

УДК 666.1.535.37

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ ОКСИФТОРИДНЫХ СТЕКОЛ СИСТЕМЫ $\text{SrF}_2\text{—SiO}_2\text{—B}_2\text{O}_3\text{—Bi}_2\text{O}_3\text{—ZnO—Y}_2\text{O}_3$, АКТИВИРОВАННЫХ ОКСИДАМИ Er_2O_3 И Yb_2O_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 06.03.2023 г.

После доработки 16.04.2023 г.

Принята к публикации 17.04.2023 г.

Разработаны и синтезированы оксифторидные стекла в системе $\text{SrF}_2\text{—SiO}_2\text{—B}_2\text{O}_3\text{—Bi}_2\text{O}_3\text{—ZnO—Y}_2\text{O}_3$ при различном соотношении исходных компонентов. Исследованы спектрально-люминесцентные свойства стекол, активированных оксидами Er_2O_3 и Yb_2O_3 . По данным рентгенофазового анализа все образцы стекол рентгеноаморфны, определена температура стеклования (t_g). Изучение локальной структуры методом ИК-спектроскопии показало, что стекла, независимо от состава, содержат сложные полиборатные анионы, образованные $[\text{BO}_3]$ и $[\text{BO}_4]$ группами, также происходит встраивание висмута в сетку стекла с образованием Bi—O—Si связей и сеткообразователей в виде $[\text{BiO}_6]$ групп.

Ключевые слова: стекла, ИК-спектроскопия, редкоземельные ионы, ап-конверсионные люминофоры

DOI: 10.31857/S0002337X23080079, **EDN:** ISANEI

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое внимание уделяется развитию физико-химической базы направленного рационального поиска и разработке новых материалов на основе стекол с необходимыми спектрально-люминесцентными свойствами, которые обладают относительно низкими температурами синтеза и позволяют вводить большие концентрации редкоземельных активаторов [1–7]. За последние годы стекла, особенно оксидные и оксифторидные, вызывают повышенный интерес из-за нелинейных оптических свойств, которые важны для создания широкополосных инфракрасных лазеров, устройств оптической памяти, для записи и сохранения информации. Ап-конверсионные люминофоры, преобразующие возбуждающее инфракрасное излучение в видимое, на основе оксидных и оксифторидных стекол нашли практическое применение в солнечных батареях, для получения люминесцирующих покрытий светодиодов и трехмерных многоцветных дисплеев, активных элементов лазеров, для биомедицинской визуализации. Для этих целей используются фториды, оксифториды, оксидные матрицы, легированные редкоземельными ионами [1–5]. Система $\text{SrF}_2\text{—SiO}_2\text{—B}_2\text{O}_3\text{—Bi}_2\text{O}_3\text{—ZnO—Y}_2\text{O}_3$ позволяет получать стекла с широким диапазоном составов.

Успешное развитие современной техники и технологии во многом обусловлено разработками новых высокоэффективных функциональных материалов, значительная часть которых относится к стеклам, которые играют двойную роль нелинейной и усилительной среды и обладают однородностью размеров и технологическими преимуществами синтеза [1–15]. Особый интерес с точки зрения создания люминофоров представляют стекла, допированные редкоземельными элементами (РЗЭ). Наиболее подходящими матрицами для РЗЭ являются стекла, содержащие оксиды тяжелых металлов, в частности Y_2O_3 , Bi_2O_3 [1, 8, 9, 13]. В стеклах полосы поглощения более широкие за счет неоднородного уширения. Оксифторидные стекла сочетают в себе достоинства оксидных стекол (химическую и термическую стабильность) и фторидных (высокие квантовые выходы и широкие полосы поглощения). Такие стекла обладают высокими показателями преломления, высокой плотностью, протяженной областью прозрачности в видимом и ИК-диапазонах [2–6]. Стекла, содержащие B_2O_3 и ZnO , характеризуются значительными областями стеклообразования, что позволяет варьировать их состав и свойства. Соактивирование стекол ионами Bi^{3+} и РЗЭ приводит к увеличению квантового выхода люминесценции за счет перехода энергии с возбужденных уровней Bi^{3+} на R^{3+} [1, 6, 8, 9, 12]. Изучение вис-

Таблица 1. Состав образцов стекол и температура стеклования

Обозначение	Состав, мас. %	t_g , °C
Ст-1	30SrF ₂ –10SiO ₂ –15B ₂ O ₃ –15Bi ₂ O ₃ –10ZnO–8Y ₂ O ₃ –8Yb ₂ O ₃ –4Er ₂ O ₃	529
Ст-2	32SrF ₂ –12SiO ₂ –12B ₂ O ₃ –16Bi ₂ O ₃ –8ZnO–10Y ₂ O ₃ –8Yb ₂ O ₃ –2Er ₂ O ₃	537
Ст-3	33SrF ₂ –12SiO ₂ –10B ₂ O ₃ –17Bi ₂ O ₃ –8ZnO–10Y ₂ O ₃ –9Yb ₂ O ₃ –1Er ₂ O ₃	541

мутосодержащих стекол с оксидами РЗЭ перспективно для создания эффективных ап-конверсионных люминофоров.

Оксифторидные боросиликатные стекла имеют каркасную структуру с большим размером пустот, что облегчает зародышеобразование кристаллической фазы и в то же время ограничивает размеры образующихся частиц, что позволяет влиять на свойства люминофора посредством варьирования состава стекол и термообработки [2–6]. Оксифторидные стекла характеризуются широкими областями стеклообразования, уникальными оптическими свойствами и возможностями практического применения в таких областях, как оптика, квантовая электроника, лазерные технологии [2–7, 12–17].

Целью данной работы является получение оксифторидных стекол системы SrF₂–SiO₂–B₂O₃–Bi₂O₃–ZnO–Y₂O₃ с различным соотношением компонентов, легированных оксидами Er₂O₃ и Yb₂O₃, изучение их физико-химических и спектрально-люминесцентных свойств для использования в качестве ап-конверсионных люминофоров. Сведения об изучении люминесцентных свойств в этой системе в литературе отсутствуют.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для синтеза стекол использовали Bi₂O₃ квалификации “ос. ч.”, а также H₃BO₃, SiO₂, ZnO и SrF₂ квалификаций “х. ч.” и “ч. д. а.”, Y₂O₃, Yb₂O₃, Er₂O₃ “ос. ч.” с содержанием основного компонента 99.999%. Исходные реактивы, взятые в соответствующих пропорциях, тщательно перемешивали со спиртом в агатовой ступке до получения однородной гомогенной смеси, просушивали при 100–150°C и плавляли в керамическом тигле при 850–950°C. Плавление проводили в течение 6–8 ч, до полной гомогенизации расплава. Охлаждение проводилось инерционно вместе с печью. Синтезированы три состава стекол в системе SrF₂–SiO₂–B₂O₃–Bi₂O₃–ZnO–Y₂O₃, представленные в табл. 1.

Рентгенофазовый анализ выполняли на дифрактометре D8 ADVANCE фирмы Bruker AXS с использованием CuK_α-излучения в области углов $2\theta = 10^\circ\text{--}40^\circ$. Точность определения углов составляла 0.021°. Для идентификации фаз использовали базу данных ICDD 2003 г. Температуру стеклования

(t_g) определяли методом дифференциальной сканирующей калориметрии на синхронных термоаналитических комплексах NETZSCH STA 449F1. Навеску (15–20 мг) измельченного образца помещали в специальные платиновые тигли. В качестве эталона использовали пустой платиновый тигель, прокаленный при 1200°C до постоянной массы. Нагрев образцов проводили со скоростью 10°C/мин до температуры 1200°C с точностью определения температуры ±1°C.

Изучение структурных особенностей полученных стекол выполнено методом инфракрасной спектроскопии. ИК-спектры регистрировали на спектрометре ALPHA (Bruker, Германия) в диапазоне волновых чисел 600–4000 см⁻¹, на приставке НПВО (кристалл ZnSe) в области 400–2000 см⁻¹, исследования проводили на порошках, спрессованных в таблетки с KBr. Отнесение полос в ИК-спектрах к тем или иным структурным элементам кристаллической решетки и локальной структуры стекол осуществляли в соответствии с известными данными [2, 8–11].

Люминесцентные характеристики образцов люминофоров с различной концентрацией оксидов эрбия и иттербия 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). Схема реализации ап-конверсии в системе ионов Yb³⁺–Er³⁺ представлена в работе [16]. Энергетический выход ап-конверсионной люминесценции измерен в видимом диапазоне спектра с помощью интегрирующей сферы. Возбуждающее излучение вводилось внутрь сферы и фокусировалось на образце (размер пятна 1 см²). Приемником излучения являлся кремниевый фотодатчик TSL237 с диапазоном чувствительности 300–1100 нм. Интенсивность возбуждающего пучка измерялась с помощью как с помощью сферы, так и термометрического измерителя мощности лазерного излучения ИМО-2М. Интенсивность ап-конверсии измеряли через фильтр ЗС25, отсекающий инфракрасное излучение лазера 977 нм. Преобразование показаний TSL237 в мощность излучения (ватты) осуществлялось с помощью лазера 536 нм через ослабляющий фильтр HC13 с измеренной мощностью. Энергетический выход ап-конверсионной люминесценции (B_{en}) определялся как отношение излученной мощности к поглощенной (P_{em}/P_{abs}). Поглощен-

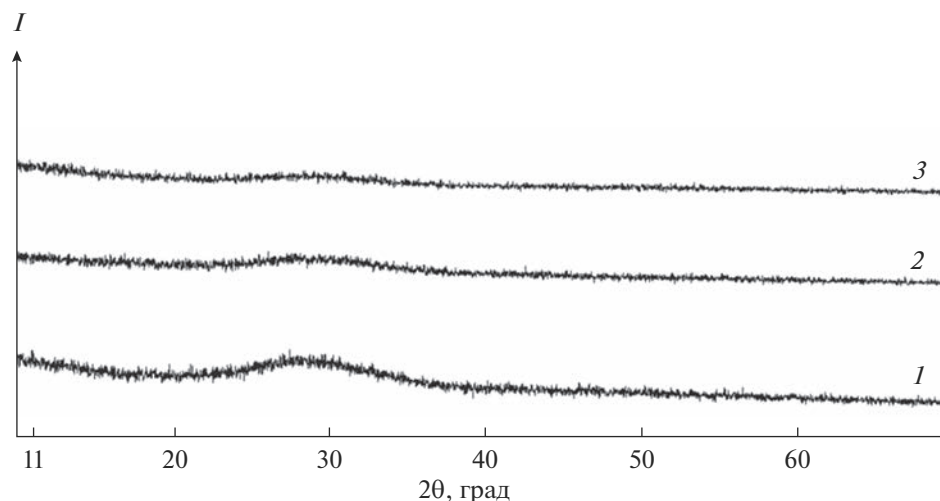


Рис. 1. Рентгенограммы стекол: Ст-1 (1), Ст-2 (2), Ст-3 (3).

ную мощность рассчитывали как разницу между рассеянием от стандартного рассеивающего образца, не содержащего легирующих ионов, и от исследуемого образца. Времена жизни ап-конверсионной люминесценции ионов Er^{3+} определены в люминофоре с максимальным значением $B_{en} = 0.39\%$ при переходах между уровнями ${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ и ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ (зеленая область спектра) и ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ (красная область спектра) с использованием интегрирующей сферы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Все образцы синтезированных стекол: $30\text{SrF}_2-10\text{SiO}_2-15\text{B}_2\text{O}_3-15\text{Bi}_2\text{O}_3-10\text{ZnO}-8\text{Y}_2\text{O}_3-8\text{Yb}_2\text{O}_3-4\text{Er}_2\text{O}_3$ (Ст-1), $32\text{SrF}_2-12\text{SiO}_2-12\text{B}_2\text{O}_3-16\text{Bi}_2\text{O}_3-8\text{ZnO}-10\text{Y}_2\text{O}_3-8\text{Yb}_2\text{O}_3-2\text{Er}_2\text{O}_3$ (Ст-2), $33\text{SrF}_2-12\text{SiO}_2-10\text{B}_2\text{O}_3-17\text{Bi}_2\text{O}_3-8\text{ZnO}-10\text{Y}_2\text{O}_3-9\text{Yb}_2\text{O}_3-1\text{Er}_2\text{O}_3$ (Ст-3), в которых оксид Y_2O_3 был частично замещен на лазерно-активные оксиды Er_2O_3 и Yb_2O_3 , рентгеноаморфны, о чем свидетельствуют отсутствие дифракционных пиков и наличие широкой линии (гало) с угловой шириной $10^\circ-20^\circ$ (рис. 1). Температура стеклования стекол указана в табл. 1, с увеличением содержания Bi_2O_3 и SrF_2 параметр t_g возрастает.

В ИК-спектрах стекол Ст-1, Ст-2, Ст-3, снятых в диапазоне $400-2000\text{ см}^{-1}$ (рис. 2), доминирует интенсивная полоса поглощения в области $800-1100\text{ см}^{-1}$ с максимумом 896 см^{-1} , относящаяся к валентным колебаниям $\text{Bi}-\text{O}$ в $[\text{BiO}_6]$ -полиэдрах [9]. Кроме того, в спектрах можно выделить еще три менее интенсивные полосы с максимумами около $673, 1239, 1353\text{ см}^{-1}$. Полоса в области $620-720\text{ см}^{-1}$ соответствует деформационным колебаниям $\text{B}-\text{O}-\text{B}$ в $[\text{BO}_3]$ -треугольниках, при-

сутствие бора в четверной координации подтверждают полосы с максимумами 932 и 976 см^{-1} . Полоса около 766 см^{-1} относится к связи $=\text{B}-\text{O}-\text{B}=\text{}$, в которой кислородный мостик находится между тригональным и тетрагональным атомами бора [4–6]. Полоса в области $1200-1500\text{ см}^{-1}$ имеет сложную форму и является суперпозицией двух компонент: полосы поглощения с максимумом 1239 см^{-1} и линии вблизи 1320 см^{-1} , первая компонента соответствует асимметричным бор-кислородным колебаниям в $[\text{BO}_3]$ -треугольниках, вторая – $\text{Bi}-\text{O}$ -валентным колебаниям в BiO_3 . Полоса с максимумом 867 см^{-1} относится к симметричным валентным колебаниям в $[\text{BiO}_6]$ -полиэдрах. Деформационные колебания концевых группировок $\text{Si}-\text{O}$ -связаны с полосой около 818 см^{-1} , колебания связей $\text{O}-\text{Si}-\text{O}$ в островных группах $[\text{SiO}_4]$ соответствуют области с максимумом при 932 см^{-1} [9], к которой также относятся бор-кислородные колебания в тетраэдрах $[\text{BO}_4]$. Полосы в области $450-460\text{ см}^{-1}$ обусловлены деформационными колебаниями $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ мостиков и колебаниями $\text{Zn}-\text{O}$ -связей [5–7]. Полосы с максимумами 668 и 689 могут быть отнесены к колебаниям $\text{Si}-\text{O}$ и $\text{Bi}-\text{O}$ в BiO_3 -пирамидах, полосы около 545 см^{-1} принадлежат колебаниям $\text{Ca}-\text{F}$ -связей [8–11]. Анализ ИК-спектров полученных стекол показал, что основное состояние ионов висмута в системах – октаэдрическое с образованием групп $[\text{BiO}_6]$, заряд ионов висмута – Bi^{3+} . Это позволяет предположить, что Bi_2O_3 выступает в качестве стеклообразующего оксида с формированием висмутатной структурной сетки из деформированных октаэдрических групп $[\text{BiO}_6]$ и происходит образование $\text{Bi}-\text{O}-\text{Si}$ -связей. Также стекла независимо от состава содержат сложные полиборатные анионы, образованные $[\text{BO}_3]$ - и $[\text{BO}_4]$ -груп-

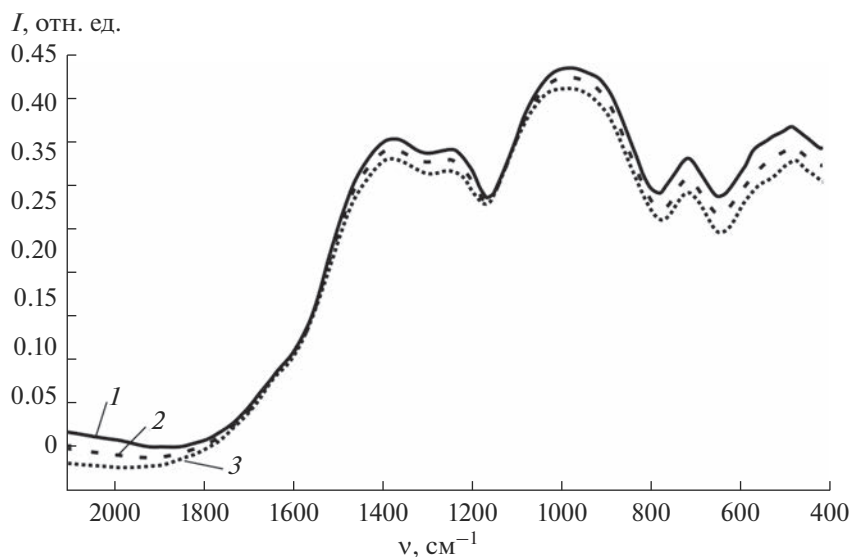


Рис. 2. ИК-спектры стекол: Ст-1 (1), Ст-2 (2), Ст-3 (3).

пами, при этом происходит встраивание висмута в сетку стекла с образованием связей $\text{Bi}-\text{O}-\text{Si}$ и сеткообразователей в виде $[\text{BiO}_6]$ -групп [5].

В [18, 19] ап-конверсионной люминесценцией принято называть люминесценцию, которая приводит к образованию кванта света с большей энергией, чем энергия кванта возбуждения. Ап-конверсионная люминесценция в ионах РЗЭ возникает в результате процессов, протекающих как внутри одного иона, так и благодаря кооперативным межионным взаимодействиям с суммированием энергии. 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 поглощенных фотонов, что приводит к увеличению энергии возбужденного метастабильного состояния и, соответственно, уменьшению длины волны люминесценции. Происхождение наблюдаемых полос при возбуждении ($\lambda_{\text{возб}} = 977 \text{ нм}$) в спектрах ап-конверсионной люминесценции могут быть объяснены следующим образом (рис. 3). 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 500–700 нм [2, 3, 18–21]. Спектры люминесценции обладают средней полосой излучения при 525 нм, полосой сильной интенсивности при 550 нм в зеленой области и средней полосой излучения при 663 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 663 нм в красной области спектра связано с переходом $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$. 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. 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 $^2H_{9/2}$ [13, 14]. При переходе с высоколежащих уровней энергии может происходить видимая люминесценция. Более высокая интенсивность обусловлена отношением концентраций ионов $\text{Yb}^{3+} : \text{Er}^{3+}$, равным 9 : 1, другие отношения концентраций ионов иттербия и эрбия не являются оптимальными. 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. Экспериментальные значения для энергетического выхода (B_{en}) составляют для активированных стекол: Ст-1 – 0.19%, Ст-2 – 0.23%, Ст-3 – 0.43%. Времена жизни ап-конверсионной люминесценции ионов Er^{3+} в люминофоре с максимальным значением $B_{\text{en}} = 0.43\%$ при переходах между уровнями $^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ и $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ (зеленая область спектра) и $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ (красная об-

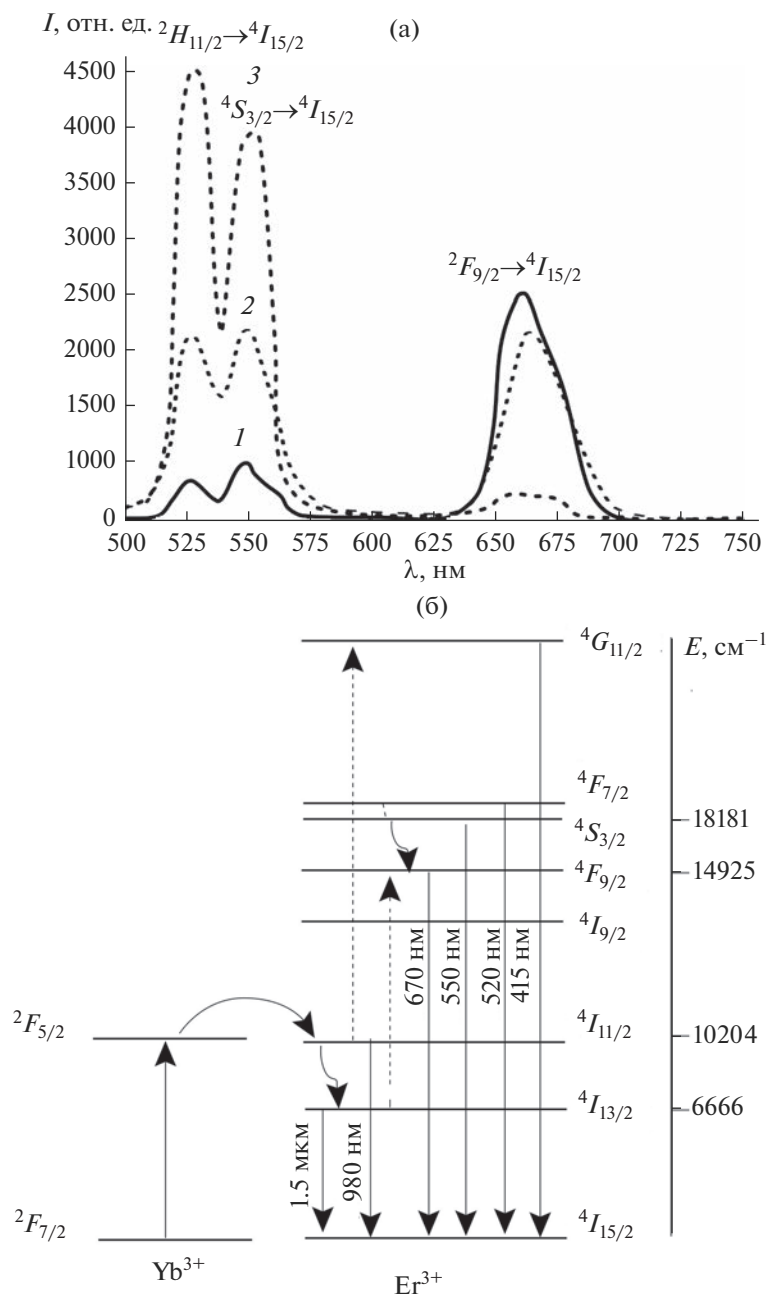


Рис. 3. Спектры люминесценции образцов люминофоров на основе оксифторидных стекол: Ст-1 (1), Ст-2 (2), Ст-3 (3) с разной концентрацией ионов активаторов (а) и схема реализации ап-конверсии в системе ионов $\text{Yb}^{3+}-\text{Er}^{3+}$ по данным [16] (б).

ласть спектра) составили 53 ± 5 и 23 ± 3 мкс. На рис. 4 [21] приведена схема энергетических уровней ионов $\text{Yb}^{3+}-\text{Er}^{3+}$ и указаны основные процессы кооперативного межионного взаимодействия с суммированием энергии, которые могут приводить к заселению уровней $2H_{11/2} + 4S_{3/2}$ и $4F_{9/2}$ ионов Er^{3+} .

Наиболее эффективными механизмами заселения вышележащих электронных уровней $2H_{11/2} + 4S_{3/2}$ и $4F_{9/2}$ ионов Er^{3+} в исследуемых материа-

лах могут быть нелинейные ап-конверсионные механизмы 1 (рис. 4), в результате которых энергия двух возбужденных ионов Yb^{3+} передается одному иону Er^{3+} , находящемуся в основном состоянии $4I_{15/2}$, и процесс 2, в результате которого два иона Er^{3+} в возбужденном состоянии $4I_{11/2}$ разменивают свою энергию и один из них переходит в вышележащее состояние $4F_{7/2}$ [21]. Однако в результате конкурирующего безызлучательного ме-

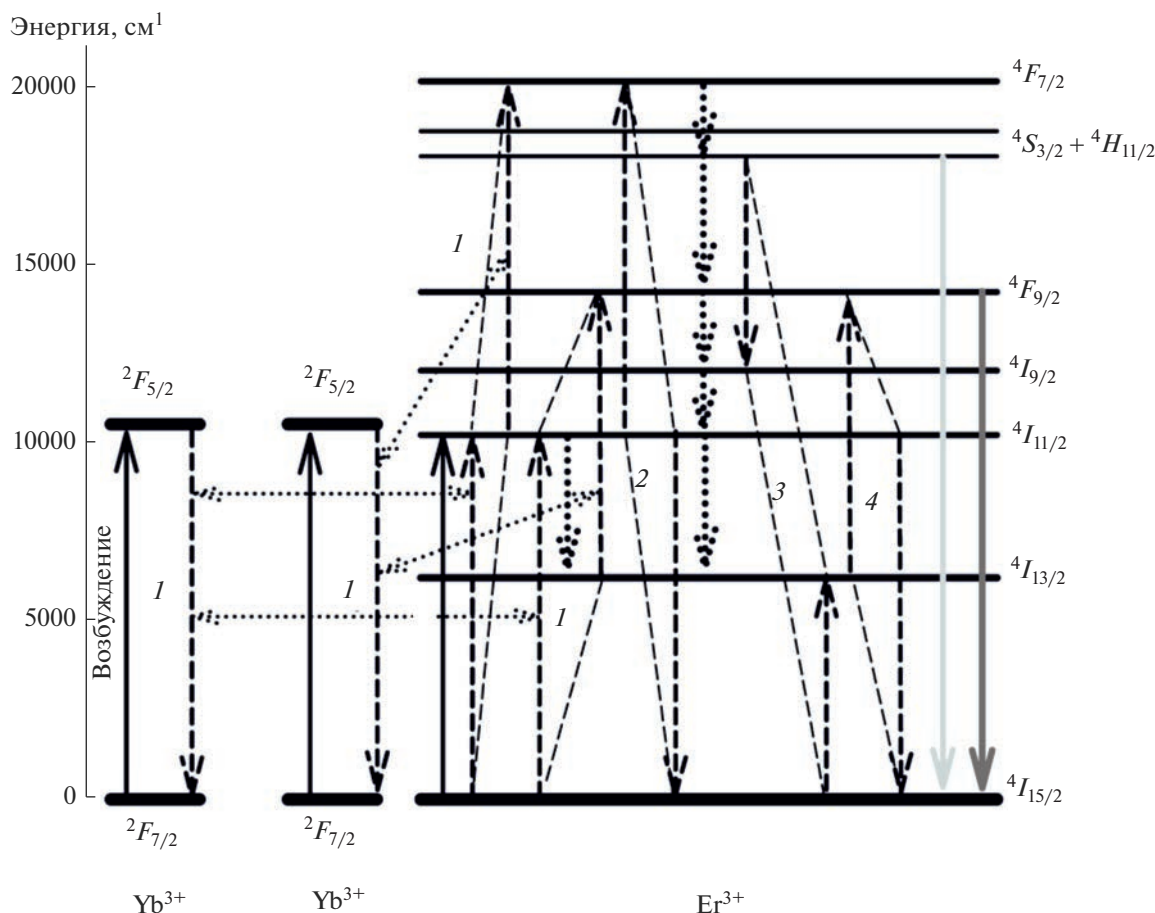


Рис. 4. Схема энергетических уровней и основные безызлучательные кооперативные процессы между ионами Yb^{3+} и Er^{3+} по данным [21]: 1 – $2(^2F_{5/2} - ^2F_{7/2}(\text{Yb}^{3+}) + (^4I_{15/2} - ^4I_{11/2}, ^4I_{11/2} - ^4F_{7/2}) / (^4I_{15/2} - ^4I_{11/2}, ^4I_{13/2} - ^4F_{9/2})(\text{Er}^{3+})$, ап-конверсия; 2 – $^4I_{11/2} - ^4F_{7/2} + ^4I_{11/2} - ^4I_{15/2}(\text{Er}^{3+})$, ап-конверсия; 3 – $^4S_{3/2} - ^4I_{9/2} + ^4I_{15/2} - ^4I_{13/2}(\text{Er}^{3+})$, кросс-релаксация; 4 – $^4I_{13/2} - ^4I_{9/2} + ^4I_{11/2} - ^4I_{15/2}(\text{Er}^{3+})$, ап-конверсия.

ханизма кросс-релаксации 3 (рис. 4) происходит эффективная разгрузка состояний $^2H_{11/2} + ^4S_{3/2}$. Электронный уровень $^4F_{9/2}$ может эффективно заселяться за счет как спонтанного распада ионов Er^{3+} с уровней $^2H_{11/2} + ^4S_{3/2}$, так и нелинейного ап-конверсионного взаимодействия 4 (рис. 4) [21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована видимая люминесценция Er^{3+} и Yb^{3+} (525–550 и 663 нм) в стеклах, легированных Er^{3+} и Yb^{3+} , при возбуждении светом с длиной волны 977 нм. Образцы стекол Ст-1, Ст-2, Ст-3 обладают высокой интенсивностью переходов $^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ и $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ в ионах Er^{3+} и широкими полосами люминесценции. Более высокая интенсивность обусловлена отношением концентраций ионов $\text{Yb}^{3+} : \text{Er}^{3+}$, равным 9 : 1, другие отношения концентраций ионов иттербия и эрбия

не являются оптимальными. Экспериментальные значения для энергетического выхода (B_{en}) для активированных стекол составляют: 0.17% – Ст-1, 0.21% – Ст-2, 0.39% – Ст-3. Времена жизни ап-конверсионной люминесценции ионов Er^{3+} в люминофоре с максимальным значением $B_{en} = 0.39\%$ при переходах между уровнями $^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ и $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ и $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ составили 53 ± 5 и 23 ± 3 мкс.

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. *Kaewako J., Boonin K., Yasaka P. et al.* Optical and Luminescence Characteristics of Eu^{3+} Doped Zinc Bismuth Borate (ZBB) Glasses for Red Emitting Device // *Mater. Res. Bull.* 2015. V. 71. P. 37–41.
2. *Fedorov P.P., Luginina A.A., Popov A.I.* Transparent Oxyfluoride Glass Ceramics // *J. Fluorine Chem.* 2015. V. 172. P. 22–50.
3. *Gugov I., Mueller M., Ruessel C.* Transparent Oxyfluoride Glass Ceramics Co-Doped with Er^{3+} and Yb^{3+} – Crystallization and Upconversion Spectroscopy // *J. Solid State Chem.* 2011. V. 184. P. 1001–1007.
4. *Rault G., Adam J.L., Smektala F., Lucas J.* Fluoride Glass Compositions for Waveguide Applications // *J. Fluorine Chem.* 2001. V. 110. № 2. P. 165–173.
5. *Aseev V.A., Kolobkova E.V., Nekrasova Yu.A. et al.* Oxyfluoride Glasses for Red Phosphors // *Mater. Phys. Mech.* 2013. V. 17. P. 135–141.
6. *Polishchuk S.A., Ignateva L.N., Marchenco Yu.V. et al.* Oxyfluoride Glasses // *Glass Phys. Chem.* 2011. V. 37. № 3. P. 1–20.
7. *Лойко П.А., Рачковская Г.Е., Захаревич Г.Б. и др.* Новые люминесцирующие оксифторидные стекла с ионами европия и иттербия // *Стекло и керамика.* 2014. № 2. С. 3–6.
8. *Laczka M., Stoch L., Gorecki J.* Bismuth-Containing Glasses as Materials for Optoelectronics // *J. Alloys Compd.* 1992. V. 186. P. 279–291.
9. *Oprea I., Hesse H., Betler K.* Optical Properties of Bismuth Borate Glasses // *Opt. Mater.* 2004. V. 26. P. 235–237.
10. *Накамото К.* ИК спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений. М.: Мир, 1991. 269 с.
11. *Власов А.Г., Флоринская В.А., Венедиктов А.А. и др.* Инфракрасные спектры неорганических стекол и кристаллов. Л.: Химия, 1972. 304 с.
12. *Bale S., Rahman S., Awasthi A.M., Sathe V.* Role of Bi_2O_3 content on physical, optical and vibrational studies in $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{--ZnO--B}_2\text{O}_3$ glasses // *J. Alloys Compd.* 2008. V. 460. P. 699–703.
13. *Yasaka P., Boonin K., Limsuwan P. et al.* Physical, Structural and Luminescence Properties of $\text{ZnO--Bi}_2\text{O}_3\text{--B}_2\text{O}_3$ Glass System // *Appl. Mech. Mater.* 2013. V. 431. P. 8–13.
14. *Левицкий И.А., Дяденко М.В., Панко Л.Ф.* Получение оптических стекол на основе системы $\text{BaO--La}_2\text{O}_3\text{--B}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2\text{--SiO}_2$ // *Стекло и керамика.* 2011. № 10. С. 3–6.
15. *Князян Н.Б.* Оксифторидные боросиликатные стекла // *Сер. Химические и экологические технологии.* 2012. Вып. 15. № 2. С. 1–23.
16. *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.
17. *Жукова Е.В., Сиротина В.А., Севостьянова Т.С. и др.* Свинцовые оксифторидные боросиликатные стекла, активированные редкоземельными элементами // *Успехи в химии и хим. технологии.* 2016. Т. 30. № 3. С. 108–110.
18. *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.
19. *Auzel F.* Upconversion and Anti-Stokes Processes with f and d Ions in Solids // *Chem. Rev.* 2004. V. 104. № 1. P. 139–173.
20. *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.
21. *Крутько В.А., Рябова А.В., Комова М.Г., Волков В.В., Каргин Ю.Ф., Лощенов В.Б.* Синтез и люминесценция ультрадисперсных соединений $\text{Gd}_{11}\text{SiP}_3\text{O}_{26}$, $\text{Gd}_{14}\text{V}_6\text{Ge}_2\text{O}_{34}$, 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>