

**Yb_{3-x}Er_xAl₅O₁₂ для оптической термометрии: измерение
люминесценции, вызванной переходами
с температурно-несвязанных уровней**

И.В. Бакланова, В.Н. Красильников, Я.В. Бакланова

ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН»

620108, Россия, Екатеринбург, ул. Первомайская, 91

baklanova_i@ihim.uran.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.015

Аннотация: Допированный эрбием иттербий-алюминиевый гранат был синтезирован прекурсорным способом. Образцы охарактеризованы с помощью инфракрасной спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии. При инфракрасном возбуждении при 980 нм соединения демонстрируют интенсивную апконверсионную красную люминесценцию в видимом диапазоне. Согласно концентрационным зависимостям апконверсионной люминесценции оптимальная концентрация эрбия в соединениях Yb_{3-x}Er_xAl₅O₁₂ составила x=0,3. Термолюминесцентные характеристики для Yb_{2,7}Er_{0,3}Al₅O₁₂ определялись величиной отношения интенсивности полос в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, обусловленных переходами с температурно-несвязанных энергетических уровней ⁴F_{9/2} и ⁴I_{9/2} иона Er³⁺. Определены максимальные значения абсолютной и относительной чувствительности в температурном диапазоне 25-225°C. Полученные результаты показывают обоснованность использования метода сравнения двух люминесцентных линий, отнесенных к термически несвязанным уровням энергии ионов лантаноидов для оптической термометрии, и перспективность применения люминофоров на основе Yb_{3-x}Er_xAl₅O₁₂ граната в качестве материалов для температурных датчиков.

Ключевые слова: иттербий-алюминиевый гранат, эрбий, прекурсорный синтез, люминесценция, апконверсия.

Бакланова Инна Викторовна – к.х.н., старший научный сотрудник, лаборатория квантовой химии и спектроскопии им. профессора А.Л. Ивановского, ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН»

Красильников Владимир Николаевич – д.х.н., главный научный сотрудник, лаборатория неорганического синтеза ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН»

Бакланова Яна Викторовна – к.х.н., старший научный сотрудник лаборатории квантовой химии и спектроскопии им. профессора А.Л. Ивановского ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН»

Original paper

**Yb_{3-x}Er_xAl₅O₁₂ for optical thermometry: measurement of luminescence caused by transitions
from non-thermal coupled levels**

I.V. Baklanova, V.N. Krasil'nikov, Ya.V. Baklanova

Institute of Solid State Chemistry, Ural Branch of the RAS, Ekaterinburg, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.015

Abstract: Erbium-doped ytterbium aluminum garnet has been synthesized by a precursor method. The samples were characterized by Infrared spectroscopy and scanning electron microscopy. Under infrared excitation at 980 nm, the compounds exhibit intense upconversion red luminescence in the visible range. According to the concentration dependences of upconversion luminescence, the optimal concentration of erbium in Yb_{3-x}Er_xAl₅O₁₂ compounds was x=0,3. The thermoluminescent characteristics for Yb_{2,7}Er_{0,3}Al₅O₁₂ garnet were determined by the ratio of band intensities in the visible and near-infrared ranges due to transitions from non-thermal coupled energy levels ⁴F_{9/2} and ⁴I_{9/2} of Er³⁺ ion. The maximum values of absolute and relative sensitivity in the temperature interval of 25-225°C have been determined. The results obtained show that it is reasonable to use the method of comparing two luminescent lines assigned to non-thermal coupled energy levels of lanthanide ions for optical thermometry and that phosphors based on Yb_{3-x}Er_xAl₅O₁₂ garnet hold promise as materials for

© И.В. Бакланова, В.Н. Красильников, Я.В. Бакланова, 2025

temperature sensors.

Keywords: ytterbium aluminum garnet, erbium, precursor synthesis, luminescence, upconversion.

Inna V. Baklanova – Ph. D., Senior Researcher, Laboratory of quantum chemistry and spectroscopy after professor A.L. Ivanovsky, Institute of Solid State Chemistry Ural Branch of the RAS, ORCID: 0000-0002-5643-7004

Vladimir N. Krasil'nikov – Dr. Sc., Principal Researcher, Laboratory of inorganic synthesis, Institute of Solid State Chemistry, Ural Branch of the RAS, ORCID: 0000-0001-6381-0746

Yana V. Baklanova – Ph. D., Senior Researcher, Laboratory of quantum chemistry and spectroscopy after professor A.L. Ivanovsky, Institute of Solid State Chemistry Ural Branch of the RAS, ORCID: 0000-0003-0988-2735

Поступила в редакцию/received: 17.04.2025; после рецензирования/ revised: 15.05.2025; принята/accepted 20.05.2025.

1. Введение

Для создания новых люминесцентных материалов очень важным этапом является выбор оптической матрицы. При этом необходимо учитывать физико-химические характеристики матрицы, ее устойчивость при эксплуатации. К наиболее устойчивым соединениям можно отнести алюминаты со структурой граната, обладающие высокой химической и радиационной стойкостью, хорошими механическими, оптическими и тепловыми свойствами [1]. $Y_3Al_5O_{12}$ уже давно нашел широкое применение в качестве матрицы для люминофоров, как, например, $Y_3Al_5O_{12} : Ce^{3+}$ ($YAG : Ce$), дающий желтое излучение [2]. В настоящее время $YAG : Ce$ является одним из составляющих светодиодов белого свечения в комбинации с нитридом галлия, обеспечивающим голубое свечение [3]. Структурным аналогом $Y_3Al_5O_{12}$ является $Yb_3Al_5O_{12}$, однако в отличие от иттрий-алюминиевого граната имеет уже в своем составе ион Yb^{3+} , который может выступать в качестве сенсibilизатора люминесценции и усиливать апконверсионную люминесценцию соединения. Ион Yb^{3+} обладает простой энергетической структурой с двумя уровнями ($^2F_{7/2}$, $^2F_{5/2}$) и большим сечением поглощения по сравнению с другими лантаноидами [4]. Для апконверсионного преобразования инфракрасного (ИК) излучения в эмиссию в видимом диапазоне чрезвычайно привлекательным активатором в силу целого ряда причин является эрбий. В матрице люминофора ион Er^{3+} может излучать фотоны при переходе с возбужденного уровня до основного в широкой области длин волн видимого диапазона спектра: в синей ($^2H_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$), зеленой ($^2H_{11/2} / ^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$) и красной ($^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$) [5]. Большое спектральное перекрытие между излучающими переходами в ближнем ИК диапазоне $^2F_{5/2} \rightarrow ^2F_{7/2}$ (Yb^{3+}) и $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ (Er^{3+}) приводит к эффективному безызлучательному процессу передачи энергии между возбужденным состоянием иттербия и состояниями эрбия. Высокая эффективность люминесценции соединений, допированных эрбием и иттербием, способствует их потенциальному применению в оптической термометрии.

По сравнению с традиционными термометрами оптические датчики имеют большие преимущества, такие как безопасность, быстрый отклик, высокая точность, помехоустойчивость, возможность дистанционного измерения. В работе $Yb_{3-x}Er_xAl_5O_{12}$ ($x=0,1\div 0,5$) был получен по прекурсорной методике. Термолюминесцентные характеристики оценивались из отношения интенсивностей эмиссионных линии (Luminescence Intensity Ratio – LIR) в видимом и ближнем ИК диапазоне, обусловленных переходами с температурно-несвязанных энергетических уровней иона Er^{3+} .

2. Экспериментальная часть

В качестве реагентов были использованы $Yb(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ (99,99%), $Er(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ (99,99%), $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ (99,95%) и аналитически чистая муравьиная кислота с содержанием 99,7% $HCOOH$. Для получения прекурсора использовали метод, близкий описанному ранее [6]. Взятые в необходимых количествах нитраты металлов при расчете на общую формулу $Yb_{3-x}Er_xAl_5O_{12}$ ($x=0,1, 0,15, 0,2, 0,3, 0,35$ и $0,5$) растворяли в 99,7% муравьиной кислоте при перемешивании. Полученный раствор выдерживали при комнатной температуре до начала спонтанной реакции, протекающей с сильным разогревом и выделением бурых паров диоксида азота. После завершения реакции твердый остаток просушивали при $50^\circ C$ в течение часа и перетирали в агатовой ступке, затем помещали в алуноводый тигель и нагревали в муфельной печи до $1100^\circ C$ со скоростью $5^\circ C/мин$. После выдержки образца при $1100^\circ C$ в течение 0,5 часа нагревание прекращали и печь охлаждали до комнатной температуры. Инфракрасные (ИК) спектры в диапазоне волновых чисел $4000-360\text{ см}^{-1}$ получены на ИК Фурье спектрометре Vertex 80 (Bruker, ФРГ) с помощью приставки НПВО MVP-Pro (Harrick, США) (материал призмы – алмаз). Морфологию образцов изучали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе Tescan Vega Compact (Tescan, ЧР) с вольфрамовым катодом. Энергодисперсионный анализ (ЭДА) проводили на приборе Oxford Instruments INCA Energy 350/X-max 80 (Halifax Rd, Великобритания) в программной среде Aztec Standard. Спектры апконверсии при комнатной температуре записаны на флуориметре Cary Eclipse (Varian, США) с лазером ($\lambda = 980\text{ нм}$, FTI-Optronic, РФ). Спектры апконверсии от 25 до $225^\circ C$ получены с помощью ячейки GS-21525 (Specac Ltd, Великобритания), монохроматора MDR-204 с геометрией 90° и дифракционной решеткой 1200 штр/мм (Lomo Photonics, РФ) и счетчика фотонов на основе ФЭУ R2949 (Hamamatsu, Япония).

3. Результаты и их обсуждение

Поскольку кристаллическая структура $Yb_{3-x}Er_xAl_5O_{12}$ подобна

структуре $Y_3Al_5O_{12}$, то их ИК спектры должны быть идентичны [7]. Соединение $Yb_{3-x}Er_xAl_5O_{12}$ имеет кубическую структуру, где ионы Al^{3+} располагаются в тетраэдрических (AlO_4) и в октаэдрических позициях (AlO_6) (в соотношении 1,5:1), связанных через общие углы. В ИК спектре полосы при 796, 732 и 695 cm^{-1} относятся к асимметричным валентным колебаниям в тетраэдрах (ν_3) AlO_4 (см. рис. 1 а, Таблицу 1). Моды при 563 и 510 cm^{-1} связаны с асимметричными валентными колебаниями в октаэдрах (ν_3) AlO_6 , а полосы при 449 и 426 cm^{-1} – с деформационными колебаниями в октаэдрах (ν_4) AlO_6 .

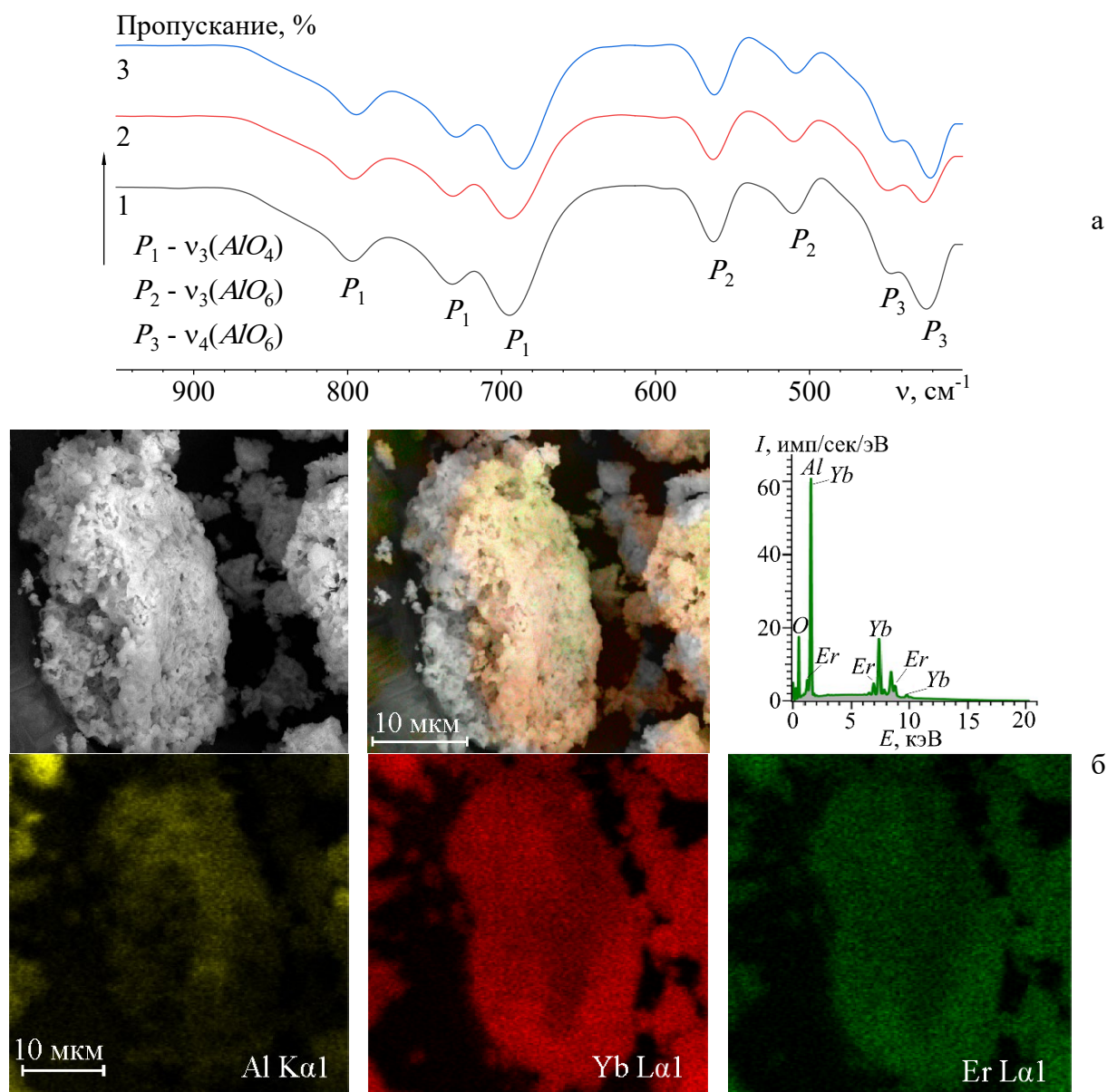


Рис. 1. ИК спектры $Yb_{3-x}Er_xAl_5O_{12}$: 1 – $x=0$, 2 – $x=0,15$, 3 – $x=0,3$ (а), СЭМ $Yb_{2,5}Er_{0,5}Al_5O_{12}$, спектр ЭДА и картирование (б).

По результатам СЭМ образцы $Yb_{3-x}Er_xAl_5O_{12}$ представляют собой спеченные агломераты до 50 мкм с размерами кристаллитов 0,5-1 мкм (см. рис. 1 б). В спектре ЭДА $Yb_{2,5}Er_{0,5}Al_5O_{12}$ присутствуют только пики, соответствующие элементам Al , Yb и Er . Равномерное распределение элементов в агломератах подтверждается картированием.

Таблица 1. Отнесение колебательных мод в ИК спектрах $Yb_{3-x}Er_xAl_5O_{12}$.

x			Отнесение колебаний
0	0,15	0,3	
797	796	794	$(\nu_3)AlO_4$
732	732	729	
695	695	592	
562	563	562	$(\nu_3)AlO_6$
511	510	510	
447	449	446	$(\nu_4)AlO_6$
424	426	422	

Спектры апконверсионной люминесценции в видимой области для всей серии $Yb_{3-x}Er_xAl_5O_{12}$ измерены при ИК возбуждении (980 нм). На рис. 2 а показана зависимость интенсивности апконверсионной эмиссии от концентрации эрбия. При возбуждении 980 нм происходит поглощение энергии первого фотона основным состоянием иона Er^{3+} и заполнение уровня $^4I_{11/2}$ ($^4I_{15/2} + h\nu \rightarrow ^4I_{11/2}$) без участия иона-сенсбилизатора. Энергия второго фотона поглощается возбужденным состоянием $^4I_{11/2}$ с переходом иона Er^{3+} на более высокий энергетический уровень $^4F_{7/2}$. Далее с уровня $^4F_{7/2}$ должны происходить процессы многофононной релаксации к состояниям $^2H_{11/2}$, $^4S_{3/2}$ и $^4F_{9/2}$. Незначительная по интенсивности эмиссия в зеленой области спектрального диапазона наблюдается только для $x = 0,35$, то есть происходит лишь частичная релаксация до уровней $^2H_{11/2}$ и $^4S_{3/2}$, и эти состояния слабо заселены. С уровня $^4F_{7/2}$ происходит безызлучательная релаксация до уровня $^4F_{9/2}$, с которого осуществляется переход $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ с возникновением интенсивной красной люминесценции (широкая линия со штарковским расщеплением иона эрбия (III) с максимумами при 655, 661, 672 и 678 нм). Уровень $^4F_{9/2}$ может быть заполнен также в результате безызлучательной релаксации с уровня $^4I_{15/2}$ на уровень $^4I_{13/2}$ и перехода иона эрбия на уровень $^4F_{9/2}$ за счет поглощения энергии второго фотона. Поскольку ион Yb^{3+} имеет значительно большее сечение поглощения по сравнению с ионом Er^{3+} , то помимо описанного механизма, заселение возбужденного уровня $^4I_{11/2}$ иона эрбия происходит за счет переноса энергии от возбужденного иона Yb^{3+} , затем ион Er^{3+} переходит также на

состояние ${}^4F_{7/2}$ из-за поглощения следующего фотона. Рост интенсивности красной люминесценции с увеличением концентрации эрбия свидетельствует о заселении излучательного уровня ${}^4F_{9/2}$ благодаря процессам кросс-релаксации ${}^4I_{15/2} + {}^4S_{3/2} / {}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4F_{9/2} + {}^4I_{13/2}$ и ${}^4I_{13/2} + {}^2F_{5/2} \rightarrow {}^4F_{9/2} + {}^2F_{7/2}$, что приводит к сокращению заселенности уровней ${}^2H_{11/2}$ и ${}^4S_{3/2}$ [8]. Концентрационное тушение люминесценции наблюдается для образцов с $x > 0,3$ (см. рис. 2 а).

Зависимость апконверсионной эмиссии $Yb_{3-x}Er_xAl_5O_{12}$ с $x = 0,3$ от мощности ИК лазера представлена на рис. 2 б. Интенсивность апконверсионного излучения (I) растет с увеличением мощности возбуждения (P) как интенсивность возбуждения в степени n , где n -число поглощенных фотонов, необходимых для возбуждения одного апконверсионного фотона, то есть I пропорционально P^n . График зависимости $\lg I$ от $\lg P$ хорошо описывается прямой линией с наклоном n (см. рис. 2 в). Значение наклона линии равно 1,59, и указывает, что двухфотонный процесс ответственен за появление апконверсионной красной люминесценции.

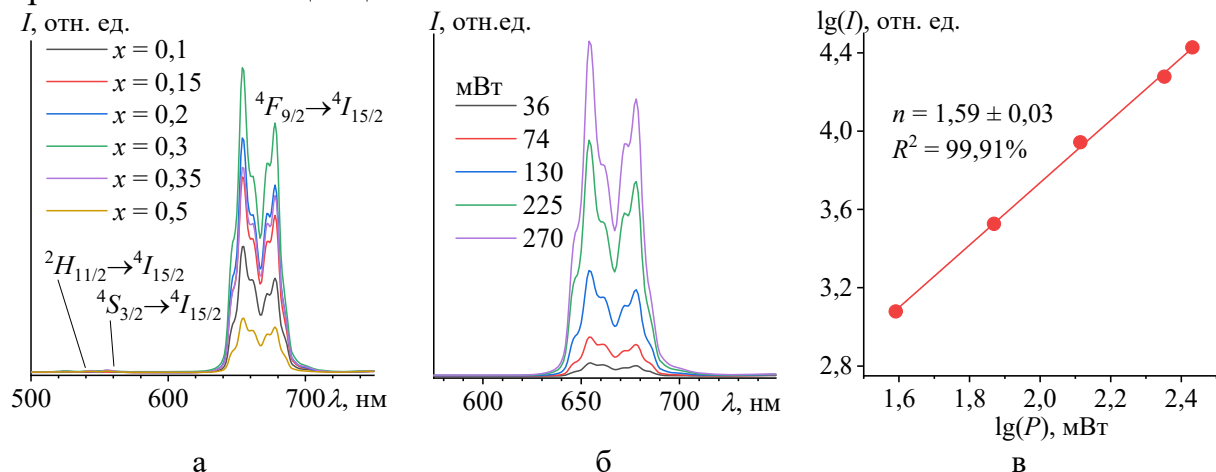


Рис. 2. Спектры апконверсионной люминесценции $Yb_{3-x}Er_xAl_5O_{12}$ (а), спектры апконверсионной люминесценции $Yb_{2,7}Er_{0,3}Al_5O_{12}$, измеренные при различной мощности возбуждения (б), график $\lg I$ от $\lg P$ (в).

В люминесцентной термометрии используют мониторинг различных температурно-чувствительных характеристик, таких, например, как сдвиг положения максимума спектральной полосы, изменение отношения интенсивностей двух эмиссионных линии (LIR), изменение времени жизни возбужденных состояний. Связь между LIR и температурой определяется тепловым равновесием между термически связанными уровнями и описывается законом распределения Больцмана согласно формуле:

$$LIR = B \cdot e^{\frac{\Delta E}{k \cdot T}}, \quad (1)$$

где ΔE – разность энергий между двумя термически связанными энергетическими уровнями, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, B – константа. Разность энергий между уровнями должна находиться в диапазоне от 200 до 2000 см^{-1} [9, 10]. Однако для материалов, имеющих перспективы в термометрии, метод LIR успешно применяется для описания соотношения люминесцентных линий, которые изменяются с температурой и обусловлены переходами с температурно-несвязанных уровней. Такие датчики имеют более высокую относительную чувствительность при высокой температуре [11-13].

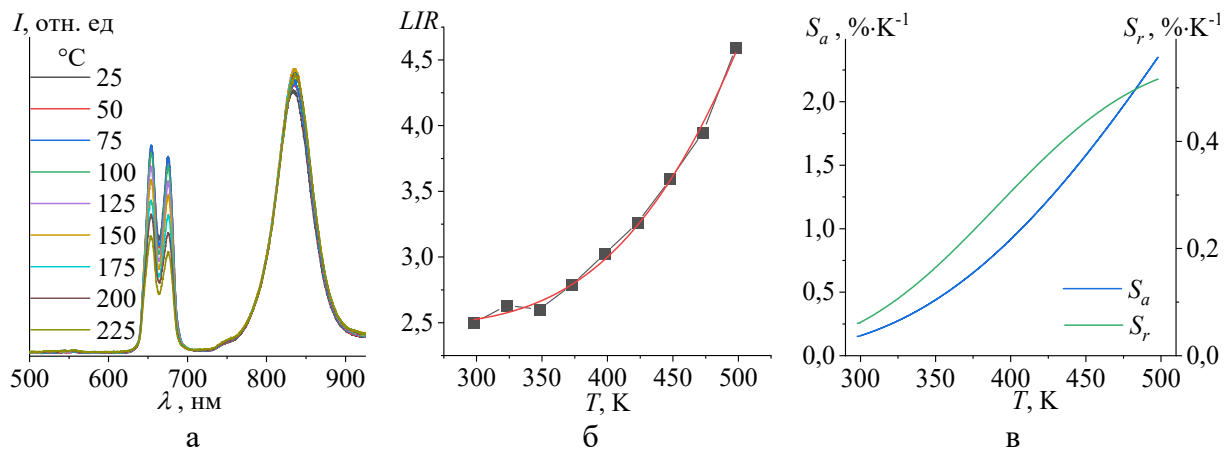


Рис. 3. Спектры апконверсионной люминесценции $Yb_{2,7}Er_{0,3}Al_5O_{12}$, измеренные в диапазоне температур от 25 до 225 °C (а), температурная зависимость LIR (б), значения S_a и S_r от температуры (в).

На рис. 3 а представлены спектры апконверсионной люминесценции для состава с $x = 0,3$, измеренные в температурном интервале 25-225 °C. Большая интенсивная линия с максимумом при 850 нм относится к переходу ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ионов Er^{3+} . Линия, ответственная за красную люминесценцию, наиболее чувствительна к изменению температуры (интенсивность падает с ростом температуры), тогда как ИК линия незначительно увеличивается с повышением температуры. Положительный коэффициент термического расширения $Yb_3Al_5O_{12}$ ($7,83 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [14]) соответствует расширению решетки при нагреве люминофора. Среднее расстояние между Yb и Er увеличивается, что приводит к уменьшению интенсивности излучения в видимом диапазоне [15]. Известно, что для близкорасположенных энергетических уровней с повышением температуры вышележащий уровень заселяется за счет переходов с нижележащего уровня, что влияет на скорости релаксации с этих уровней. [16]. С ростом температуры заселенность уровня ${}^4I_{9/2}$ может увеличиваться за счет дополнительной безызлучательной релаксации с

уровня ${}^4F_{9/2}$, что приведет к различным значениям величины LIR при разных температурах, хотя эти уровни и не являются термически связанными.

Таким образом, в случае $Yb_{3-x}Er_xAl_5O_{12}$, LIR (см. рис. 3 б) величина является термически зависимым параметром, и хорошо описывается уравнением:

$$LIR = 581,1 \cdot e^{\frac{2805,3}{T}} + 2,5. \quad (2)$$

Поскольку разность энергий между энергетическими состояниями ${}^4F_{9/2}$ и ${}^4I_{9/2}$ ионов Er^{3+} равна 1950 см^{-1} , учитывая зарегистрированный спектр излучения, то эти линии можно посчитать «термически связанными». Зависимость LIR от температуры были аппроксимированы функциями для расчета абсолютной (S_a) и относительной (S_r) температурной чувствительности:

$$S_a = B \cdot \frac{\Delta E}{k \cdot T^2} e^{\frac{\Delta E}{k \cdot T}}, \quad S_r = \frac{\Delta E}{k \cdot T^2}. \quad (3)$$

На показание S_a влияет значение ΔE , тогда как S_r пропорциональна ΔE и обратно пропорциональна квадратичной степени температуры (см. рис. 3 в). Можно сделать вывод, что большее значение ΔE способствует более высокому S_r , а, значит, лучшей точности оптического датчика при одной и той же температуре [10]. Если же ΔE будет иметь слишком маленькие значения, то возможно предполагать перекрытие пиков люминесценции от разных уровней. Значение LIR , рассчитанное как соотношение интенсивности люминесцентных линий красного и ИК диапазонов, демонстрирует лучшую абсолютную ($2,35\% \text{ K}^{-1}$) и относительную ($0,52\% \text{ K}^{-1}$) чувствительность во всем температурном интервале с максимальными значениями при 225°C . Относительная чувствительность для $Yb_{2,7}Er_{0,3}Al_5O_{12}$ сопоставима со значениями, полученными для других люминофоров, используемых в оптической термометрии: $Bi_3Ti_{1,5}W_{0,5}O_9:Er,Yb$ ($0,53\% \text{ K}^{-1}$) [17], $NaYF_4:Er,Yb$ ($0,5\% \text{ K}^{-1}$) [18], $BaTiO_3:Er$ ($0,52\% \text{ K}^{-1}$) [19]. Таким образом, можно сделать вывод, что температурный датчик на основе $Yb_{3-x}Er_xAl_5O_{12}$ имеет удовлетворительные характеристики для измерения температуры в диапазоне до 225°C . Поскольку изменение температуры оказывает влияние на интенсивность излучения в видимом диапазоне, были рассчитаны координаты цветности Международной комиссии по освещению (Commission Internationale de L'Éclairage – CIE [20]) (см. Таблицу 2). Координаты цветности соответствуют красновато-оранжевому излучению при температурах до 175°C , при температурах выше 175°C цвет излучения люминофора меняется на оранжевый.

Таблица 2. Значения координат цветности от температуры для $Yb_{2,7}Er_{0,3}Al_5O_{12}$.

$T, ^\circ\text{C}$	координаты цветности		цвет излучения
	x	y	
25	0,645	0,348	красновато-оранжевый
50	0,641	0,352	
75	0,641	0,352	
100	0,632	0,361	
125	0,625	0,368	
150	0,621	0,372	
175	0,605	0,387	
200	0,600	0,391	
225	0,586	0,404	оранжевый

4. Заключение

Образцы $Yb_{3-x}Er_xAl_5O_{12}$ ($x = 0,1 \div 0,5$) синтезированы прекурсорным методом. При ИК возбуждении они проявляют яркую апконверсионную люминесценцию в красном спектральном диапазоне. Из-за ограничения оптической термометрии на основе термически связанных уровней Er^{3+} температурно-чувствительные свойства соединений определялись величиной отношения интенсивности эмиссионных линии в видимом и ближнем ИК диапазоне, обусловленных переходами с температурно-несвязанных энергетических уровней ${}^4F_{9/2}$ и ${}^4I_{9/2}$ иона Er^{3+} . Абсолютная и относительная чувствительность для $Yb_{2,7}Er_{0,3}Al_5O_{12}$ составляют 2,35% K^{-1} и 0,52% K^{-1} при 225 $^\circ\text{C}$, соответственно. В диапазоне температур 175-200 $^\circ\text{C}$ цвет излучения люминофора меняется с красновато-оранжевого на оранжевый. Значение S_r подтверждает, что $Yb_{2,7}Er_{0,3}Al_5O_{12}$ является потенциальным люминесцентным материалом, чувствительным к температуре как в видимом, так и в ближнем ИК диапазоне и может быть использован для целей оптической термометрии.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием Института химии твердого тела УрО РАН (124020600024-5).

Библиографический список:

1. **George, N.C.** Phosphors for solid-state white lighting / N.C. George, K.A. Denault, R. Seshadri // Annual Review of Materials Research – 2013. – V. 43. – P. 481-501. DOI: 10.1146/annurev-matsci-073012-125702.
2. **Lee, S.** Optimization of yttrium aluminum garnet: Ce^{3+} phosphors for white light-emitting diodes by combinatorial chemistry method / S. Lee, S. Seo // Journal of The Electrochemical Society – 2002. – V. 149. – № 11. – P. J85-J88. DOI: 10.1149/1.1511755.
3. **Chen, D.** Advances in transparent glass-ceramic phosphors for white light-emitting diodes - A review / D. Chen, W. Xiang X. Liang et al. // Journal of the European Ceramic Society – 2015. – V. 35. – I. 3. – P. 859-869. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2014.10.002.
4. **Xu, L.** New role of Yb^{3+} -energy reservoir for lanthanide upconversion luminescence / L. Xu, Y. Liu, Z. Zhou et al. // Nanoscale – 2021. – V. 13. – I. 22. – P. 9978-9988. DOI: 10.1039/D0NR08205H.
5. **Auzel, F.** Upconversion and anti-stokes processes with f and d ions in solids / F. Auzel // Chemical Reviews.

- 2004. – V. 104. – I. 1. – P. 139-174. DOI: 10.1021/cr020357g.
6. **Baklanova, I.V.** Upconversion multicolor tuning in Er³⁺ and Yb³⁺ doped yttrium oxide prepared by precursor technique / I.V. Baklanova, V.N. Krasil'nikov, A.P. Tyutyunnik, Ya.V. Baklanova // *Inorganic Chemistry Communications*. – 2024. – V. 166. – Art. № 112615. – 11 p. DOI: 10.1016/j.inoche.2024.112615.
7. **Thirumavalavan, M.** Vibrational spectra of Y₃Al₅O₁₂ crystals grown from Ba- and Pb-based flux systems / M. Thirumavalavan, J. Kumar, F.D. Gnanam et al. // *Infrared Physics* – 1986. – V. 26. – I. 2. – P. 101-103. DOI: 10.1016/0020-0891(86)90029-1
8. **Zhang, J.** Infrared to visible upconversion luminescence in Er³⁺:Y₂O₃ transparent ceramics / J. Zhang, S. Wang, L. An et al. // *Journal of Luminescence* – 2007. – V. 122-123. – P. 8-10. DOI: 10.1016/j.jlumin.2006.01.065.
9. **Lu, H.** Optical temperature sensing in b-NaLuF₄:Yb³⁺/Er³⁺/Tm³⁺ based on thermal, quasi-thermal and non-thermal coupling levels / H. Lu, H. Hao, G. Shi et al. // *RSC Advances* – 2016. – V. 6. – P. 55307-55311. DOI: 10.1039/c6ra08311k.
10. **Zhao, Y.** Optical temperature sensing of up-conversion luminescent materials: Fundamentals and progress / Y. Zhao, X. Wang, Y. Zhang et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2020. – V. 817. – Art. № 152691. – 27 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.152691.
11. **Lipina, O.A.** Upconversion luminescence and temperature measurement performance of Ho³⁺/Yb³⁺ and Tm³⁺/Yb³⁺ codoped Na₅Rb₇Sc₂(WO₄)₉ phosphors / O.A. Lipina, Ya.V. Baklanova, T.S. Spiridonova, E.G. Khaikina // *CrystEngComm* – 2024. – V. 26. – I. 3. – P. 277-285. DOI: 10.1039/d3ce01020a
12. **Gao, W.** A novel upconversion optical thermometers derived from non-thermal coupling levels of CaZnOS: Tm/Yb phosphors / W. Gao, W. Ge, J. Shi et al. // *Journal of Solid State Chemistry* – 2021. – V. 297. – Art. № 122063. – 7 p. DOI: 10.1016/j.jssc.2021.122063.
13. **Han, Q.** Optical temperature sensing based on thermal, non-thermal coupled levels and tunable luminescent emission colors of Er³⁺/Tm³⁺/Yb³⁺ tri-doped Y₇O₆F₉ phosphor / Q. Han, H. Hao, J. Yang et al. // *Journal of Alloys and Compounds* – 2019. – V. 786. – P. 770-778. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.02.047.
14. **Li, Z.** A promising high-entropy thermal barrier material with the formula (Y_{0.2}Dy_{0.2}Ho_{0.2}Er_{0.2}Yb_{0.2})₃Al₅O₁₂ / Z. Li, J. Zheng, W. Zhang et al. // *Materials* – 2022. – V. 15. – I. 22. – Art. № 8079. – 12 p. DOI: 10.3390/ma15228079.
15. **Li, X.** Impact of nitridation on the up-conversion luminescence property of Yb₃Al₅O₁₂:Er³⁺ phosphors upon 980 nm excitation / X. Li, Z. Guan, Z. Liu et al. // *Inorganic Chemistry Communications*. – 2024. – V. 160. – Art. № 111905. – 11 p. DOI: 10.1016/j.inoche.2023.111905
16. **dos Santos, P.V.** Optical temperature sensing using upconversion fluorescence emission in Er³⁺/Yb³⁺-codoped chalcogenide glass / P.V. dos Santos, M.T. de Araujo, A.S. Gouveia-Neto, J.A. Medeiros Neto, A.S.B. Sombra // *Applied Physics Letters* – 1998. – V. 73. – I. 5. – P. 578-580. DOI: 10.1063/1.121861
17. **Zhang, Y.** Enhanced up-conversion luminescence and excellent temperature sensing properties in Yb³⁺ sensitized Er³⁺-doped Bi₃Ti_{1.5}W_{0.5}O₉ multifunctional ferroelectric ceramics / Y. Zhang, X. Chai, J. Li et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2018. – V. 735. – P. 473-479. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.11.085.
18. **Savchuk, O.I.A.** Novel low-cost, compact and fast signal processing sensor for ratiometric luminescent nanothermometry / O.I. Savchuk, J.J. Carvajal, J. Massons et al. // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2016. – V. 250. – P. 87-95. DOI: 10.1016/j.sna.2016.08.031.
19. **Alencar, M.A.R.C.** Er³⁺-doped BaTiO₃ nanocrystals for thermometry: Influence of nanoenvironment on the sensitivity of a fluorescence based temperature sensor / M.A.R.C. Alencar, G.S. Maciel, C.B. de Araújo, A. Patra // *Applied Physics Letters*. – 2004. – V.84. – I. 23. – P. 4753-4755. DOI: 10.1063/1.1760882.
20. **Kelly, K.L.** Color designations for lights / K.L. Kelly // *Journal of the Optical Society of America*. – 1943. – V.33. – I. 11. – P. 627-632, DOI: 10.1364/JOSA.33.000627.

References:

1. George N.C., Denaut K.A., Seshadri R. Phosphors for solid-state white lighting, *Annual Review of Materials Research*, 2013, vol. 43, pp. 481-501. DOI: 10.1146/annurev-matsci-073012-125702.
2. Lee S., Seo S.Y. Optimization of yttrium aluminum garnet: Ce³⁺ phosphors for white light-emitting diodes by combinatorial chemistry method, *Journal of The Electrochemical Society*, 2002, vol.149, no. 11, pp. J85-J88. DOI: 10.1149/1.1511755.
3. Chen D., Xiang W., Liang X. et al. Advances in transparent glass-ceramic phosphors for white light-emitting diodes - A review, *Journal of the European Ceramic Society*, 2015, vol. 35, issue 3, pp. 859-869. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2014.10.002.
4. Xu L., Liu Y., Zhou Z. et al. New role of Yb³⁺-energy reservoir for lanthanide upconversion luminescence, *Nanoscale*, 2021, vol. 13, issue 22, pp. 9978-9988. DOI: 10.1039/D0NR08205H.

5. Auzel F. Upconversion and anti-stokes processes with f and d ions in solids, *Chemical Reviews*, 2004, vol. 104, issue 1, pp. 139-174. DOI: 10.1021/cr020357g.
6. Baklanova I.V., Krasil'nikov V.N., Tyutyunnik A.P., Baklanova Ya.V. Upconversion multicolor tuning in Er³⁺ and Yb³⁺ doped yttrium oxide prepared by precursor technique, *Inorganic Chemistry Communications*, 2024, vol. 166, art. no. 112615, 11 p. DOI: 10.1016/j.inoche.2024.112615.
7. Thirumavalavan M., Kumar J., Gnanam F.D., Ramasamy P. Vibrational spectra of Y₃Al₅O₁₂ crystals grown from Ba- and Pb-based flux systems, *Infrared Physics*, 1986, vol. 26, issue 2, pp. 101-103. DOI: 10.1016/0020-0891(86)90029-1.
8. Zhang J., Wang S., An L., Liu M., Chen L. Infrared to visible upconversion luminescence in Er³⁺:Y₂O₃ transparent ceramics, *Journal of Luminescence*, 2007, vol. 122-123, pp. 8-10. DOI: 10.1016/j.jlumin.2006.01.065.
9. Lu H., Hao H., Shi G. et al. Optical temperature sensing in b-NaLuF₄:Yb³⁺/Er³⁺/Tm³⁺ based on thermal, quasi-thermal and non-thermal coupling levels, *RSC Advances*, 2016, vol. 6, issue 60, pp. 55307-55311. DOI: 10.1039/c6ra08311k.
10. Zhao Y., Wang X., Zhang Y., Li Y., Yao X. Optical temperature sensing of up-conversion luminescent materials: Fundamentals and progress, *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, vol. 817, art. no. 152691, 27 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.152691.
11. Lipina O.A., Baklanova Ya.V., Spiridonova T.S., Khaikina E.G. Upconversion luminescence and temperature measurement performance of Ho³⁺/Yb³⁺ and Tm³⁺/Yb³⁺ codoped Na₅Rb₇Sc₂(WO₄)₉ phosphors, *CrystEngComm*, 2024, vol. 26, issue 3, pp. 277-285. DOI: 10.1039/d3ce01020a.
12. Gao W., Ge W., Shi J., Chen X., Li Y. A novel upconversion optical thermometers derived from non-thermal coupling levels of CaZnOS:Tm/Yb phosphors, *Journal of Solid State Chemistry*, 2021, vol. 297, art. no. 122063, 7 p. DOI: 10.1016/j.jssc.2021.122063.
13. Han Q., Hao H., Yang J. et al. Optical temperature sensing based on thermal, non-thermal coupled levels and tunable luminescent emission colors of Er³⁺/Tm³⁺/Yb³⁺ tri-doped Y₇O₆F₉ phosphor, *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 786, pp. 770-778. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.02.047.
14. Li Z., Zheng J., Zhang W. et al. A promising high-entropy thermal barrier material with the formula (Y_{0.2}Dy_{0.2}Ho_{0.2}Er_{0.2}Yb_{0.2})₃Al₅O₁₂, *Materials*, 2022, vol. 15, issue 22, art. № 8079? 12 p. DOI: 10.3390/ma15228079.
15. Li X., Guan Z., Liu Z. et al. Impact of nitridation on the up-conversion luminescence property of Yb₃Al₅O₁₂:Er³⁺ phosphors upon 980 nm excitation, *Inorganic Chemistry Communications*, 2024, vol. 160, art. no. 111905, 11 p. DOI: 10.1016/j.inoche.2023.111905.
16. dos Santos P.V., de Araujo M.T., Gouveia-Neto A.S., Medeiros Neto J.A., Sombra A.S.B. Optical temperature sensing using upconversion fluorescence emission in Er³⁺/Yb³⁺-codoped chalcogenide glass, *Applied Physics Letters*, 1998, vol. 73, issue 5, pp. 578-580. DOI: 10.1063/1.121861.
17. Zhang Y., Chai X., Li J., Wang X., Li Y., Yao X. Enhanced up-conversion luminescence and excellent temperature sensing properties in Yb³⁺ sensitized Er³⁺-doped Bi₃Ti_{1.5}W_{0.5}O₉ multifunctional ferroelectric ceramics, *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 735, pp. 473-479. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.11.085.
18. Savchuk O.I.A., Carvajal J.J., Massons J. et al. Novel low-cost, compact and fast signal processing sensor for radiometric luminescent nanothermometry, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, vol. 250, pp. 87-95. DOI: 10.1016/j.sna.2016.08.031.
19. Alencar M.A.R.C., Maciel G.S., de Araújo C.B., Patra A. Er³⁺-doped BaTiO₃ nanocrystals for thermometry: Influence of nanoenvironment on the sensitivity of a fluorescence based temperature sensor, *Applied Physics Letters*, 2004, vol. 84, issue 23, pp. 4753-4755. DOI: 10.1063/1.1760882.
20. Kelly K.L. Color designations for lights, *Journal of the Optical Society of America*, 1943, vol. 33, issue 11, pp. 627-632. DOI: 10.1364/JOSA.33.000627.