

УДК 546.776

СИНТЕЗ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ЛЮМИНОФОРА $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8:\text{Er}^{3+}$ С ШЕЕЛИТОПОДОБНОЙ СТРУКТУРОЙ

© 2019 г. Н. М. Кожевникова*

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

*e-mail: nicas@binm.bscnet.ru

Поступила в редакцию 21.05.2018 г.

После доработки 28.12.2018 г.

Принята к публикации 16.01.2019 г.

Методами рентгенографии и дифференциального термического анализа исследованы фазовые соотношения в субсолидусной области системы $\text{Li}_2\text{MoO}_4\text{--BaMoO}_4\text{--La}_2(\text{MoO}_4)_3$. Синтезирован тройной молибдат $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8$, легированный ионами Er^{3+} , изучены его люминесцентные свойства, охарактеризованы ИК-спектры.

Ключевые слова: фазовые равновесия, субсолидусная область системы, рентгенография, колебательные спектры, люминесценция ионов Er^{3+}

DOI: 10.1134/S0002337X19060095

ВВЕДЕНИЕ

Высокий интерес к представителям оксидных фаз, кристаллизующихся в структурном типе шеелита, обусловлен их уникальными свойствами: высокой химической и термической устойчивостью, низким тепловым расширением, высокой ионной проводимостью. Молибдаты и вольфраматы с шеелитоподобной структурой, содержащие щелочноземельные и редкоземельные элементы, благодаря возможности варьирования их физико-химических, оптических характеристик находят широкое применение в современных технологиях, таких как лазеры, оптические волокна, люминофоры, твердые электролиты [1–17]. В последние годы актуальна проблема создания многофункциональных люминофоров, обладающих люминесценцией при УФ- и антистоксовой люминесценцией при ИК-возбуждении. Эффективным способом воздействия на люминесцентные свойства материалов является активация их ионами Er^{3+} , способными поглощать ИК-излучение и преобразовывать его в видимую антистоксовую люминесценцию [8–10, 14, 15]. В шеелитоподобных молибдатах и вольфраматах удается стабилизировать сочетание различных катионов с сохранением мотива структуры, что обеспечивает формирование трехмерных структур в виде слоев с требуемыми свойствами – оптическими, теплофизическими, электрическими, магнитными [3–7]. Реализация той или иной структурной разновидности зависит от природы катионов, входящих в состав соединения, их сочетания, раз-

мещения по структурным позициям, от заселенности этих позиций. Широкий изоморфизм катионов различной природы приводит к дисбалансу зарядов в структуре вследствие геометрических особенностей расположения ближайших полиэдров, возникновению локальных и кооперативных искажений и позволяет регулировать свойства соединений со слоистыми структурами [1, 2, 7].

Цель настоящей работы – синтез люминофора $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8:\text{Er}^{3+}$ с шеелитоподобной структурой, изучение его спектральных и физико-химических характеристик.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исходными компонентами для изучения фазообразования в системе $\text{Li}_2\text{MoO}_4\text{--BaMoO}_4\text{--La}_2(\text{MoO}_4)_3$ служили предварительно синтезированные твердофазным способом Li_2MoO_4 , BaMoO_4 и $\text{La}_2(\text{MoO}_4)_3$ из Li_2CO_3 , BaO , La_2O_3 и MoO_3 . Исследование взаимодействия в системе $\text{Li}_2\text{MoO}_4\text{--BaMoO}_4\text{--La}_2(\text{MoO}_4)_3$ выполняли в два этапа. Первоначально изучали фазовый состав точек пересечения разрезов, исходящих из средних и двойных молибдатов, образующихся в ограничивающих двойных системах $\text{Li}_2\text{MoO}_4\text{--La}_2(\text{MoO}_4)_3$ и $\text{BaMoO}_4\text{--La}_2(\text{MoO}_4)_3$, система $\text{Li}_2\text{MoO}_4\text{--Ba}(\text{MoO}_4)_2$ является эвтектической. На втором этапе изучали выявленные квазибинарные разрезы, что позволило провести триангуляцию системы (рис. 1). Наиболее подробно (через 1–2 мол. %) изучено вза-

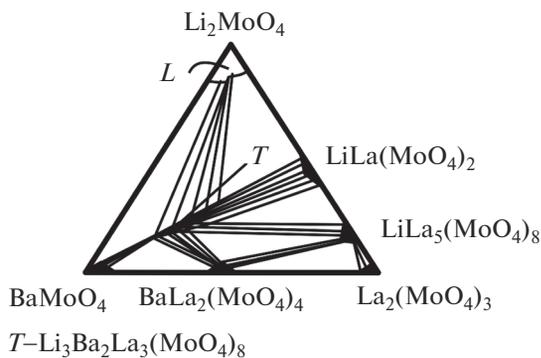


Рис. 1. Фазовые соотношения в системе Li_2MoO_4 – BaMoO_4 – $\text{La}_2(\text{MoO}_4)_3$ при 700°C .

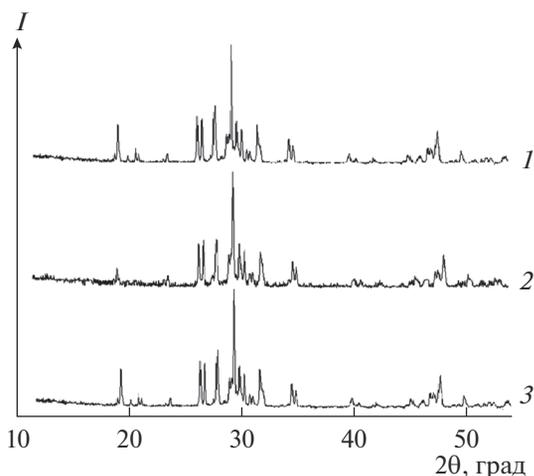


Рис. 2. Рентгенограммы $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{Gd}_3(\text{MoO}_4)_8$ (1), $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8$ (2), $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8:\text{Er}^{3+}$ (3).

имодействие по разрезу BaMoO_4 – $\text{LiLa}(\text{MoO}_4)_2$, где установлено образование тройного молибдата $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8$ при 680 – 700°C . Образцы отжигали при 400 , 500 , 550 , 600 , 650 , 700°C с многократными промежуточными перетираниями через каждые 20 – 30 ч. Время прокаливания при каждой температуре составляло 100 – 120 ч.

Синтез $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8$ проводили из реакционной смеси $3\text{Li}_2\text{MoO}_4 + 4\text{BaMoO}_4 + 3\text{La}_2(\text{MoO}_4)_3$. Для получения различных концентраций активатора оксид эрбия (3–5 мол. %) эквимольно заменяли в молибдате лантана. 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”. Дифференциальный термический анализ проводили на дериватографе ОД-103 фирмы МОМ (Венгрия), скорость подъема температуры $10^\circ\text{C}/\text{мин}$, навеска 0.3 – 0.4 г.

Колебательные спектры образцов $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8$ и $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8:\text{Er}^{3+}$ зарегистрированы на ИК-фурье-спектрометре Varian 3100 FT-IR (приставка МНПВО). Образцы готовили в виде таблеток с КВг. Спектры люминесценции $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8:\text{Er}^{3+}$ при УФ-возбуждении ($\lambda_{\text{возб}} = 365$ нм) записаны на спектрофлуориметре СМ 2203 (Solar, Беларусь), источник излучения – ксеноновая дуговая лампа высокого давления ДКсШ 150-1М. Для возбуждения люминесценции в ИК-диапазоне использовали InGaAs-лазерный диод, $\lambda_{\text{возб}} = 977$ нм. Спектры люминесценции измерены на спектрометре Ocean Optics QE 65000.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для системы Li_2MoO_4 – BaMoO_4 – $\text{La}_2(\text{MoO}_4)_3$ квазибинарными разрезами являются: Li_2MoO_4 – $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8$, BaMoO_4 – $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8$, $\text{BaLa}_2(\text{MoO}_4)_4$ – $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8$, $\text{BaLa}_2(\text{MoO}_4)_4$ – $\text{LiLa}_5(\text{MoO}_4)_8$, $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8$ – $\text{LiLa}_5(\text{MoO}_4)_8$ и $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8$ – $\text{LiLa}(\text{MoO}_4)_2$.

Фазовый анализ образцов, отожженных при 700°C , показал отсутствие в них исходных молибдатов лития, бария и лантана. Рентгенограмма $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8$ проявляла сходство в положениях и интенсивностях рефлексов с $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{Gd}_3(\text{MoO}_4)_8$, что подтвердило его принадлежность к структурному типу моноклинно искаженного шеелита, пр. гр. $C2/c$, $Z = 2$ (рис. 2). В структуре $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8$ реализуются сотоподобные слои из La-восьми-вершинников, к обеим сторонам слоя присоединяются Mo-тетраэдры через общие кислородные вершины. Атомы лития занимают различные кристаллографические позиции, треть атомов лития статистически располагается по позициям редкоземельного элемента с к. ч. = 8. Оставшиеся $2/3$ атомов лития локализованы в частной позиции на оси второго порядка с октаэдрической координацией по кислороду [2]. Атомы Ba имеют координацию 10 и находятся между слоями, образованными полиэдрами Mo и La.

Рентгенограмма $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8$ проиндексирована в моноклинной сингонии с использованием параметров элементарной ячейки монокристаллов $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{Gd}_3(\text{MoO}_4)_8$: $a = 5.343(1)$, $b = 12.963(2)$, $c = 19.304(2)$ Å, $\beta = 91.26(1)^\circ$. Структура $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{Gd}_3(\text{MoO}_4)_8$ расшифрована методом тяжелого атома с использованием трехмерной функции Патерсона и последующими расчетами карт электронной плотности $\rho(xyz)$ для локализации

Таблица 1. Частоты колебаний в длинноволновой области ИК-спектров поглощения $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{R}_3(\text{MoO}_4)_8$

ν, cm^{-1}			Отнесение
$\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{Gd}_3(\text{MoO}_4)_8$	$\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8$	$\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8:\text{Er}^{3+}$	
456	454	452	$\delta(\text{MoO}_4)$
417	416	417	$\delta(\text{MoO}_4)$
382	382	382	$\delta(\text{MoO}_4)$
324	319	319	TLi
290	287	288	TLi
265	265	265	TMo + TR
263	257	258	TLi
232	227	230	TLi
186	186	186	TMo + TR
164	164	164	R
156	156	156	R
90	91	90	TBa

более легких атомов O и Li. Уточнение структуры в анизотропном приближении с одновременным уточнением фактора заполнения позиций гадолиния привело к $R = 0.044$. Был рассчитан локальный баланс валентных усилий с учетом заполнения позиций. Полученные данные хорошо согласуются со стехиометрическим составом соединения $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{Gd}_3(\text{MoO}_4)_8$, качество баланса валентности D_0 имеет значение 2.10% [2, 7]. Соединение $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8$ плавится инконгруэнтно при 935°C .

Измеренные значения колебательных частот длинноволновой области ИК-спектров $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8$, $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8:\text{Er}^{3+}$ и $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{Gd}_3(\text{MoO}_4)_8$ приведены в табл. 1. Особенности строения $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8$ в зависимости от природы катионов изучены путем их сравнения с ИК-спектром изоструктурного соединения $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{Gd}_3(\text{MoO}_4)_8$, который в данной области очень похож (рис. 3) [7]. При проведении теоретико-группового анализа колебаний $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8$ применяли имеющиеся аналогии с ранее исследованными тройными молибдатами, кристаллизующимися в структурном типе слоистого шеелита с моноклинным искажением (пр. гр. $C2/c$) [7, 16, 17]. Теоретико-групповой анализ колебаний $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8$ предполагает следующее распределение по неприводимым представлениям:

– для катионов лития, расположенных на осях второго порядка (в октаэдрах)

$$\Gamma_{\text{Li}} = 1A_g + 2B_g + 1A_u + 2B_u$$

– катионов бария и лантана на осях второго порядка (позиция M1)

$$\Gamma_{\text{M1}} = 1A_g + 2B_g + 1A_u + 2B_u$$

– катионов лития, бария и лантана в общих позициях (позиция M2 в восьмивершинниках)

$$\Gamma_{\text{M2}} = 3A_g + 3B_g + 3A_u + 3B_u.$$

Эти колебания активны в ИК-спектрах поглощения и должны иметь частоты ниже 500 cm^{-1} . ИК-спектры характеризуются большой шириной полос, которые перекрываются, являясь суперпозицией нескольких близкорасположенных линий [7, 18] (рис. 3). Кроме того, в этой же области спектра должны наблюдаться полосы, относящи-

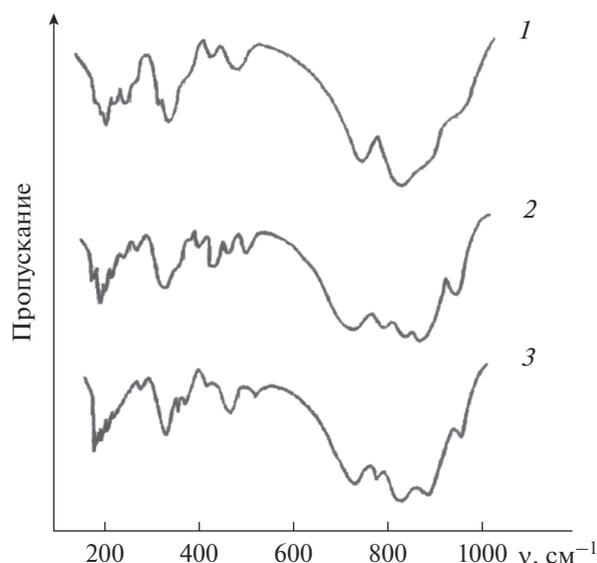


Рис. 3. ИК-спектры $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{Gd}_3(\text{MoO}_4)_8$ (1), $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8$ (2), $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8:\text{Er}^{3+}$ (3).

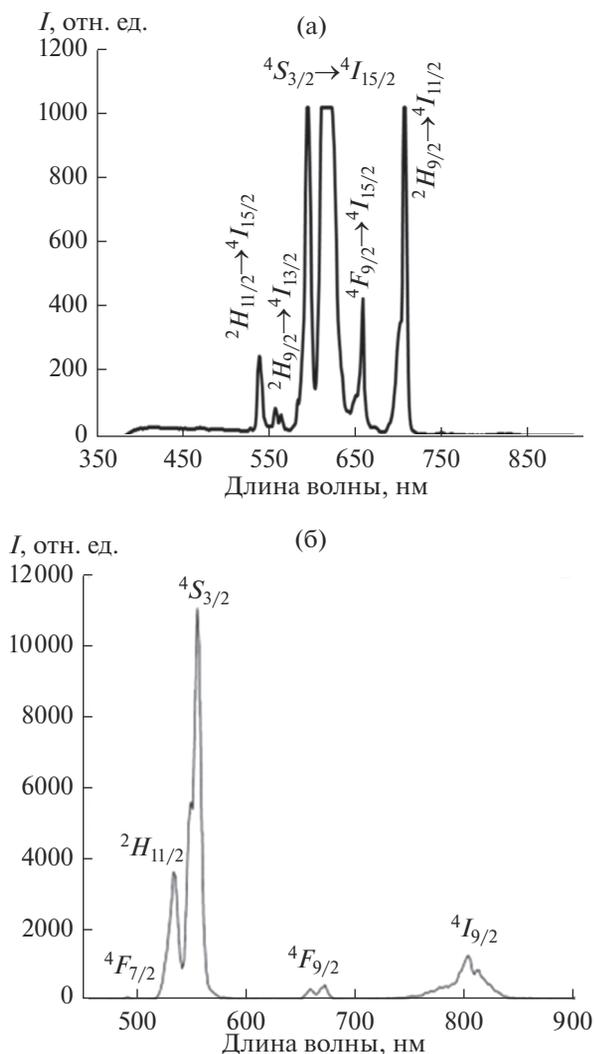


Рис. 4. Спектры люминесценции $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_{2.85}\text{Er}_{0.15}(\text{MoO}_4)_8$ ($\lambda_{\text{возб}} = 365$ нм) (а), $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_{2.85}\text{Er}_{0.15}(\text{MoO}_4)_8$ ($\lambda_{\text{возб}} = 977$ нм) (б).

еся к деформационным, либрационным и трансляционным колебаниям MoO_4 -групп.

Зарегистрированные спектры исследованных соединений в своей высокочастотной (990–660 см^{-1}) части не имеют заметных различий. Полосы поглощения этой области спектра, относящиеся к валентным колебаниям MoO_4 -групп, плохо разрешены. Это является следствием реализации описанного способа размещения в кристалле катионов по кристаллографическим позициям и связанной с этим статистикой в искажении тетраэдрических анионных группировок. В области деформационных колебаний MoO_4 -групп и колебаний катионных подрешеток (ниже 500 см^{-1}) в спектре $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8:\text{Er}^{3+}$ зарегистрировано до 14 полос поглощения. В то же время спектры рассматриваемого соединения в данной об-

ласти очень близки к спектру $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{Gd}_3(\text{MoO}_4)_8$. Это свидетельствует о том, что колебания катионных подрешеток близки между собой и с деформационными колебаниями тетраэдров MoO_4 .

Частоты внешних колебаний MoO_4 -групп и колебаний подрешеток тяжелых катионов имеют примерно те же значения, что и в случае $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{Gd}_3(\text{MoO}_4)_8$.

К либрационным колебаниям MoO_4 -групп отнесены полосы с частотами 164–156 см^{-1} , бария – 91–90 см^{-1} . Трансляционные колебания молибдена перемешаны с колебаниями атомов подрешетки редкоземельного элемента и имеют частоты 265 и 186 см^{-1} . В длинноволновой области спектров исследованных соединений зарегистрированы две полосы – 232–227 и 263–257 см^{-1} , отнесенные к колебаниям катионов лития [7, 18].

Легирование люминесцентного материала $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8:\text{Er}^{3+}$ ионами эрбия является эффективным способом воздействия на повышение интенсивности люминесценции ИК- и фотолюминофоров с шелитоподобной структурой. Активация люминофоров ионами Er^{3+} , способными поглощать ИК-излучение и преобразовывать его в видимую антистоксовую люминесценцию, позволяет повышать КПД оптических квантовых генераторов. Спектральный состав стационарной люминесценции $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8:\text{Er}^{3+}$ при $\lambda_{\text{возб}} = 365$ нм определяется полосами, соответствующими оптическим 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, соответствующей переходу $4S_{3/2} \rightarrow 4I_{15/2}$. Слева и справа от этих зеленых полос наблюдаются более слабые полосы излучения в областях 535–538 и 556–560 нм, обусловленные переходами $2H_{11/2} \rightarrow 4I_{15/2}$ и $2H_{9/2} \rightarrow 4I_{13/2}$ соответственно. В красной области спектра происхождение полос обусловлено переходами $4F_{9/2} \rightarrow 4I_{15/2}$, $2H_{9/2} \rightarrow 4I_{11/2}$, спектр которых простирается от 660 до 705 нм и имеет более сложную структуру, что связано с расщеплением возбужденного состояния $4F_{9/2}$ на 5 мультиплетов.

$\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_{2.85}\text{Er}_{0.15}(\text{MoO}_4)_8$ обладает эффективной антистоксовой люминесценцией в видимой области при возбуждении ИК-излучением. Происхождение наблюдаемых полос при возбуждении ($\lambda_{\text{возб}} = 977$ нм) в спектрах антистоксовой люминесценции могут быть объяснены следующим образом. В соответствии с известной схемой [9] после двухстадийного последовательного возбуждения ионов Er^{3+} до уровня $4F_{7/2}$ в результате безызлучательных релаксаций происходит засе-

ление возбужденных уровней ${}^4H_{11/2}$, ${}^4S_{3/2}$, ${}^4F_{9/2}$, ${}^4I_{9/2}$, 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 при 531, 552, 660, 800 нм. Полосы 531 и 552 нм соответствуют переходам ${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ и ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ в ионах Er^{3+} . Излучение при 660 нм обусловлено переходом ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, при 800 нм – переходом ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$. Слабая синяя полоса при 490 нм связана с переходом ${}^4F_{7/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$. 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 ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ и ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$. При переходе с высоко лежащих уровней энергии может наблюдаться видимая люминесценция. Характер спектров обусловлен влиянием кристаллической решетки матрицы на штарковскую структуру основного и возбужденного уровней иона-активатора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом твердофазного синтеза получен люминофор $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8:\text{Er}^{3+}$, принадлежащий к слоистой шеелитоподобной структуре (пр. гр. $C2/c$). Изучение люминесцентных характеристик показало, что 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.

$\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{La}_3(\text{MoO}_4)_8:\text{Er}^{3+}$ обладает эффективной антистоксовой люминесценцией в видимой области при возбуждении ИК-излучением. Происхождение наблюдаемых полос при возбуждении ($\lambda_{\text{возб}} = 977$ нм) в спектрах антистоксовой люминесценции могут быть объяснено заселением возбужденных уровней ${}^4H_{11/2}$, ${}^4S_{3/2}$, ${}^4F_{9/2}$, ${}^4I_{9/2}$, что приводит к антистоксовой люминесценции в области 530–850 нм.

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. Клевцова Р.Ф., Васильев А.Д., Глинская Л.А. и др. Кристаллоструктурное исследование тройных молибдатов состава $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{R}_3(\text{MoO}_4)_8$ ($\text{R} = \text{Gd}, \text{Tm}$) // Журн. структур. химии. 1992. Т. 33. № 3. С. 126–130.

3. 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. doi 10.1021/ic300221m
4. 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. doi 10.7868/S0044457X15010122
5. 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.
6. Каминский А.А. Спектроскопия кристаллов. М.: Наука, 1975. 255 с.
7. Кожевникова Н.М., Мохосоев М.В. Тройные молибдаты. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского государственного университета, 2000. 298 с.
8. 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 // 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. Казарян А.К., Тимофеев Ю.Р., Фок М.В. Антистоксовое преобразование излучения в люминофорах с редкоземельными ионами // Труды ФИАН. 1986. Т. 175. С. 4–65.
11. Евдокимов А.А., Ефремов В.А., Трунов В.К. и др. Соединения редкоземельных элементов. Молибдаты, вольфраматы. М.: Наука, 1991. 267 с.
12. 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.
13. 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. doi org/10.1016/j.optmat.2014.03.043
14. 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 $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Er}^{3+}$ // Неорганические материалы. 2004. Т. 40. № 8. С. 963–968.
15. Грузинцев А.Н. Антистоксовая люминесценция $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Er}^{3+}$ // Неорганические материалы. 2014. Т. 50. № 1. С. 64–69. doi 10.7868/S0002337X14010084
16. Кожевникова Н.М. Синтез и изучение фазообразования в системах $\text{K}_2\text{MoO}_4\text{--SrMoO}_4\text{--R}_2(\text{MoO}_4)_3$, $\text{R} = \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}$ // Журн. неорганической химии. 2012. Т. 57. № 5. С. 714–717.
17. Кожевникова Н.М. Синтез и исследование тройных молибдатов $\text{RbSrR}(\text{MoO}_4)_3$ ($\text{R} = \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}$) шеелитоподобной структуры // Журн. неорганической химии. 2013. Т. 58. № 3. С. 328–331. doi 10.7868/S0044457X13020116
18. Петров К.И., Полозникова М.Э., Шарипов Х.Т., Фомичёв В.В. Колебательные спектры молибдатов и вольфраматов. Ташкент: ФАН, 1990. 135 с.