–17]. Размеры и качество выращенных кристаллов $Li_3Ba_2Ln_3(WO_4)_8$ (Ln = La, Gd, Y) [9–12, 18], допированных ионами Nd^{3+}, Eu^{3+}, Tm^{3+} и др., позволили перейти к детальному исследованию оптико-генерационных характеристик этих новых высокоэффективных лазерных сред. Керамики $Li_3Ba_2La_3(WO_4)_8$: Eu^{3+} [8] и $Li_3Ba_2Gd_3(WO_4)_8$:Tb^{3+} [15] могут найти применение как красный и зеленый люминофоры соответственно.

В настоящей работе методом направленного синтеза по керамической технологии получены первые представители рассматриваемого семейства фаз, содержащие в своем составе отличный от редкоземельного трехвалентный элемент – тройные молибдат и вольфрамат висмута состава $Li_3Ba_2Bi_3(XO_4)_8$ (X = Mo, W), осуществлена первичная характеризация этих соединений и изучены их электрофизические свойства.

2. Экспериментальная часть

В качестве исходных компонентов для синтеза $Li_3Ba_2Bi_3(XO_4)_8$ (X = Mo, W) служили промышленные реактивы Li_2MoO_4, Li_2WO_4, XO_3 (X = Mo, W), Bi_2O_3, $BaMoO_4$, $BaCO_3$ («х.ч.»). $BaWO_4$ получали отжигом стехиометрической смеси $BaCO_3$ и WO_3 (600–850°C, 70 ч), $Bi_2(MoO_4)_3$ – по реакции: $Bi_2O_3 + 3MoO_3 = Bi_2(MoO_4)_3$ (450–500 °C, 50 ч). Средний вольфрамат висмута не существует, во всяком случае, не получается твердофазным путем, о чем свидетельствуют как литературные данные [19], так и наши безуспешные попытки его синтеза. Поэтому исходным компонентом в этом случае служила оксидная смесь Bi_2O_3 и WO_3. AXO_4 (A = Ca, Sr, Cd, Pb; X = Mo, W), необходимые для изучения возможности реализации рассматриваемой структуры в тройных молибдатах и вольфраматах висмута при полной или частичной замене бария на другой двухзарядный катион, получали взаимодействием ACO_3 («х.ч.» и «ч.д.а.») и XO_3 по реакции $ACO_3 + XO_3 = AXO_4 + CO_2$. Режимы синтеза молибдатов: Ca, Pb – 500–650 °C, Sr – 500–750 °C, Cd – 450–500 °C, время прокаливания 50–60 ч; вольфраматов: Ca, Sr – 600–900 °C, Cd – 500–650 °C, Pb – 500–750 °C, время прокаливания 70–80 ч. Однофазность синтезированных препаратов контролировали рентгенографически. Идентификацию соединений осуществляли сравнением с базой данных ICDD PDF-2 [20].

Рентгенофазовый анализ (РФА) проводили на порошковом автоматическом дифрактометре D8 ADVANCE фирмы Bruker (λCuK_α, вторичный монохроматор, шаг сканирования 0.02076°). Параметры элементарных ячеек поликристаллических образцов $Li_3Ba_2R_3(XO_4)_8$ (X = Mo, W) рассчитывали методом подбора изоструктурного соединения. Метрики уточняли методом наименьших квадратов с использованием пакета программ ICDD для подготовки экспериментальных стандартов. В качестве критерия правильности индицирования рентгенограмм применяли критерий Смита–Снайдера F_{30} [21].

Исследования методом дифференциальной сканирующей калориметрии осуществляли на синхронном термоаналитическом комплексе NETZSCH STA 449C, $V_{нагр.(охл.)}$ = 10°/мин.

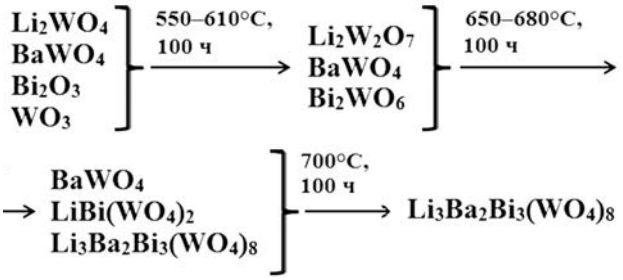
Керамические диски $Li_3Ba_2Bi_3(XO_4)_8$ (X = Mo, W) для изучения ионопроводящих свойств были приготовлены прессованием порошка при 1 кбар и спеканием при 680 (X = Mo) или 730 °C (X = W) в течение 4 ч. Плотность полученных таблеток составляла 90–95 % от теоретических значений. Диски имели диаметр 10 мм и толщину 1.8 мм.

Для изготовления электродов большие поверхности дисков покрывали коллоидной платиной с последующим отжигом при 660 (X = Mo) или 710 °C (X = W) в течение 1 ч. Комплексную электропроводность образцов определяли с помощью измерителя импеданса «Z-1500J» на выбранных частотах от 1 Гц до 1 МГц в диапазоне температур 200–650 °C (X = Mo) и 300–700 °C (X = W) при скоростях нагрева и охлаждения 2 град/мин.

3. Результаты и их обсуждение

В однофазном поликристаллическом состоянии тройной молибдат $Li_3Ba_2Bi_3(MoO_4)_8$ синтезирован отжигом стехиометрических смесей Li_2MoO_4, $BaMoO_4$ и $Bi_2(MoO_4)_3$ при 450–550 °C в течение 150 ч, аналогичный тройной вольфрамат $Li_3Ba_2Bi_3(WO_4)_8$ – 300-часовым прокаливанием Li_2WO_4, $BaWO_4$, Bi_2O_3 и WO_3, взятых в мольном соотношении 3:4:3:9, при 550–700 °C (промежуточная гомогенизация осуществлялась каждые 15–20 ч).

По данным РФА (рис. 1), последовательность химических превращений, протекающих при образовании $Li_3Ba_2Bi_3(WO_4)_8$ из стехиометрической смеси оксидов и средних вольфраматов, может быть проиллюстрирована схемой [22]:



Образование $Li_3Ba_2Bi_3(MoO_4)_8$, скорее всего, также протекает через стадию формирования двойного соединения лития-висмута, но из-за близких температурных интервалов образования промежуточного и конечного продуктов появление в реакционных смесях $LiBi(MoO_4)_2$ зафиксировано не было.

По данным дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), полученные соединения плавятся инконгруэнтно при 756 (X = Mo) и 786 °C (X = W). Рентгенографически в охлажденном плаве молибдата фиксируется присутствие $BaMoO_4$ и $LiBi(MoO_4)_2$, вольфрамата – помимо $BaWO_4$ и $LiBi(WO_4)_2$ еще и Bi_2WO_6.

Рентгенограммы $Li_3Ba_2Bi_3(XO_4)_8$ (X = Mo, W) удовлетворительно индицируются в предположении изоструктурности лантаноидсодержащим аналогам (в случае молибдата $F(30)$ = 217.1 (0.0035;

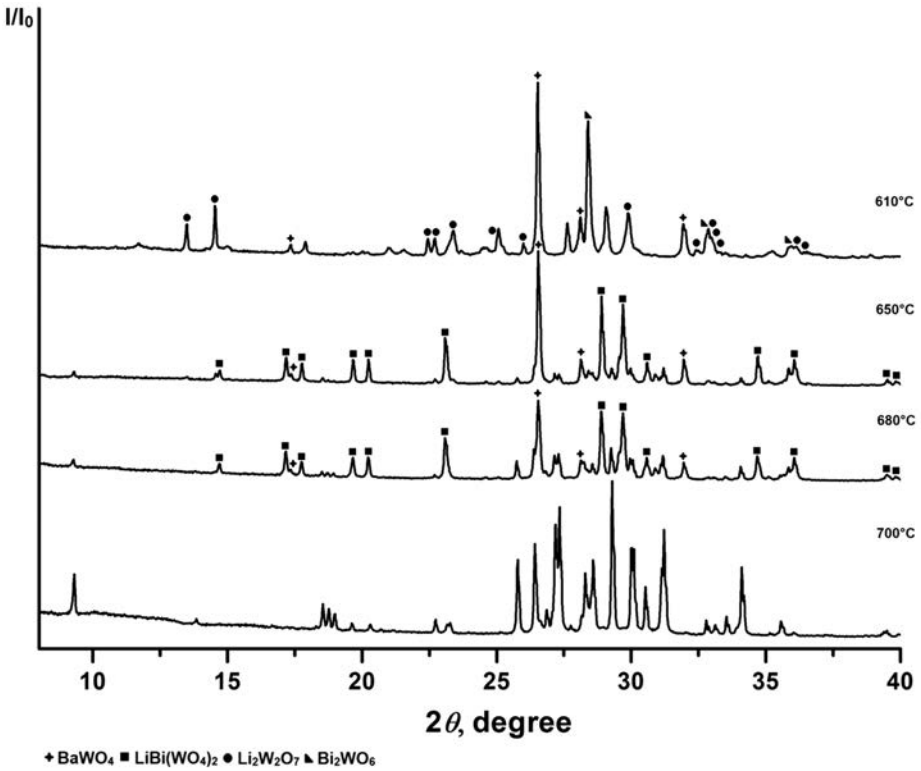


Рис. 1. Рентгенограммы реакционной смеси $3Li_2WO_4 + 4BaWO_4 + 3Bi_2O_3 + 9WO_3$, последовательно отожженной при различных температурах

39), вольфрамата – $F(30) = 162.3$ (0.0047; 39)). Полученные кристаллографические характеристики приведены в табл. 1, результаты индицирования $Li_3Ba_2Bi_3(WO_4)_8$ – в табл. 2.

Исследована возможность реализации подобной структуры в тройных молибдатах и вольфраматах висмута при замене бария на другой двухзарядный катион A^{2+}, однако попытки синтеза $Li_3A_2Bi_3(XO_4)_8$ (A = Ca, Sr, Cd, Pb) успехом не увенчались. При частичном замещении бария стронцием, кадмием и свинцом в однофазном состоянии получены составы $Li_3Ba_{1.9}A_{0.1}Bi_3(MoO_4)_8$. Предел растворимости в аналогичных вольфраматах составил менее 5 %.

Таблица 1. Кристаллографические характеристики $Li_3Ba_2Bi_3(XO_4)_8$ (X = Mo, W), пр. гр. $C2/c$, Z = 2

Соединение	Параметры элементарной ячейки				V, Å^3
	a, Å	b, Å	c, Å	β,°	
$Li_3Ba_2Bi_3(MoO_4)_8$	5.2798(1)	12.8976(4)	19.2272(5)	90.978(2)	1309.12
$Li_3Ba_2Bi_3(WO_4)_8$	5.2733(2)	12.9032(4)	19.2650(6)	91.512(3)	1310.38

Таблица 2. Результаты индицирования рентгенограммы $Li_3Ba_2Bi_3(WO_4)_8$

$2\theta_{эксп}$,°	I/I_0	$d_{эксп}$, Å	h	k	l	$\Delta = 2\theta_{эксп} - 2\theta_{выч}$,°	$2\theta_{эксп}$,°	I/I_0	$d_{эксп}$, Å	h	k	l	$\Delta = 2\theta_{эксп} - 2\theta_{выч}$,°
9.191	31	9.6140	0	0	2	−0.014	35.032	1	2.5593	−2	0	2	−0.002
13.723	3	6.4475	0	2	0	−0.009	35.293	1	2.5410	−1	3	5	−0.004
16.539	2	5.3555	0	2	2	−0.013	35.447	16	2.5303	0	2	7	−0.006
18.163	2	4.8802	1	1	0	+0.001	35.527	1	2.5248	2	0	2	−0.008
18.417	18	4.8134	0	0	4	−0.004	35.900	2	2.4994	1	3	5	−0.003
18.637	14	4.7571	−1	1	1	−0.004	36.810	1	2.4397	2	2	0	−0.005
18.857	11	4.7021	1	1	1	−0.004	37.084	1	2.4223	−1	1	7	+0.004
19.501	5	4.5482	0	2	3	−0.010	37.322	1	2.4074	0	0	8	+0.001
20.184	5	4.3958	−1	1	2	−0.002	38.601	1	2.3305	−1	3	6	−0.014
20.592	1	4.3097	1	1	2	−0.005	38.814	1	2.3182	−1	5	0	+0.007
22.601	10	3.9309	−1	1	3	−0.003	39.056	1L	2.3044	−1	5	1	+0.000
23.032	6	3.8583	0	2	4	−0.002	39.168	2	2.2981	1	5	1	+0.000
23.148	8	3.8392	1	1	3	−0.004	39.268	3	2.2924	1	3	6	−0.006
25.650	66	3.4701	−1	1	4	+0.002	39.382	5	2.2861	2	0	4	−0.012
26.298	57	3.3861	1	1	4	−0.001	39.819	2	2.2620	2	2	3	−0.010
26.723	16	3.3332	−1	3	0	0.005	39.945	2	2.2551	0	2	8	−0.005
26.943	9	3.3065	0	2	5	−0.005	41.030	1	2.1980	−2	2	4	−0.004
27.059	86	3.2926	−1	3	1	−0.004	41.228	1	2.1879	−1	5	3	−0.006
27.219	100	3.2736	1	3	1	−0.009	41.384	2	2.1800	−1	1	8	−0.003
27.639	8	3.2248	0	4	0	−0.009	41.554	1L	2.1714	1	5	3	−0.011
28.032	11	3.1804	0	4	1	−0.009	41.879	2	2.1553	2	2	4	+0.000
28.172	51	3.1650	−1	3	2	−0.006	41.975	2	2.1506	0	6	0	+0.002
28.464	45	3.1331	1	3	2	+0.000	42.245	1L	2.1375	0	6	1	+0.006
29.167	97	3.0592	−1	1	5	−0.007	42.946	2	2.1042	1	3	7	−0.005
29.880	63	2.9878	1	1	5	−0.003	43.041	1	2.0998	0	6	2	+0.021
29.982	28	2.9779	−1	3	3	−0.002	43.083	3	2.0979	−1	5	4	−0.002
30.402	26	2.9377	1	3	3	−0.001	43.158	1	2.0944	0	4	7	+0.024
31.001	47	2.8823	0	4	3	−0.001	43.378	2	2.0843	−2	2	5	−0.001
31.097	61	2.8736	0	2	6	−0.001	44.391	25	2.0390	0	6	3	−0.003
32.998	8	2.7123	−1	1	6	+0.000	44.584	23	2.0306	0	2	9	−0.008
33.411	14	2.6797	0	4	4	−0.003	44.740	2	2.0239	2	4	1	−0.033
33.781	5	2.6512	1	1	6	−0.012	45.180	12	2.0052	−2	4	2	+0.005
33.985	61	2.6357	2	0	0	+0.000	45.395	2	1.9962	−1	5	5	+0.001

Окончание табл 2

$2\theta_{эксп}$,°	I/I_0	$d_{эксп}$, Å	h	k	l	$\Delta = 2\theta_{эксп} - 2\theta_{выч}$,°
45.581	15	1.9885	2	4	2	+0.001
45.881	3	1.9762	1	5	5	+0.009
46.136	21	1.9659	−2	2	6	+0.004
46.190	26	1.9637	0	6	4	+0.004
46.363	25	1.9568	−2	4	3	+0.003
46.948	22	1.9338	2	4	3	+0.001
47.077	2	1.9288	0	4	8	−0.014
47.147	9	1.9261	0	0	10	+0.006
47.311	17	1.9198	2	2	6	−0.006
48.018	6	1.8931	−2	4	4	+0.001
48.116	4	1.8895	−1	5	6	+0.000
48.447	3	1.8774	0	6	5	−0.008
48.680	5	1.8689	1	5	6	+0.003
48.771	7	1.8657	2	4	4	+0.004
49.270	11	1.8479	−2	2	7	−0.003
49.347	11	1.8452	0	2	10	−0.004
50.249	1	1.8142	−1	3	9	−0.006
50.481	9	1.8064	−1	1	10	−0.003
50.565	10	1.8036	2	2	7	−0.005
51.066	1	1.7871	1	3	9	−0.001
51.198	25	1.7828	−1	5	7	−0.001
51.391	11	1.7765	1	1	10	−0.003
51.829	24	1.7625	1	5	7	+0.000
52.069	2	1.7550	2	0	8	+0.012
52.558	22	1.7398	1	7	0	−0.007
52.746	8	1.7340	−1	7	1	−0.008
52.826	7	1.7316	1	7	1	+0.000
53.373	4	1.7151	−1	7	2	+0.008
53.558	2	1.7096	1	7	2	−0.001
53.665	2	1.7065	2	4	6	−0.004
54.601	1	1.6794	−1	3	10	−0.007
54.727	1	1.6759	1	7	3	+0.005
55.063	2	1.6664	−2	6	0	+0.005
55.270	7	1.6607	−1	1	11	−0.007
55.526	1	1.6536	0	4	10	0.002
55.627	8	1.6509	−3	1	4	−0.012
55.832	3	1.6453	−2	6	2	−0.045
56.021	2	1.6402	−1	7	4	−0.030
56.133	1	1.6372	2	6	2	−0.005
56.208	5	1.6352	1	1	11	−0.004
56.460	8	1.6285	−2	2	9	−0.006
56.557	2	1.6259	−3	3	0	−0.029
56.627	11	1.6241	3	1	4	+0.009
56.810	4	1.6193	−2	6	3	−0.006
56.869	7	1.6177	3	3	1	+0.006
57.142	6	1.6106	−3	3	2	+0.009
57.309	4	1.6063	2	6	3	+0.000
57.464	8	1.6024	−3	1	5	+0.002
57.651	4	1.5976	3	3	2	+0.003
57.965	5	1.5897	2	2	9	+0.002
58.112	2	1.5860	−3	3	3	−0.001
58.229	7	1.5831	−2	6	4	+0.013
58.287	14	1.5817	−1	5	9	+0.011
58.557	2	1.5750	−2	0	10	+0.006
58.659	4	1.5725	−2	4	8	−0.007
58.727	4	1.5709	3	1	5	−0.013
58.893	13	1.5668	2	6	4	+0.011
59.043	10	1.5632	1	5	9	+0.000
59.148	1	1.5607	−1	3	11	+0.002
59.302	1	1.5570	0	2	12	−0.016
59.704	2	1.5475	−3	1	6	+0.001
59.972	1	1.5412	2	4	8	−0.006
60.070	3	1.5389	0	4	11	0.008
60.210	3	1.5357	−1	1	12	−0.001
60.459	7	1.5300	−2	2	10	+0.000
60.887	1	1.5202	2	6	5	+0.006
61.040	1	1.5168	0	6	9	−0.003
61.181	2	1.5136	1	1	12	+0.001
62.057	7	1.4943	2	2	10	+0.013
62.150	1	1.4923	−2	4	9	+0.005
62.274	1	1.4897	−1	5	10	−0.005
62.368	5	1.4876	0	8	5	−0.004
62.465	1	1.4856	3	3	5	+0.000
63.061	1	1.4729	1	5	10	+0.004
63.220	1L	1.4696	2	6	6	+0.035
63.908	2	1.4555	−1	3	12	+0.000
64.135	1	1.4508	−3	5	1	+0.008
64.475	1L	1.4440	0	2	13	+0.009
64.608	8	1.4414	0	8	6	+0.010
64.832	6	1.4369	0	4	12	+0.003

Изучены ионопроводящие свойства полученных соединений. Установлено, что $Li_3Ba_2Bi_3(XO_4)_8$ претерпевают фазовые превращения при 441 (X = Mo) и 527 °C (X = W), которые, исходя из наличия температурных гистерезисов на зависимостях lg (σT) – ($10^3/T$) в цикле нагревание – охлаждение, можно интерпретировать как размытые фазовые переходы первого рода. После перехода проводимость $Li_3Ba_2Bi_3(MoO_4)_8$ достигает значений $3.5\cdot10^{-3}$ См/см (640 °C) при E_a = 1.0 эВ, $Li_3Ba_2Bi_3(WO_4)_8$ – $2.7\cdot10^{-4}$ См/см (700 °C) при E_a = 0.8 эВ. Температурная зависимость электропроводности $Li_3Ba_2Bi_3(MoO_4)_8$ в качестве примера представлена на рис. 2. На рис. 3 приведена полученная взаи-

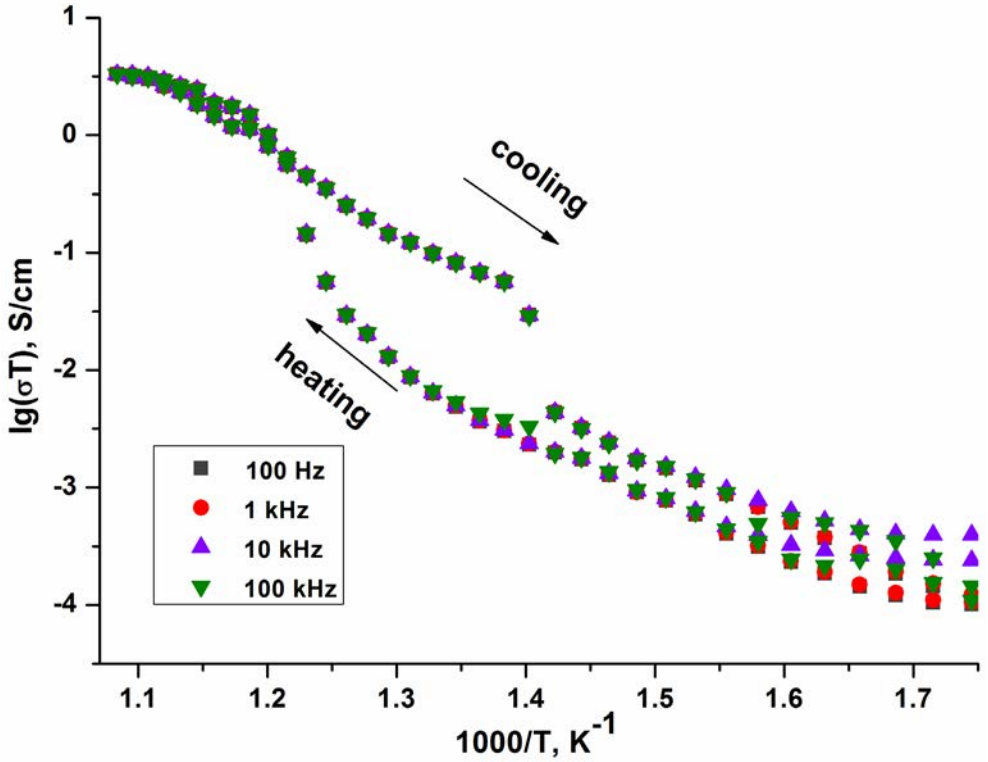
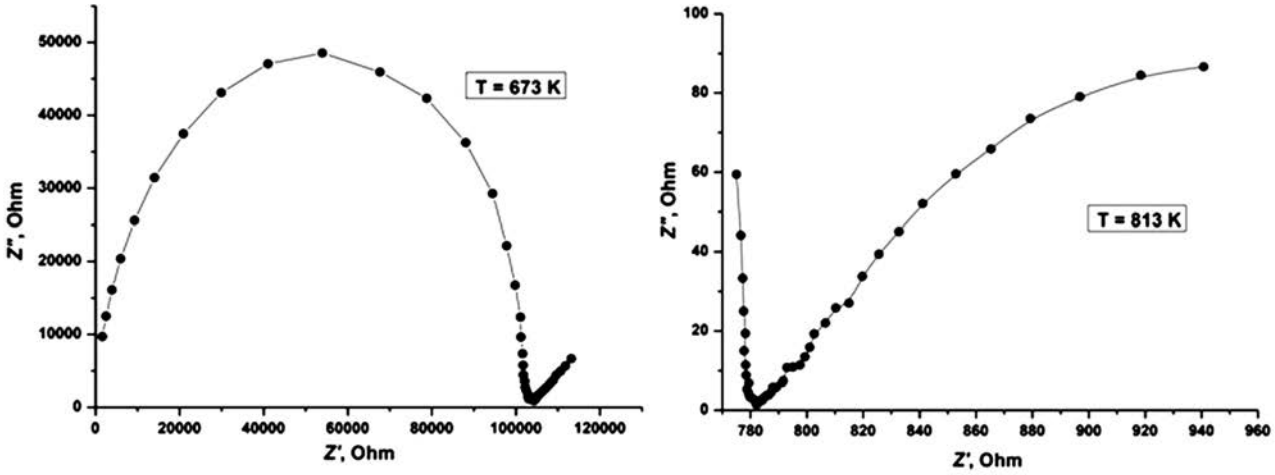


Рис. 2. Температурная зависимость проводимости $Li_3Ba_2Bi_3(MoO_4)_8$



а *б*

Рис. 3. Годограф импеданса $Li_3Ba_2Bi_3(MoO_4)_8$ при 673 К (а) и 813 К (б)

мозависимость активной и реактивной составляющих электрического импеданса для этого соединения (при температурах до и после фазового перехода), которая является типичной для ионных проводников с блокирующими электродами.

4. Заключение

Таким образом, получены первые соединения семейства $Li_3Ba_2R_3(XO_4)_8$ (X = Mo, W) со структурой $BaNd_2(MoO_4)_4$ (пр. гр. $C2/c$, Z = 2), в состав которых входит отличный от редкоземельного элемента трехвалентный металл. Установлена последовательность химических превращений, протекающих при синтезе тройного вольфрамата лития, бария, висмута из стехиометрической смеси средних вольфраматов и оксидов. Определены кристаллографические и термические характеристики $Li_3Ba_2Bi_3(XO_4)_8$ (X = Mo,

W), изучены их ионопроводящие свойства. Показано, что тройные молибдаты и вольфраматы $Li_3A_2Bi_3(XO_4)_8$ (A = Ca, Sr, Cd, Pb; X = Mo, W) со структурой $BaNd_2(MoO_4)_4$ не образуются.

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. Кожевникова Н. М., Мохосоев М. В. *Тройные молибдаты*. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета; 2000. 298 с.

2. Кожевникова Н. М., Корсун В. П., Мохосоев М. В., Алексеев Ф. П. Тройные молибдаты лития, бария и редкоземельных элементов. *Журнал неорганической химии*. 1990;35(4): 835–838.

3. Хайкина Е. Г., Базарова Ж. Г., Солодовников С. Ф., Клевцова Р. Ф. Тройные молибдаты как основа новых перспективных сложнооксидных материалов. *Инженерная экология*. 2011;1: 48–54.

4. Кожевникова Н. М., Копылова О. А. Синтез и электрофизические свойства тройных молибдатов $Li_3Ba_2R_3(MoO_4)_8$, R – La–Lu, Y. *Журнал прикладной химии*. 2011;84(3): 392–396. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43809567

5. Кожевникова Н. М. Синтез и люминесцентные свойства люминофора $Li_3Ba_2La_3(MoO_4)_8$: Er^{3+} шеелитоподобной структуры. *Неорганические материалы*. 2019;55(6): 650–654. https://doi.org/10.1134/S0002337X19060095

6. Кожевникова Н. М., Батуева С. Ю. Синтез и исследование люминесцентных свойств люминофора $Li_3Ba_2Y_3(MoO_4)_8$: Tb^{3+} слоистой шеелитоподобной структуры. *Неорганические материалы*. 2019;55(11): 1230–1234. https://doi.org/10.1134/S0002337X19110071

7. Кожевникова Н. М., Батуева С. Ю. АП-конверсионный люминофор в системе Li_2MoO_4–$BaMoO_4$–$Y_2(MoO_4)_3$, легированный эрбием. *Неорганические материалы*. 2020;56(3): 299–304. https://doi.org/10.31857/S0002337X20030082

8. Hu J., Gong X., Huang J., Chen Y., Lin Y., Luo Z., Huang Y. Near ultraviolet excited Eu^{3+} doped $Li_3Ba_2La_3(WO_4)_8$ red phosphors for white light emitting diodes. *Optical Materials Express*. 2016;6(1): 181–190. https://doi.org/10.1364/OME.6.000181

9. Li H., Zhang L., Wang G. Growth, structure and spectroscopic characterization of a new laser crystals Nd^{3+}: $Li_3Ba_2Gd_3(WO_4)_8$. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009;478: 484–488. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.11.079

10. Xiao B., Lin Z., Zhang L., Huang Y., Wang G. Growth, thermal and spectral properties of Er^{3+}-doped and Er^{3+}/Yb^{3+}-codoped $Li_3Ba_2La_3(WO_4)_8$ crystals. *PLoS ONE*. 2012;7(7): e40631. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040631

11. Pan Y., Chen Y., Lin Y., Gong X., Huang J., Luo Z., Huang Y. Structure, spectral properties and laser performance of Tm^{3+}-doped $Li_3Ba_2La_3(WO_4)_8$ crystal. *CrystEngComm*. 2012;14: 3930. https://doi.org/10.1039/C2CE25190F

12. Li H., Lin Z., Zhang L., Huang Y., Wang G. Spectroscopic characteristics of Yb^{3+}-doped $Li_3Ba_2Y_3(WO_4)_8$ crystal. *Journal of Luminescence*. 2012;132(6): 1507–1510. https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2012.01.050

13. Hu J., Gong X., Huang J., Chen Y., Lin Y., Luo Z., Huang, Y. Near ultraviolet excited Eu^{3+} doped $Li_3Ba_2La_3(WO_4)_8$ red phosphors for white light emitting diodes. *Optical Materials Express*. 2016;6(1): 181. https://doi.org/10.1364/OME.6.000181

14. Zeng X.-L., Zhang J.-Y., Chen D.-G., Huang F. Crystal structure and spectroscopic sroperties of a new ternary tungstate $Li_3Ba_2Ho_3(WO_4)_8$. *Chinese Journal of Structural Chemistry*. 2013;1: 33–38. Available at: http://caod.oriprobe.com/articles/32299408/Crystal_Structure_and_Spectroscopic_Properties_of_a_New_Ternary_Tungst.htm

15. Guo W. L., Jiao Y. T., Wang P. S., Liu Q., Liu S., Hou F. Energy transfer and spectroscopic characterization of new green emitting $Li_3Ba_2Gd_3(WO_4)_8$:Tb^{3+} phosphor. Solid State Phenomena. 2018;281: 686–691. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.281.686

16. Wei B., Liu Z., Xie C., Yang S., Tang W., Gu A., Wong W.-T., Wong K.-L. Fast synthesis of red $Li_3BaSrLn_3(WO_4)_8$:Eu^{3+} phosphors for white LEDs under near-UV excitation by a microwave-assisted solid state reaction method and photoluminescence studies. *Journal of Materials Chemistry C*. 2015;3(47): 12322. https://doi.org/10.1039/c5tc03165f

17. Singh K., Vaidyanathan S. Synthesis and optical properties of new red emitting phosphor $Li_3BaSrGd_{3-x}Eu_x(MO_4)_8$ for white LEDs. *Chemistry Select*. 2017;1(17): 5448–5462. https://doi.org/10.1002/slct.201601183

18. Li H., Wang G., Zhang L., Huang Y., Wang G. Growth and structure of Nd^{3+}-doped $Li_3Ba_2Y_3(WO_4)_8$ crystal with a disorder structure. *CrystEngComm*. 2010;12(4): 1307–1310. https://doi.org/10.1039/B914641E

19. *Диаграммы состояния систем тугоплавких оксидов: Справочник. Вып. 5. Двойные системы. Ч. 2* / Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова. Л.: Наука; 1986. 359 с.

20. ICDD PDF-2 Data Base, Cards ## 00-053-0670, 00-029-0193, 01-070-1396, 01-079-2006, 01-085-0588, 01-085-1267, 01-085-0586, 00-007-0209, 00-044-1486, 00-041-1431, 00-008-0490, 00-014-0676, 00-019-0708

21. Smith G. S., Snyder R. L. F_N: A criterion for rating powder diffraction patterns and evaluating the reliability of powder-pattern indexing. *Journal of Applied Crystallography*. 1979;12(1): 60–65. https://doi.org/10.1107/s002188987901178x

22. ICDD PDF-2 Data Base, Cards ## 00-051-1725, 01-070-0869, 00-039-0256

Информация об авторах

Спиридонова Татьяна Сергеевна, ведущий инженер лаборатории оксидных систем Байкальского института природопользования СО РАН (БИП СО РАН), Улан-Удэ, Российская Федерация; e-mail: spiridonova-25@mail.ru. ORCID iD: https://orcid.org/0000-0001-7498-5103.

Савина Александра Александровна, к. х. н., н. с. лаборатории оксидных систем Байкальского института природопользования СО РАН (БИП СО РАН), Улан-Удэ и н. с., Сколковский институт науки и технологий, Москва, Российская Федерация; e-mail: a.savina@skoltech.ru. ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-7108-8535.

Кадырова Юлия Монировна, к. х. н., н. с. лаборатории оксидных систем Байкальского института природопользования СО РАН (БИП СО РАН) и старший преподаватель кафедры общей и аналитической химии химического факультета Бурятского государственного университета имени Доржи Банзарова, Улан-Удэ, Российская Федерация; e-mail: yliychem@yandex.ru. ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-0106-8096.

Белых Елена Петровна, магистрант химического факультета Бурятского государственного университета имени Доржи Банзарова, Улан-Удэ, Российская Федерация; e-mail: elena.belych1996@yandex.ru

Хайкина Елена Григорьевна, д. х. н., заведующий лабораторией оксидных систем Байкальского института природопользования СО РАН (БИП СО РАН) и профессор кафедры неорганической и органической химии химического факультета Бурятского государственного университета имени Доржи Банзарова, Улан-Удэ, Российская Федерация; e-mail: egkha@mail.ru. ORCID iD: https://orcid.org/0000-0003-2482-9297.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 24.12.2020; одобрена после рецензирования 15.01.2021; принята к публикации 15.03.2021; опубликована онлайн 25.03.2021.