

УДК 546.776

СИНТЕЗ АП-КОНВЕРСИОННОГО ЛЮМИНОФОРА В СИСТЕМЕ K_2MoO_4 – $BaMoO_4$ – $Lu_2(MoO_4)_3$, ЛЕГИРОВАННОГО ЭРБИЕМ

© 2021 г. Н. М. Кожевникова*

Байкальский институт природопользования СО Российской академии наук,
ул. Сахьяновой, 6, Улан-Удэ, 670047 Россия

*e-mail: nicas@binm.ru

Поступила в редакцию 08.06.2020 г.

После доработки 08.09.2020 г.

Принята к публикации 09.09.2020 г.

Изучены фазовые отношения в субсолидусной области системы K_2MoO_4 – $BaMoO_4$ – $Lu_2(MoO_4)_3$ методами рентгенографического и дифференциального термического анализа, проведена триангуляция системы. Синтезирован тройной молибдат $KBaLu(MoO_4)_3$, который кристаллизуется в моноклинной шеелитоподобной структуре (пр.гр. $P2_1/n$). Легированием ионами Er^{3+} $KBaLu(MoO_4)_3$ получен ап-конверсионный люминофор, обладающий эффективной антистоксовой люминесценцией в области 530–850 нм при возбуждении ИК-излучением ($\lambda_{возб} = 977$ нм). Синтезированный люминофор исследован методами рентгенографии, дифференциального термического анализа и колебательной спектроскопии.

Ключевые слова: фазовые равновесия, тройной молибдат, люминесценция ионов эрбия

DOI: 10.31857/S0002337X21010097

ВВЕДЕНИЕ

Молибдаты и вольфраматы, содержащие щелочноземельные и редкоземельные элементы, структуры которых производны от шеелита, обладая низким коэффициентом термического расширения, высокой химической и термической устойчивостью, находят широкое применение в таких областях, как квантовая электроника, волоконная оптика, лазерные устройства [1–6].

Поиск перспективных соединений и создание на их основе полифункциональных люминофоров, обладающих интенсивной люминесценцией при УФ- и антистоксовой люминесценцией при ИК-возбуждении, является актуальной задачей для материаловедения. Эффективным способом воздействия на люминесцентные свойства материалов является легирование их ионами Er^{3+} , способными поглощать ИК-излучение и преобразовывать его в видимую антистоксовую люминесценцию [7–17].

Обширность поля кристаллизации индивидуальных соединений и твердых растворов с шеелитоподобной структурой определяется возможностью изо- и гетеровалентных замещений щелочноземельных элементов катионами различной природы и размеров, которые заселяют кристаллографические позиции каркаса структуры и ее

полости. Широкий изоморфизм катионов различной природы приводит к дисбалансу зарядов в структуре шеелита вследствие геометрических особенностей расположения ближайших полиэдров, возникновения локальных и кооперативных искажений и позволяет регулировать свойства фаз. Такие особенности строения шеелитоподобных молибдатов определяют перспективы их использования в качестве люминесцентных и лазерных материалов, химических сенсоров, ионообменных материалов, что способствует интенсивным теоретическим и экспериментальным исследованиям этой группы неорганических соединений [1–6, 13–15].

Среди тройных молибдатов, содержащих щелочноземельные и редкоземельные элементы, известны ряды кальциевых, стронциевых соединений $M(Ca)SrLn(MoO_4)_3$ ($M = K, Rb, Cs$; $Ln = Nd, Sm, Eu, Gd$) [1, 6, 14]. Возможность других комбинаций катионов металлов не была проанализирована.

Цель настоящей работы – изучение фазовых равновесий в субсолидусной области системы K_2MoO_4 – $BaMoO_4$ – $Lu_2(MoO_4)_3$, синтез ап-конверсионного люминофора на основе тройного молибдата $KBaLu(MoO_4)_3:Er^{3+}$ с шеелитоподоб-

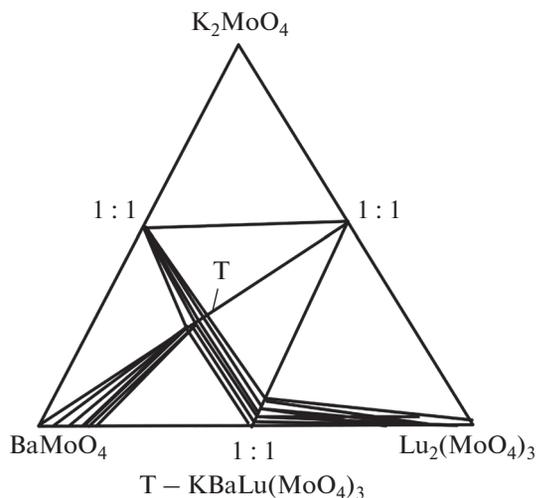


Рис. 1. Фазовые отношения в системе K_2MoO_4 – $BaMoO_4$ – $Lu_2(MoO_4)_3$ при $800^\circ C$.

ной структурой и изучение его люминесцентных и физико-химических свойств.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исходными компонентами для изучения фазообразования в системе K_2MoO_4 – $BaMoO_4$ – $Lu_2(MoO_4)_3$ служили предварительно синтезированные твердофазным способом K_2MoO_4 , $BaMoO_4$ и $Lu_2(MoO_4)_3$ из K_2CO_3 , $BaCO_3$, Lu_2O_3 и MoO_3 в интервале температур 400 – $650^\circ C$ с многократными промежуточными перетираниями через каждые 20 – 30 ч. Время прокаливания при каждой температуре составляло 100 – 120 ч. После обжига образцы медленно охлаждали вместе с печью. Неравновесные образцы отжигали дополнительно, равновесие считали достигнутым, если фазовый состав образцов оставался неизменным при двух последовательных отжигах. Продукты синтеза идентифицировали методами рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре D8 Advance фирмы Bruker AXS (CuK_α -излучение) в области углов $2\theta = 10^\circ$ – 70° , точность определения углов составила 0.021° . Для идентификации фаз использовали базу данных ICDD 2003 г. Расчет рентгенограмм проводили с использованием программ “Рентген”.

Колебательные спектры поликристаллических образцов $KBaLu(MoO_4)_3$ зарегистрированы на спектрометре Bruker FT-IR и спектрометре Spexord M-80 с использованием для возбуждения лазера с излучением в ближней ИК-области 1.06 мкм (геометрия обратного рассеяния, разрешение 3 – 5 cm^{-1}). Образцы готовили в виде суспензии

в вазелиновом масле на полиэтиленовой подложке и таблеток с KBr. Для приготовления изотопозамещенных по молибдену образцов использовали оксиды $^{92}MoO_3$ и $^{100}MoO_3$ с содержанием основного изотопа не менее 95% .

Дифференциальный термический анализ проводили на дериватографе ОД-103 фирмы МОМ, скорость подъема температуры $10^\circ C/мин$, навеска 0.3 – 0.4 г.

Для введения различных концентраций иона-активатора оксид лютеция в $KBaLu(MoO_4)_3$ эквимолярно замещался на оксид эрбия. Таким способом были получены образцы люминофора, содержащие 1 – 6 мол. % Er_2O_3 .

Спектры люминесценции $KBaLu_{0.95}Er_{0.05}(MoO_4)_3$ при УФ-возбуждении ($\lambda_{возб} = 365$ нм) получены на спектрофлуориметре CM 2203 (Solar, Беларусь), источник излучения – ксеноновая дуговая лампа высокого давления ДКсШ 150-1М. Для возбуждения люминесценции в ИК-диапазоне использовали InGaAs-лазерный диод, $\lambda_{возб} = 977$ нм. Спектры люминесценции измерены на спектрометре Ocean Optics QE 65000.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Взаимодействие в системе K_2MoO_4 – $BaMoO_4$ – $Lu_2(MoO_4)_3$ изучено методом перекрещивающихся разрезов в области 450 – $800^\circ C$. Исследование системы K_2MoO_4 – $BaMoO_4$ – $Lu_2(MoO_4)_3$ проведено в две стадии. Первоначально изучали фазовый состав точек пересечения разрезов, исходящих из средних и двойных молибдатов, образующихся в ограничивающих двойных системах. На второй стадии изучали выявленные квазибинарные до $800^\circ C$ разрезы, что позволило провести триангуляцию системы. На рис. 1 представлены фазовые отношения в системе K_2MoO_4 – $BaMoO_4$ – $Lu_2(MoO_4)_3$, равновесия с участием расплава не показаны.

В ограничивающей двойной системе K_2MoO_4 – $Lu_2(MoO_4)_3$ установлено образование молибдатов состава $1:1$, $5:1$, кристаллизующихся в различных структурных типах [1, 6, 13]. При взаимодействии K_2MoO_4 с $BaMoO_4$ зафиксировано образование двойного молибдата $K_2Ba(MoO_4)_2$, обладающего структурой пальмиерита. В системе $BaMoO_4$ – $Lu_2(MoO_4)_3$ синтезирован молибдат $BaLu_2(MoO_4)_4$, принадлежащий к слоистой шеелитоподобной структуре с моноклинным искажением (пр. гр. $C2/c$) [1, 6].

Наиболее подробно (через 1 – 2 мол. %) изучено взаимодействие на разрезе $BaMoO_4$ – $KLu(MoO_4)_2$, где установлено образование тройного молибдата

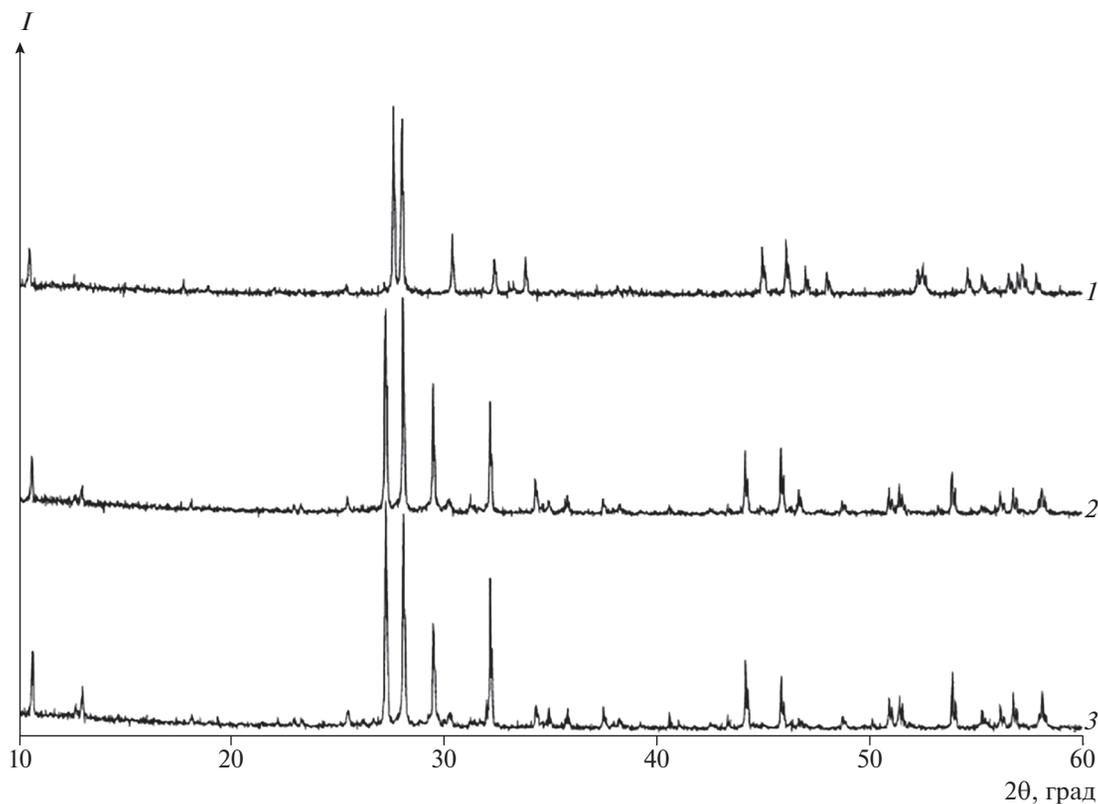


Рис. 2. Рентгенограммы α -KSm(MoO₄)₂ (1), KBaSm(MoO₄)₃ (2), KBaLu(MoO₄)₃ (3).

KBaLu(MoO₄)₃ при 650–750°C. Для достижения равновесия необходимо прокалывать реакционные смеси в течение 140–160 ч с промежуточной гомогенизацией.

Для системы K₂MoO₄–BaMoO₄–Lu₂(MoO₄)₃ квазибинарными разрезами являются: KLu(MoO₄)₂–KBaLu(MoO₄)₃, K₂Ba(MoO₄)₂–KBaLu(MoO₄)₃, K₂Ba(MoO₄)₂–KLu(MoO₄)₂, BaMoO₄–KBaLu(MoO₄)₃, BaLu₂(MoO₄)₄–KBaLu(MoO₄)₃, BaLu₂(MoO₄)₄–KLu(MoO₄)₂. Методом РФА установлено, что в тройном молибдате KBaLu(MoO₄)₃ растворяется 3 мол. % BaMoO₄, растворимость тройного молибдата в BaMoO₄ составляет 12 мол. %. Фазовые отношения в системах K₂Ba(MoO₄)₂–KBaLu(MoO₄)₃ и BaLu₂(MoO₄)₄–KBaLu(MoO₄)₃ характеризуются двухфазными областями, системы эвтектические с областью гомогенности тройной фазы до 2 мол. %. Растворимость KLu(MoO₄)₂ в KBaLu(MoO₄)₃ составляет 4.0 мол. %, в KLu(MoO₄)₂ растворяется не более 1.5 мол. % KBaLu(MoO₄)₃. Разрез K₂Ba(MoO₄)₂–K₅Lu(MoO₄)₄ не является квазибинарным, так как при температуре 800°C он нестабилен из-за термической неустойчивости фазы K₅Lu(MoO₄)₄, которая плавится инконгруэнтно

при 690°C. Разрез K₂Ba(MoO₄)₂–KLu(MoO₄)₂ является простым эвтектическим без заметной растворимости компонентов.

Рентгенографическое исследование показало, что тройной молибдат KBaLu(MoO₄)₃ имеет шеелитоподобную структуру с моноклинным искажением и проявляет большое сходство в расположении наиболее интенсивных линий с рентгенограммой α -KSm(MoO₄)₂, что свидетельствует об общности структурных мотивов тройного и двойного молибдатов. Для сравнения на рис. 2 приведены рентгенограммы α -KSm(MoO₄)₂, KBaSm(MoO₄)₃ и KBaLu(MoO₄)₃. Рентгенограммы KBaSm(MoO₄)₃ и KBaLu(MoO₄)₃ проиндексированы в моноклинной сингонии, пр. гр. $P2_1/n$, $Z = 9$. В табл. 1 приведены результаты индексирования рентгенограммы KBaLu(MoO₄)₃. Соединения изоструктурны между собой, а также двойному молибдату α -KSm(MoO₄)₂, и принадлежат к структурному типу моноклинно искаженного шеелита. Структуру KBaLu(MoO₄)₃ можно рассматривать как продукт гетеровалентного замещения щелочноземельного элемента в структуре шеелита по схеме: $2Ba = K^+ + Lu^{3+}$. Параметры кристаллической решетки KBaLu(MoO₄)₃ равны: $a = 12.180(3) \text{ \AA}$, $b =$

Таблица 1. Результаты индцирования рентгенограммы $\text{KBaLu}(\text{MoO}_4)_3$

$I, \%$	$d, \text{Å}$	$10^{-4}/a_{\text{эксп}}^2$	h	k	l	$10^{-4}/a_{\text{БЫЧ}}^2$
3	3.4143200	141.22	0	0	2	141.20
3	3.9204100	413.00	1	0	3	411.70
5	3.8660300	669.00	1	1	4	669.30
5	3.3743500	873.00	3	1	2	876.70
100	3.2349100	926.70	2	2	3	923.00
95	3.2078300	971.80	2	2	1	970.50
5	3.0446100	1078.30	3	1	3	1077.40
46	3.0259400	1092.20	2	3	2	1092.90
8	2.7323600	1291.30	3	2	3	1292.60
			0	4	2	1292.60
70	2.6437600	1423.60	3	1	$\bar{5}$	1424.00
13	2.6149100	1463.00	1	1	6	1463.40
10	2.5742600	2509.00	2	1	$\bar{6}$	1508.50
			1	4	$\bar{3}$	1507.60
4	2.5396500	1561.50	1	4	3	1560.20
4	2.5254400	1563.00	3	2	4	1566.90
2	2.4270900	1697.60	3	1	5	1696.90
12	2.4031700	1724.40	2	2	$\bar{6}$	1724.00
2	2.3313600	1763.40	5	1	0	1763.40
3	2.3739500	1774.30	5	0	1	1773.80
6	2.2143700	2039.40	3	0	6	2037.70
2	2.1270200	2210.40	4	1	5	2212.20
6	2.0533000	2370.70	5	2	$\bar{4}$	2363.90
7	2.0389600	2405.30	3	5	0	2404.00
31	1.9962100	2509.50	3	4	$\bar{5}$	2503.30
1	1.9653000	2539.10	2	4	$\bar{6}$	2538.10
20	1.9493300	2630.20	4	1	6	2626.40
1	1.9317200	2679.90	1	6	$\bar{1}$	2673.20
8	1.8364300	2310.10	3	2	7	2310.10
			1	6	2	2810.10
13	1.7997800	3087.20	4	5	$\bar{3}$	3033.40
12	1.7367700	3132.30	4	1	$\bar{3}$	3133.90
			7	1	0	3337.40
6	1.6932900	3467.20	0	6	5	3466.70
8	1.6666900	3599.90	5	0	$\bar{8}$	3601.10
7	1.6420600	3703.70	1	7	$\bar{2}$	3703.60
			4	3	$\bar{8}$	3703.20
15	1.6065000	3374.70	5	5	$\bar{4}$	3376.00
13	1.6032100	3390.60	7	0	$\bar{5}$	3396.90
			7	1	3	3339.10

Таблица 2. Частоты колебаний в КР- и ИК-спектрах $\text{KBaLu}(\text{MoO}_4)_3$, BaMoO_4

v, cm^{-1}								Отнесение
$\text{KBaLu}(\text{MoO}_4)_3$		$\text{KBaSm}(\text{MoO}_4)_3$		$\alpha\text{-KSm}(\text{MoO}_4)_2$		BaMoO_4		
КР	ИК	КР	ИК	КР	ИК	КР	ИК	
932	934	934		944	925	981		v1
917	912	919	915	929				
889		895		888				
858	855	867		869	845			
835		838	840	840		838	830	v3
813		812		815				
802	800		800	803		792		
772	758	774	760	795	795			
742		746		767	760			
	680		682		682			
	474				455			
			417		417	360	371	
384	385	385	386	383	386	346		
362	353	364	352	332	352			
	326		327		327	325	324	v4
	316		300	320	300			v2
320		322					292	
	284		286		286			R
			210		210			
227		229						T
					187	189		
				176			154	R
				154				
				100	157	143		R
					139	136		R
					125			T
						107		T
							105	
						76		
						79		

$a = 11.813(2) \text{ \AA}$, $c = 16.876(3) \text{ \AA}$, $\beta = 94.92(3)^\circ$, $V = 2416.2 \text{ \AA}^3$. Плавится $\text{KBaLu}(\text{MoO}_4)_3$ инконгруэнтно при 940°C , не претерпевая полиморфных превращений.

Измеренные значения колебательных частот ИК- и КР-спектров $\text{KBaLu}(\text{MoO}_4)_3$, $\text{KBaSm}(\text{MoO}_4)_3$, $\alpha\text{-KSm}(\text{MoO}_4)_2$ приведены в табл. 2. Здесь же даны частоты колебаний BaMoO_4 и их отнесение к

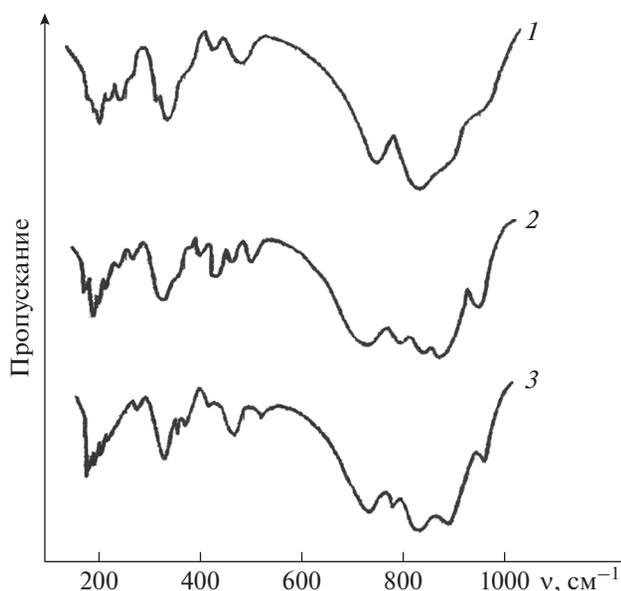


Рис. 3. ИК-спектры α -KSm(MoO₄)₂ (1), KBaSm(MoO₄)₃ (2), KBaLu(MoO₄)₃ (3).

внутренним колебаниям групп MoO₄ и колебаниям кристаллической решетки (либрационным колебаниям MoO₄-групп *R* и трансляционным колебаниям различных подрешеток кристалла *T*) [6, 18].

Представленные данные свидетельствуют о близости колебательных спектров BaMoO₄ и KBaLu(MoO₄)₃, KBaSm(MoO₄)₃, α -KSm(MoO₄)₂, позволяющей дать удовлетворительную интерпретацию. Имеющиеся различия объясняются

изменениями в межатомных расстояниях и, как следствие, в энергиях связей Mo—O при гетеровалентном изоморфном замещении в катионных позициях. Так, границы области частот валентных колебаний групп MoO₄ заметно расширяются как в высокочастотную, так и в низкочастотную стороны, а число измеренных в этой области частот втрое больше, чем в спектре BaMoO₄. Увеличение числа полос связано с понижением симметрии групп MoO₄, полным снятием вырождения трижды вырожденных колебаний и проявлением резонансного взаимодействия колебаний трансляционно-неэквивалентных групп MoO₄.

В измеренных спектрах увеличивается число либрационных колебаний MoO₄-групп, активных в ИК-спектрах. Их частоты практически не меняются по ряду исследованных соединений и близки соответствующим частотам BaMoO₄. Число наблюдаемых полос трансляционных колебаний отвечает теоретически предполагаемому. Соответствующие частоты в ряде случаев претерпевают закономерные изменения в ходе замещения катионов. Полученные данные (рис. 3) свидетельствуют о том, что в трансляционных колебаниях KBaLu(MoO₄)₃, KBaSm(MoO₄)₃, α -KSm(MoO₄)₂ в равной степени участвуют все катионы. Имеющее место понижение симметрии кристаллической решетки при гетеровалентном замещении катионов в структуре шеелита определяется искажениями молибден-кислородных тетраэдров.

Спектральный состав стационарной люминесценции KBaLu_{0.95}Er_{0.05}(MoO₄)₃ при $\lambda_{\text{возб}} = 365$ нм определяется полосами, соответствующими оп-

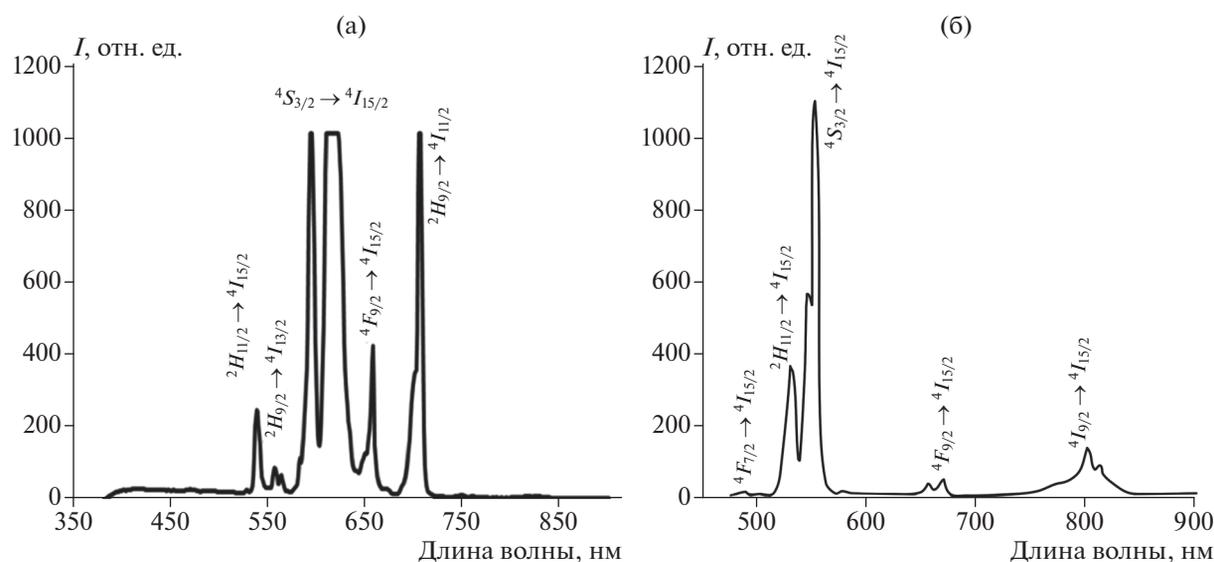


Рис. 4. Спектры люминесценции KBaLu_{0.95}Er_{0.5}(MoO₄)₃ ($\lambda_{\text{возб}} = 365$ нм) (а), KBaLu_{0.95}Er_{0.5}(MoO₄)₃ ($\lambda_{\text{возб}} = 977$ нм) (б).

тическим переходам в ионах Er^{3+} (рис. 4а). Увеличение содержания Er^{3+} до 5 мол. % приводит к появлению нескольких групп узких эрбиевых полос излучения в зеленой (535–610 нм) и красной (660–705 нм) областях видимого спектра. Наиболее простую и четко выраженную структуру имеют полосы излучения в области 590–610 нм, соответствующие переходу ${}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$. Слева и справа от этих зеленых полос наблюдаются более слабые полосы излучения в областях 535–538 и 556–560 нм, обусловленные переходами ${}^2\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ и ${}^2\text{H}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$ соответственно. В красной области спектра происхождение полос обусловлено переходами ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$, ${}^2\text{H}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$, спектр которых простирается от 660 до 705 нм и имеет более сложную структуру, что связано с расщеплением возбужденного состояния ${}^4\text{F}_{9/2}$ на 5 мультиплетов.

$\text{KBaLu}_{0.95}\text{Er}_{0.05}(\text{MoO}_4)_3$ обладает эффективной ап-конверсионной люминесценцией в видимой области при возбуждении ИК-излучением. Происхождение наблюдаемых полос при возбуждении ($\lambda_{\text{возб}} = 977$ нм) в спектрах антистоксовой люминесценции может быть объяснено следующим образом. После двухстадийного последовательного возбуждения ионов Er^{3+} до уровня ${}^4\text{F}_{7/2}$ в результате безызлучательных релаксаций происходит заселение возбужденных состояний ${}^4\text{H}_{11/2}$, ${}^4\text{S}_{3/2}$, ${}^4\text{F}_{9/2}$, ${}^4\text{I}_{9/2}$, что приводит к антистоксовой люминесценции в области 530–850 нм. На рис. 4б показан спектр антистоксовой люминесценции от 450 до 850 нм. Наблюдаются 4 интенсивные полосы около 531, 552, 660, 800 нм. Две полосы (531 и 552 нм) соответствуют переходам ${}^2\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ и ${}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ в ионах Er^{3+} . Излучение при 660 нм обусловлено переходом ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$, при 800 нм – переходом ${}^4\text{I}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$. Слабая синяя полоса при 490 нм связана с переходом ${}^4\text{F}_{7/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$. Характерной чертой Er^{3+} является узость полос люминесценции. В процессе возбуждения антистоксовой люминесценции обычно происходит последовательное поглощение двух ИК-фотонов с одинаковой энергией, дающее последовательность переходов электрона ${}^4\text{I}_{15/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ и ${}^4\text{I}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{F}_{7/2}$. При переходе с высоколежащих уровней энергии может происходить видимая люминесценция. Характер спектров обусловлен влиянием кристаллической решетки матрицы на штарковскую структуру основного и возбужденного уровней иона-активатора. Люминофор $\text{KBaLu}_{0.95}\text{Er}_{0.05}(\text{MoO}_4)_3$ может найти применение в лазерах, в преобразователях ИК-излучения в видимое, в цветных дисплеях, в биомедицинской диагностике, в оптической связи.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках государственного задания БИП СО РАН (проект № 0339-2016-007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трунов В.К., Ефремов В.А., Великодний Ю.А. Кристаллохимия и свойства двойных молибдатов и вольфраматов. Л.: Наука, 1986. 173 с.
2. Morozov V., Arakcheeva A., Redkin V. et al. $\text{Na}_{2/7}\text{Gd}_{4/7}\text{MoO}_4$: a Modulated Scheelite-Type Structure and Conductivity Properties // Inorg. Chem. 2012. V. 51. № 9. P. 5313–5324. <https://doi.org/10.1021/ic300221m>
3. Раскина М.В., Морозов В.А., Павленко А.В. и др. Структура и люминесцентные свойства твердых растворов $\text{Sm}_{2-x}\text{Eu}_x(\text{MoO}_4)_3$ // Журн. неорганической химии. 2015. Т. 60. № 1. С. 89–97. <https://doi.org/10.7868/S0044457X15010122>
4. Золотова Е.С., Рахманова М.И., Соколов В.В., Усков Е.М. Влияние висмута и кальция на интенсивность люминесценции люминофора $\text{NaY}_{1-x}\text{Eu}_x(\text{MoO}_4)_2$ // Неорганические материалы. 2011. Т. 47. № 11. С. 1368–1371.
5. Каминский А.А. Спектроскопия кристаллов. М.: Наука, 1975. 255 с.
6. Кожевникова Н.М., Мохосоев М.В. Тройные молибдаты. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета, 2000. 298 с.
7. Овсянкин В.В., Феофилов П.П. Кооперативная сенсификация люминесценции в кристаллах, активированных редкоземельными ионами // Письма в ЖЭТФ. Т. 4. Вып. 11. С. 471–474.
8. Манаширов О.Я., Сатаров Д.К., Смирнов В.Б. и др. Состояние и перспективы разработок антистоксовых люминофоров для визуализации ИК-излучений в области 0.8–1.3 мкм // Неорганические материалы. 1993. Т. 29. № 10. С. 1322–1325.
9. Озель Ф.Е. Материалы и устройства, использующие антистоксовые люминофоры с переносом энергии // ТИИЭР. 1973. Т. 61. № 6. С. 87–120.
10. Auzel F. Upconversion and Anti-Stokes Processes with f and d Ions in Solids // Chem. Rev. 2004. V. 104. № 1. P. 139–173.
11. Lyapin A.A., Ermakov A.S., Kuznetsov S.V. et al. Upconversion Luminescence of $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2\text{-ErF}_3$ Single Crystals Upon 1.5 μm Laser Excitation // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1410. 012086. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1410/1/012086>
12. Казарян А.К., Тимофеев Ю.Р., Фок М.В. Антистоксовое преобразование излучения в люминофорах с редкоземельными ионами // Тр. ФИАН. 1986. Т. 175. С. 4–65.
13. Евдокимов А.А., Ефремов В.А., Трунов В.К. и др. Соединения редкоземельных элементов. Молибдаты, вольфраматы. М.: Наука, 1991. 267 с.
14. Kozhevnikova N.M., Korsun V.P., Mursakhanova I.I., Mokhosoev M.V. Luminescence Materials Based on Re Molybdates // J. Rare Earth. 1991. V. 2. P. 845–849.

15. *Jiang Y., Liu Y., Liu G., Dong X., Wang J., Yu W., Dong Q.* Surfactant-Assisted Hydrothermal Synthesis of Octahedral Structured $\text{NaGd}(\text{MoO}_4)_2:\text{Eu}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$ and Tunable Photoluminescent Properties // *Opt. Mater.* 2014. V. 36. P. 1865–1870.
<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2014.03.043>
16. *Георгобиани А.Н., Грузинцев А.Н., Бартту К., Беналлул П.* Инфракрасная люминесценция соединений $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Er}^{3+}$ и $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Er}^{3+}$ // *Неорган. материалы.* 2004. Т. 40. № 8. С. 963–968.
17. *Грузинцев А.Н.* Антистоксовая люминесценция $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Er}^{3+}$ // *Неорган. материалы.* 2014. Т. 50. № 1. С. 64–69.
<https://doi.org/10.7868/S0002337X14010084>
18. *Петров К.И., Полозникова М.Э., Шарипов Х.Т., Фомичев В.В.* Колебательные спектры молибдатов и вольфрамов. Ташкент: ФАН, 1990. 135 с.