

УДК 546.776

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

© 2024 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 17.01.2024 г.

После доработки 24.02.2024 г.

Принята к публикации 25.02.2024 г.

Синтезирован тройной молибдат $\text{KSrGd}(\text{MoO}_4)_3$, который кристаллизуется в моноклинной шее-литоподобной структуре. Активированием ионами $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ $\text{KSrGd}(\text{MoO}_4)_3$ 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/S0002337X24040067, **EDN:** MZWMAM

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, 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]. Структурные аналогии и кристаллохимические закономерности в системе $\text{K}_2\text{MoO}_4\text{--SrMoO}_4\text{--Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$ впервые проанализированы в работе [4]. Синтезирован тройной молибдат $\text{KSrGd}(\text{MoO}_4)_3$, который исследован методом рентгенографического анализа. При формиро-

вании структуры $\text{KSrGd}(\text{MoO}_4)_3$, производной от шеелита, наблюдается изменение в межатомных расстояниях молибден–кислород и как следствие изменение энергий связей Mo–O при гетеровалентном изоморфном замещении в катионных позициях по схеме $2\text{Sr}^{2+}=\text{K}^++\text{Gd}^{3+}$. 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, возникновения локальных и кооперативных искажений и позволяет регулировать оптические свойства фаз. Такие особенности строения шеелитоподобных молибдатов способствуют их использованию 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]. Изучены спектрально-люминесцентные характеристики

$\text{KBaLu}(\text{MoO}_4)_3$, активированного неодимом или европием, построены эмпирические схемы штарковского расщепления уровней Nd^{3+} в кристаллическом поле шеелита [4].

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

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исходными компонентами для изучения фазообразования в системе $\text{K}_2\text{MoO}_4\text{--SrMoO}_4\text{--Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$ служили предварительно синтезированные твердофазным способом K_2MoO_4 , SrMoO_4 и $\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$ из K_2CO_3 , SrO , Gd_2O_3 и MoO_3 в интервале температур 400–750°C с многократной промежуточной гомогенизацией через каждые 20–30 ч.

Время прокаливания при 400°C – 15 ч, 500°C – 20 ч, 600°C – 20 ч, 700°C – 40 ч, 750°C – 75 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 (CuK_α -излучение). Расчет рентгенограмм проводили с использованием программ «Рентген». Колебательные спектры поликристаллических образцов $\text{KSrGd}(\text{MoO}_4)_3$ зарегистрированы на спектрометрах Bruker FT-IR и Specord 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 КВг. 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°C/мин, навеска 0.3–0.4 г. Для введения различных концентраций иона-

активатора оксид гадолиния в $\text{KSrGd}(\text{MoO}_4)_3$ эквимолярно замещали на оксид 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 – $\text{KSrGd}_{0.97}\text{Er}_{0.01}\text{Yb}_{0.02}(\text{MoO}_4)_3$, $\text{KSrGd}_{0.95}\text{Er}_{0.01}\text{Yb}_{0.04}(\text{MoO}_4)_3$, $\text{KSrGd}_{0.90}\text{Er}_{0.01}\text{Yb}_{0.09}(\text{MoO}_4)_3$, $\text{KSrGd}_{0.91}\text{Er}_{0.01}\text{Yb}_{0.08}(\text{MoO}_4)_3$ – измерены на спектрометре Ocean Optics QE 65000. Для возбуждения люминесценции в ИК-диапазоне использовали InGaAs-лазерный диод, $\lambda_{\text{возб}}=977$ нм (0.5 Вт/см²).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Взаимодействие в системе $\text{K}_2\text{MoO}_4\text{--SrMoO}_4\text{--Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$ изучено методом перекрещивающихся разрезов в области температур 450–750°C. Исследование системы $\text{K}_2\text{MoO}_4\text{--SrMoO}_4\text{--Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$ 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 проведена триангуляция системы. Наиболее подробно (через 1–2 мол.%) изучено взаимодействие на разрезе $\text{SrMoO}_4\text{--KGd}(\text{MoO}_4)_2$, где установлено образование тройного молибдата $\text{KSrGd}(\text{MoO}_4)_3$ при 650–750°C. Для достижения равновесия необходимо прокаливать реакционные смеси в течение 140–160 ч с промежуточной гомогенизацией при 750°C в течение 70 ч.

В ограничивающей двойной системе $\text{K}_2\text{MoO}_4\text{--Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$ установлено образование молибдатов состава 1 : 1, 5 : 1, кристаллизующихся в различных структурных типах [1, 6, 14]. При взаимодействии K_2MoO_4 с SrMoO_4 зафиксировано образование $\text{K}_2\text{Sr}(\text{MoO}_4)_2$, обладающего структурой пальмиерита. В системе $\text{SrMoO}_4\text{--Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$ синтезирован молибдат $\text{SrGd}_2(\text{MoO}_4)_4$ с широкой областью гомогенности, принадлежащий к слоистой шеелитоподобной структуре с моноклинным искажением (пр.гр. C2/c) [4].

Разрез $\text{K}_2\text{Sr}(\text{MoO}_4)_2\text{--KGd}(\text{MoO}_4)_2$ является эвтектическим.

Методом РФА установлено, что в тройном молибдате $\text{KSrGd}(\text{MoO}_4)_3$ растворяется 3 мол.% SrMoO_4 , растворимость тройного молибдата в SrMoO_4 составляет 11 мол.%. Фазовые отношения в системах $\text{K}_2\text{Sr}(\text{MoO}_4)_2\text{--KSrGd}(\text{MoO}_4)_3$ и $\text{SrGd}_2(\text{MoO}_4)_4\text{--KSrGd}(\text{MoO}_4)_3$ характеризуются двухфазными областями, системы эвтектические с областью гомогенности тройной фазы до 3 мол.%. Растворимость $\text{KGd}(\text{MoO}_4)_2$ в $\text{KSrGd}(\text{MoO}_4)_3$ составляет 3.2 мол.%,

в $\text{KGd}(\text{MoO}_4)_2$ растворяется не более 1.5 мол.% $\text{KSrGd}(\text{MoO}_4)_3$. Разрез $\text{K}_2\text{Sr}(\text{MoO}_4)_2$ – $\text{KGd}(\text{MoO}_4)_2$ является простым эвтектическим без заметной растворимости компонентов.

Рентгенографическое исследование показало, что тройной молибдат $\text{KSrGd}(\text{MoO}_4)_3$ имеет шеелитоподобную структуру с моноклинным искажением и проявляет большое сходство в расположении наиболее интенсивных линий с рентгенограммой α - $\text{KSm}(\text{MoO}_4)_2$, что свидетельствует об общности структурных мотивов тройного и двойного молибдатов. Для сравнения на рис. 1 приведены рентгенограммы α - $\text{KSm}(\text{MoO}_4)_2$, $\text{KSrSm}(\text{MoO}_4)_3$ и $\text{KSrGd}(\text{MoO}_4)_3$.

Рентгенограммы $\text{KSrSm}(\text{MoO}_4)_3$ и $\text{KSrGd}(\text{MoO}_4)_3$ проиндексированы в моноклинной сингонии (пр.гр. $P21/n$, $Z=9$). Структуру $\text{KSrGd}(\text{MoO}_4)_3$ можно рассматривать как продукт гетеровалентного замещения щелочноземельного элемента в структуре шеелита по схеме: 2Sr^{2+} на K^+ + Gd^{3+} в структуре шеелита. Параметры кристаллической решетки $\text{KSrGd}(\text{MoO}_4)_3$ равны: $a=13.165(1)\text{Å}$, $b=11.762(3)\text{Å}$, $c=16.868(4)\text{Å}$, $\beta=95.37(4)^\circ$. $V/Z=265.7\text{Å}^3$. Плавится $\text{KSrGd}(\text{MoO}_4)_3$ инконгруэнтно при 985°C , не претерпевая полиморфных превращений.

Измеренные значения колебательных частот ИК- и КР-спектров $\text{KSrGd}(\text{MoO}_4)_3$, $\text{KSrSm}(\text{MoO}_4)_3$, α - $\text{KSm}(\text{MoO}_4)_2$ приведены в табл. 1. Здесь же даны частоты колебаний SrMoO_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]. Представлен-

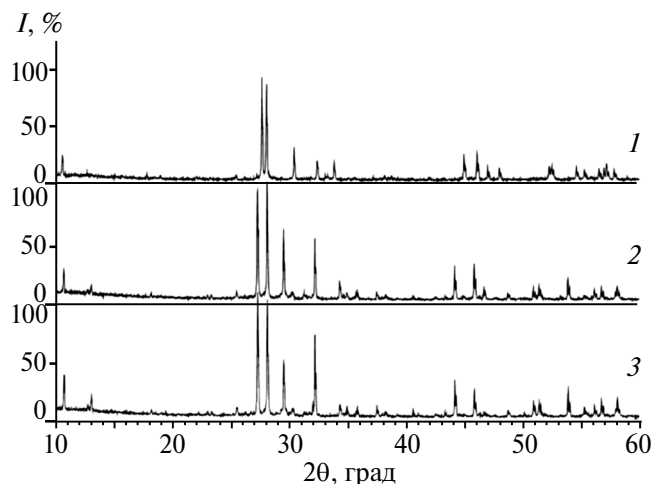


Рис. 1. Рентгенограммы α - $\text{KSm}(\text{MoO}_4)_2$ (1), $\text{KSrSm}(\text{MoO}_4)_3$ (2), $\text{KSrGd}(\text{MoO}_4)_3$ (3).

ные данные свидетельствуют о близости колебательных спектров SrMoO_4 и $\text{KSrGd}(\text{MoO}_4)_3$, $\text{KSrSm}(\text{MoO}_4)_3$, α - $\text{KSm}(\text{MoO}_4)_2$, позволяющей дать удовлетворительную интерпретацию. Имеющиеся различия обусловлены изменениями в межатомных расстояниях и, как следствие, в энергиях связей $\text{Mo}-\text{O}$ 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 SrMoO_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 SrMoO_4 . 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 $\text{KSrGd}(\text{MoO}_4)_3$, $\text{KSrSm}(\text{MoO}_4)_3$, α - $\text{KSm}(\text{MoO}_4)_2$ в равной степени участвуют все катионы (рис. 2).



Рис. 2. ИК-спектры α - $\text{KSm}(\text{MoO}_4)_2$ (1), $\text{KSrSm}(\text{MoO}_4)_3$ (2), $\text{KSrGd}(\text{MoO}_4)_3$ (3).

Таблица. Частоты колебаний (см⁻¹) в КР- и ИК-спектрах KСrGd(МоО₄)₃, KСrSm(МоО₄)₃, α-KСrSm(МоО₄)₂, SrМоО₄

KСrGd(МоО ₄) ₃		KСrSm(МоО ₄) ₃		α-KСrSm(МоО ₄) ₂		SrМоО ₄		Отнесение
КР	ИК	КР	ИК	КР	ИК	КР	ИК	
934	936			944		892		v1
915				929				
895				888	925			
	855	934		869				
		919		840		838		
842		895	915	815	845			
813		867		803		792		v3
803				795				
748		838		767				
737	738	815	840	746	795			
							832	
		774	801		760			
	686	746	760		682			
	474	737			455			
	430			383	417	362		v2
383	372		682	332	386	347		
365					352			
			417					
	320	385	386	320	327	325		v4
	309	364	352		300		371	v2
321	285		327		286			
			300					
285		322			210			R
			286					
228	224					190		T
			210	176	187			
170	168	229		154				R
145	149			100				R
139	137				157	143		R
129	131				139	136		R
126					125			
103						108		T
77						79		

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

Образцы люминофора KСrGd_{0,97}Er_{0,01}Yb_{0,02}(МоО₄)₃, KСrGd_{0,95}Er_{0,01}Yb_{0,04}(МоО₄)₃, KСrGd_{0,90}Er_{0,01}Yb_{0,09}(МоО₄)₃, KСrGd_{0,91}Er_{0,01}Yb_{0,08}(МоО₄)₃ обладают эффективной ап-конверсионной люминесценцией в ви-

димой области при возбуждении ИК-излучением (рис.3).

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 $\text{KSrGd}(\text{MoO}_4)_3:\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ [7–13, 17, 18]. Происхождение наблюдаемых полос при возбуждении ($\lambda_{\text{возб}}=977\text{нм}$) в спектрах ап-конверсионной люминесценции могут быть объяснены 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 655–675 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 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 $^2H_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$. Ионы-активаторы Er^{3+} являются центрами люминесценции люминофора, а сенсibiliзирующее действие

ионов Yb^{3+} увеличивает интенсивность ап-конверсионной люминесценции благодаря эффективной передаче энергии от Yb^{3+} к Er^{3+} и более высокого коэффициента 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 распадом этих высоколежащих уровней в $^2H_{9/2}$ [8–13]. При переходе с высоколежащих уровней энергии может происходить видимая люминесценция. Более высокая интенсивность обусловлена отношением концентраций ионов $\text{Yb}^{3+}:\text{Er}^{3+}$, равным 8:1 (рис. 3), другие отношения концентраций ионов иттербия и эрбия не являются оптимальными. 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 шарковскую 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].

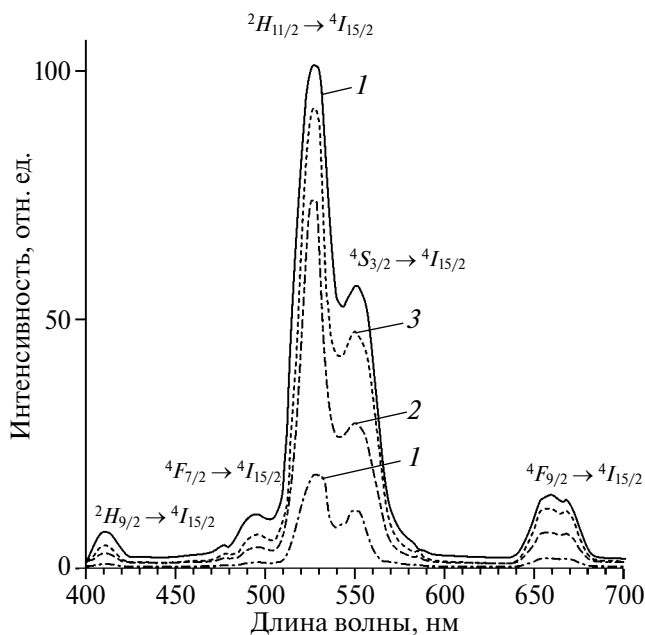


Рис. 3. Спектры люминесценции образцов люминофора $\text{KSrGd}(\text{MoO}_4)_3:\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ с разной концентрацией ионов активаторов: $\text{KSrGd}_{0.97}\text{Er}_{0.01}\text{Yb}_{0.02}(\text{MoO}_4)_3$ (1), $\text{KSrGd}_{0.95}\text{Er}_{0.01}\text{Yb}_{0.04}(\text{MoO}_4)_3$ (2), $\text{KSrGd}_{0.90}\text{Er}_{0.01}\text{Yb}_{0.09}(\text{MoO}_4)_3$ (3), $\text{KSrGd}_{0.91}\text{Er}_{0.01}\text{Yb}_{0.08}(\text{MoO}_4)_3$ (4), $\lambda_{\text{возб}} = 977\text{нм}$.

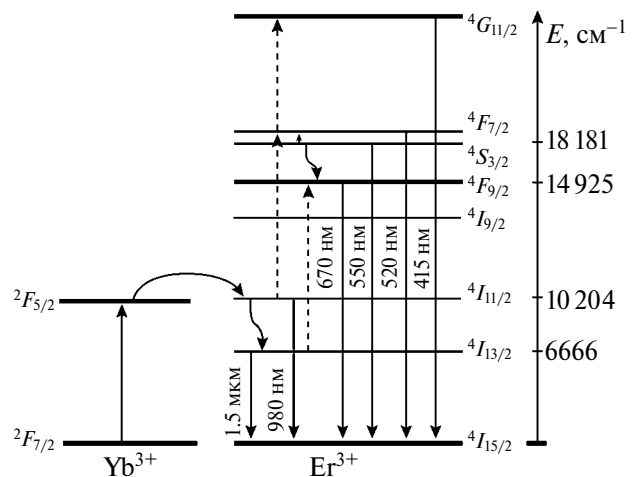


Рис. 4. Схема реализации ап-конверсии в системе ионов $\text{Yb}^{3+}-\text{Er}^{3+}$ по данным [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезирован тройной молибдат $\text{KSrGd}(\text{MoO}_4)_3$, кристаллизующийся в моноклинной сингонии (пр.гр. $P2_1/n$, $Z=9$). Получен ап-конверсион-

ный люминофор на основе тройного молибдата, активированного ионами эрбия и иттербия $\text{KSrGd}(\text{MoO}_4)_3:\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 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 не являются оптимальными. Изучены его люминесцентные и физико-химические свойства, Люминофор $\text{KSrGd}(\text{MoO}_4)_3:\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ может найти применение в лазерах, в преобразователях ИК-излучения в видимое, в цветных дисплеях, в биомедицинской диагностике, в оптической связи.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП БИП СО РАН.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет, что у нее нет конфликта интересов.

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-излучения в области 0.8–1.3 мкм // *Неорган. материалы.* 1993. Т. 29. № 10. С. 1322-1325.
8. Овсянкин В.В., Феофилов П.П. Кооперативная сенсбилизация 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. 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. 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 $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Er}^{3+}$ 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. doi: 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., Комова М.Г., Волков В.В., Каргин Ю.Ф. Лощенов В.Б. Синтез и люминесценция ультрадисперсных соединений $\text{Gd}_{11}\text{SiP}_3\text{O}_{26}, \text{Gd}_{14}\text{B}_6\text{Ge}_2\text{O}_{34}$, 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>