

УДК 546.776

АП-КОНВЕРСИОННЫЙ ЛЮМИНОФОР $\text{KVaY}(\text{MoO}_4)_3:\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ В СИСТЕМЕ $\text{K}_2\text{MoO}_4\text{—BaMoO}_4\text{—Y}_2(\text{MoO}_4)_3$, ЛЕГИРОВАННЫЙ ЭРБИЕМ И ИТТЕРБИЕМ

© 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 03.12.2020 г.

После доработки 09.12.2020 г.

Принята к публикации 29.12.2020 г.

Изучены фазовые отношения в субсолидусной области системы $\text{K}_2\text{MoO}_4\text{—BaMoO}_4\text{—Y}_2(\text{MoO}_4)_3$ по разрезам методами рентгенографического и дифференциального термического анализа, проведена триангуляция системы. Синтезирован тройной молибдат $\text{KVaY}(\text{MoO}_4)_3$, который кристаллизуется в моноклинной шеелитоподобной структуре (пр. гр. $P2_1/n$). При легировании ионами $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ $\text{KVaY}(\text{MoO}_4)_3$ получен ап-конверсионный люминофор, обладающий антистоксовой люминесценцией в области 400–700 нм при возбуждении ИК-излучением ($\lambda_{\text{возб}} = 977$ нм). Синтезированный люминофор исследован методами рентгенографии, дифференциального термического анализа и колебательной спектроскопии.

Ключевые слова: фазовые равновесия, тройной молибдат, ап-конверсионная люминесценция, эрбий, иттербий

DOI: 10.31857/S0002337X21060063

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, люминофоры, лазерные устройства, ап-конверсионные материалы, преобразующие излучение с низкой энергией в излучение с более высокой энергией [1–4].

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+} , Yb^{3+} , способными поглощать ИК-излучение и преобразовывать его в видимую антистоксовую люминесценцию [5–18].

Обширность поля кристаллизации индивидуальных соединений и твердых растворов с шеелитоподобной структурой определяется возможно-

стью 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 оптические свойства фаз. Такие особенности строения шеелитоподобных молибдатов определяют перспективы их использования в качестве люминесцентных и лазерных материалов, химических сенсоров, ап-конверсионных материалов, что определяет интенсивные теоретические и экспериментальные исследования этой группы неорганических соединений [1–4, 14–16].

Среди тройных молибдатов, содержащих щелочноземельные и редкоземельные элементы, известны ряды кальциевых, стронциевых соединений $\text{M}(\text{Ca})\text{SrLn}(\text{MoO}_4)_3$ ($\text{M} = \text{K}, \text{Rb}, \text{Cs}$; $\text{Ln} = \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}$) [6, 15]. Возможность других комбинаций катионов металлов не была проанализирована.

Цель настоящей работы – изучение фазовых равновесий в субсолидусной области системы

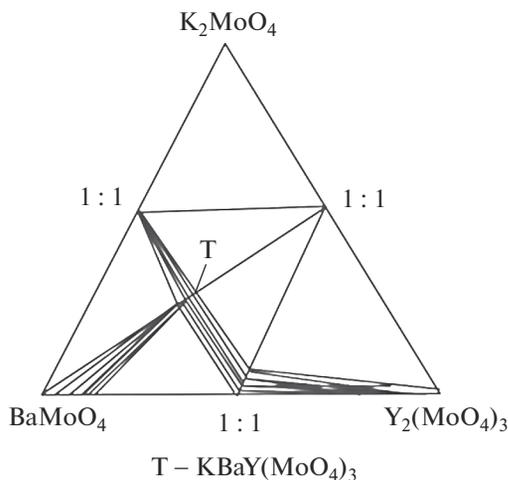


Рис. 1. Фазовые отношения в системе K_2MoO_4 – $VaMoO_4$ – $Y_2(MoO_4)_3$ при $800^\circ C$.

K_2MoO_4 – $VaMoO_4$ – $Y_2(MoO_4)_3$, синтез ап-конверсионного люминофора на основе тройного молибдата $KVaY(MoO_4)_3:Er^{3+}/Yb^{3+}$ с шеелитоподобной структурой и изучение его люминесцентных свойств.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исходными компонентами для изучения фазообразования в системе K_2MoO_4 – $VaMoO_4$ – $Y_2(MoO_4)_3$ служили предварительно синтезированные твердофазным способом K_2MoO_4 , $VaMoO_4$ и $Y_2(MoO_4)_3$ из K_2CO_3 , $VaCO_3$, Y_2O_3 и MoO_3 в интервале температур 400 – $650^\circ C$ с многократными промежуточными перетираниями через каждые 20 – 30 ч. Время прокаливании 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 методом рентгенофазового анализа на дифрактометре D8 Advance фирмы Bruker (CuK_α -излучение). Расчет рентгенограмм проводили с использованием программ “Рентген”. Колебательные спектры поликристаллических образцов $KVaY(MoO_4)_3$ зарегистрированы на спектрометрах Bruker FT-IR и Spexord M-80 с использованием для возбуждения лазера с излучением в ближней ИК-области 1.06 мкм (геометрия обратного рассеяния, разрешение 3 – 5 см $^{-1}$). Образцы готовили в виде суспензии в вазелиновом масле на полиэтиленовой подложке и таблеток с KBr. Для приготовления изотопозамещенных по молибдену образцов ис-

пользовали 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 иттрия в $KVaY(MoO_4)_3$ эквимольно заменялся на оксиды эрбия и иттербия. Таким способом были получены образцы люминофора, содержащие 1 – 6 мол. % Er_2O_3 и 1 – 9 мол. % Yb_2O_3 .

Спектры люминесценции образцов люминофора с различной концентрацией ионов эрбия и иттербия – $KVaY_{0.97}Er_{0.01}Yb_{0.02}(MoO_4)_3$, $KVaY_{0.95}Er_{0.01}Yb_{0.04}(MoO_4)_3$, $KVaY_{0.90}Er_{0.01}Yb_{0.09}(MoO_4)_3$ – измерены на спектрометре Ocean Optics QE 65000. Для возбуждения люминесценции в ИК-диапазоне использовали InGaAs-лазерный диод ($\lambda_{возб} = 977$ нм).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Взаимодействие в системе K_2MoO_4 – $VaMoO_4$ – $Y_2(MoO_4)_3$ изучено методом перекрещивающихся разрезов в области 450 – $800^\circ C$. Исследование системы K_2MoO_4 – $VaMoO_4$ – $Y_2(MoO_4)_3$ проведено в две стадии. Первоначально изучали фазовый состав точек пересечения разрезов, исходящих из средних и двойных молибдатов, образующихся в ограняющих 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 – $VaMoO_4$ – $Y_2(MoO_4)_3$.

В ограняющей двойной системе K_2MoO_4 – $Y_2(MoO_4)_3$ установлено образование молибдатов состава $1 : 1$, $5 : 1$, кристаллизующихся в различных структурных типах [1, 6, 14]. При взаимодействии K_2MoO_4 с $VaMoO_4$ зафиксировано образование двойного молибдата $K_2Va(MoO_4)_2$, обладающего структурой пальмиерита. В системе $VaMoO_4$ – $Y_2(MoO_4)_3$ синтезирован молибдат $VaY_2(MoO_4)_4$, принадлежащий слоистой шеелитоподобной структуре с моноклинным искажением (пр. гр. $C2/c$) [2].

Наиболее подробно (через 1 – 2 мол. %) изучено взаимодействие на разрезе $VaMoO_4$ – $KY(MoO_4)_2$, где установлено образование тройного молибдата $KVaY(MoO_4)_3$ при 650 – $750^\circ C$. Для достижения равновесия необходимо прокалывание реакционных смесей в течение 150 – 170 ч с промежуточной гомогенизацией.

Для системы K_2MoO_4 – $VaMoO_4$ – $Y_2(MoO_4)_3$ квазибинарными разрезами являются: $KY(MoO_4)_2$ – $KVaY(MoO_4)_3$, $K_2Va(MoO_4)_2$ – $KVaY(MoO_4)_3$, $K_2Va(MoO_4)_2$ – $KY(MoO_4)_2$, $VaMoO_4$ – $KVaY(MoO_4)_3$, $VaY_2(MoO_4)_4$ – $KVaY(MoO_4)_3$, $VaY_2(MoO_4)_4$ – $KY(MoO_4)_2$.

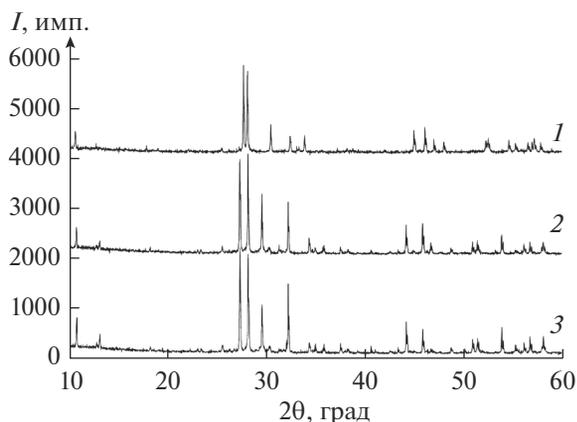


Рис. 2. Рентгенограммы $\alpha\text{-KSm}(\text{MoO}_4)_2$ (1), $\text{KBaSm}(\text{MoO}_4)_3$ (2), $\text{KBaY}(\text{MoO}_4)_3$ (3).

Методом РФА установлено, что в тройном молибдате $\text{KBaY}(\text{MoO}_4)_3$ растворяется 4 мол. % BaMoO_4 , растворимость тройного молибдата в BaMoO_4 составляет 13 мол. %. Системы $\text{K}_2\text{Ba}(\text{MoO}_4)_2\text{—KBaY}(\text{MoO}_4)_3$ и $\text{BaY}_2(\text{MoO}_4)_4\text{—KBaY}(\text{MoO}_4)_3$ характеризуются двухфазными областями, они эвтектические с областью гомогенности тройной фазы до 3 мол. %. Растворимость $\text{KY}(\text{MoO}_4)_2$ в $\text{KBaY}(\text{MoO}_4)_3$ составляет 4.0 мол. %, в $\text{KY}(\text{MoO}_4)_2$ растворяется не более 1.5 мол. % $\text{KBaY}(\text{MoO}_4)_3$. Разрез $\text{K}_2\text{Ba}(\text{MoO}_4)_2\text{—K}_5\text{Y}(\text{MoO}_4)_4$ не является квазибинарным из-за термической неустойчивости фазы $\text{K}_5\text{Y}(\text{MoO}_4)_4$, которая плавится инконгруэнтно при 715°C . Разрез $\text{K}_2\text{Ba}(\text{MoO}_4)_2\text{—KY}(\text{MoO}_4)_2$ является простым эвтектическим без заметной растворимости компонентов.

Рентгенографическое исследование показало, что тройной молибдат $\text{KBaY}(\text{MoO}_4)_3$ имеет шеелитоподобную структуру с моноклинным искажением и проявляет большое сходство в расположении наиболее интенсивных линий на рентгенограмме с $\alpha\text{-KSm}(\text{MoO}_4)_2$, что свидетельствует об общности структурных мотивов тройного и двойного молибдатов. Для сравнения на рис. 2 приведены рентгенограммы $\alpha\text{-KSm}(\text{MoO}_4)_2$ и $\text{KBaSm}(\text{MoO}_4)_3$. Рентгенограммы $\text{KBaSm}(\text{MoO}_4)_3$ и $\text{KBaY}(\text{MoO}_4)_3$ проиндексированы в моноклинной сингонии (пр. гр. $P2_1/n$, $Z = 9$). Соединения изоструктурны между собой, а также двойному молибдату $\alpha\text{-KSm}(\text{MoO}_4)_2$ и принадлежат к структурному типу моноклинно искаженного шеелита. Структуру $\text{KBaY}(\text{MoO}_4)_3$ можно рассматривать как результат гетеровалентного замещения щелочноземельного элемента в структуре шеелита по схеме: $2\text{Ba} = \text{K}^+ + \text{Y}^{3+}$. Параметры кристаллической решетки $\text{KBaY}(\text{MoO}_4)_3$ равны: $a = 12.169(3) \text{ \AA}$, $b = 11.807(2) \text{ \AA}$, $c = 16.933(3) \text{ \AA}$, $\beta = 94.90(3)^\circ$, $V = 2419.1 \text{ \AA}^3$. Плавится $\text{KBaY}(\text{MoO}_4)_3$

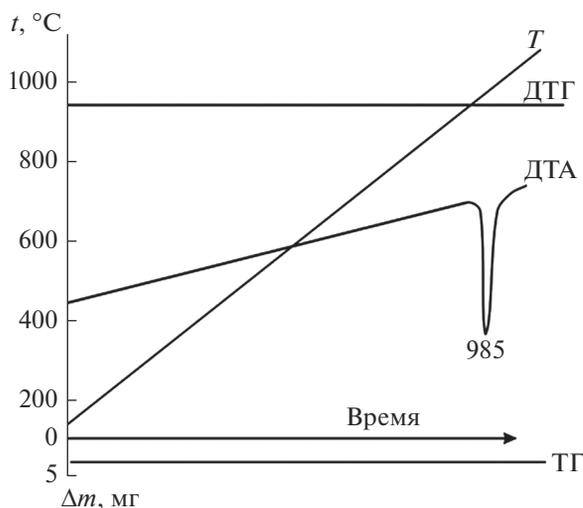


Рис. 3. Результаты термического анализа $\text{KBaY}(\text{MoO}_4)_3$.

инконгруэнтно при 985°C , не претерпевая полиморфных превращений (рис. 3).

Измеренные значения колебательных частот ИК- и КР-спектров $\text{KBaY}(\text{MoO}_4)_3$, $\text{KBaSm}(\text{MoO}_4)_3$, $\alpha\text{-KSm}(\text{MoO}_4)_2$ приведены в табл. 1. Здесь же даны частоты колебаний BaMoO_4 и их отнесение к внутренним колебаниям групп MoO_4 и колебаниям кристаллической решетки (либрационным колебаниям MoO_4 -групп (R) и трансляционным колебаниям различных подрешеток кристалла (T)) [6, 19].

Представленные данные свидетельствуют о близости колебательных спектров BaMoO_4 и $\text{KBaY}(\text{MoO}_4)_3$, $\text{KBaSm}(\text{MoO}_4)_3$, $\alpha\text{-KSm}(\text{MoO}_4)_2$, позволяющей дать удовлетворительную интерпретацию. Имеющиеся различия обусловлены 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 MoO_4 заметно расширяются как в высокочастотную, так и в низкочастотную стороны, а число измеренных в этой области частот втрое больше, чем в спектре BaMoO_4 . Увеличение числа полос связано с понижением симметрии групп MoO_4 , полным снятием вырождения трижды вырожденных колебаний и проявлением резонансного взаимодействия колебаний трансляционно-неэквивалентных групп MoO_4 .

В измеренных спектрах увеличивается число либрационных колебаний MoO_4 -групп, активных в ИК-спектрах. Их частоты практически не меняются по ряду исследованных соединений и близки соответствующим частотам BaMoO_4 . Число наблюдаемых полос трансляционных колебаний отвечает предполагаемому теории.

Таблица 1. Частоты колебаний в КР- и ИК-спектрах $\text{KBaYLn}(\text{MoO}_4)_3$, BaMoO_4

ν, cm^{-1}								Отнесение
$\text{KBaY}(\text{MoO}_4)_3$		$\text{KBaSm}(\text{MoO}_4)_3$		$\alpha\text{-KSm}(\text{MoO}_4)_2$		BaMoO_4		
КР	ИК	КР	ИК	КР	ИК	КР	ИК	
935	934	934		944	925	891		ν_1
920	916	919	915	929				
896		895		888				
868	855	867		869	845			
839		838	840	840		838	830	ν_3
816		815		815				
802	800		800	803		792		
772	758	774	760	795	795			
747		746		767				
		737		746	760			
	680		682		682			
	474				455			
			417		417			
	385		386		386	360	371	
386	353	385	352	383	352	346		ν_2
362		364		332				
	326		327		327			ν_4
	316		300		300	325	324	
				320				ν_2
320	284	322	286		286		292	
			210		210			R
227		229			187			
						189		T
				176			154	
				154	157			R
				100	139	143		
					125	136		R
							105	
						107		T
						76		
						79		T

Соответствующие частоты в ряде случаев претерпевают закономерные изменения в ходе замещения катионов. Полученные данные свидетельствуют о том, что в трансляционных колебаниях $\text{KBaY}(\text{MoO}_4)_3$, $\text{KBaSm}(\text{MoO}_4)_3$, $\alpha\text{-KSm}(\text{MoO}_4)_2$ в равной степени участвуют все катионы (рис. 4). Имеющее место понижение симметрии кристал-

лической решетки при гетеровалентном замещении катионов в структуре шеелита связано с искажениями молибден-кислородных тетраэдров.

Образцы люминофора $\text{KBaY}_{0.97}\text{Er}_{0.01}\text{Yb}_{0.02}(\text{MoO}_4)_3$ (1), $\text{KBaY}_{0.95}\text{Er}_{0.01}\text{Yb}_{0.04}(\text{MoO}_4)_3$ (2), $\text{KBaY}_{0.90}\text{Er}_{0.01}\text{Yb}_{0.09}(\text{MoO}_4)_3$ (3) обладают эффек-

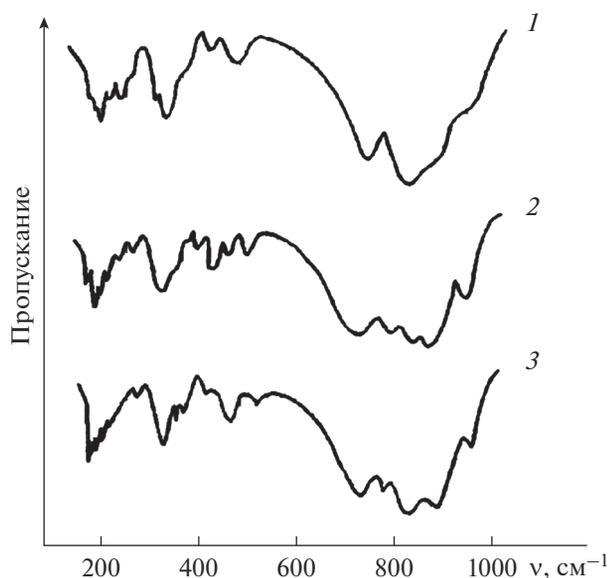


Рис. 4. ИК-спектры $\alpha\text{-KSm}(\text{MoO}_4)_2$ (1), $\text{KBaSm}(\text{MoO}_4)_3$ (2), $\text{KBaY}(\text{MoO}_4)_3$ (3).

тивной ап-конверсионной люминесценцией в видимой области при возбуждении ИК-излучением (рис. 5). Ионы иттербия-донора обладают высоким эффективным сечением поглощения в ИК-области. Энергетические состояния иона эрбия-акцептора обладают длительным временем жизни, поэтому ион-донор может безызлучательно передать на долгоживущее состояние акцептора сразу несколько поглощенных фотонов, что приведет к увеличению энергии возбужденного метастабильного состояния и, соответственно, уменьшению длины волны люминесценции $\text{KBaY}(\text{MoO}_4)_3:\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ [7–13, 17, 18].

Происхождение наблюдаемых полос при возбуждении ($\lambda_{\text{возб}} = 977 \text{ нм}$) в спектрах ап-конверсионной люминесценции можно объяснить следующим образом. После двухстадийного последовательного возбуждения ионов Er^{3+} до уровня $^4F_{7/2}$ в результате безызлучательных релаксаций происходит заселение возбужденных уровней $^2H_{11/2}$, $^4S_{3/2}$, $^4F_{9/2}$, $^4I_{9/2}$, что приводит к ап-конверсионной люминесценции в области 400–700 нм [7–13]. Спектр люминесценции обладает сильной полосой излучения при 525 нм, полосой средней интенсивности при 550 нм в зеленой области и двумя слабыми полосами излучения при 655 нм в красной области спектра. Полосы излучения при 525 и 550 нм в зеленой области спектра соответствуют переходам $^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ и $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ в ионах Er^{3+} , а излучение при 655 нм в красной области спектра связано с переходом $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$. Полоса при 490 нм соответствует переходу $^4F_{7/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$. Полоса излучения при 410 нм обусловлена переходом $^2H_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$.

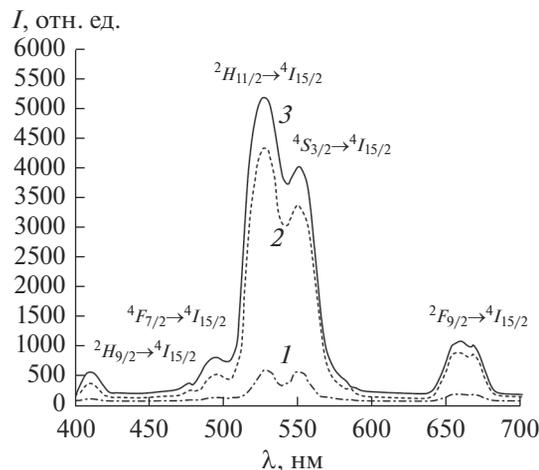


Рис. 5. Спектры люминесценции образцов люминофора $\text{KBaY}(\text{MoO}_4)_3:\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ с разной концентрацией ионов-активаторов: $\text{KBaY}_{0.97}\text{Er}_{0.01}\text{Yb}_{0.02}(\text{MoO}_4)_3$ (1), $\text{KBaY}_{0.95}\text{Er}_{0.01}\text{Yb}_{0.04}(\text{MoO}_4)_3$ (2), $\text{KBaY}_{0.90}\text{Er}_{0.01}\text{Yb}_{0.09}(\text{MoO}_4)_3$ (3) ($\lambda_{\text{возб}} = 977 \text{ нм}$).

Ионы-активаторы Er^{3+} являются центрами люминесценции люминофора, а сенсбилизирующее действие ионов Yb^{3+} увеличивает интенсивность ап-конверсионной люминесценции благодаря эффективной передаче энергии от Yb^{3+} к Er^{3+} и более высокому коэффициенту поглощения иттербия по сравнению с эрбием. Механизмом возбуждения $^2H_{9/2}$ -уровня может быть перенос энергии от возбужденного состояния Yb^{3+} на уровень $^4F_{9/2}$ иона Er^{3+} , поскольку разность энергий между уровнями $^4F_{9/2}$ и $^2H_{9/2}$ близка к энергии возбужденного иона иттербия [8–11]. Вследствие низкой населенности уровня $^4F_{9/2}$ наиболее вероятным каналом возбуждения является заселение вышележащих уровней из более заселенного $^4S_{3/2}$ -уровня через перенос энергии от иона Yb^{3+} с последующим распадом этих высоко лежащих уровней в $^2H_{9/2}$ [8–13]. При переходе с высоко лежащих уровней энергии может происходить видимая люминесценция.

Более высокая интенсивность обусловлена отношением концентраций ионов $\text{Yb}^{3+}:\text{Er}^{3+}$, равным 9 : 1 (рис. 5, спектр 3), другие отношения концентраций ионов иттербия и эрбия являются неоптимальными. Высокое содержание ионов иттербия и низкое содержание ионов эрбия способствует повышению интенсивности ап-конверсионной люминесценции, что обусловлено эффективным переносом энергии от иона иттербия к иону эрбия. Характер спектров обусловлен влиянием кристаллической решетки матрицы на штарковскую структуру основного и возбужденного уровней ионов-активаторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучены фазовые равновесия в субсолидусной области системы K_2MoO_4 – $BaMoO_4$ – $Y_2(MoO_4)_3$ по разрезам в интервале температур 450–800°C. Синтезирован тройной молибдат $KBaY(MoO_4)_3$, кристаллизующийся в моноклинной сингонии (пр. гр. $P2_1/n$, $Z=9$). Проведена триангуляция системы при 800°C.

Получен ап-конверсионный люминофор на основе тройного молибдата, активированного ионами эрбия и иттербия $KBaY(MoO_4)_3:Er^{3+}/Yb^{3+}$ при различном соотношении концентраций ионов активаторов. Оптимизировано соотношение концентраций ионов эрбия и иттербия, высокая интенсивность обусловлена отношением концентраций ионов $Yb^{3+}:Er^{3+}$, равным 9 : 1, другие отношения концентраций ионов иттербия и эрбия являются неоптимальными. Изучены его люминесцентные свойства. Люминофор $KBaY(MoO_4)_3:Er^{3+}/Yb^{3+}$ может найти применение в лазерах, в преобразователях ИК-излучения в видимое, в цветных дисплеях, в биомедицинской диагностике, в приборах 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., Великодный Ю.А. Кристаллохимия и свойства двойных молибдатов и вольфраматов. Л.: Наука, 1986. 173 с.
2. Morozov V., Arakcheeva A., Redkin V. et al. $Na_{2/7}Gd_{4/7}MoO_4$: 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 $Sm_{2-x}Eu_x(MoO_4)_3$ // 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 $NaY_{1-x}Eu_x(MoO_4)_2$ // 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 государственного университета, 2000. 298 с.
7. 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.
8. Овсянкин В.В., Феофилов П.П. Кооперативная сенсibilизация люминесценции в кристаллах, активированных редкоземельными ионами // Письма в ЖЭТФ. 1966. Т. 4. Вып. 11. С. 471–474.
9. Kuznetsov S., Ermakova Yu., Voronov V. et al. Up-conversion Quantum Yields of $SrF_2:Yb^{3+},Er^{3+}$ Sub-micron Particles Prepared by Precipitation in Water Solution // J. Mater. Chem. C. 2018. V. 6. № 3. P. 598–604.
10. Озель Ф.Е. Материалы и устройства, использующие антистоксовые люминофоры с переносом энергии // ТИИЭР. 1973. Т. 61. № 6. С. 87–120.
11. Auzel F. Upconversion and Anti-Stokes Processes with f and d Ions in Solids // Chem. Rev. 2004. V. 104. № 1. P. 139–173.
12. Lyapin A.A., Ermakov A.S., Kuznetsov S.V. et al. Upconversion Luminescence of $CaF_2-SrF_2-ErF_3$ 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>
13. 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.
14. Евдокимов А.А., Ефремов В.А., Трунов В.К. и др. Соединения редкоземельных элементов. Молибдаты, вольфраматы. М.: Наука, 1991. 267 с.
15. 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.
16. Jiang Y., Liu Y., Liu G., Dong X., Wang J., Yu W., Dong Q. Surfactant-Assisted Hydrothermal Synthesis of Octahedral Structured $NaGd(MoO_4)_2:Eu^{3+}/Tb^{3+}$ and Tunable Photoluminescent Properties // Opt. Mater. 2014. V. 36. P. 1865–1870. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2014.03.043>
17. Георгобидани А.Н., Грузинцев А.Н., Баршту К., Беналлул П. Инфракрасная люминесценция соединений $Y_2O_3:Er^{3+}$ и $Y_2O_3:Er^{3+}$ // Неорганические материалы. 2004. Т. 40. № 8. С. 963–968.
18. Грузинцев А.Н. Антистоксовая люминесценция $Y_2O_3:Er^{3+}$ // Неорганические материалы. 2014. Т. 50. № 1. С. 64–69. <https://doi.org/10.7868/S0002337X14010084>
19. Петров К.И., Полозникова М.Э., Шарипов Х.Т., Фомичев В.В. Колебательные спектры молибдатов и вольфраматов. Ташкент: ФАН, 1990. 135 с.