



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 544.228:546.65:535.37

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.034



ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ИОНОВ ЕВРОПИЯ(III) ВО ФТОРИРОВАННОЙ ИТТРИЙ-АЛЮМИНИЕВОЙ ОКСИДНОЙ МАТРИЦЕ

Александр Петрович Худяков¹, Николай Александрович Омелько²,
Владимир Петрович Смагин³, Лина Викторовна Затонская⁴,
Владимир Антонович Новоженев⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия

¹ hudyakov.aleksandr@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0006-6742-9145>

² omelkokola@mail.ru

³ smaginV@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4782-6355>

⁴ zatonskayalv@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2842-2710>

⁵ novozhenov@mail.asu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9073-5427>

Аннотация. Предметом рассмотрения многих научных работ являются оксиды иттрия и алюминия, а также сложные иттрий-алюминиевые оксидные композиции. Во многом проявляемый к ним интерес определяется потребностью современной оптоэлектронной техники в материалах с улучшенными оптическими, физико-химическими и механическими свойствами. В подавляющем большинстве работ внимание исследователей сконцентрировано на индивидуальных оксидных фазах, а также фазах граната и перовскита. Исследование композиций сложного фазового состава ограничены, несмотря на потенциальные возможности их применения в качестве компактных люминесцентных сенсоров электромагнитного излучения и в ряде других применений. Люминесцирующие порошки сложного фазового состава на основе оксидов иттрия и алюминия при атомарном соотношении $Y^{3+} : Al^{3+} = 3 : 5$ нами синтезированы термическим разрушением активированных европием(III) гелеобразных систем, приготовленных на основе этилацетата (ЭА). Основными компонентами порошков в зависимости от состава исходных смесей и условий синтеза являются оксиды иттрия, европия, сложные оксиды иттрия и алюминия, а также оксифториды иттрия различного состава. Ионы Eu^{3+} формируют активаторные центры в структуре оксидных и оксифторидных фаз. Люминесценция порошков связана с возвращением 4f-электронов ионов Eu^{3+} из метастабильного 5D_0 в основное электронное состояние. Возбуждение люминесценции происходит в результате перехода электронов из основного 7F_0 в возбужденные электронные состояния, переноса энергии колебательного движения оксоанионной матрицы на возбужденные уровни энергии и перехода 2p-электронов ионов кислорода на вакантные 4f-орбитали ионов Eu^{3+} . Изменения мультиплетности и интенсивности полос и их отдельных компонент в спектрах связаны с входжением атомов фтора в состав европиевых активаторных центров и влиянием ионов Al^{3+} на их симметрию в фторированных иттрий-алюминиевых оксидных фазах. Искажение параметров элементарных ячеек подтверждает глубокое взаимодействие фаз, оказывающее влияние на симметрию и люминесценцию активаторных центров, которые начинают формироваться в результате сильного координационного взаимодействия солей в исходном растворе и далее в гелеобразной системе на основе этилацетата.

Ключевые слова: золь-гель синтез, этилацетат, фторированные иттрий-алюминиевые композиции, лантаноиды, европий, люминесценция.

Для цитирования: Люминесценция ионов европия(III) во фторированной иттрий-алюминиевой оксидной матрице / А. П. Худяков [и др.] // Ползуновский вестник. 2024. № 1, С. 264–274. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.034. EDN: <https://elibrary.ru/GYLNQT>.

Original article

LUMINESCENCE OF EUROPIUM(III) IONS IN A FLUORINATED YTTRIUM-ALUMINUM OXIDE MATRIX

Alexander P. Khudyakov¹, Nikolay A. Omelko², Vladimir P. Smagin³,
Lina V. Zatonskaya⁴, Vladimir A. Novozhenov⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Altai State University, Barnaul, Russia

¹ hudyakov.aleksandr@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0006-6742-9145>

² omelkokola@mail.ru

³ smaginV@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4782-6355>

⁴ zatonskayalv@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2842-2710>

⁵ novozhenov@mail.asu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9073-5427>

Abstract. The subject of many scientific works is oxides of yttrium and aluminum, as well as complex yttrium-aluminum oxide compositions. In many ways, the interest shown in them is determined by the need of modern optoelectronic technology for materials with improved optical, physico-chemical and mechanical properties. In the vast majority of works, the attention of researchers is concentrated on individual oxide phases, as well as garnet and perovskite phases. Research on compositions of complex phase composition is limited, despite the potential for their use as compact luminescent sensors of electromagnetic radiation and in a number of other applications. We synthesized luminescent powders of complex phase composition based on yttrium and aluminum oxides at the atomic ratio $Y^{3+} : Al^{3+} = 3 : 5$ by thermal destruction of europium(III) activated gel systems prepared on the basis of ethyl acetate. The main components of the powders, depending on the composition of the initial mixtures and synthesis conditions, are oxides of yttrium, europium, complex oxides of yttrium and aluminum, as well as yttrium oxyfluorides of various compositions. Eu^{3+} ions form activator centers in the structure of oxide and oxyfluoride phases. The luminescence of powders is associated with the return of 4f-electrons of Eu^{3+} ions from the metastable 5D_0 to the ground electronic state. Excitation of luminescence occurs as a result of the transition of electrons from the ground 7F_0 to excited electronic states, the transfer of energy from the vibrational motion of the oxoanion matrix to excited energy levels, and the transition of 2p-electrons of oxygen ions to vacant 4f-orbitals of Eu^{3+} ions. Changes in the multiplicity and intensity of bands and their individual components in the spectra are associated with the inclusion of fluorine atoms in the composition of europium activator centers and the influence of Al^{3+} ions on their symmetry in fluorinated yttrium-aluminum oxide phases. The distortion of the unit cell parameters confirms the deep interaction of phases, which affects the symmetry and luminescence of activator centers, which begin to form as a result of the strong coordination interaction of salts in the initial solution and further in the gel-like system based on ethyl acetate.

Keywords: sol-gel synthesis, ethyl acetate, fluorinated yttrium-aluminum compositions, lanthanides, europium, luminescence.

For citation: Khudyakov, A.P., Omelko, N.A., Smagin, V.P., Zatonskaya, L.V. & Novozhenov, V.A. (2024). Luminescence of europium(III) ions in a fluorinated yttrium-aluminum oxide matrix. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 264-274. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2024.01.034. EDN: <https://elibrary.ru/GYLNQT>.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на многолетнее применение оксидов иттрия и алюминия в оптике, новые пути синтеза и свойства их композиций являются предметом рассмотрения многих научных работ [1–7]. Проявляемый к ним интерес определяется потребностью современной оптоэлектронной техники в материалах с улучшенными оптическими, физико-химическими и механическими свойствами.

Фторирование оксидов влияет на их оптические свойства [8, 9]. При соответствующим

условиях в результате синтеза получают индивидуальные фторсодержащие фазы, а также смеси на основе фторидов, оксидов и оксифторидов металлов [8–10]. При вхождении атомов фтора в состав активаторных центров увеличивается эффективность преобразования поглощенной энергии в люминесценцию, а также вероятности обмена энергией между активаторными центрами различного состава и симметрии [8, 9, 11].

Значительное влияние на формирование активаторных центров оказывает способ синтеза материалов. Он включает стадии по-

лучения предшественников в виде неагломерированных порошков, формирования компактных образцов и, при соответствии структурным и размерным требованиям, спекания до состояния керамики [12, 13].

Для получения компактных образцов люминофоров, сенсоров излучения, визуализирующих слоев применяются порошки заданного состава, формы и размера частиц [14]. При применении золь-гель технологий их синтезируют преимущественно в водной среде с последующим отжигом при температурах > 1000 °С [15, 16]. Исходными веществами синтеза являются нитраты, ацетаты, оксалаты металлов [17, 18]. Фтор вводят в составе фторида аммония [19]. В процессе синтеза в водной среде и гидролиза образуются гидроксоформы продуктов. Люминесценция лантаноидов эффективно тушится на колебательных оборотах гидроксильных групп. Замена воды органическими растворителями уменьшает влияние гидроксильных групп, а также изменяет всю систему физико-химических равновесий в исходных растворах и в гелеобразных составах, определяющих состав координационной сферы и связи ионов активатора.

Использование водно-органических и органических растворов в качестве среды золь-гель синтеза активированных оксидов иттрия и алюминия представлено в работах [20, 21]. Применение этилацетата для приготовления гелеобразных систем описано нами в работах [22–24]. В отличие от полярных растворителей, ограниченная взаимная растворимость в системе «вода – этилацетат» позволила практически полностью исключить воду из состава термически разлагаемых смесей. Применение в качестве носителей ионов иттрия и европия солей трифторуксусной кислоты исключило необходимость дополнительного введения фторирующих агентов. Особая димерная структура трифторацетатов лантаноидов в кристаллическом состоянии [25] и в среде этилацетата [26] обеспечивала высокую концентрацию солей в исходных растворах и образование гелеобразных систем при постепенном удалении растворителя. Система координационных связей лантаноидов с кислородом и фтором в трифторацетатах, являясь важным фактором начальной стадии формирования активаторных центров уже при подготовке термически разлагаемых систем, обеспечивала образование сильно взаимодействующих фторсодержащих фаз в составе продуктов термолиза [22–24].

Учитывая, что фазовый состав продуктов зависит от состава исходных систем, атомарных соотношений катионов и фтора, а также от условий синтеза конечных продуктов, цель дан-

ной работы состояла в установлении влияния температуры синтеза и концентрации ионов Eu^{3+} на люминесценцию фторированных иттрий-алюминиевых оксидных композиций сложного фазового состава, синтезированных термическим разрушением гелеобразных систем, приготовленных на основе этилацетата, содержащих ионы алюминия и иттрия в атомарном соотношении 3 : 5.

Использование в качестве активатора ионов Eu^{3+} направлено на расширение номенклатуры люминофоров красного свечения, а также, исходя из их электронной структуры и энергетической диаграммы, относительной легкости тушения и сенсibilизации люминесценции, на получение новой информации о спектральных свойствах лантаноидсодержащих систем [27, 28].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез проведен по методике [24]. В качестве исходных веществ использованы трифторацетаты иттрия и европия. Навески трифторацетата европия рассчитывали, исходя из содержания ионов Eu^{3+} в конечном продукте 1.0, 3.0 и 5.0 ат. % от содержания атомов иттрия. После растворения солей иттрия и европия в этилацетате в раствор вносили навеску нитрата алюминия (х.ч.). Ее рассчитывали исходя из атомарного соотношения $\text{Y}^{3+} : \text{Al}^{3+} = 3 : 5$. Растворы нагревали до кипения. При комнатной температуре испаряли этилацетат до образования гелеобразных систем. Далее нагревали в муфельной печи на воздухе при температурах 600 °С, 800 °С и 900 °С в течение 4 ч. В результате получены белые кристаллические порошки. Они исследованы методами рентгенофазового анализа (РФА), электронной и колебательной спектроскопии по методикам, приведенным в работах [22, 23]. РФА выполнен на рентгеновском дифрактометре XRD-6000 с использованием баз данных PCPDFWIN и программы полнопрофильного анализа POWDER CELL 2.4. Спектры возбуждения люминесценции и люминесценции зарегистрированы при комнатной температуре на спектрофлуориметре Shimadzu RF-5301PC. Ширина входного и выходного окон монохроматора составляла 1.5 нм–1.5 нм. В отдельных случаях она была равна 3 нм–1.5 нм (отмечено в подписях к рисункам 1 и 2). Колебательные спектры зарегистрированы на ИК-Фурье спектрометре «Infracum FT 801». Для исследования были подготовлены таблетки вещества в KBr.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В спектрах люминесценции порошков зарегистрированы полосы ${}^5D_{0,1} \rightarrow {}^7F_{0,1,2,3,4}$ электронных переходов ионов Eu^{3+} (рису-

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 1 2024

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ИОНОВ ЕВРОПИЯ(III) ВО ФТОРИРОВАННОЙ ИТТРИЙ-АЛЮМИНИЕВОЙ ОКСИДНОЙ МАТРИЦЕ

нок 1). С увеличением температуры синтеза увеличивалась их мультиплетность. В спектрах образцов, синтезированных при 900 °С, мультиплетность полос магнитно-дипольного ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$ и электро-дипольных ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_{2,4}$ электронных переходов равна (${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$ и ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_4$, мультиплетность 3) или приближается (${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$, мультиплетность 4 из 5) к ее максимальным значениям (рисунок 1, спектр 4, $\lambda_{\text{в}} = 240$ нм). Наблюдается гипсохромное

смещение коротковолновой компоненты полосы ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ электронного перехода (рисунок 1, спектры 3 и 4). Максимальное смещение до длины волны 610 нм происходит при возбуждении люминесценции излучением с длиной волны 240 нм (рисунок 1, спектр 4). Полосы люминесценции неоднородно уширены, особенно у основания. Уширение связано с образованием близких по симметрии активаторных центров.

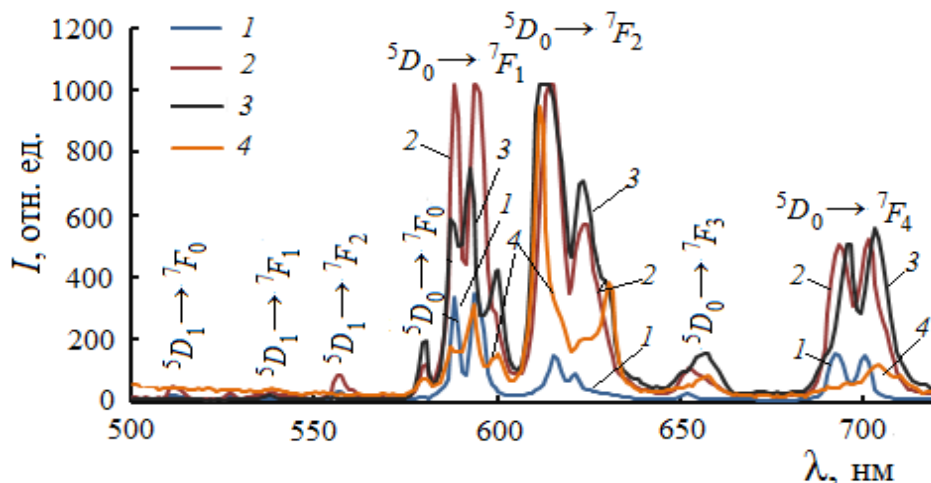


Рисунок 1 – Спектры люминесценции ($\lambda_{\text{в}} = 394$ нм) образцов, синтезированных при температурах: 600 °С (3 нм – 1.5 нм) (1), 800 °С (2), 900 °С (3) и 900 °С ($\lambda_{\text{в}} = 240$ нм, 3 нм – 1.5 нм) (4), $C_{\text{Eu}} = 5$ ат. %

Figure 1 – Luminescence spectra ($\lambda_{\text{ex}} = 394$ nm) of samples synthesized at temperatures: 600 °С (3 nm – 1.5 nm) (1), 800 °С (2), 900 °С (3) and 900 °С ($\lambda_{\text{ex}} = 240$ nm, 3 nm – 1.5 nm) (4), $C_{\text{Eu}} = 5$ at. %

При увеличении температуры синтеза 600 °С → 800 °С → 900 °С изменяется соотношение пиковых интенсивностей полос ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$ и ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ электронных переходов. В спектрах люминесценции образцов, синтезированных при 600 °С, более интенсивной является полоса ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$ электронного перехода (рисунок 1, спектр 1). При увеличении температуры синтеза пиковые интенсивности наиболее интенсивных компонент полос ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$ и ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ электронных переходов выравниваются (рисунок 1, спектр 2, 800 °С). Далее, более интенсивной становится полоса ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ электронного перехода (рисунок 1, спектр 3, 900 °С). Соотношение пиковых интенсивностей компонент I_{610}/I_{593} приближается к значению 3, где I_{610} – пиковая интенсивность наиболее интенсивной компоненты полосы ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ электронного перехода, а I_{593} – пиковая интенсивность наиболее интенсивной компоненты полосы ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$ электронного перехода. Значение 3 соответствует теоретическому отношению количества центров симметрии C_2 к C_{3i} , занимаемых катионами в узлах кристаллической решетки оксидной иттриевой матрицы [29]. Интенсивность полосы ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$ электронного перехода связана с ионами активатора, занимающими бо-

лее симметричные C_{3i} позиции в структуре оксидной матрицы. Интенсивность данной полосы практически не зависит от симметрии активаторных центров. Интенсивность полосы ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ электронного перехода увеличивается при уменьшении симметрии окружения люминесцирующих ионов с C_{3i} до C_2 с исчезновением инверсии. Увеличение интенсивности полосы ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ электронного перехода и возникновение структуры полос в спектрах образцов, полученных при температуре 900 °С, объясняется структурными изменениями в системе « $Y_2O_3 \leftrightarrow YO_F$ », протекающими при температурах больше 700 °С, приводящими к изменению атомарного соотношения атомов кислорода и фтора в составе активаторных центров [8, 30]. Зарегистрированные соотношения интенсивностей данных полос и их изменение с увеличением температуры синтеза косвенно подтверждают преимущественное внедрение ионов Eu^{3+} в оксидную матрицу даже при преобладающей фазе трифторида иттрия.

В спектрах возбуждения люминесценции зарегистрированы полосы, соответствующие переходу электронов из основного 7F_0 в возбужденные электронные состояния ионов Eu^{3+} (рисунок 2).

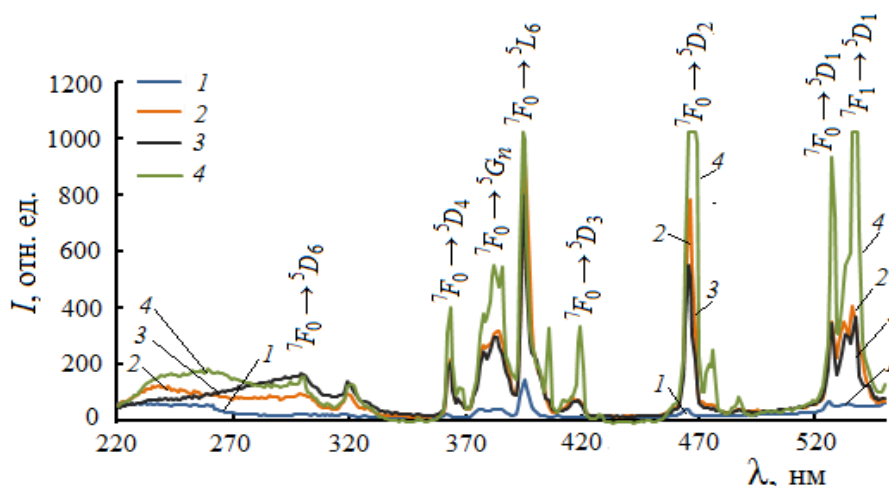


Рисунок 2 – Спектры возбуждения люминесценции ($\lambda_{\text{л}} = 615 \text{ нм}$) образцов, синтезированных при температурах: 600 °C (3 нм – 1.5 нм) (1), 800 °C (2), 900 °C (3) и 900 °C ($\lambda_{\text{л}} = 610 \text{ нм}$, 3 нм – 1.5 нм) (4), $C_{\text{Eu}} = 5 \text{ ат.}\%$

Figure 2 – Luminescence excitation spectra ($\lambda_{\text{em}} = 615 \text{ nm}$) of samples synthesized at temperatures: 600 °C (3 nm - 1.5 nm) (1), 800 °C (2), 900 °C (3) and 900 °C ($\lambda_{\text{em}} = 610 \text{ nm}$, 3 nm - 1.5 nm) (4), $C_{\text{Eu}} = 5 \text{ at.}\%$

Наиболее интенсивной является полоса ${}^7F_0 \rightarrow {}^5L_6$ электронного перехода с максимумом 394 нм (рисунок 2, спектр 1). В спектрах образцов, синтезированных при температуре 900 °C, максимум данной полосы смещается в пределах нескольких нанометров в область коротких волн. С увеличением температуры синтеза образцов в спектрах увеличивается интенсивность полос ${}^7F_0 \rightarrow {}^5D_2$ (466 нм) и ${}^7F_{0,1} \rightarrow {}^5D_1$ (> 540 нм) электронных переходов (рисунок 2, спектры 2 и 3). Увеличение интенсивности объясняется внедрением атомов фтора в активаторные оксидные центры с образованием оксифторидов [8]. Широкие спектральные полосы, расположенные при длинах волн меньше 320 нм, связывают [8, 31, 32] с резонансным переносом колебательной энергии матрицы на возбужденные уровни энергии ионов Eu^{3+} . В интервале (225–280) нм, с максимумом в области 256 нм, находятся полосы, связанные с переходом 2p-электронов ионов O^{2-} на 4f-орбиталь ионов Eu^{3+} [8, 31, 32]. Невысокая интенсивность данных полос объясняется большой долей фторидной и оксифторидных фаз, особенно при температуре синтеза 600 °C, и влиянием фтора в составе активаторных центров. Увеличение интенсивности полосы с максимумом в области 240 нм (рисунок 2, спектры 1 и 2) объясняется переходом YF_3 в оксифториды YOF и $\text{Y}_7\text{O}_6\text{F}_9$ и, соответственно, увеличением доли ионов кислорода в составе активаторных центров при увеличении температуры синтеза до 800 °C. Перераспределение интенсивности компонент широкой полосы в области 300 нм (ри-

сунк 2, спектр 3, 900 °C) связано с увеличением роли фоновых колебательных возбуждений при формировании матрицы на основе YOF . Восстановление структуры полосы возбуждения (рисунок 2, спектр 4, $\lambda_{\text{л}} = 610 \text{ нм}$) показывает вклад ее отдельных компонент в неоднородное уширение полос люминесценции при изменении длины волны возбуждающего излучения.

Наблюдаемые изменения в спектрах возбуждения люминесценции и люминесценции объяснены, исходя из фазового состава продуктов, формирующегося при разрушении гелеобразных составов на основе этилацетата при различной температуре. В соответствии с данными [25, 26] разложение тригидратов трифторацетатов лантаноидов и иттрия начинается при температуре ~140 °C потерей двух молекул воды. При 200 °C они теряют третью молекулу воды. При этом в результате изомерного структурного превращения она участвует в образовании гидроксоформы солей [25]. При температуре 400 °C образуются фториды металлов, которые через стадию образования оксифторидов различного состава переходят в оксиды металлов. При температуре больше 700 °C в системе « $\text{Y}_2\text{O}_3 \leftrightarrow \text{YOF}$ » происходят обратимые структурные изменения. При дальнейшем нагревании YOF переходит в оксид иттрия [8].

По данным рентгенофазового анализа, в составе продуктов синтеза, полученных при температуре 600 °C, основными фазами являются трифторид иттрия (YF_3 , ромбическая сингония; пространственная группа (п.г.) $R\bar{3}m$), оксифторид иттрия (YOF , гексагональная сингония; п.г. $R3m$). Присутствуют фазы оксидов иттрия (куби-

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ИОНОВ ЕВРОПИЯ(III) ВО ФТОРИРОВАННОЙ ИТТРИЙ-АЛЮМИНИЕВОЙ ОКСИДНОЙ МАТРИЦЕ

ческая сингония, п.г. Ia3) и алюминия (гексагональная сингония, п.г. R3c), а также гидроксида европия $\text{Eu}(\text{OH})_3$ (гексагональная сингония; п.г. R63/m). Образование гидроксиформ продуктов, полученных при температуре синтеза 600 °C, подтверждено методом ИК-спектроскопии. В ИК-спектрах образцов зарегистрирована полоса поглощения при значениях волновых чисел больше 3000 см^{-1} . Она связана с валентными колебаниями O–H связей. Интенсивность спектральной полосы уменьшается с увеличением температуры синтеза образцов. Поглощение в данной спек-

тральной области не зарегистрировано в ИК-спектрах образцов, синтезированных при температуре 900 °C. Образование $\text{Eu}(\text{OH})_3$ связано с молекулами кристаллизационной воды в составе исходных солей [24, 25]. Учитывая небольшую концентрацию ионов Eu^{3+} (≤ 5.0 ат. %), искажение параметров элементарных ячеек и плотности иттриевых и европиевых фаз объясняем вхождением ионов Eu^{3+} в кристаллическую структуру иттриевых и иттрий-алюминиевых оксидных и оксифторидных фаз.

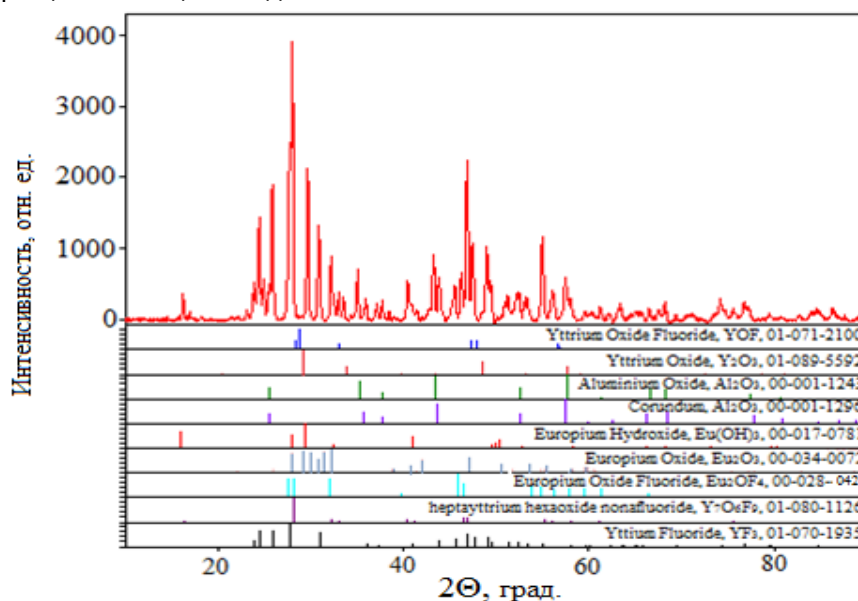


Рисунок 3 – Рентгенограмма порошка и штрих-рентгенограммы компонентов, $T = 800 \text{ °C}$ [24]

Figure 3 – X-ray powder and X-ray diffraction patterns of components, $T = 800 \text{ °C}$ [24]

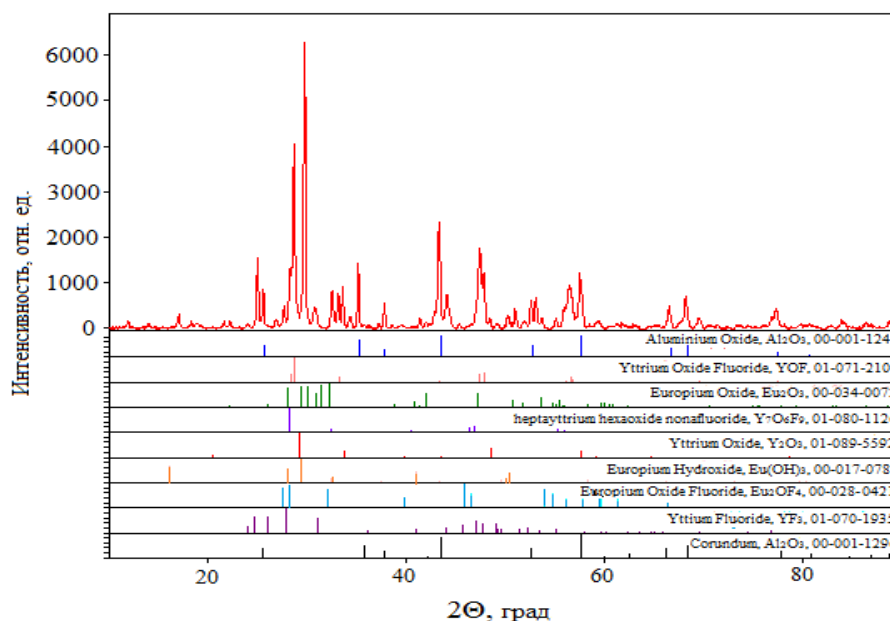


Рисунок 4 – Рентгенограмма порошка и штрих-рентгенограммы компонентов, $T = 900 \text{ °C}$

Figure 4 – X-ray powder and X-ray diffraction patterns of components, $T = 900 \text{ °C}$

Рентгенограммы образцов, синтезированных при температурах 800 °С и 900 °С, приведены на рисунках 3 [24] и 4. Зарегистрировано образование продуктов сложного фазового состава. Отметим уменьшение доли фторида иттрия и гидроксида европия при увеличении температуры синтеза. Присутствуют фазы оксифторидов иттрия состава YOF (гексагональная сингония, п.г. R3m) и $Y_7O_6F_9$ (ромбическая структура, нецентросимметричная п.г. Abm2). Образование низко симметричной фазы Eu_2O_3 (моноклинная модификация, п.г. C12/m1) и значительные искажения параметров элементарных ячеек фаз подтверждают вхождение ионов Eu^{3+} в кристаллическую решетку иттрий-алюминиевых фаз, которые образуют матрицу. Например, это можно связать с образованием $(Y_{1-x}Eu_x)F_3$, $(Y_{1-x}Eu_x)OF$, $(Y_{1-x}Eu_x)_7O_6F_9$, $(Y_{1-x}Eu_x)_2O_3$, $(Y_{1-x}Eu_x)_2O_3 \cdot Al_2O_3$.

По общему виду рентгенограммы (рисунок 4) можно сделать заключение об улучшении однородности состава и структуры продуктов, синтезированных при 900 °С.

При увеличении концентрации ионов европия изменяются соотношения интенсивностей рефлексов, некоторые рефлексы на рентгенограммах не регистрируются. Наблюдаемые изменения связаны не только с влиянием ионов Eu^{3+} , но и с изменением фазового состава в результате возрастания в продуктах доли

атомов фтора, которое обусловлено увеличением концентрации трифторацетата европия в исходных системах. Изменения состава и структуры продуктов синтеза, происходящие с увеличением концентрации трифторацетата европия в составе исходных систем, отражаются на их спектрах. Пиковые интенсивности полос люминесценции линейно увеличиваются с ростом концентрации ионов Eu^{3+} (рисунок 5, 800 °С). Линейная зависимость $I_{\text{л}} = f(C_{Eu})$ подтверждает их равномерное распределение в матрице, вероятнее всего, как было отмечено ранее, это оксидная матрица.

В спектрах образцов, синтезированных при 900 °С, с увеличением концентрации ионов Eu^{3+} наблюдается изменение мультиплетности полос. Изменяются соотношения пиковых интенсивностей отдельных компонент (рисунок 6, спектры 1–3). В большей степени эти изменения проявились в спектрах люминесценции, зарегистрированных при возбуждении излучением с длиной волны 240 нм (рисунок 6, спектр 4). Уменьшение интенсивности полос люминесценции (рисунок 6, спектр 4) относительно интенсивности аналогичных полос в спектре 3 (рисунок 6), при одинаковой концентрации Eu^{3+} , связано со смещением максимумов полос в спектрах возбуждения и люминесценции от длин волн регистрируемого и возбуждающего излучений.

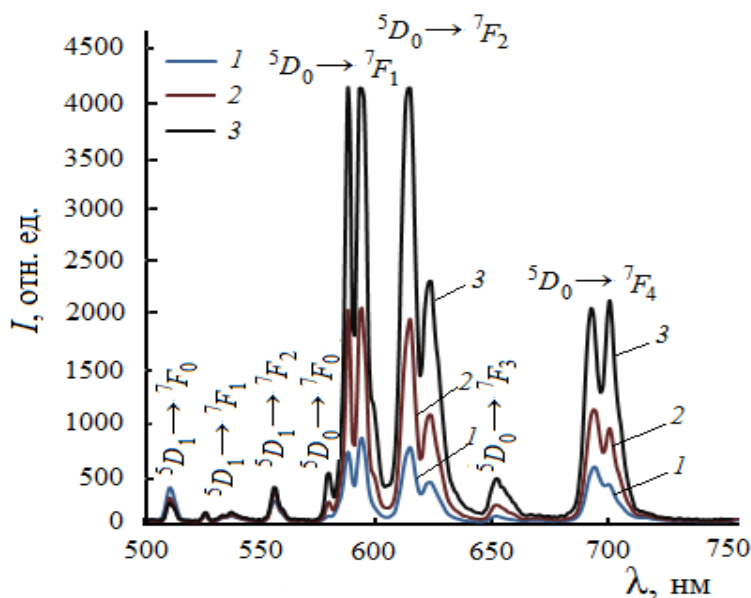


Рисунок 5 – Спектры люминесценции ($\lambda_{\text{в}} = 394$ нм) образцов, содержащих ионы Eu^{3+} в концентрации: 1.0 ат. % (1), 3.0 ат. % (2) и 5.0 ат. % (3), $T = 800$ °С

Figure 5 – Luminescence spectra ($\lambda_{\text{ex}} = 394$ nm) of samples containing Eu^{3+} ions in concentration: 1.0 at. % (1), 3.0 at. % (2) и 5.0 at. % (3), $T = 800$ °С

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ИОНОВ ЕВРОПИЯ(III) ВО ФТОРИРОВАННОЙ ИТТРИЙ-АЛЮМИНИЕВОЙ ОКСИДНОЙ МАТРИЦЕ

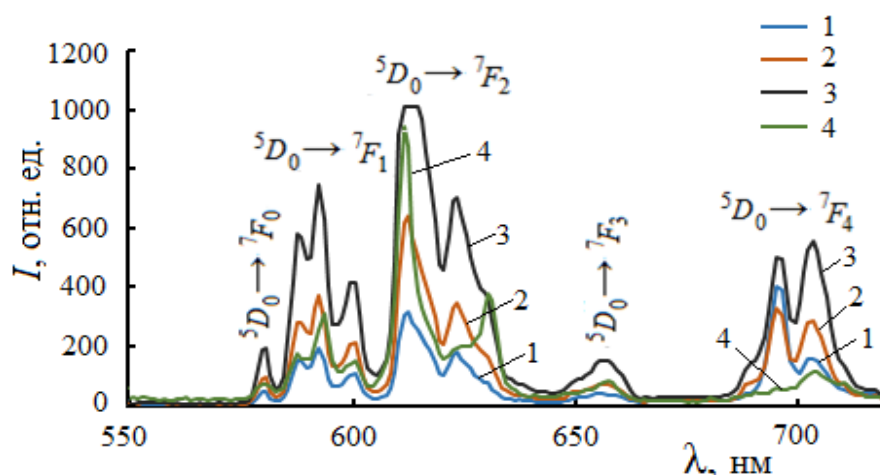


Рисунок 6 – Спектры люминесценции образцов, содержащих ионы Eu^{3+} в концентрации ($\lambda_{\text{в}}$): 1 – 1.0 ат. % (394 нм), 2 – 3.0 ат. % (394 нм), 3 – 5.0 ат. % (394 нм), 4 – 5.0 ат. % (240 нм), $T = 900^\circ\text{C}$

Figure 6 – Luminescence spectra of samples containing Eu^{3+} ions in concentration (λ_{ex}): 1 - 1.0 at. % (394 nm), 2 - 3.0 at. % (394 nm), 3 - 5.0 at. % (394 nm), 4 - 5.0 at. % (240 nm), $T = 900^\circ\text{C}$

В спектрах возбуждения люминесценции (рисунок 7, 900°C) при длинах волн меньше 320 нм полосы одинаково малоинтенсивные. Это связано с уменьшением доли ионов кислорода в составе активаторных центров в оксифторидной матрице. Изменение положения максимума широкой полосы 300 нм (рисунок 7, спектр 3) и 250 нм (рисунок 7, спектр 4) связано с различной вероятностью процессов переноса энергии и перехода электронов на возбужденные уровни энергии

ионов Eu^{3+} , регистрируемые для полос люминесценции 615 нм и 610 нм. Кроме того, в спектрах изменяются мультиплетности и соотношения интенсивностей компонент полос, связанных с собственными электронными переходами в ионах европия. В большей степени эти изменения проявляются в спектрах образцов с его концентрацией, равной 5 ат. %, и при изменении длины волны регистрируемой люминесценции.

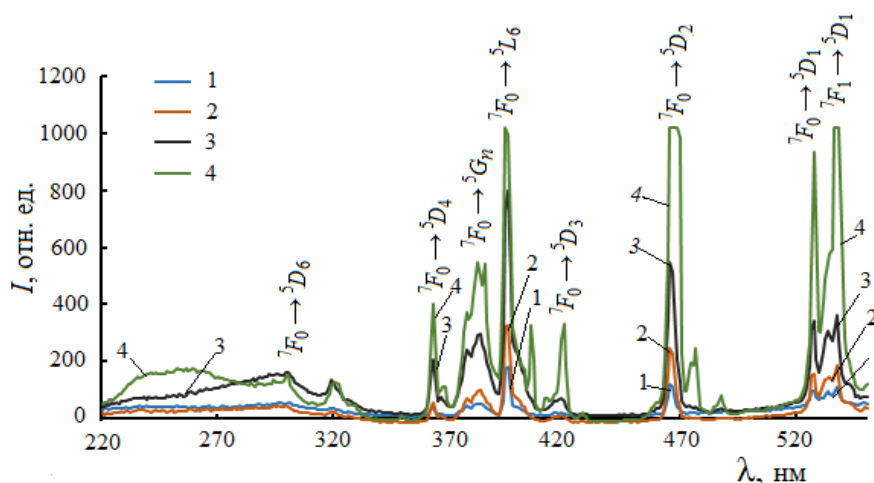


Рисунок 7 – Спектры возбуждения люминесценции образцов ($\lambda_{\text{л}}$): 1 – 1.0 ат. % (615 нм), 2 – 3.0 ат. % (615 нм), 3 – 5.0 ат. % (615 нм), 4 – 5.0 ат. % (610 нм), $T = 900^\circ\text{C}$

Figure 7 – Luminescence excitation spectra of samples (λ_{em}): 1 – 1.0 at. % (615 nm), 2 - 3.0 at. % (615 nm), 3 - 5.0 at. % (615 nm), 4 - 5.0 at. % (610 nm), $T = 900^\circ\text{C}$

ВЫВОДЫ

Таким образом, термическим разрушением гелеобразных систем синтезированы

порошки на основе фторированного оксида иттрия и оксида алюминия. Полученные результаты показывают преимущественное

расположение ионов Eu^{3+} в оксидной иттриевой и иттрий-алюминиевой матрице. Значительное влияние на спектры оказывают атомы фтора, внедряясь в европиевые активаторные центры. При сопоставлении спектров, для образцов, синтезированных при различных концентрациях ионов Eu^{3+} , температуре, атомарном соотношении $\text{Y} : \text{Al}$ ($\text{Y} : \text{Al} = 3 : 5$, рисунки 1 и 2), а также учитывая данные [24] и ($\text{Y} : \text{Al} = 1 : 1$, [22, 23]), отмечено изменение мультиплетности, интенсивности полос и их отдельных компонент. Нивелирование различий в спектрах связано с взаимным влиянием фаз, предпосылки которого возникают при подготовке исходных смесей в малополярном этилацетате вследствие координационного взаимодействия солей в исходном растворе и гелеобразной системе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Progress in Ceramic Lasers / A. Ikesue [et al.] // *Annu. Rev. Mater. Res.* 2006. V. 36. P. 397–429. doi: 10.1146/annurev.matsci.36.011205.152926.
2. Eu^{3+} – Doped $\text{Ln}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ($\text{Ln} = \text{Er}, \text{Tm}, \text{Yb}, \text{Lu}$) garnets: Synthesis, characterization and investigation of structural and luminescence properties / L. Pavasaryte [et al.] // *Journal of Luminescence.* 2019. V. 212. P. 14–22. doi: 10.1016/j.jlumin.2019.04.005.
3. Fabrication and microstructural characterizations of lasing grade $\text{Nd}:\text{Y}_2\text{O}_3$ ceramics / D. Yin [et al.] // *J. Am. Ceram. Soc.* 2019. V. 102(12). P. 7462. doi: 10.1111/jace.16671.
4. Control of defects and their luminescence properties in $\text{Nd}:\text{YAG}$ crystals by laser irradiation / S. Panahibakhsh [et al.] // *Journal of Luminescence.* 2020. V. 218. P. 116813. doi: 10.1016/j.jlumin.2019.116813.
5. Upconversion luminescence in $\text{Cr}^{3+}:\text{YAG}$ single crystal under infrared excitation / M. Chaika [et al.] // *Journal of Luminescence.* 2020. V. 226. P. 117467. doi: 10.1016/j.jlumin.2020.117467.
6. Tailoring the $^3\text{F}_4$ level lifetime in $\text{Tm}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ by Eu^{3+} co-doping for signal processing application / Z. Zhang [et al.] // *Journal of Luminescence.* 2020. V. 222. P. 117107. doi: 10.1016/j.jlumin.2020.117107.
7. Tuned structure of europium-doped Al_2O_3 -yttrium luminescent composites and their spectroscopic behavior / A. Riul [et al.] // *Journal of Luminescence.* 2021. V. 233. P. 117925. doi: 10.1016/j.jlumin.2021.117925.
8. Уклеина И.Ю. Оксифториды иттрия и РЗЭ: синтез, люминесценция и оптика: дис. ... канд. хим. наук. Ставрополь : СтГУ, 2005. 158 с.
9. Rakov N., Maciel G.S. Comparative Study of Er^{3+} and Tm^{3+} Co-Doped YOF and Y_2O_3 Powders as Red Spectrally Pure Upconverters // *Opt. Mater.* 2013. V. 35. P. 2372–2375. doi: 10.1016/j.optmat.2013.06.037.
10. Fabrication and luminescent enhancement of Eu^{3+} -doped $\text{Y}_2\text{O}_3@$ YOF core-shell nanocrystals / Y. Tian [et al.] // *J. Nanosci Nanotechnol.* 2011. V. 11, № 11. P. 9631–9635. doi: 10.1166/jnn.2011.5312.
11. Неорганические нанофториды и наноконпозиты на их основе / С.В. Кузнецов [и др.] // *Успехи химии.* 2006. Т. 75, № 12. С. 1193–1211.
12. Исследование структуры и люминесцентных свойств наночастиц $\text{YAG}:\text{Eu}$ / М.Д. Михайлов [и др.] // *Современные проблемы науки и образования.* 2012. № 4. С. 335.
13. Сиглова Н.В. Исследование люминесцентных свойств и разработка технологии производства катодолуминофоров красного цвета свечения на основе Y_2O_3 для дисплейных и проекционных ЭЛТ: дис. ... канд. хим. наук. Ставрополь: СтГУ, 2003. 143 с.
14. Синтез и спекание субмикронных частиц ИАГ: Nd , полученных из карбонатных прекурсоров / Т.Ю. Коломиец [и др.] // *Неорганические материалы.* 2017. Т. 53, № 8. С. 890–899. doi: 10.7868/S0002337X17080152.
15. Luminescent Properties of Rare Earth (Er, Yb) Doped Yttrium Aluminium Garnet Thin Films and Bulk Samples Synthesised by an Aqueous Sol-Gel Technique / E. Garskaite [et al.] // *Journal of the European Ceramic Society.* 2010. V. 30. P. 1707–1715. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2010.01.001.
16. Modified Pechini method for the synthesis of weakly-agglomerated nanocrystalline yttrium aluminium garnet (YAG) powders / D.V. Mamonova [et al.] // *Materials Chemistry and Physics.* 2017. V. 189. P. 245–251. doi: 10.1016/j.matchemphys.2016.12.025.
17. Multicolour and upconversion fluorescence of lanthanide doped Vernier phase yttrium oxyfluoride nanocrystals / T. Wen [et al.] // *J. Mater. Chem. C.* 2013. V. 1. P. 1995–2001.
18. Об аномальной эффективности люминесценции субмикронного фосфора $\text{Y}_2\text{O}_3 : \text{Eu}^{3+}$ / Т.А. Помелова [и др.] // *Физика твердого тела.* 2014. Т. 56, № 12. С. 2410–2419.
19. Structural and spectroscopic analyses of europium doped yttrium oxyfluoride powders prepared by combustion synthesis / N. Rakov [et al.] // *Journal of Applied Physics.* 2013. V. 114(4). P. 043517. doi: 10.1063/1.4816623.
20. Morphology Control and Luminescence Properties of $\text{YAG}:\text{Eu}$ Phosphors Prepared by Spray Pyrolysis / Y.H. Zhou [et al.] // *Materials Research Bulletin.* 2003. V. 38, № 8. P. 1289–1299. doi: 10.1016/S0025-5408(03)00141-7.
21. Cho T.H., Shin S.C. Novel synthetic method for the preparation of $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ red phosphors // *J. of Adv. Science.* 2006. V. 18, № 3–4. P. 229–234. doi: 10.2978/jasas.18.229.
22. Смагин В.П., Худяков А.П. Влияние условий синтеза на люминесценцию европийсодержащих композиций на основе оксида и оксифторидов иттрия // *Неорганические материалы.* 2019. Т. 55, № 1. С. 67–79. doi: 10.1134/S0002337X19010147.
23. Смагин В.П., Худяков А.П. Фотолюминесценция европийсодержащих композиций на основе фторированных оксидов иттрия и алюминия // *Неорганические материалы.* 2020. Т. 56, № 10. С. 1095–1106. doi: 10.31857/S0002337X20100140.
24. Смагин В.П., Худяков А.П., Бирюков А.А. Синтез и фотолюминесценция фторированных иттрий-алюминиевых оксидных композитов // *Не-*

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ИОНОВ ЕВРОПИЯ(III) ВО ФТОРИРОВАННОЙ ИТТРИЙ-АЛЮМИНИЕВОЙ ОКСИДНОЙ МАТРИЦЕ

органические материалы. 2021. Т. 57, № 10. С. 1113–1121. doi: 10.31857/S0002337X21100158.

25. Изомерия в димере тригидрата трифтороацетата тербия(III) / В.И. Белый [и др.] // Журнал структурной химии. 2002. Т. 43, № 4. С. 634–641.

26. Смагин В.П., Мокроусов Г.М. Физико-химические аспекты формирования и свойства оптически прозрачных металлосодержащих полимерных материалов : монография. Барнаул : Изд-во Алт. ун-та, 2014. 258 с.

27. Dieke G.H. Spectra and Energy Levels of Rare Earth Ions in Crystals. New York : Interscience Publishers, 1968. 457 p.

28. Binnemans K. Interpretation of europium(III) spectra // Coordination Chemistry Reviews. 2015. V. 295. P. 1–45. doi: 10.1016/j.ccr.2015.02.015.

29. Манаширов О.Я., Зверева Е.М., Воробьев В.А. Сравнительное исследование различных классов люминофоров, активированных ионами Yb^{3+} , при ИК-возбуждении // Вестник Южного научного центра РАН. 2012. Т. 8, № 4. С. 38–49.

30. Смагин В.П., Еремина Н.С., Мичуева З.В. Синтез и спектрально-люминесцентные свойства композиций (Y_2O_3 -YOF) : Ln(III) // Неорганические материалы. 2017, Т. 53, № 8. С. 851–860. doi: 10.7868/S0002337X17080103.

31. Synthesis and fabrication of $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Tb}^{3+}$ and $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ thin films for electroluminescent applications: Optical and structural characteristics / G. Alarcón-Flores [et al.] // Materials Chemistry and Physics. 2015. V. 149–150. P. 34–42. doi: 10.1016/j.matchemphys.2014.09.020.

32. Ćirić A., Stojadinović S. Structural and photoluminescence properties of Y_2O_3 and $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Ln}^{3+}$ (Ln = Eu, Er, Ho) films synthesized by plasma electrolytic oxidation of yttrium substrate // Journal of Luminescence. 2020. V. 217. P. 116762. doi: 10.1016/j.jlumin.2019.116762.

Информация об авторах

А. П. Худяков – аспирант кафедры техносферной безопасности и аналитической химии, институт химии и химико-фармацевтических технологий, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет».

Н. А. Омелько – студент кафедры техносферной безопасности и аналитической химии, институт химии и химико-фармацевтических технологий, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет».

В. П. Смагин – доктор химических наук, профессор, профессор кафедры техносферной безопасности и аналитической химии, институт химии и химико-фармацевтических технологий, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет».

Л. В. Затонская – кандидат химических наук, доцент кафедры техносферной безопасности и аналитической химии, институт химии и химико-фармацевтических технологий, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет».

В. А. Новоженев – доктор химических наук, профессор, профессор кафедры физической и неорганической химии, институт химии и хими-

ко-фармацевтических технологий, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет».

REFERENCES

1. Ikesue, A., Aung, Y.L., Taira, T., Kamimura, T., Yoshida, K. & Gary L. Messing, G.L. (2006). Progress in Ceramic Lasers. *Annu. Rev. Mater. Res.*, (36), 397-429. doi: 10.1146/annurev.matsci.36.011205.152926.

2. Pavasaryte, L., Katelnikovas, A., Momot, A., Reekmans, G., Hardy, A., Van Bael, M., Adriaensens, P., Yang, T.C.K. & Kareiva, A. (2019). Eu^{3+} -Doped $\text{Ln}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (Ln = Er, Tm, Yb, Lu) garnets: Synthesis, characterization and investigation of structural and luminescence properties. *Journal of Luminescence*, (212), 14-22. doi: 10.1016/j.jlumin.2019.04.005.

3. Yin, D., Wang, J., Liu, P., Zhu, H., Yao, B., Dong, Z. & Tang, D. (2019). Fabrication and microstructural characterizations of lasing grade $\text{Nd}:\text{Y}_2\text{O}_3$ ceramics. *J. Am. Ceram. Soc.*, 102(12), 7462. doi: 10.1111/jace.16671.

4. Panahibakhsh, S., Bahramian, R., Jaber, M. & Jelvani, S. (2020). Control of defects and their luminescence properties in $\text{Nd}:\text{YAG}$ crystals by laser irradiation. *Journal of Luminescence*, (218), 116813. doi: 10.1016/j.jlumin.2019.116813.

5. Chaika, M., Tomala, R., Vovk, O., Nizhankovskiy, S., Mancardi, G. & Strek, W. (2020). Upconversion luminescence in $\text{Cr}^{3+}:\text{YAG}$ single crystal under infrared excitation. *Journal of Luminescence*, (226), 117467. doi: 10.1016/j.jlumin.2020.117467.

6. Zhang, Z., Louchet-Chauvet, A., Morvan, L., Berger, P., Goldner, P. & Ferrier, A. (2020). Tailoring the $^3\text{F}_4$ level lifetime in $\text{Tm}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ by Eu^{3+} co-doping for signal processing application. *Journal of Luminescence*, (222), 117107. doi: 10.1016/j.jlumin.2020.117107.

7. Riul, A., da Fonseca, F.A.A., Pugina, R.S. & Caiu, J.M.A. (2021). Tuned structure of europium-doped Al_2O_3 -yttrium luminescent composites and their spectroscopic behavior. *Journal of Luminescence*, (233), 117925. doi: 10.1016/j.jlumin.2021.117925.

8. Ukleina, I.Yu. (2005). Yttrium and lanthanide oxyfluorides: synthesis, luminescence, and optical properties. (In Russ.).

9. Rakov, N. & Maciel, G.S. (2013). Comparative Study of Er^{3+} and Tm^{3+} Co-Doped YOF and Y_2O_3 Powders as Red Spectrally Pure Upconverters. *Opt. Mater.*, (35), 2372-2375. doi: 10.1016/j.optmat.2013.06.037.

10. Tian, Y., Chen, B., Hua, R., Sun, J., Cheng, L., Zhong, H., Li, X., Zhang, J., Meng, Q. & Chen, M. (2011). Fabrication and luminescent enhancement of Eu^{3+} -doped $\text{Y}_2\text{O}_3@$ YOF core-shell nanocrystals. *J. Nanosci Nanotechnol.*, 11(11), 9631-9635. doi: 10.1166/jnn.2011.5312.

11. Kuznetsov, S.V., Osiko V.V., Tkatchenko, E.A. & Fedorov, P.P. (2006). Inorganic nanofluorides and related nanocomposites. *Russian Chemical Reviews*, 75(12), 1065-1082. (In Russ.). doi: 10.1070/RC2006v075n12ABEH003637.

12. Mikhaylov, M.D., Semencha, A.V., Kolesnikov, I.E. & Manshina, A.A. (2012). Structural and luminescent properties of $\text{YAG}:\text{Eu}$ nanoparticles. *Modern problems of science and education*, (4), 10. (In Russ.).

13. Siglovaya, N.V. (2003). Luminescence properties and fabrication of Y_2O_3 -based red cathodoluminescent phosphors for display and projection CRTs. Stavropol. (In Russ.).

14. Kolomiets, T.Y., Tel'nova, G.B., Ashmarin, A.A., Chelpanov, V.I., Solntsev, K.A. (2017). Synthesis and sintering of submicron $\text{Nd}:\text{YAG}$ particles prepared from carbonate precursors. *Inorganic materials*, 53(8), 874-882. (In Russ.). doi: 10.1134/S0020168517080076.

15. Garskaite, E., Lindgren, M., Einarsrud, M.-A. & Grande, T. (2010). Luminescent Properties of Rare Earth (Er, Yb) Doped Yttrium Aluminium Garnet Thin Films and Bulk Samples Synthesised by an Aqueous Sol-Gel Technique. *Journal of the European Ceramic Society*, (30), 1707-1715. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2010.01.001.

16. Mamonova, D.V., Kolesnikov, I.E., Manshina, A.A., Mikhailov, M.D. & Smirnov, V.M. (2017). Modified Pechini method for the synthesis of weakly-agglomerated nanocrystalline yttrium aluminum garnet (YAG) powders. *Materials Chemistry and Physics*, (189), 245-251. doi: 10.1016/j.matchemphys.2016.12.025.
17. Wen, T., Luo, W., Wang, Y., Zhang, M., Guo, Y., Yuan, J., Ju, J., Wang, Y., Liao, F. & Yang, B. (2013). Multi-colour and upconversion fluorescence of lanthanide doped Vernier phase yttrium oxyfluoride nanocrystals. *J. Mater. Chem. C.*, (1), 1995-2001.
18. Pomelova, T.A., Bakovets, V.V., Korol'kov, I.V., Antonova, O.V. & Dolgovsova, I.P. (2014). On the abnormal efficiency of the luminescence of submicron-sized phosphor $Y_2O_3:Eu^{3+}$. *Physics of the Solid State*, 56(12), 2496-2506. (In Russ.). doi: 10.1134/S1063783414120269.
19. Rakov, N., Guimarães, R.B., Lozano, B.W. & Maciel, G.S. (2013). Structural and spectroscopic analyses of europium doped yttrium oxyfluoride powders prepared by combustion synthesis. *Journal of Applied Physics*, 114(4), 043517. doi: 10.1063/1.4816623.
20. Zhou, Y.H., Lin, J., Yu, M., Han, S.M., Wang, S.-B. & Zhang, H. (2003). Morphology Control and Luminescence Properties of YAG:Eu Phosphors Prepared by Spray Pyrolysis. *Materials Research Bulletin*, 38(8), 1289-1299. doi: 10.1016/S0025-5408(03)00141-7.
21. Cho, T.H. & Shin, S.C. (2006). Novel synthetic method for the preparation of $Y_2O_3:Eu^{3+}$ red phosphors. *J. of Adv. Science*, 18(3-4), 229-234. doi: 10.2978/jsas.18.229.
22. Smagin, V.P. & Khudyakov, A.P. (2019). Effect of synthesis conditions on the luminescence of europium-containing materials based on yttria and yttrium oxyfluorides. *Inorganic materials*, 55(1), 64-76. (In Russ.). doi: 10.1134/S002016851901014X.
23. Smagin, V.P. & Khudyakov, A.P. (2020). Photoluminescence of europium-containing materials based on fluorinated yttria and alumina. *Inorganic materials*, 56(10), 1039-1049. (In Russ.). doi: 10.1134/S0020168520100143.
24. Smagin, V.P., Khudyakov, A.P. & Biryukov, A.A. (2021). Synthesis and photoluminescence of fluorinated yttria-alumina composites. *Inorganic materials*, 57(10), 1052-1060. (In Russ.). doi: 10.1134/S0020168521100150.
25. Belyi, V.I., Rastorguev, A.A., Remova, A.A., Romanenko, G.V. & Sokolova, N.P. (2002). Isomerism in the Terbium(III) Trifluoroacetate Trihydrate Dimer. *Journal of Structural Chemistry*, 43(4), 587-594. (In Russ.). doi: 10.1023/A:1022088218110.
26. Smagin, V.P. & Mokrousov, G.M. (2014). *Physico-chemical Aspects of Formation and Properties of Optically Transparent Metal-Containing Polymer Materials: Monograph*. Barnaul: Altai State University. (In Russ.).
27. Dieke, G.H. (1968). *Spectra and Energy Levels of Rare Earth Ions in Crystals*. New York: Interscience Publishers.
28. Binnemans, K. (2015). Interpretation of europium(III) spectra. *Coordination Chemistry Reviews*, (295), 1-45. doi: 10.1016/j.ccr.2015.02.015.
29. Manashirov, O.Ya., Zvereva, E.M. & Vorobev, V.A. (2012). A comparative study of different classes of phosphors doped with Yb^{3+} ions at IR-excitation. *Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 8(4), 38-49. (In Russ.).
30. Smagin, V.P., Eremina, N.S. & Michueva, Z.V. (2017). Synthesis and luminescence spectra of $(Y_2O_3-YOF):Ln(III)$ composites // *Inorganic materials*, 53(8), 838-846. (In Russ.). doi: 10.1134/S0020168517080167.
31. Alarcón-Flores, G., García-Hipólito, M., Aguilar-Frutos, M., Carmona-Téllez, S., Martínez-Martínez, R., Campos-Arias, M.P., Zaleta-Alejandre, E. & Falcony, C. (2015). Synthesis and fabrication of $Y_2O_3:Tb^{3+}$ and $Y_2O_3:Eu^{3+}$ thin films for electroluminescent applications: Optical and structural characteristics. *Materials Chemistry and Physics*, 149-150, 34-42. doi: 10.1016/j.matchemphys.2014.09.020.
32. Čirč, A. & Stojadinović, S. (2020). Structural and photoluminescence properties of Y_2O_3 and $Y_2O_3:Ln^{3+}$ (Ln = Eu, Er, Ho) films synthesized by plasma electrolytic oxidation of yttrium substrate. *Journal of Luminescence*, (217), 116762. doi: 10.1016/j.jlum.2019.116762.

Information about the authors

A.P. Khudyakov - graduate student of the Department of Technosphere Safety and Analytical Chemistry, Institute of Chemistry and Chemical-Pharmaceutical Technologies, Altai State University.

N.A. Omelko - student of the Department of Technosphere Safety and Analytical Chemistry, Institute of Chemistry and Chemical-Pharmaceutical Technologies, Altai State University.

V.P. Smagin - Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technosphere Safety and Analytical Chemistry, Institute of Chemistry and Chemical-Pharmaceutical Technologies, Altai State University.

L.V. Zatonskaya - Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Technosphere Safety and Analytical Chemistry, Institute of Chemistry and Chemical-Pharmaceutical Technologies, Altai State University.

V.A. Novozhenov - Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor of the Department of Physical and Inorganic Chemistry, Institute of Chemistry and Chemical-Pharmaceutical Technologies, Altai State University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 23 июня 2023; одобрена после рецензирования 29 февраля 2024; принята к публикации 05 марта 2024.

The article was received by the editorial board on 23 June 2023; approved after editing on 29 Feb 2024; accepted for publication on 05 Mar 2024.