 © Авторы статьи / Authors of the article

НЕОРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ/INORGANIC CHEMISTRY

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.58 EDN: PRGHKZ

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ ZRO_2–SC_2O_3–EU_2O_3, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СООСАЖДЕНИЯ

Научная статья

Данилов В.П.[1,*], Петрова О.Б.[2], Пак В.А.[3], Серкина К.С.[4], Шукшин В.Е.[5], Ефимов А.А.[6]

[1] ORCID : 0009-0002-4389-0456;
[2] ORCID : 0000-0001-7828-1058;
[3] ORCID : 0009-0008-1827-0195;
[4] ORCID : 0009-0002-2386-7398;
[5] ORCID : 0009-0006-8226-6700;
[6] ORCID : 0009-0009-7226-7146;

[1, 2, 3, 4] Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Москва, Российская Федерация
[5] Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Российская Федерация
[6] Фрязинский филиал института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (danilovp1[at]yandex.ru)

Предложена: 14.10.2026; Принята: 12.11.2026; Опубликована: 17.11.2026

Аннотация

В работе методом соосаждения из растворов нитратов синтезированы порошки ZrO_2–Sc_2O_3–Eu_2O_3 с содержанием Sc_2O_3 2, 9, 20 и 25 мол.% и постоянным содержанием Eu_2O_3 0.1 мол.%, отожжённые при 500, 750 и 1200 °C. Методами РФА, КРС и люминесцентной спектроскопии Eu^{3+} также исследованы фазовые превращения и локальная структура полученных твёрдых растворов. Установлено, что с увеличением концентрации Sc_2O_3 происходит последовательная смена фаз от моноклинной и тетрагональной (2 мол.%) к тетрагональной и кубической (9 мол.%), а затем к кубической и ромбоэдрической (20–25 мол.%), при этом величина коэффициента асимметрии R, рассчитанного из спектров люминесценции Eu^{3+}, также хорошо коррелирует с фазовым состоянием образцов.

Ключевые слова: диоксид циркония, оксид скандия, европий, соосаждение, рентгенофазовый анализ, комбинационное рассеяние света, люминесценция.

PHASE TRANSFORMATIONS AND SPECTRAL-LUMINESCENCE PROPERTIES OF ZRO_2–SC_2O_3–EU_2O_3 SOLID SOLUTIONS PREPARED BY CO-PRECIPITATION

Research article

Danilov V.P.[1,*], Petrova O.B.[2], Pak V.A.[3], Serkina K.S.[4], Shukshin V.E.[5], Efimov A.A.[6]

[1] ORCID : 0009-0002-4389-0456;
[2] ORCID : 0000-0001-7828-1058;
[3] ORCID : 0009-0008-1827-0195;
[4] ORCID : 0009-0002-2386-7398;
[5] ORCID : 0009-0006-8226-6700;
[6] ORCID : 0009-0009-7226-7146;

[1, 2, 3, 4] D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation
[5] A.M. Prokhorov Institute of General Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
[6] Fryazino branch of V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (danilovp1[at]yandex.ru)

Suggested: 14.10.2026; Accepted: 12.11.2026; Published: 17.11.2026

Abstract

Using the co-precipitation method from nitrate solutions, ZrO_2–Sc_2O_3–Eu_2O_3 powders were synthesised with Sc_2O_3 contents of 2, 9, 20 and 25 mol.% and a constant Eu_2O_3 content of 0.1 mol.%, and were annealed at 500, 750 and 1200 °C. The phase transformations and local structure of the resulting solid solutions were also investigated using XRF, XRD and Eu^{3+} luminescence spectroscopy. It was found that, with increasing Sc_2O_3 concentration, a sequential phase transition occurs from monoclinic and tetragonal (2 mol.%) to tetragonal and cubic (9 mol.%), and then to cubic and rhombohedral (20–25 mol.%), whilst the value of the asymmetry coefficient R, calculated from the Eu^{3+} luminescence spectra, also correlates well with the phase state of the samples.

Keywords: zirconium dioxide, scandium oxide, europium, co-precipitation, X-ray phase analysis, Raman spectroscopy, luminescence.

Введение

Диоксид циркония (ZrO_2) является одним из ключевых материалов для создания твердооксидных топливных элементов благодаря высокой ионной проводимости и химической стабильности. Однако чистый ZrO_2 претерпевает

 © Авторы статьи / Authors of the article

полиморфные превращения при нагреве, которые сопровождаются изменением объема и может приводить к разрушению ионной керамики. Для стабилизации высокотемпературных кубической и тетрагональной модификаций в структуру ZrO_2 вводят оксиды редкоземельных элементов, среди которых особый интерес представляет Sc_2O_3, обеспечивающий наиболее высокую ионную проводимость среди известных стабилизаторов [1]. Дополнительное введение ионов Eu^{3+} позволяет использовать люминесцентную спектроскопию для оценки локальной симметрии кристаллографического окружения, что делает этот ион уникальным структурным зондом [2]. В настоящей работе методами РФА, КРС и люминесцентной спектроскопии исследованы изменения фазового состава и локальной структуры порошков ZrO_2–Sc_2O_3–Eu_2O_3, полученных соосаждением и отожжённых при 500, 750 и 1200 °C [1], [2].

Методы и принципы исследования

Твердые растворы ZrO_2–Sc_2O_3–Eu_2O_3 с содержанием Sc_2O_3 2, 9, 20 и 25 мол.% и постоянным содержанием Eu_2O_3 0.1 мол.% синтезировали методом соосаждения из нитратных растворов. В качестве прекурсоров использовали $Zr(NO_3)_4{\cdot}2H_2O$, $Sc(NO_3)_3{\cdot}4H_2O$ и $Eu(NO_3)_3{\cdot}6H_2O$ (Eu^{3+} является спектроскопическим зондом для оценки локального окружения, его минимальное содержание в 0.1 мол.% не оказывает влияние на структуру составов) квалификации ОСЧ, а осадителем служил 1 М водный раствор NH_4OH (см. табл.1). Расчет массового содержания исходных веществ в образцах состава $(ZrO_2)_{(1-x-0,001)}$-$(Sc_2O_3)_x$-$(Eu_2O_3)_{0,001}$ проводили согласно уравнению реакции (1):

$$(1-x-0,001)Zr\left(NO_3\right)_4\cdot 2H_2O + xSc\left(NO_3\right)_3\cdot 4H_2O + 0,001Eu\left(NO_3\right)_3\cdot 6H_2O + (3,999-x)NH_4OH \rightarrow Zr_{(1-x-0,001)}Sc_xEu_{0,001}O_{(1,9995-0,5x)}\downarrow +(3,999-x)NH_4NO_3 + (4,0035+1,5x)H_2O \quad (1)$$

Таблица 1 - Составы образцов ZrO_2–Sc_2O_3–Eu_2O_3, полученных методом соосаждения

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.58.1

Общая молек. масса продукта, г/моль	Масса навесок исходных реактивов, г			Объем осадителя, мл	Номинальный состав, мол. %	Обозначение
	$Zr(NO_3)_4{\cdot}2H_2O$	$Sc(NO_3)_3{\cdot}4H_2O$	$Eu(NO_3)_3{\cdot}6H_2O$	NH_4OH (р-р 25 масс.%)		
121,981	15,0485	0,2484	0,0183	25,0	$97.9ZrO_2$-$2Sc_2O_3$-$0.1Eu_2O_3$	2ScSZ
118,201	14,4193	1,1535	0,0189	25,4	$90.9ZrO_2$-$9Sc_2O_3$-$0.1Eu_2O_3$	9ScSZ
112,261	13,3450	2,6991	0,0199	26,0	$79.9ZrO_2$-$20Sc_2O_3$-$0.1Eu_2O_3$	20ScSZ
109,561	12,8182	3,4570	0,0204	26,3	$74.9ZrO_2$-$25Sc_2O_3$-$0.1Eu_2O_3$	25ScSZ

Растворы нитратов готовили отдельно, затем смешивали при перемешивании, после чего приливали осадитель со скоростью 5 мл/мин до pH > 9. Полученный аморфный осадок отстаивали, декантировали и промывали бидистиллированной водой до отрицательной реакции на нитрат-ионы (с дифениламином), после чего высушивали. Сухой осадок измельчали в ступке и подвергали термической обработке при 500, 750 и 1200 °C в течение 5 часов. Выбранные температуры соответствуют ключевым стадиям фазовых переходов в структуре образцов: от начала формирования кристаллической структуры (500 °C), к фазовой нестабильности (750 °C) и к формированию стабильной фазовой структуры (1200 °C). Фазовый состав порошков изучали методом рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре Equinox 2000 (CuKα, λ = 1.54060 Å) в диапазоне 2θ = 20–110°. Дополнительные рентгенограммы на больших углах (2θ = 110–160°) регистрировали на дифрактометре D2 PHASER (Bruker) для уточнения структурных параметров. Расшифровку дифрактограмм проводили с использованием баз данных PCPDFWIN и Match!. Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) получали для спрессованных таблеток, содержащих 30 масс.% KBr в качестве пластификатора. Спектры КРС возбуждали излучением непрерывного лазера с длиной волны 532 нм и мощностью 50 мВт в 180°-геометрии рассеяния. Регистрацию КРС осуществляли на двойном монохроматоре SPEX-Ramalog 1403 с разрешением 2 $см^{-1}$ и пятикратным накоплением сигнала. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) регистрировали на спектрофлуориметре Fluorolog 3D (Horiba Jobin Yvon) для оценки локального окружения ионов Eu^{3+}. Обработку спектров РФА, ФЛ и КРС проводили в программе OriginPro 2018.

Основные результаты

Согласно данным рентгенофазового анализа, фазовый состав порошков ZrO_2–Sc_2O_3–Eu_2O_3 существенно зависит от концентрации Sc_2O_3 и температуры отжига. Для образца с 2 мол.% Sc_2O_3 после отжига при 500 °C (рис. 1,а)

 © Авторы статьи / Authors of the article

наблюдаются пики при 2θ ≈ 28.2° и 31.5°, соответствующие отражениям (-111) и (111) моноклинной фазы ZrO_2 (m и пр. гр. $P2_1/c$) [3], [11]. Увеличение содержания Sc_2O_3 до 9 мол.% (рис. 1,а) приводит к исчезновению моноклинных пиков и появлению пиков при 2θ ≈ 30.2°, 35.2°, 50.6° и 60.2°, которые индицируются как (101), (110), (112) и (211) тетрагональной фазы (t и пр. гр. $P4_2/nmc$) [4], [12]. При 20 и 25 мол.% Sc_2O_3 в образцах, отожжённых при 500 °C (рис. 1,а) и 750 °C (рис. 1,б), фиксируются пики при 2θ ≈ 30.3°, 35.1°, 50.5° и 60.1°, соответствующие отражениям (111), (200), (220) и (311) кубической фазы ZrO_2 (c и пр. гр. Fmm) и одновременно тетрагональной фазы (пр. гр. $P4_2/nmc$) [4]. Их точное определение осложнено близким нахождением пиков на 2θ углах свойственных этим фазам. Также у образца при 20 мол.% Sc_2O_3 наблюдается ромбоэдрический пик **β-фазы** (r и пр. гр. R) при 2θ ≈ 38°

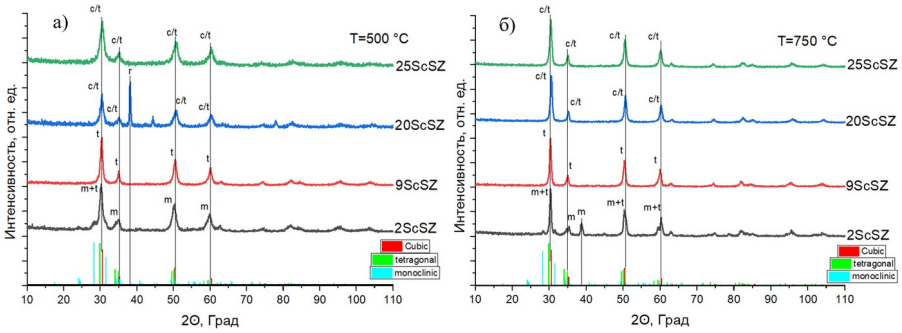


Рисунок 1 - Рентгеновские дифрактограммы образцов состава ZrO_2–Sc_2O_3–Eu_2O_3 обработанных при 500 °C (*а*) и 750 °C (*б*)

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.58.2

После отжига при 1200 °C (рис. 2) для образцов с 20 и 25 мол.% Sc_2O_3 наблюдается расщепление рефлексов в области 2θ ≈ 50–52° и 59–62°, что является диагностическим признаком ромбоэдрической фазы (пр. гр. R) [5]. Согласно фазовой диаграмме системы ZrO_2– Sc_2O_3, при содержании Sc_2O_3 от 15 до 23 мол.% стабильна ромбоэдрическая γ-фаза, а при 24–40 мол.% — δ-фаза [1]. Для образца с 2 мол.% Sc_2O_3 после отжига при 1200 °C (рис. 2) сохраняется смесь моноклинной и тетрагональной фаз, что подтверждается наличием рефлексов при 2θ ≈ 28.2°, 31.5° (m- ZrO_2) и 30.2°, 35.2° (t- ZrO_2) [3], [4]. Полученные результаты согласуются с данными работы [6], в которой для скандий-стабилизированного ZrO_2 также наблюдался переход от моноклинной фазы к тетрагональной и кубической при увеличении содержания скандия. Таким образом, введение 9–25 мол.% Sc_2O_3 обеспечивает полную стабилизацию фаз ZrO_2, а при 1200 °C в образцах с 20 и 25 мол.% Sc_2O_3 формируется δ-ромбоэдрическая фаза.

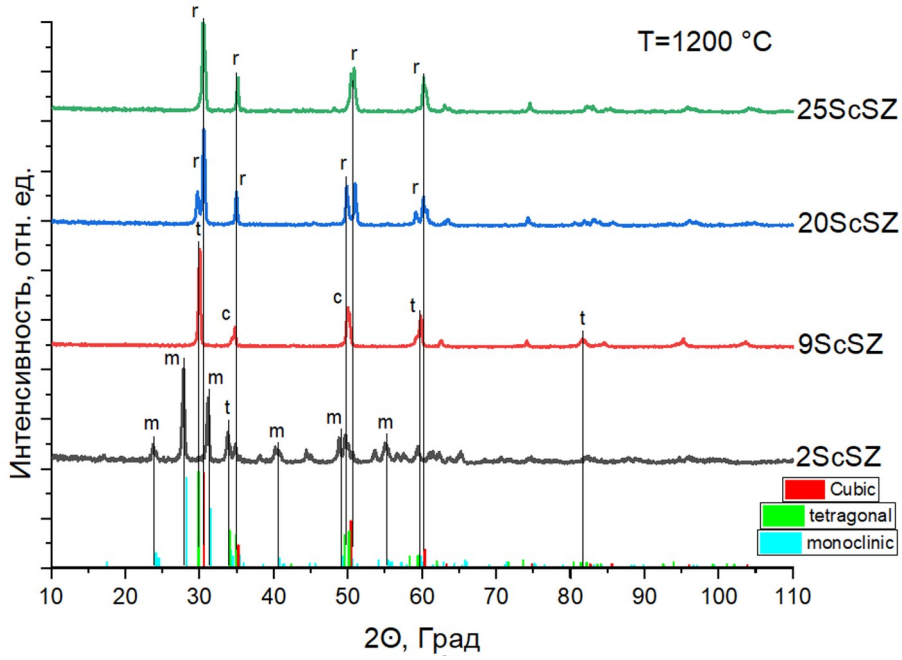


Рисунок 2 - Рентгеновская дифрактограмма образцов состава ZrO_2–Sc_2O_3–Eu_2O_3 обработанных при 1200 °C

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.58.3

Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) образцов, отожжённых при 1200 °C, подтверждают результаты РФА и демонстрируют переход от моноклинной к высокосимметричным фазам по мере увеличения концентрации

 © Авторы статьи / Authors of the article

Sc_2O_3 (рис. 3). Для образца с 2 мол.% Sc_2O_3 (2ScSZ) в спектре присутствует набор узких интенсивных пиков, характерных для моноклинной фазы ZrO_2: полосы при ~225, ~330, ~380, ~475, ~540, ~620 и ~750 $см^{-1}$, которые относятся к колебаниям Zr–O и O–O в моноклинной решётке [7]. Увеличение содержания Sc_2O_3 до 9 мол.% (9ScSZ) приводит к резкому изменению спектра: наблюдаются две выраженные полосы при ~270 и ~460 $см^{-1}$, соответствующие тетрагональной фазе t- ZrO_2 и c- ZrO_2 [8]. Для образца с 20 мол.% Sc_2O_3 (20ScSZ) в спектре фиксируется широкая полоса в области ~600–620 $см^{-1}$, которую можно отнести к моде ромбоэдрической γ-фазы, а также признаки расщепления, указывающие на формирование второй ромбоэдрической δ-фазы [3]. Наконец, для образца с 25 мол.% Sc_2O_3 (25ScSZ) наблюдается уширенный спектр с доминирующей слабоинтенсивной полосой при ~600 $см^{-1}$, что согласуется с образованием ромбоэдрической δ-фазы ($Sc_4Zr_3O_{12}$) [9]. Таким образом, данные КРС полностью подтверждают фазовую эволюцию, установленную методом РФА: от моноклинной фазы при 2 мол.% Sc_2O_3 через тетрагональную при 9 мол.% к кубической и ромбоэдрической фазам при 20–25 мол.% Sc_2O_3.

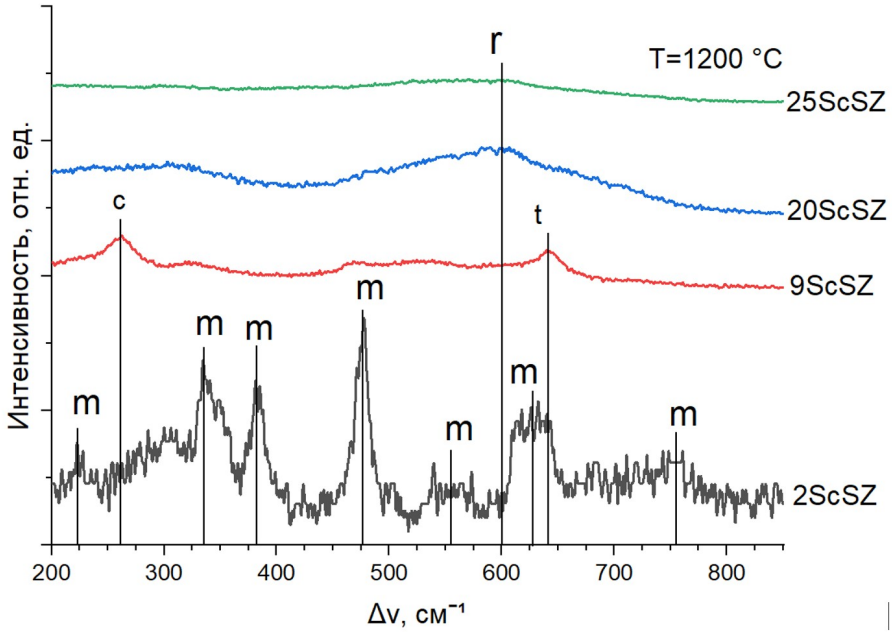


Рисунок 3 - Спектры комбинационного рассеяния образцов состава ZrO_2–Sc_2O_3–Eu_2O_3 обработанных при 1200 °C
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.58.4

Спектры люминесценции ионов Eu^{3+} являются чувствительным зондом локальной структуры, поскольку соотношение интенсивностей переходов $^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ (электрический диполь, ED) и $^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$ (магнитный диполь, MD) зависит от симметрии окружения люминесцентного центра. Переход $^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$ является магнитодипольным и практически нечувствителен к симметрии локального окружения, в то время как сверхчувствительный переход $^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ запрещён в центросимметричном поле и его интенсивность возрастает при понижении симметрии. Поэтому отношение (2), часто называемое коэффициентом асимметрии, служит мерой отклонения локального окружения Eu^{3+} от симметрии [10], [13].

$$R = \frac{I_{ED}(^5D_0 \rightarrow {}^7F_2)}{I_{MD}(^5D_0 \rightarrow {}^7F_1)} \quad (2)$$

 © Авторы статьи / Authors of the article

Анализ спектров фотолюминесценции образцов ZrO_2–Sc_2O_3–Eu_2O_3, отожжённых при 500, 750 и 1200 °C (рис. 4-5), показывает систематическое изменение формы спектра в зависимости от концентрации Sc_2O_3. Для образца 2ScSZ при 500 °C (рис. 4) наблюдается широкая полоса $^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ с максимумом около 610 нм и дополнительным компонентом при 630 нм, что характерно для моноклинной фазы ZrO_2 с низкосимметричным окружением Eu^{3+} [10]. С ростом концентрации Sc_2O_3 до 9 мол.% (9ScSZ) при 500 °C (рис. 4) в спектре наблюдается доминирование полосы $^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ в области 610–615 нм, что указывает на стабилизацию тетрагональной фазы. Для образцов с 20 и 25 мол.% Sc_2O_3 (20ScSZ и 25ScSZ) при 500 °C (рис. 4) форма спектра уширяется, а интенсивность полосы $^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ снижается относительно $^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$, что отражает высокую степень симметрии катионной подрешётки в кубической фазе.

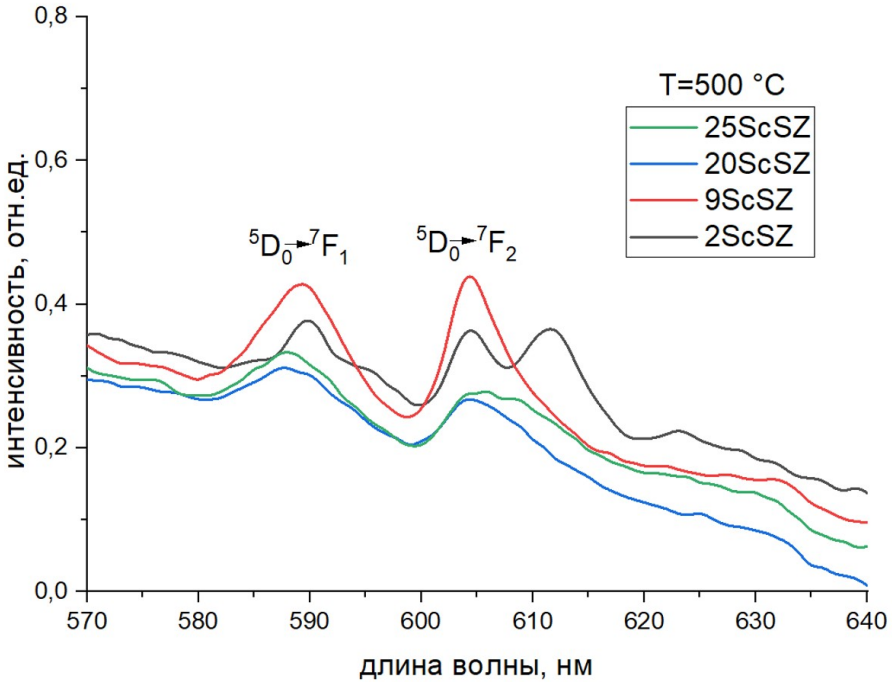


Рисунок 4 - Спектр фотолюминесценции образцов состава ZrO_2–Sc_2O_3–Eu_2O_3 обработанных при 500 °C
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.58.5

При повышении температуры отжига до 750 °C (рис. 5, а) для 2ScSZ наблюдается резкое возрастание коэффициента асимметрии R до 2.068, что связано с формированием смеси моноклинной и тетрагональной фаз с низкой локальной симметрией Eu^{3+}. У образца 9ScSZ R=1,164, что говорит о незначительном изменении его структуры после повышения температуры отжига, а именно увеличение кубической фазы и уменьшение тетрагональной. Для образцов 20ScSZ и 25ScSZ при 750 °C значения R остаются низкими (0.959 и 0.913 соответственно), что подтверждает сохранение кубической или ромбоэдрической фаз. После отжига при 1200 °C (рис. 5, б) максимальное значение R=2.305 достигается для 2ScSZ, что соответствует моноклинной фазе, тогда как для 25ScSZ значение R снижается до 1.046, а для 20ScSZ составляет 1.358, что связано с формированием второй ромбоэдрической фазы.

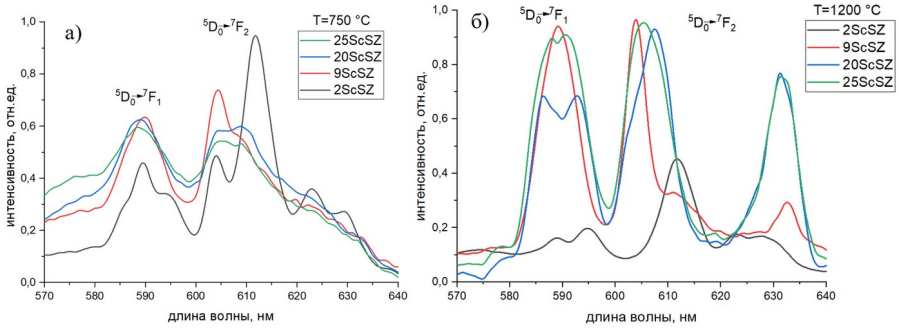


Рисунок 5 - Спектр фотолюминесценции образцов состава ZrO_2–Sc_2O_3–Eu_2O_3 обработанных при 750 °C (*а*) и 1200°C (*б*)
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.58.6

 © Авторы статьи / Authors of the article

Для количественной оценки симметрии были рассчитаны коэффициенты асимметрии R для всех образцов (табл. 2). Таким образом, значения коэффициента асимметрии R хорошо коррелируют с данными РФА и КРС: моноклинная фаза демонстрирует высокие значения R (низкая симметрия или наличие нескольких фаз), а кубическая и ромбоэдрическая фазы — низкие (высокая симметрия), исключением является 20ScSZ при 1200°C из-за наличия 2-х ромбоэдрических фаз, которые формируют метастабильное состояние кристаллической решетки.

Таблица 2 - Коэффициент асимметрии R образцов системы ZrO_2–Sc_2O_3–Eu_2O_3

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.58.7

Обозначение образца	Температура термообработки, °C		
	500°C	750°C	1200°C
2ScSZ	0,970	2,068	2,305
9ScSZ	1,024	1,164	1,028
20ScSZ	0,857	0,959	1,358
25ScSZ	0,841	0,913	1,046

Обсуждение

Твердые растворы ZrO_2–Sc_2O_3–Eu_2O_3 были синтезированы методом соосаждения из нитратных растворов с последующей термической обработкой при 500, 750 и 1200 °C. Для полученных образцов были исследованы фазовый состав, локальная структура и люминесцентные свойства в зависимости от концентрации Sc_2O_3 и температуры отжига. При нагревании наблюдалось систематическое изменение фазового состава: от смеси моноклинной и тетрагональной фаз при 2 мол.% Sc_2O_3 через тетрагональную и кубическую фазы при 9 мол.% к ромбоэдрическим фазам при 20–25 мол.% Sc_2O_3. Метод КРС подтвердил результаты РФА: для образца с 2 мол.% Sc_2O_3 наблюдаются узкие интенсивные полосы моноклинной фазы, тогда как при 9 мол.% появляются полосы, характерные для тетрагональной и кубической фаз, а при 20–25 мол.% — уширенные полосы, соответствующие ромбоэдрическим фазам. Анализ спектров люминесценции Eu^{3+} показал, что коэффициент асимметрии R, равный отношению интенсивностей переходов $^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ и $^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$, хорошо коррелирует с фазовым состоянием образцов: максимальные значения R (2.305) характерны для моноклинной фазы с низкой локальной симметрией Eu^{3+}, тогда как для кубической и ромбоэдрической фаз значения R снижаются до 0.84–1.05, что отражает высокую симметрию катионной подрешётки. Полученная зависимость от концентрации указывает на то, что увеличение содержания Sc_2O_3 от 2 до 9 мол.% приводит к стабилизации тетрагональной фазы, а дальнейшее увеличение до 20–25 мол.% — к формированию кубической и ромбоэдрической фаз. Результаты исследования показывают, что синтезированные образцы демонстрируют выраженный и зависящий от концентрации скандия и температуры отжига структурный отклик, а совокупность методов РФА, КРС и люминесцентной спектроскопии позволяет идентифицировать фазовые превращения в системе ZrO_2–Sc_2O_3–Eu_2O_3.

Заключение

1. Синтезированные методом соосаждения порошки ZrO_2–Sc_2O_3–Eu_2O_3 проявляют люминесценцию ионов Eu^{3+} в оранжево-красной области спектра при УФ-возбуждении. Нагрев образцов в диапазоне 500–1200 °C приводит к последовательному изменению фазового состава: от смеси моноклинной и тетрагональной фаз при 2 мол.% Sc_2O_3 к тетрагональной и кубической фазам при 9 мол.% и далее к ромбоэдрическим фазам при 20–25 мол.% Sc_2O_3.

2. Методом РФА установлено, что введение 9–25 мол.% Sc_2O_3 обеспечивает полную стабилизацию высокосимметричных фаз ZrO_2, а при 1200 °C в образцах с 20 и 25 мол.% Sc_2O_3 формируются ромбоэдрические фазы. Данные КРС подтверждают фазовую эволюцию, установленную методом РФА.

3. Коэффициент асимметрии R, рассчитанный из спектров люминесценции Eu^{3+}, хорошо коррелирует с фазовым состоянием образцов: максимальное значение R = 2.305 достигается для моноклинной фазы (2 мол.% Sc_2O_3, 1200 °C), тогда как для тетрагонально, кубической и ромбоэдрической фаз (9–25 мол.% Sc_2O_3) значения R снижаются до 0.84–1.05, что отражает высокую симметрию локального окружения Eu^{3+}. Совокупность методов РФА, КРС и люминесцентной спектроскопии позволяет надёжно идентифицировать фазовые превращения в системе ZrO_2–Sc_2O_3–Eu_2O_3.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Список литературы на английском языке / References in English

1. Zhiwei Y. Crystallization process of $(ZrO_2)_{0.9}(Sc_2O_3)_{0.1}$ nanoparticles synthesized by a sol–gel method for SOFC electrolyte / Y. Zhiwei, T. Jingxin, L. Fangzhe [et al.] // Journal of the American Ceramic Society. — 2026. — Vol. 109. — № 1. — P. e70430.
2. Borik M.A. Structure and phase transformations in scandia, yttria, ytterbia and ceria-doped zirconia-based solid solutions during directional melt crystallization / M.A. Borik, M.V. Gerasimov, A.V. Kulebyakin [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. — 2020. — Vol. 844. — P. 156040.
3. Toscani L.M. Ni-free CeO_2-ZrO_2-Sc_2O_3 nanostructured fuel electrodes for high performance solid oxide cells / L.M. Toscani, H. Troiani, D.G. Lamas [et al.] // Electrochimica Acta. — 2023. — Vol. 462. — P. 142781.
4. Huang H. Structure, local environment, and ionic conduction in scandia stabilized zirconia / H. Huang, C.H. Hsieh, N. Kim [et al.] // Solid State Ionics. — 2008. — Vol. 179. — № 27–32. — P. 1442–1445.
5. Agarkov D.A. Comparative analysis of the structure and electrical properties of single crystal and ceramic (ZrO2) 0.90 (Sc2O3) 0.09 (Yb2O3) 0.01 solid electrolyte / D.A. Agarkov, E.A. Agarkova, M.A. Borik [et al.] // Journal of Solid State Electrochemistry. — 2024. — Vol. 28. — № 6. — P. 1963–1970.
6. Yashima M. Metastable-stable phase diagrams in the zirconia-containing systems utilized in solid-oxide fuel cell application / M. Yashima, M. Kakihana, M. Yoshimura // Solid State Ionics. — 1996. — Vol. 86–88. — P. 1131–1149.
7. Kim B.K. Mode Assignments of the Raman Spectrum of Monoclinic Zirconia by Isotopic Exchange Technique / B.K. Kim, H. Hamaguchi // Physica Status Solidi (B). — 1997. — Vol. 203. — № 2. — P. 557–563.
8. Bouvier P. Raman spectra of tetragonal zirconia: powder to zircaloy oxide frequency shift / P. Bouvier, H.C. Gupta, G. Lucazeau // Journal of Nuclear Materials. — 2001. — Vol. 288. — № 2-3. — P. 192–197.
9. Yashima M. Determination of the cubic-tetragonal phase boundary in ZrO_2-Sc_2O_3 system by Raman spectroscopy / M. Yashima, K. Ohtake, M. Kakihana [et al.] // Journal of Physics and Chemistry of Solids. — 1996. — Vol. 57. — № 1. — P. 17–24.
10. Petrova O.B. Luminescent Glass-Ceramics Based on Nanoparticles of $Ba_xRE_{1-x}F_{2+x}$ and $Pb_xRE_{1-x}F_{2+x}$ Solid Solutions into Fluoroborate / O.B. Petrova, T.S. Sevostjanova, A.V. Khomyakov [et al.] // Physica status solidi (a). — 2018. — Vol. 215. — № 3. — P. 1700446.
11. Alekseeva A.S. Phase Composition and Structural Defects of ZrO_2-Sc_2O_3-Yb_2O_3 Solid Solutions / A.S. Alekseeva, S.A. Bukarev, V.M. Kyashkin [et al.] // Ceramics International. — 2026.
12. Borik M. Phase Stability and Transport Properties of $(ZrO_2)_{0.91-x}(Sc_2O_3)_{0.09}(Yb_2O_3)_x$ Crystals (x= 0–0.01) / M. Borik, G. Korableva, A. Kulebyakin [et al.] // Crystals. — 2021. — Vol. 11. — № 2. — P. 83.
13. Ryabochkina P.A. Phase formation and luminescence spectral parameters of ZrO_2-Eu_2O_3 crystals and nanopowders / P.A. Ryabochkina, S.A. Bukarev, A.S. Alekseeva [et al.] // Ceramics International. — 2025.