

УДК 546.776

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ап-КОНВЕРСИОННОГО ЛЮМИНОФОРА $\text{KBaLu}(\text{MoO}_4)_3:\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$

© 2023 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 22.05.2023 г.

После доработки 09.09.2023 г.

Принята к публикации 11.09.2023 г.

Синтезирован тройной молибдат $\text{KBaLu}(\text{MoO}_4)_3$, который кристаллизуется в моноклинной шеелитоподобной структуре. Активированием $\text{KBaLu}(\text{MoO}_4)_3$ ионами $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ получен ап-конверсионный люминофор, обладающий антистоксовой люминесценцией в области 400–700 нм при возбуждении ИК-излучением. Синтезированный люминофор исследован методами рентгенографии, дифференциального термического анализа и колебательной спектроскопии, изучены его спектрально-люминесцентные характеристики.

Ключевые слова: ап-конверсионный люминофор, антистоксовая люминесценция, колебательная спектроскопия

DOI: 10.31857/S0002337X23100056, **EDN:** CEWHQN

ВВЕДЕНИЕ

Молибдаты и вольфраматы, содержащие щелочноземельные и редкоземельные элементы и обладающие шеелитоподобными структурами, 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-возбуждении и антистоксовой люминесценцией при ИК-возбуждении, являются актуальной задачей для материаловедения. Эффективным способом воздействия на люминесцентные свойства материалов является легирование ионами Er^{3+} , Yb^{3+} , способными поглощать ИК-излучение и преобразовывать его в видимую антистоксовую люминесценцию [5–18]. Впервые проанализированы структурные аналогии и кристаллохимические закономерности в системах $\text{K}_2\text{MoO}_4\text{—BaMoO}_4\text{—Ln}_2(\text{MoO}_4)_3$ [4]. Синтезирован тройной молибдат $\text{KBaLu}(\text{MoO}_4)_3$, который исследован методом рентгенографического анализа. При формировании структуры $\text{KBaLu}(\text{MoO}_4)_3$, производной

от шеелита, наблюдаются изменение в межатомных расстояниях молибден–кислород и, как следствие, изменение энергий связей Mo—O при гетеровалентном изоморфном замещении в катионных позициях по схеме $2\text{Ba}^{2+} = \text{K}^+ + \text{Lu}^{3+}$. При этом понижается симметрия MoO_4 -групп, увеличивается число формульных единиц до 9. 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, возникновению 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 стимулирует интенсивные теоретические и экспериментальные исследования этой группы неорганических соединений [1–4, 14–16]. Изучены спектрально-люминесцентные характеристики $\text{KBaLu}(\text{MoO}_4)_3$, активированного неодимом или европием, построены эмпири-

ческие схемы штарковского расщепления уровней Nd^{3+} в кристаллическом поле шеелита [4].

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

Цель настоящей работы – синтез ап-конверсионного люминофора на основе тройного молибдата $\text{KBaLu}(\text{MoO}_4)_3:\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ с шеелитоподобной структурой и изучение его люминесцентных и физико-химических свойств.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исходными компонентами для изучения фазообразования в системе $\text{K}_2\text{MoO}_4\text{--BaMoO}_4\text{--Lu}_2(\text{MoO}_4)_3$ служили предварительно синтезированные твердофазным способом K_2MoO_4 , BaMoO_4 и $\text{Lu}_2(\text{MoO}_4)_3$ из K_2CO_3 , BaCO_3 , Lu_2O_3 и MoO_3 в интервале температур $400\text{--}750^\circ\text{C}$ с многократными промежуточными перетираниями через каждые $20\text{--}30$ ч.

Время прокаливания составляло: при 400°C – 15 ч, 500°C – 20 ч, 600°C – 25 ч, 700°C – 40 ч, 750°C – 70 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 отжигках.

Продукты синтеза идентифицировали методами рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре D8 Advance фирмы Bruker ($\text{CuK}\alpha$ -излучение). Расчет рентгенограмм проводили с использованием программ “Рентген”.

Колебательные спектры поликристаллических образцов $\text{KBaLu}(\text{MoO}_4)_3$ 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 $3\text{--}5$ 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 $^{92}\text{MoO}_3$ и $^{100}\text{MoO}_3$ с содержанием основного изотопа не менее 95%.

Дифференциальный термический анализ (ДТА) проводили на дериватографе ОД-103 фирмы МОМ, скорость подъема температуры составляла $10^\circ\text{C}/\text{мин}$, навеска $0.3\text{--}0.4$ г.

Для введения различных концентраций иона-активатора оксид лутеция в $\text{KBaLu}(\text{MoO}_4)_3$ эквивалентно заменяли на оксиды эрбия и иттербия. Таким способом были получены образцы люминофора, содержащие $1\text{--}6$ мол. % Er_2O_3 и $1\text{--}9$ мол. % Yb_2O_3 .

Спектры люминесценции образцов люминофора с различной концентрацией ионов эрбия и иттербия – $\text{KBaLu}_{0.97}\text{Er}_{0.01}\text{Yb}_{0.02}(\text{MoO}_4)_3$, $\text{KBaLu}_{0.95}\text{Er}_{0.01}\text{Yb}_{0.04}(\text{MoO}_4)_3$, $\text{KBaLu}_{0.90}\text{Er}_{0.01}\text{Yb}_{0.09}(\text{MoO}_4)_3$, $\text{KBaLu}_{0.91}\text{Er}_{0.01}\text{Yb}_{0.08}(\text{MoO}_4)_3$ – измерены на спектрометре Ocean Optics QE 65000. Для возбуждения люминесценции в ИК-диапазоне использовали лазерный InGaAs -диод с $\lambda_{\text{возб}} = 977$ нм (0.5 Вт/см²).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Взаимодействие в системе $\text{K}_2\text{MoO}_4\text{--BaMoO}_4\text{--Lu}_2(\text{MoO}_4)_3$ изучено методом перекрещивающихся разрезов в области температур $450\text{--}750^\circ\text{C}$. Исследование системы $\text{K}_2\text{MoO}_4\text{--BaMoO}_4\text{--Lu}_2(\text{MoO}_4)_3$ проведено в две стадии. Первоначально изучали фазовый состав точек пересечения разрезов, исходящих из средних и двойных молибдатов, образующихся в ограняющих двойных системах.

В ограняющей двойной системе $\text{K}_2\text{MoO}_4\text{--Lu}_2(\text{MoO}_4)_3$ установлено образование молибдатов состава $1 : 1, 5 : 1$, кристаллизующихся в различных структурных типах [1, 6, 14]. Двойной молибдат $\text{K}_5\text{Lu}(\text{MoO}_4)_4$ не является термически стабильным при 750°C , он плавится инконгруэнтно при 690°C . Исследуемая система $\text{K}_2\text{MoO}_4\text{--BaMoO}_4\text{--Lu}_2(\text{MoO}_4)_3$ отличается от других подобных систем с редкоземельными элементами отсутствием квазибинарного разреза $\text{K}_2\text{Ba}(\text{MoO}_4)_2\text{--K}_5\text{Lu}(\text{MoO}_4)_4$. При взаимодействии K_2MoO_4 с BaMoO_4 зафиксировано образование двойного молибдата $\text{K}_2\text{Ba}(\text{MoO}_4)_2$, обладающего структурой пальмиерита. В системе $\text{BaMoO}_4\text{--Lu}_2(\text{MoO}_4)_3$ синтезирован молибдат $\text{BaLu}_2(\text{MoO}_4)_4$, принадлежащий к слоистой шеелитоподобной структуре с моноклинным искажением (пр. гр. $C2/c$) [2]. Разрез $\text{K}_2\text{Ba}(\text{MoO}_4)_2\text{--KLu}(\text{MoO}_4)_2$ является эвтектическим.

Наиболее подробно (через $1\text{--}2$ мол. %) изучено взаимодействие на разрезе $\text{BaMoO}_4\text{--KLu}(\text{MoO}_4)_2$, где установлено образование тройного молибдата $\text{KBaLu}(\text{MoO}_4)_3$ при $650\text{--}750^\circ\text{C}$. Для достижения равновесия необходимо прокалывать реакционные смеси при 750°C в течение 70 ч.

Методом РФА установлено, что в тройном молибдате $\text{KBaLu}(\text{MoO}_4)_3$ растворяется 3 мол. % BaMoO_4 , растворимость тройного молибдата в BaMoO_4 составляет 12 мол. %. Фазовые отношения в системах $\text{K}_2\text{Ba}(\text{MoO}_4)_2\text{--KBaLu}(\text{MoO}_4)_3$ и $\text{BaLu}_2(\text{MoO}_4)_4\text{--KBaLu}(\text{MoO}_4)_3$ характеризуются двухфазными областями, системы эвтектические с областью гомогенности тройной фазы до 3 мол. %. Растворимость $\text{KLu}(\text{MoO}_4)_2$ в $\text{KBaLu}(\text{MoO}_4)_3$ составляет 3.1 мол. %, в $\text{KLu}(\text{MoO}_4)_2$ растворяется не более 1.5 мол. % $\text{KBaLu}(\text{MoO}_4)_3$. Разрез $\text{K}_2\text{Ba}(\text{MoO}_4)_2\text{--KLu}(\text{MoO}_4)_2$

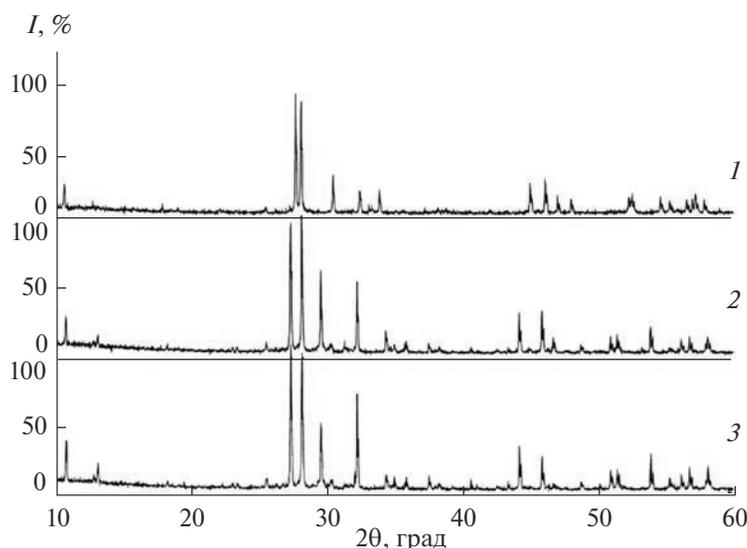


Рис. 1. Рентгенограммы: α -KSm(MoO₄)₂ (1), KBaSm(MoO₄)₃ (2), KBaLu(MoO₄)₃ (3).

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 на рентгенограммах с α -KSm(MoO₄)₂, что свидетельствует об общности структурных мотивов тройного и двойного молибдатов. Для сравнения на рис. 1 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. $P2_1/n$, $Z = 9$). Структуру KBaLu(MoO₄)₃ можно рассматривать как продукт гетеровалентного замещения щелочноземельного элемента в структуре шеелита по схеме: $2Ba^{2+} = K^+ + Lu^{3+}$. Параметры кристаллической решетки KBaLu(MoO₄)₃ равны: $a = 12.180(3) \text{ \AA}$, $b = 11.813(2) \text{ \AA}$, $c = 16.876(3) \text{ \AA}$, $\beta = 94.92(1)$, $V = 2416.5 \text{ \AA}^3$, пр. гр. $P2_1/n$, $Z = 9$. Плавится KBaLu(MoO₄)₃ инконгруэнтно при 940°C, не претерпевая полиморфных превращений.

Измеренные значения колебательных частот ИК- и КР-спектров KBaLu(MoO₄)₃, KBaSm(MoO₄)₃, α -KSm(MoO₄)₂ приведены в табл. 1. Здесь же указаны частоты колебаний BaMoO₄ и их отнесение к внутренним колебаниям групп MoO₄ и колебаниям кристаллической решетки (либрационным колебаниям MoO₄-групп (R) и трансляционным колебаниям различных подрешеток кристалла (T)) [6, 19]. Представленные данные свидетельствуют о близости колебательных спектров BaMoO₄ и KBaLu(MoO₄)₃, KBaSm(MoO₄)₃, α -KSm(MoO₄)₂, позволяющей дать удовлетворительную интер-

претацию. 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 предполагаемому теории. Соответствующие частоты в ряде случаев претерпевают закономерные изменения в ходе замещения катионов. Полученные данные свидетельствуют о том, что в трансляционных колебаниях KBaLu(MoO₄)₃, KBaSm(MoO₄)₃, α -KSm(MoO₄)₂ в равной степени участвуют все катионы (рис. 2).

Имеющее место понижение симметрии кристаллической решетки при гетеровалентном замещении катионов в структуре шеелита определяется искажениями молибден-кислородных тетраэдров.

Образцы KBaLu_{0.97}Er_{0.01}Yb_{0.02}(MoO₄)₃, KBaLu_{0.95}Er_{0.01}Yb_{0.04}(MoO₄)₃, KBaLu_{0.90}Er_{0.01}Yb_{0.09}(MoO₄)₃, KBaLu_{0.91}Er_{0.01}Yb_{0.08}(MoO₄)₃ обладают эффективной

Таблица 1. Частоты колебаний в КР- и ИК-спектрах молибдатов

ν, см ⁻¹								Отнесение
КВаLu(MoO ₄) ₃		КВаSm(MoO ₄) ₃		α-KSm(MoO ₄) ₂		ВаМоО ₄		
КР	ИК	КР	ИК	КР	ИК	КР	ИК	
932	933	934		944	925	891		ν ₁
917	915	919	915	929				
893		895		888				
865	854	867		869	845			
836		838	840	840		838	830	
814		815		815				
802	800		801	803		792		
770	758	774	760	795	795			
746		746		767				
		737		746	760			
	680		682		682			
	474				455			
			417		417			
	385		386		386	360	371	
385	353	385	352	383	352	346		
361		364		332				
	326		327		327			
	316		300		300	325	324	
				320				
320	284	322	286		286		292	ν ₄
			210		210			ν ₂
227		229						R
					187			R
				176		189	154	T
				154	157			T
				100	139	143		R
					125	136		R
						107	105	R
						76		
						79		T

ап-конверсионной люминесценцией в видимой области при возбуждении ИК-излучением (рис. 3).

Ионы иттербия-донора обладают высоким эффективным сечением поглощения в ИК-области. Энергетические состояния эрбия-акцептора обладают длительным временем жизни, поэтому ион-донор может безызлучательно передать на долгоживущее состояние акцептора сразу несколько погло-

щенных фотонов, что приведет к увеличению энергии возбужденного метастабильного состояния и, соответственно, уменьшению длины волны люминесценции КВаLu(MoO₄)₃:Er³⁺/Yb³⁺ [7–13, 17, 18]. Происхождение наблюдаемых полос при возбуждении (λ_{возб} = 977 нм) в спектрах ап-конверсионной люминесценции может быть объяснено следующим образом.

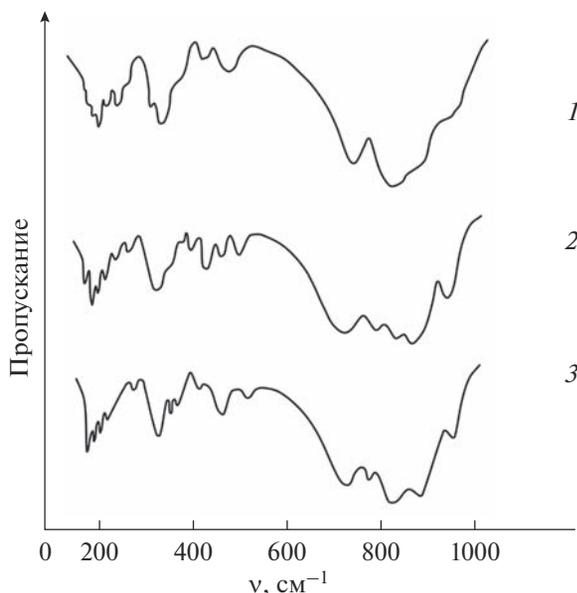


Рис. 2. ИК-спектры: α -KSm(MoO₄)₂ (1), KBaSm(MoO₄)₃ (2), KBaLu(MoO₄)₃ (3).

После двухстадийного последовательного возбуждения ионов Er³⁺ 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 655–675 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 Er³⁺, 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 $^2H_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$.

Ионы-активаторы Er³⁺ являются центрами люминесценции люминофора, а сенсбилизирующее действие ионов Yb³⁺ увеличивает интенсив-

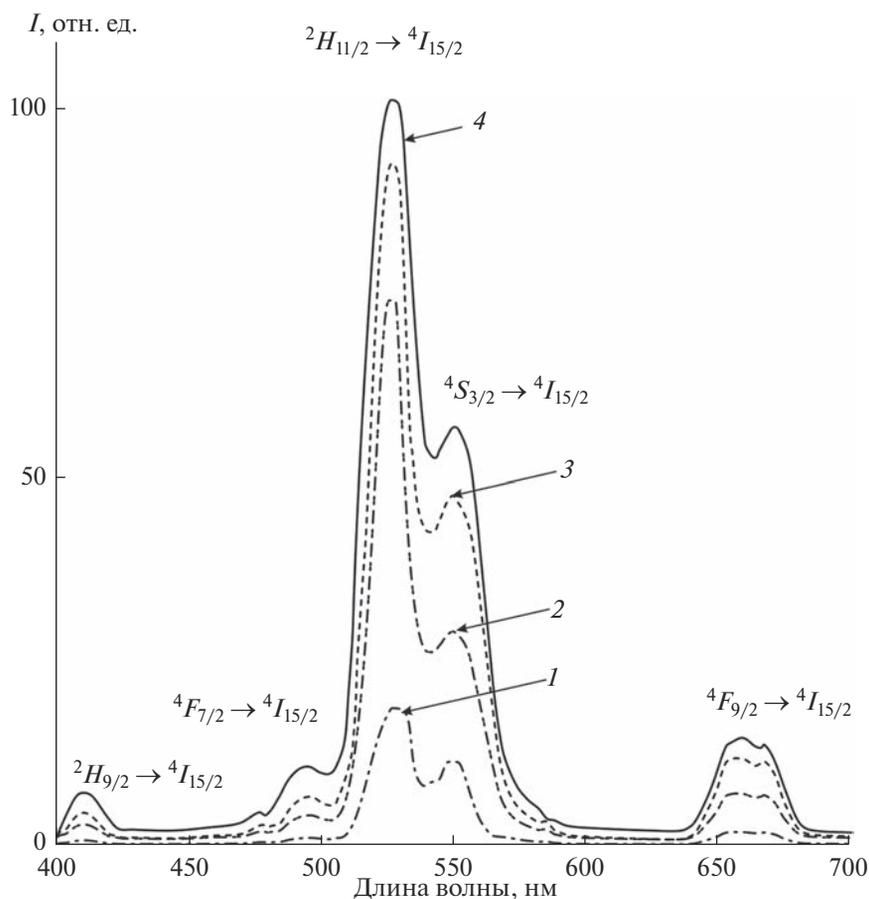


Рис. 3. Спектры люминесценции образцов люминофора KBaLu(MoO₄)₃:Er³⁺/Yb³⁺ с разной концентрацией ионов-активаторов: KBaLu_{0.97}Er_{0.01}Yb_{0.02}(MoO₄)₃ (1), KBaLu_{0.95}Er_{0.01}Yb_{0.04}(MoO₄)₃ (2), KBaLu_{0.90}Er_{0.01}Yb_{0.09}(MoO₄)₃ (3), KBaLu_{0.91}Er_{0.01}Yb_{0.08}(MoO₄)₃ (4) ($\lambda_{\text{возб}} = 977$ нм).

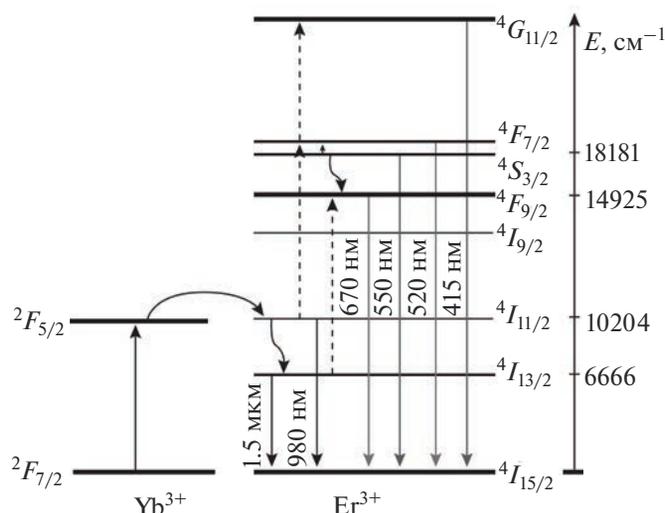


Рис. 4. Схема реализации ап-конверсии в системе ионов $\text{Yb}^{3+}-\text{Er}^{3+}$ по данным [20].

ность 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 заселенности 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 переходом с этих высоко лежащих уровней на $^2H_{9/2}$ [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 8 : 1 (рис. 4), другие отношения концентраций ионов иттербия и эрбия являются неоптимальными. Высокое содержание ионов иттербия и низкое содержание ионов эрбия способствуют 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. На рис. 4 показана схема реализации ап-конверсии в системе ионов $\text{Yb}^{3+}-\text{Er}^{3+}$ по данным [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезирован тройной молибдат $\text{KBaLu}(\text{MoO}_4)_3$, кристаллизующийся в моноклинной сингонии

(пр. гр. $P2_1/n$, $Z = 9$). Получен ап-конверсионный люминофор на основе тройного молибдата, активированного ионами эрбия и иттербия $\text{KBaLu}(\text{MoO}_4)_3:\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ при различном соотношении концентраций ионов-активаторов.

Оптимизировано соотношение концентраций ионов эрбия и иттербия, высокая интенсивность обусловлена отношением концентраций ионов $\text{Yb}^{3+} : \text{Er}^{3+}$, равным 8 : 1, другие отношения концентраций ионов иттербия и эрбия являются неоптимальными.

Изучены люминесцентные и физико-химические свойства люминофора $\text{KBaLu}(\text{MoO}_4)_3:\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$, который может найти применение в лазерах, в преобразователях ИК-излучения в видимое, в цветных дисплеях, в биомедицинской диагностике, в оптической связи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания БИП СО РАН (проект № 0273-2021-0008).

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП БНЦ СО РАН.

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. $\text{Na}_{2/7}\text{Gd}_{4/7}\text{MoO}_4$: a Modulated Scheelite-Type Structure and Conductivity Properties // Inorg. Chem. 2012.

- V. 51. № 9. P. 5313–5324.
<https://doi.org/10.1021/ic300221m>
3. Каминский А.А. Спектроскопия кристаллов. М.: Наука, 1975. 255 с.
 4. Кожевникова Н.М., Мохосоев М.В. Тройные молибдаты. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета, 2000. 298 с.
 5. Madirov E., Konyushkin V., Nakladov A.N., Fedorov P., Bergfeldt T., Busko D., Howard I., Richards B., Kuznetsov S., Turshatov A. An Up-Conversion Lumiphore with High Quantum Yield and Brightness Based on $\text{BaF}_2:\text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$ Single Crystals // *J. Mater. Chem. C*. 2021. V. 9. P. 3493–3503.
 6. Kaiser M., Würth C., Kraft M., Hyppänen I., Soukka T., Resch-Genger U. Power-Dependent Quantum Yield of $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$ Nano- and Micrometer-Sized Particles – Measurements and Simulations // *Nanoscale*. 2017. V. 9. № 28. P. 10051–10058.
 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 // *Неорган. 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 $\text{SrF}_2:\text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$ 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. Lyapun A.A., Ermakov A.S., Kuznetsov S.V. et al. Up-conversion 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. P. 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. Георгобиани А.Н., Грузинцев А.Н., Бармту 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., Фомичёв В.В. Колебательные спектры молибдатов и вольфраматов. Ташкент: ФАН, 1990. 135 с.
 19. Кузнецова Ю.О. Передача электронного возбуждения в ап-конверсионных наночастицах, содержащих редкоземельные ионы // *Изв. Самарского науч. центра РАН*. 2013. Т. 15. № 4. С. 112–115.
 20. Крутько В.А., Рябова А.В., Колова М.Г., Волков В.В., Каргин Ю.Ф., Лощенов В.Б. Синтез и люминесценция ультрадисперсных соединений $\text{Gd}_{11}\text{SiP}_3\text{O}_{26}$, $\text{Gd}_{14}\text{V}_6\text{Ge}_2\text{O}_{34}$, активированных ионами Er^{3+} и Yb^{3+} для диагностики рака // *Неорган. материалы*. 2013. Т. 49. № 1. С. 45–51.
<https://doi.org/10.7868/S0002337X13010041>