

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА
НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

УДК 54.057+539.26

СИНТЕЗ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ ФТОРИДА БАРИЯ С ФТОРИДАМИ
РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ
АП-КОНВЕРСИОННЫХ СВОЙСТВ

© 2023 г. А. А. Волчек^а, *, С. В. Кузнецов^а

^аБрянский государственный университет им. академика
И.Г. Петровского, ул. Бежицкая, 14, Брянск, 241023 Россия

*e-mail: angelina.vol4ek@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.12.2022 г.

После доработки 28.03.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

Методом твердофазного синтеза получены твердые растворы на основе фторида бария, легированного ионами редкоземельных элементов. По данным рентгенофазового анализа, полученные образцы имеют однофазную структуру флюорита. Увеличение концентрации редкоземельных ионов приводит к уменьшению объема кристаллической структуры. При облучении лазером 980 нм (мощность излучения 1.2 Вт/см²) наблюдается люминесценция в видимой области спектра. Наличие иона Yb³⁺ в качестве сенсibilизатора увеличивает интенсивность люминесценции для фторидов бария, легированных ионами Er³⁺. Включение во фторид бария, легированный ионом Er³⁺, ионов Tm³⁺ приводит к уменьшению общей интенсивности излучения и доминированию люминесценции в красной области спектра. Для образцов определены координаты цвета, вычисленные по данным фотолюминесценции по стандарту CIE 31. Полученные материалы заданного состава способны преобразовывать инфракрасное излучение в свет видимого диапазона.

Ключевые слова: фторид бария, фториды редкоземельных элементов, люминофоры, твердые растворы

DOI: 10.31857/S0044457X22602371, EDN: MZCUSK

ВВЕДЕНИЕ

Ап-конверсионная люминесценция является нелинейным оптическим процессом преобразования длинноволнового возбуждающего излучения в коротковолновое за счет механизмов суммирования энергии [1]. Отличительной особенностью процесса ап-конверсии является передача энергии через метастабильные промежуточные энергетические уровни, используемые в качестве резервуара для хранения энергии возбуждения [2]. Хотя процесс ап-конверсионного преобразования был открыт еще в 60-х годах прошлого века [3], по-прежнему остается актуальным вопрос поиска эффективных ап-конверсионных материалов, способных преобразовывать возбуждающее излучение ближнего инфракрасного (БИК) диапазона в видимый диапазон электромагнитных волн [4]. Матрица, в которую вводятся редкоземельные ионы, играет важную роль в процессах передачи и преобразования БИК, поскольку эффективность передачи и спектр люминесценции зависит от ее характеристик [5]. Для люминофоров эффективнее использовать матрицы с низкими значениями энергии фононов. Это позволяет избежать процессов потери энергии по механизмам многофононной

релаксации. Наилучшими матрицами для передачи энергии по показателям фоновых колебаний являются галогениды [6, 7]: иодиды (~144 см⁻¹), бромиды (~172 см⁻¹), хлориды (~260 см⁻¹), фториды (BaF₂, ~319 см⁻¹) и оксиды [8, 9], такие как Y₂O₃ (~600 см⁻¹). Галогениды являются идеальными люминесцентными носителями с точки зрения энергии фононов, но главным недостатком тяжелых галогенидов является высокая гигроскопичность. Оксиды обладают высокой химической стабильностью, но у них относительно высокая энергия фононов. Фториды обладают как низкой энергией фононов, так и относительно хорошей стабильностью, поэтому часто используются в качестве материалов-носителей ап-конверсионных материалов [10, 11]. Люминофоры на основе фторидов щелочноземельных металлов могут быть использованы как эффективные преобразователи инфракрасного излучения [12].

В зависимости от природы легирующей добавки и ее концентрации изменяется спектр люминесценции [7, 13]. Для БИК ап-конверсионных преобразований чаще всего используют ионы Er³⁺, Tm³⁺, Eu³⁺ [2]. Как показано в работе [4], ионы

Er^{3+} , Tm^{3+} и Eu^{3+} имеют разветвленную сеть уровней энергии, соответствующую их метастабильным состояниям, поэтому они могут выступать в качестве эффективных преобразователей длинноволнового возбуждающего излучения в видимую область спектра. Согласно [14], ион Yb^{3+} имеет один метастабильный уровень и характеризуется большим поперечным сечением поглощения ($11.7 \times 10^{-21} \text{ см}^2$) в области 980 нм. Поскольку метастабильный уровень энергии ${}^2\text{F}_{5/2}$ иона Yb^{3+} совпадает с уровнем ${}^4\text{I}_{11/2}$ иона Er^{3+} , система, легированная парой $\text{Er}^{3+} : \text{Yb}^{3+}$, имеет большую эффективность преобразования полученной энергии в видимую область спектра.

Для получения твердых растворов фторидов щелочных и щелочноземельных металлов в зависимости от требуемого конечного вида люминофора используют различные методы синтеза: гидро- или сольвотермальный [12, 15], из расплава [16] и высокотемпературное спекание в твердой фазе [17, 18].

Метод получения твердых растворов на основе фторида бария, легированного редкоземельными ионами из водных растворов, не подходит для получения стехиометрического состава, поскольку в процессе соосаждения образуется двухфазный осадок в диапазоне концентраций 1–25 мол. % [19] и фтористый барий с небольшим количеством редкоземельного элемента (РЗЭ), который осаждается после основной фазы. Это объясняется различной растворимостью фтористого бария и фторидов РЗЭ.

Цель настоящей работы – изучение возможности получения твердых растворов на основе фторида бария, легированных фторидами РЗЭ, в широком диапазоне концентраций, твердофазным методом, а также исследование их люминесцентных характеристик.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Методика синтеза

Чистые фториды BaF_2 , EuF_3 , ErF_3 , TmF_3 , YbF_3 получали из BaCO_3 квалификации “х. ч.” и Eu_2O_3 , Er_2O_3 , Yb_2O_3 , Tm_2O_3 (99.99%) растворением в HCl марки “ос. ч. 20–4”. К хлоридному раствору при постоянном перемешивании приливали плавиковую кислоту (массовая доля 40%, х. ч.) в десятикратном избытке. Осадок отмывали методом декантации шесть раз с добавлением HF для предотвращения гидролиза. Отсутствие ионов Cl^- контролировали по реакции с раствором AgNO_3 .

Осадок отделяли центрифугированием (8000 об/мин) и сушили в вакуумном эксикаторе над твердой щелочью для удаления избыточной влаги и HF .

Следы воды удаляли нагреванием в никелевом тигле под вакуумом (10 мм рт. ст.) со скоростью 7 град/мин в течение 120 мин. Обезвоженный образец перетирали в агатовой ступке и хранили в запаянной ампуле в атмосфере аргона.

Методика спекания

Стехиометрические количества фторидов бария и редкоземельного элемента перетирали и помещали в кварцевую ампулу (поверхность предварительно графитизировали) для изоляции от паров воды и кислорода. Ампулу заполняли инертным газом Ar и нагревали в индукционной печи с графитовым тиглем. Контроль температуры осуществляли высокотемпературным пирометром DT-8867H. Процесс нагрева проводили в несколько этапов:

1. выдерживание в индукционной печи при 200°C в течение 10 мин;
2. повышение температуры на 100°C каждые 10 мин до 900°C ;
3. выдержка при 900°C в течение 20 мин.

Образец охлаждали на воздухе, затем извлекали из ампулы и перетирали в агатовой ступке.

Процесс спекания проводили два раза для достижения гомогенности твердого раствора.

Методика проведения и измерения рентгеновских дифракционных спектров

Рентгенофазовый анализ синтезированных образцов проводили на универсальном рентгеновском спектрометре СУР-01 РЕНОМ в диапазоне углов $2\theta = 20^\circ\text{--}80^\circ$. Образец полученного твердого раствора в виде тонкого порошка запрессовывали в кювету. Условия снятия спектра: напряжение 30 кВ, сила тока 4.8 мА, CuK_α -излучение, Ni -фильтр, шаг 0.03° , время экспозиции 1 с.

Расшифровку полученных рентгенограмм осуществляли в программе Match с использованием открытой базы спектров ISTM.

Методика проведения и измерения люминесцентных спектров

Для исследования ап-конверсионной люминесценции использовали прибор Флюорат-02 “Панорама”, включающий волоконно-оптическую приставку ВОЛОС-Рb-Эксклюзив. Настройка измерения: чувствительность ФЭУ средняя, усреднение 0.1 с. Возбуждение ап-конверсионной люминесценции осуществляли лазером с длиной волны $980 \pm 5 \text{ нм}$ и мощностью 1.2 Вт/см^2 . Между возбуждающим лазером и оптоволоконным углом 90° (относительно образца угол падения 45° , угол измерения излучения 45°).

Толщина слоя порошка составляла $\sim 1 \text{ мм}$. Образец предварительно прессовали при нагрузке в 10 т.

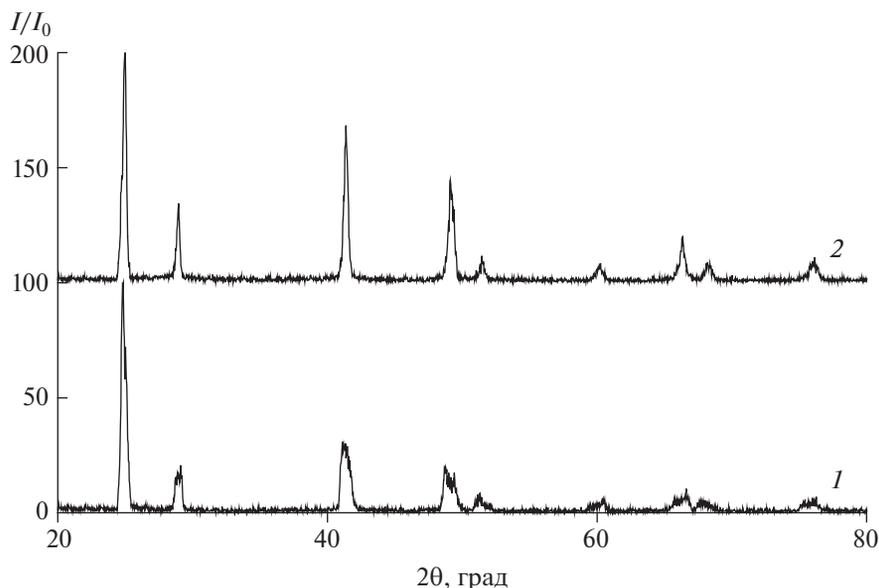


Рис. 1. Дифрактограммы твердого раствора состава 90% BaF_2 –10% ErF_3 : 1 – первое спекание, 2 – второе спекание.

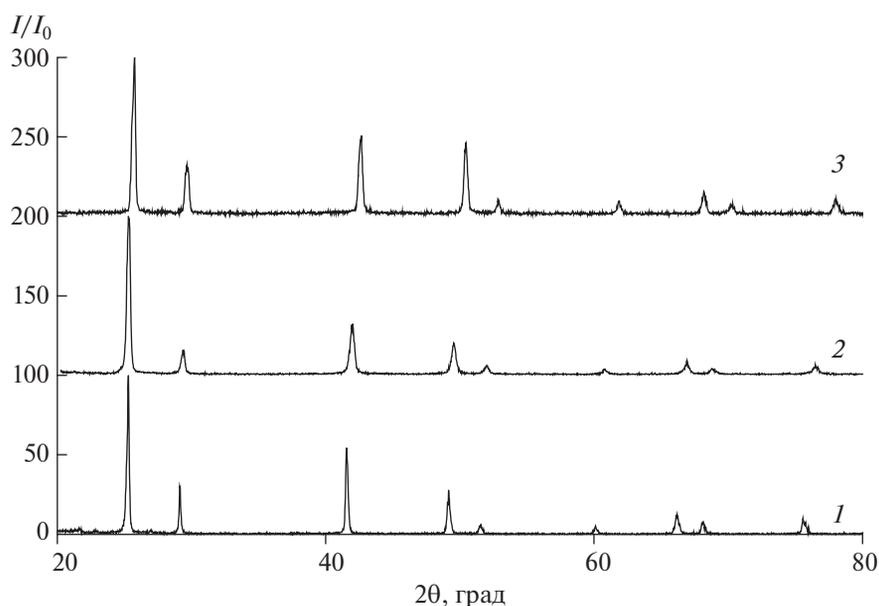


Рис. 2. Дифрактограммы твердого раствора состава $(100-x)\text{BaF}_2-x\text{ErF}_3$, $x = 2, 13, 30\%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рентгенофазовый анализ

Рентгенограммы образца 90% BaF_2 –10% ErF_3 после термической обработки представлены на рис. 1. Анализ показывает, что при первом процессе спекания образуются твердые растворы со структурой флюорита на основе матрицы BaF_2 . После второго процесса спекания система является однородной структурой флюорита без посторонних фаз и искажений.

На рис. 2 приведены дифрактограммы твердых растворов на основе фторида бария с различным замещением бария на эрбий. Синтезированные твердые растворы имеют кристаллическую структуру флюорита.

Дифрактограммы твердых растворов на основе фторида бария с различными замещениями бария на фториды РЗЭ представлены на рис. 3. Все полученные системы имеют однофазовую однородную структуру флюорита без искажения кристаллической структуры. При увеличении концен-

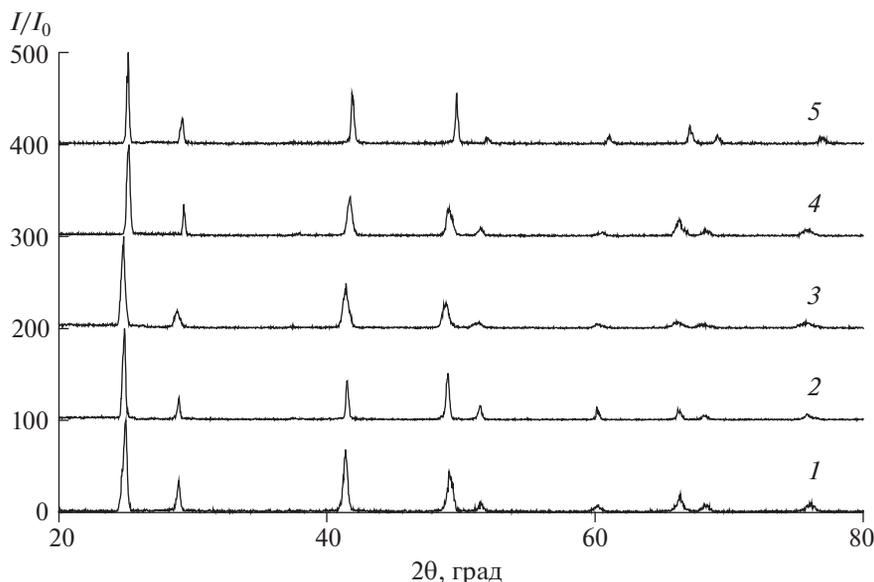


Рис. 3. Дифрактограммы твердого раствора $\text{BaF}_2\text{-RF}_3$ состава с различным молярным соотношением компонентов: 1 – 90% BaF_2 –10% ErF_3 ; 2 – 90% BaF_2 –5% ErF_3 –5% YbF_3 ; 3 – 90% BaF_2 –6% YbF_3 –4% EuF_3 ; 4 – 90% BaF_2 –5% ErF_3 –5% TmF_3 ; 5 – 80% BaF_2 –16% YbF_3 –4% EuF_3 .

трации наблюдается относительное уширение и смещение пиков в область дальних углов на дифрактограмм. Смещение в область дальних углов происходит за счет встраивания в решетку фторида бария ионов РЗЭ с меньшим ионным радиусом.

Параметры твердых растворов в кубической решетке определяли по формуле $\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2}$, межплоскостные расстояния d – по формуле Вульфа–Брэгга: $d_{hkl} = n\lambda/(2\sin\theta)$. С увеличением концентрации фторидов лантаноидов кристаллическая решетка фторида бария сужается (табл. 1).

Таблица 1. Кристаллографические данные и параметры уточнения структуры

Состав вещества, мол. %	Параметр a , Å	Объем, Å ³
BaF_2	6.1911(9)	237.31(34)
98% BaF_2 –2% ErF_3	6.1591(3)	233.64(57)
90% BaF_2 –6% YbF_3 –4% EuF_3	6.1504(9)	232.66(48)
90% BaF_2 –5% YbF_3 –5% ErF_3	6.1395(9)	231.43(01)
90% BaF_2 –5% ErF_3 –5% TmF_3	6.1191(3)	229.12(36)
90% BaF_2 –10% ErF_3	6.1321(3)	230.58(70)
87% BaF_2 –13% ErF_3	6.1164(0)	228.81(69)
80% BaF_2 –16% YbF_3 –4% EuF_3	6.0656(2)	223.16(43)
70% BaF_2 –30% ErF_3	5.9953(8)	215.50(14)

Ап-конверсионные спектры при возбуждении излучением с длиной волны 980 нм.

На рис. 4 показаны спектры ап-конверсионной люминесценции образцов при возбуждении диодным лазером с длиной волны 980 нм при комнатной температуре.

Образец состава 90% BaF_2 –5% ErF_3 –5% YbF_3 имеет самое эффективное преобразование энергии в видимую область за счет включения в состав YbF_3 , который обладает большим показателем сечения в области 980 нм. При возбуждении квант длинноволнового излучения поглощается ионом Yb^{3+} и переходит из основного энергетического уровня $^2\text{F}_{7/2}$ в метастабильное состояние $^2\text{F}_{5/2}$ [20, 21]. Далее происходит перенос энергии с уровня $^2\text{F}_{5/2}$ иона Yb^{3+} на метастабильный уровень $^4\text{I}_{11/2}$ иона Er^{3+} . Параллельно происходит процесс возбуждения иона Er^{3+} : $^4\text{I}_{15/2} \rightarrow ^4\text{I}_{11/2}$. Для возникновения люминесценции в видимой области спектра необходима передача энергии от возбужденного уровня $^4\text{I}_{11/2}$ (Er^{3+}) на верхние энергетические уровни с последующим излучением. Слабая полоса синего излучения при 408 нм связана с электронным переходом $\text{Er}^{3+} \ ^2\text{H}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, зеленое излучение при 520 и 548 нм – с переходами $^2\text{H}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ и $^4\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ соответственно, красное излучение при 660 нм отвечает переходу между уровнями $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, широкие полосы пика в области 800 нм характеризуют переход $^4\text{I}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$.

При ап-конверсионном излучении в зеленую и красную области возможно несколько механиз-

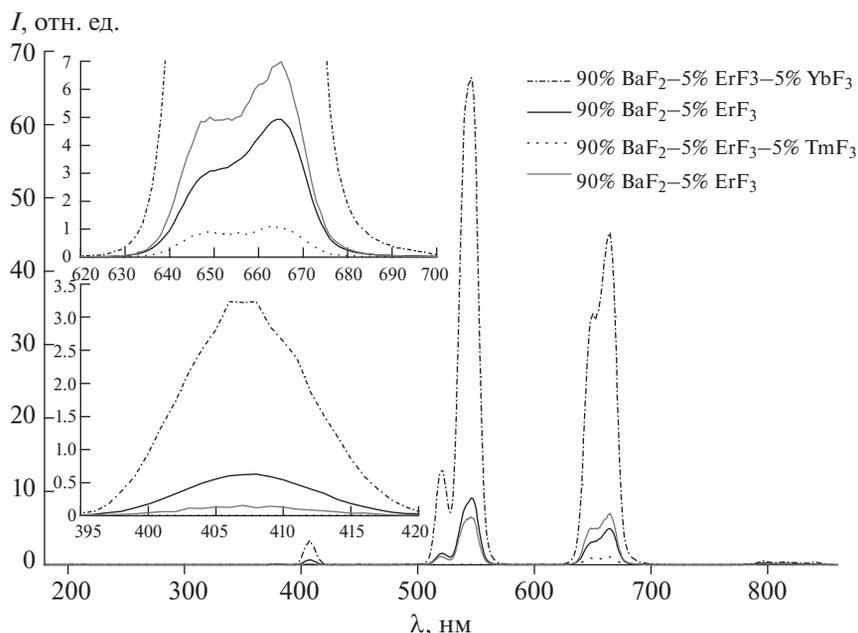


Рис. 4. Спектры ап-конверсионной люминесценции $(100-x)\text{BaF}_2-x\text{ErF}_3$, $x = 5, 10$; 90% $\text{BaF}_2-5\% \text{ErF}_3-5\% \text{YbF}_3$, 90% $\text{BaF}_2-5\% \text{ErF}_3-5\% \text{TmF}_3$.

мов передачи энергии: передача от возбужденного уровня ${}^2\text{F}_{5/2}$ (Yb^{3+}) на возбужденный уровень ${}^2\text{I}_{11/2}$ (Er^{3+}): ${}^2\text{I}_{11/2}(\text{Er}^{3+}) + {}^2\text{F}_{5/2}(\text{Yb}^{3+}) \rightarrow {}^4\text{F}_{7/2}(\text{Er}^{3+}) + {}^2\text{F}_{7/2}(\text{Yb}^{3+})$; перекрестная передача с двух возбужденных уровней ${}^2\text{I}_{11/2}(\text{Er}^{3+}) + {}^2\text{I}_{11/2}(\text{Er}^{3+}) \rightarrow {}^4\text{F}_{7/2}(\text{Er}^{3+}) + {}^4\text{I}_{15/2}(\text{Er}^{3+})$ и дополнительное возбуждение уровня ${}^2\text{I}_{11/2}(\text{Er}^{3+})$ лазером: ${}^2\text{I}_{11/2}(\text{Er}^{3+}) + \text{фотон}(980 \text{ нм}) \rightarrow {}^4\text{F}_{7/2}$. За счет короткого времени жизни электрона на уровне ${}^4\text{F}_{7/2}$ иона Er^{3+} происходит безызлучательная передача энергии на уровень ${}^2\text{H}_{9/2} \rightarrow {}^2\text{H}_{11/2}$ и ${}^2\text{H}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{S}_{3/2}$. С данных энергетических уровней происходит излучение в зеленой области при 520 нм (${}^2\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$) и 548 нм (${}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$). С уровня ${}^4\text{S}_{3/2}$ также происходит процесс безызлучательной передачи энергии на уровень ${}^4\text{F}_{9/2}$ с последующим излучением в красной области спектра.

Для твердых растворов 90% $\text{BaF}_2-10\% \text{ErF}_3$ и 95% $\text{BaF}_2-5\% \text{ErF}_3$ спектр ап-конверсионной люминесценции схож со спектром твердого раствора, содержащего ионы Yb^{3+} . Эффективное сечение для иона Er^{3+} на несколько порядков ниже, чем для Yb^{3+} [7], и передача энергии менее эффективна. При возбуждении лазерным источником иона Er^{3+} осуществляется переход энергии ${}^4\text{I}_{15/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ с последующими процессами передачи энергии между ионами Er^{3+} : перекрестная передача с двух возбужденных уровней ${}^2\text{I}_{11/2}(\text{Er}^{3+}) - {}^2\text{I}_{11/2}(\text{Er}^{3+}) + {}^2\text{I}_{11/2}(\text{Er}^{3+}) \rightarrow {}^4\text{F}_{7/2}(\text{Er}^{3+}) + {}^4\text{I}_{15/2}(\text{Er}^{3+})$,

непосредственное возбуждение уровня ${}^2\text{I}_{11/2}$ (Er^{3+}) лазером: ${}^2\text{I}_{11/2}(\text{Er}^{3+}) + \text{фотон}(980 \text{ нм}) \rightarrow {}^4\text{F}_{7/2}$. Интенсивность свечения образцов, легированных ионами Er^{3+} , излучающего в зеленой области спектра, выше для образца с большим процентным содержанием эрбия. Соотношение зеленого и красного излучения в 95% $\text{BaF}_2-5\% \text{ErF}_3$ составляет 1 : 1, в 90% $\text{BaF}_2-10\% \text{ErF}_3$ — 1.8 : 1.

Для образца состава 90% $\text{BaF}_2-5\% \text{ErF}_3-5\% \text{TmF}_3$ наблюдается слабая полоса излучения при 640–670 нм в красной области спектра, характерная для ионов Tm^{3+} (${}^1\text{G}_4 \rightarrow {}^3\text{F}_4$) и Er^{3+} (${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$), и широкие полосы пика при 800 нм для Tm^{3+} (${}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$) и Er^{3+} (${}^4\text{I}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$). Поскольку для процесса возникновения излучения, характерного для иона Tm^{3+} , необходима заселенность верхних энергетических уровней Er^{3+} [22], а сам ион не способен поглощать энергию в 980 нм, заселенность уровня ${}^1\text{G}_4$ осуществляется посредством передачи энергии от иона Er^{3+} через энергетический уровень ${}^2\text{H}_{9/2}$ или уровни ${}^4\text{F}_{3/2-5/2}$ с последующей безызлучательной релаксацией в ионе Tm^{3+} на уровни ${}^3\text{F}_{2-3}$ и испускание излучения в красной области 640–670 нм. Возможна релаксация на уровень ${}^3\text{H}_4$ с излучением в БИК-области (790–810 нм), а также процесс переброса энергии с уровня ${}^3\text{H}_4$ иона Tm^{3+} на уровень ${}^4\text{I}_{9/2}$ иона Er^{3+} с последующим излучением в БИК-области (800–815 нм).

Важной характеристикой излучения люминофоров являются координаты цветности, вычис-

ленные по данным фотолюминесценции по стандарту CIE 31: 90% BaF₂–5% ErF₃–5% YbF₃ (0.284, 0.691); 95% BaF₂–5% ErF₃ (0.436, 0.555); 90% BaF₂–10% ErF₃ (0.377, 0.608); 90% BaF₂–5% ErF₃–5% TmF₃ (0.701, 0.259).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом твердофазного синтеза получены твердые растворы заданного состава на основе фторида бария, легированного ионами РЗЭ. По данным рентгенофазового анализа, все образцы после первого спекания являются твердыми растворами с дефектами в кристаллической решетке. После второго спекания система имеет однофазную однородную структуру флюорита. Облучение лазером ($\lambda = 980 \pm 5$ нм) с мощностью возбуждающего излучения 1.2 Вт/см² приводит к появлению люминесценции в видимой области спектра. Наличие иона Yb³⁺ в качестве сенсibilизатора увеличивает интенсивность люминесценции для фторидов бария, легированных Er³⁺. Включение во фторид бария легированных ионом Er³⁺ ионов Tm³⁺ приводит к уменьшению общей интенсивности излучения и доминированию красной люминесценции. Зеленая люминесценция эрбия практически полностью отсутствует.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Auzel F.* // Chem. Rev. 2004. V. 104. № 1. P. 139. <https://doi.org/10.1021/cr020357g>
- Marti'n-Rodri'guez R., Valiente R., Polizzi S. et al.* // J. Phys. Chem. C. 2009. V. 113. № 28. P. 12195. <https://doi.org/10.1021/jp901711g>
- Овсянкин В.В., Феофилов П.П.* // Письма в ЖЭТФ. 1966. Т. 3. С. 494.
- Emory M. Chan.* // Chem. Soc. Rev. 2015. V. 44. P. 1653. <https://doi.org/10.1039/C4CS00205A>
- Madirov E.I., Konyushkin V.A., Nakladov A.N. et al.* // J. Mater. Chem. C. 2021. V. 9. P. 3493. <https://doi.org/10.1039/d1tc00104c>
- Saleta Reig D., Grauel B., Konyushkin V.A. et al.* // J. Mater. Chem. C. 2020. V. 8. P. 4093. <https://doi.org/10.1039/C9TC06591A>
- Раджабов Е.А., Шендрюк Р.Ю.* // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128. № 11. С. 1621. <https://doi.org/10.21883/OS.2020.11.50164.10-20>
- Li T., Guo C.-F., Yang Y.-M. et al.* // Acta Mater. 2013. V. 61. P. 7481. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.08.060>
- Silva J.R., Gouveia-Neto A.S., Bueno L.A.* // Nonlinear Freq. Gener. Convers. Mater. Devices. Appl. 2014. V. 8964. <https://doi.org/10.1117/12.2036374>
- Liao J., Yang Z., Wu H. et al.* // J. Mater. Chem. C. 2013. V. 1. P. 6541. <https://doi.org/10.1039/c3tc30895b>
- Betina A.A., Bulatova T.S., Kolesnikov I.E. et al.* // Russ. J. Gen. Chem. 2022. V. 92. P. 2832. <https://doi.org/10.1134/S1070363222120349>
- Rafique R., Baek S.H., Phan L.M.T. et al.* // Mater. Sci. Eng. C. 2019. V. 99. P. 1067. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.02.046>
- Gromak N.A., Kolokolov F.A., Dotsenko V.V. et al.* // Russ. J. Gen. Chem. 2021. V. 91. P. 685. <https://doi.org/10.1134/S1070363221040174>
- Zhao Y., Wang X., Zhang Y. et al.* // J. Alloys Compd. 2020. V. 84. 154998. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154998>
- Han X., Song E., Chen W. et al.* // J. Mater. Chem. C. 2020. V. 8. P. 9836. <https://doi.org/10.1039/D0TC01502D>
- Ушаков С.Н., Усламина М.А., Ницев К.Н. и др.* // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128. № 5. С. 607. <https://doi.org/10.21883/OS.2020.05.49317.278-19>
- Cheng L., Cheng G., Dong R., Zhang X.* // Adv. Mater. Res. 2011. V. 287. P. 490. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.287-290.490>
- Liu X., Aidilibike T., Guo J.* // RSC Advances. 2017. V. 7. P. 14010. <https://doi.org/10.1039/C7RA00071E>
- Karbowiak M., Cichos J.* // J. Alloys Compd. 2016. P. 258. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.02.255>
- Yun X., Zhou J., Zhu Y. et al.* // J Phys. Chem. Solids. 2022. V. 163. P. 110545. <https://doi.org/10.1016/j.jpss.2021.110545>
- Wang Z., Jiao H., Fu Z.* // J. Lumin. 2019. V. 206. P. 273. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.10.034>
- Rivera V.A.G., Silva O.B., El-Amraoui M. et al.* // Optical Components and Materials XII. 2015. V. 9359. P. 935913. <https://doi.org/10.1117/12.2079344>