

Научная статья
УДК 66.017, 535.37
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.021

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ, МЕХАНИЧЕСКИХ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КЕРАМИК $\text{Yb}(\text{Nb}_x\text{Ta}_{1-x})\text{O}_4$

**Ольга Борисовна Щербина¹, Максим Владимирович Смирнов²,
Софья Михайловна Маслобоева³, Елена Владимировна Зеленина⁴,
Михаил Николаевич Палатников⁵**

^{1, 2, 3, 5}Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И. В. Тананаева
Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

⁴Санкт-Петербургский государственный технологический институт, Санкт-Петербург, Россия

¹o.shcherbina@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9591-0274>

²m.smirnov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2645-5524>

³s.masloboeva@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9954-8479>

⁴elena.v.zelenina@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-8933-2834>

⁵m.palatnikov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9686-0563>

Аннотация

С использованием плавиковоокислых растворов ниобия и тантала и нитратных растворов Yb золь-гель методом синтезированы мелкодисперсные порошки ниобато-танталатов иттербия. Из полученных порошков по традиционной керамической технологии (ТКТ) приготовлены керамические образцы. Методами полнопрофильного анализа рентгенограмм поликристаллов определены фазовый состав и уточнены параметры структуры фаз твердых растворов (ТР) $\text{Yb}(\text{Nb}_x\text{Ta}_{1-x})\text{O}_4$ в зависимости от соотношения Nb/Ta в составе. Изучены их механические свойства, оценены прочностные характеристики (модуль Юнга, микротвердость).

Ключевые слова:

ниобато-танталаты иттербия, керамика, ир-конверсионная люминесценция, микротвердость, модуль Юнга

Благодарности:

авторы выражают благодарность Кириллу Андреевичу Яковлеву, ведущему инженеру лаборатории физико-химических методов анализа ИХТРЭМС КНЦ РАН, за помощь в получении и анализе рентгено-дифракционных данных.

Финансирование:

государственное задание по теме НИР № FMEZ-2025-0055.

Для цитирования:

Исследование структурных, механических и люминесцентных характеристик керамик $\text{Yb}(\text{Nb}_x\text{Ta}_{1-x})\text{O}_4$ / О. Б. Щербина [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 2. С. 127–133. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.021.

Original article

THE STUDY OF STRUCTURAL, MECHANICAL AND LUMINESCENT CHARACTERISTICS OF CERAMICS $\text{Yb}(\text{Nb}_x\text{Ta}_{1-x})\text{O}_4$

**Olga B. Shcherbina¹, Maxim V. Smirnov¹, Sofja M. Masloboeva³,
Elena V. Zelenina⁴, Mikhail N. Palatnikov⁵**

^{1, 2, 3, 5}Tananaev Institute of Chemistry—Subdivision of the Federal Research Centre
“Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, Russia

⁴Saint Petersburg State Institute of Technology, Saint Petersburg, Russia

¹o.shcherbina@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9591-0274>

²m.smirnov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2645-5524>

³s.masloboeva@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9954-8479>

⁴elena.v.zelenina@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-8933-2834>

⁵m.palatnikov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9686-0563>

Abstract

Finely dispersed ytterbium niobate-tantalate powders were synthesized using hydrofluoric acid solutions of niobium and tantalum and nitrate solutions of Yb using a sol-gel method. Ceramic samples were prepared from the resulting powders using conventional sintering (CS). Using Rietveld refinement of polycrystals, the phase compositions of the $\text{Yb}(\text{Nb}_x\text{Ta}_{1-x})\text{O}_4$ solid solutions (SS) were determined and their structural parameters were refined depending on the Nb/Ta ratio. Their mechanical properties were studied; and their strength characteristics, such as Young's modulus and microhardness, were evaluated.

Keywords:

ytterbium niobate-tantalates, ceramics, up-conversion luminescence, microhardness, Young's modulus

Acknowledgments:

The authors express their gratitude to Kirill Andreevich Yakovlev, leading engineer of the laboratory of physicochemical methods of analysis of ICT KSC RAS, for assistance in obtaining and analyzing XRD data.

Funding:

State task on the topic of research No FMEZ-2025-0055.

For citation:

The study of structural, mechanical and luminescent characteristics of ceramics $\text{Yb}(\text{Nb}_x\text{Ta}_{1-x})\text{O}_4$ / O. B. Shcherbina [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 2. P. 127–133. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.021.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется разработке объемных материалов, обладающих up-конверсионной люминесценцией (Up-conversion luminescence (UCL)) [1] на основе трехвалентных ионов лантаноидов. Такие материалы преобразуют возбуждающее излучение таким образом, что два или более низкоэнергетических фотона последовательно поглощаются через промежуточные долгоживущие энергетические состояния, что приводит к излучению высокоэнергетического фотона, а люминесценция излучается с длиной волны, меньшей, чем длина волны поглощенного излучения.

В целом UCL была зарегистрирована в материалах переходных металлов (3d, 4d, 5d), лантаноидов (4f) и актинидов (5f), однако материалы на основе трехвалентных лантаноидов вызвали повышенный интерес из-за больших антистоксовых сдвигов, узкополосных излучений, длительного времени жизни люминесценции, превосходной фотостабильности, а также возможности использования для мониторинга биологических процессов [2].

Например, как up-конверсионные люминофоры большое внимание привлекают ниобаты-танталаты Er и Yb, в которых в процессе UCL используется ближнее инфракрасное (NIR) возбуждение, а не ультрафиолетовое (UV), что значительно снижает фоновую автофлуоресценцию, фотообесцвечивание и фотоповреждение биологических образцов [3]. Это позволяет визуализировать *in vivo* со значительно более высоким пространственным разрешением, а также обеспечивает замечательную глубину проникновения в образец, которая намного больше, чем возможная при УФ-возбуждении [4].

Поэтому актуальнейшей задачей является не только поиск перспективных люминесцентных материалов, обладающих up-конверсией, но и разработка приемов, повышающих выход и длительность свечения up-люминесценции, а также усовершенствование технологии синтеза up-люминофоров, позволяющей получать субмикронные и наноразмерные порошки, которые могут применяться и в медицине. Использование таких субмикронных порошков позволяет создавать керамические материалы повышенной твердости и прочности — качеств, необходимых для изготовления различного рода датчиков и люминесцентных термометров.

Таким образом, целью данной работы является получение керамических образцов из синтезированных ранее порошков ниобатов-танталатов иттербия $\text{YbNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ и исследование их структурных, механических и люминесцентных (up-конверсионных) характеристик.

Результаты

Мелкодисперсные порошки ортониобатов-танталатов иттербия $\text{YbNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ ($x = 0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1$) были получены жидкофазным методом. На первом этапе путем совместного осаждения 25 %-м NH_4OH из высокочистых фторидных Nb- и Ta-содержащих растворов или их смеси в объемах, обеспечивающих заданный состав ниобато-танталатов, получали гидроксиды

ниобия, тантала или их смеси. Образовавшийся осадок три раза репульпацией промывали деионизированной водой для удаления ионов F^- при соотношении твердой и жидкой фаз $T:V_{ж} = 1:3$ и сушили при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Затем к осадку добавляли азотнокислый раствор иттербия, полученный растворением Yb_2O_3 (ос. ч.) в HNO_3 (ос. ч.). В образовавшуюся при перемешивании пульпу вводили 25 %-й раствор NH_4OH (ос. ч.) до $pH \sim 8-9$. После фильтрации и трехкратной промывки от ионов аммония деионизированной водой при $T:V_{ж} = 1:4$ его обезвоживали при $\sim 140\text{ }^{\circ}\text{C}$, затем прокачивали в печи сопротивления при $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 4 ч и в течение 5 ч при $1\text{ }200\text{ }^{\circ}\text{C}$ после размол в шаровой халцедоновой мельнице МК 1.

Во фторидных Nb- и Ta-содержащих растворах содержание ниобия и тантала определяли гравиметрическим методом, фторид-ионов — потенциометрическим на иономере ЭВ-74 с F-селективным электродом ЭВЛ-1МЗ. Фтор в синтезированных порошках анализировали методом пирогидролиза. Иттербий в фильтратах и промывных растворах определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (МС-ИСП) на масс-спектрометре Elan-9000 DRC-e. Оценку элементного состава порошков проводили методом рентгенофлуоресцентной спектрометрии на приборе «Спектроскан МАКС-GV»

Синтезированные образцы идентифицировали методом рентгеновской дифракции (РФА) с помощью рентгеновского дифрактометра Rigaku XtaLAB Synergy-S с мультифокусным источником нового поколения PhotonJet-S и НРС-детектором в диапазоне углов $2\theta = 10-80\text{ }^{\circ}$. Из полученных мелкозернистых порошков $YbNb_xTa_{1-x}O_4$ с удельной площадью поверхности от $1,39$ до $1,88\text{ м}^2/\text{г}$, определенной методом низкотемпературной адсорбции азота (БЭТ; FlowSorb II 2300; TriStar 3020 V1. 03), по традиционной керамической технологии приготавливали керамические образцы в виде таблеток диаметром 10 мм и высотой $2-3\text{ мм}$. В качестве связующего использовали поливиниловый спирт. Прессование таблеток проводили при нагрузке $\sim 3,8\text{ кг/см}^2$. Таблетки спекали в электропечи КЭП 14/1400П при $1\text{ }400\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 4 ч.

Фазовый состав и уточнение структур керамических образцов выполнялись с помощью многофункционального рентгеновского дифрактометра Rigaku с программным обеспечением SmartLab Studio II (RIGAKU Япония). Скорость движения счетчика $2\text{ град}\cdot\text{мин}^{-1}$ ($CuK\alpha$ -излучение, диапазон сканирования $6-90\text{ }^{\circ}$). Для идентификации фаз использовали базы данных ICDD (PDF 4, relies 2022). Структурные характеристики фаз уточнялись методом WPPF (Whole Powder Pattern Fitting) полнопрофильного анализа рентгенограмм. Координаты атомов и кристаллографические характеристики решетки вводились из cif-файлов базы данных International Diffraction Data Center (ICDD) (PDF 4, relies 2020). Критериями достоверности полученных результатов служили значения профильных (R_p и R_{wp}) факторов недостоверности, рассчитываемые по стандартным формулам.

В результате уточнения методом Ритвельда структурных характеристик основных фаз керамических образцов $YbNb_xTa_{1-x}O_4$ ($x = 0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1$) было установлено, что исследуемые твердые растворы кристаллизуются в зависимости от соотношения Nb/Ta в составе либо в структуре фергусонита- β с моноклинной ячейкой ортониобата иттербия (ICDD, карточка 01-081-1976 SPGR: I2/c (15), $Z = 4.00$), либо в форме фергусонита- β ортотанталата иттербия (карточка 04-015-1861 SPGR I2/a (15) $Z = 4.00$), либо (при увеличении Ta в $YbNb_xTa_{1-x}O_4$ (при $x = 0,3$ и менее)) в моноклинной разновидности М-фергусонита $YbTaO_4$ (карточка 00-024-1416) с пространственной группой SPGR: P2/a и двумя формульными единицами на ячейку $Z = 2.00$.

В структуре β -фергусонита атомы кристаллической матрицы (тантал или ниобий) находятся в искаженной октаэдрической координации с шестью связями $Ta(Nb)-O$, тогда как в М-фергусоните атомы тантала (ниобия) находятся в тетраэдрической координации. Так, образец состава $YbNb_{0,3}Ta_{0,7}O_4$ содержит две различные моноклинные фазы фергусонита: основную фазу, имеющую структуру М-формы фергусонита $YbTaO_4$ (карточка ICDD 00-024-1416 SPGR: P2/a, $Z = 2.00$) и около 20 вес. % фергусонита- β (ICDD, карточка 04-015-1861 SPGR I2/a (15), $Z = 4.00$), а также около 5 вес. % кубической фазы Yb_3NbO_7 (00-024-1130, SPGR: Fm-3m).

Следует также отметить, что образец YbNbO_4 содержит около 6 вес. % Yb_3TaO_7 кубической сингонии с пространственной группой SPGR: Fm-3m (карточка 00-024-1130).

Механические свойства керамических образцов исследовали контактным методом с помощью зондового микроскопа-нанотвердомера NanoScan. Результаты измерений и расчетов механических характеристик керамических образцов показаны в таблице.

Механические характеристики керамических образцов $\text{YbNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$

Образец	Микротвердость H, ГПа	Модуль Юнга E, ГПа
YbNbO_4	$6,68 \pm 0,5$	$142,4 \pm 4,8$
$\text{YbNb}_{0,9}\text{Ta}_{0,1}\text{O}_4$	$6,86 \pm 0,31$	$154,8 \pm 1,8$
$\text{YbNb}_{0,7}\text{Ta}_{0,3}\text{O}_4$	$7,34 \pm 0,46$	$187,6 \pm 6,2$
$\text{YbNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_4$	$6,82 \pm 0,34$	$157,2 \pm 4,3$
$\text{YbNb}_{0,3}\text{Ta}_{0,7}\text{O}_4$	$5,42 \pm 1,1$	$133,1 \pm 3,5$
$\text{YbNb}_{0,1}\text{Ta}_{0,9}\text{O}_4$	$7,7 \pm 0,24$	$189,8 \pm 2,7$
YbTaO_4	$8,6 \pm 0,8$	$218,3 \pm 3,8$
YbNbO_4	$6,68 \pm 0,5$	$142,4 \pm 4,8$

Как видно из данных таблицы, механические характеристики образцов закономерно зависят от фазового состава образцов. Наилучшими механическими характеристиками: микротвердостью ($H = 8,6 \pm 0,8$ ГПа), модулем Юнга ($E = 218,3 \pm 3,8$ ГПа) обладает монофазный керамический образец YbTaO_4 (см. табл.). Низкие механические характеристики образца $\text{YbNb}_{0,3}\text{Ta}_{0,7}\text{O}_4$ обусловлены присутствием в нем двух различных фаз фергусонита и содержанием около 5 вес. % фазы кубического Yb_3NbO_7 (00-024-1130, SPGR: Fm-3m)). Учитывая различия в методах измерения, механические характеристики керамических образцов $\text{YbNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ согласуются с литературными данными [5].

Измерение спектров фотолюминесценции исследуемых образцов проводилось с помощью спектрографа SOL SL-100M с ПЗС-детектором FLI ML 1107 BlackIlluminated (Hamamatsu) в диапазоне длин волн 360–800 нм с разрешением 0,2 нм в нормальных условиях. ПЗС-матрица в рабочем режиме охлаждалась элементом Пельте до -30 °С. Время экспозиции равно 1 сек. Максимальное значение люминесцентного сигнала нормировано на максимум чувствительности ПЗС-матрицы. В качестве источника возбуждения люминесценции использовался непрерывный He-Cd лазер ($\lambda_{\text{возб}} = 325$ нм, 15 мВт). Из каждого фотолюминесцентного спектра вычитался фоновый сигнал. Представлены спектры фотолюминесценции при возбуждении $\lambda_{\text{возб}} = 325$ нм керамики $\text{YbNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ ($x = 1; 0,9; 0,7; 0,5; 0,3; 0,1$ и 0) (рис. 1).

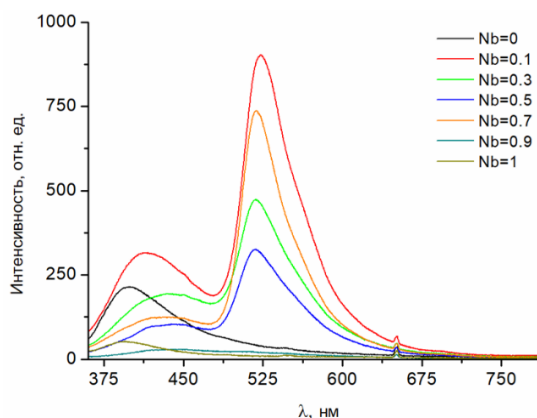


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции керамических образцов $\text{YbNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ различного состава при УФ-возбуждении ($\lambda_{\text{возб}} = 325$ нм)

В индивидуальных соединениях YbNbO_4 и YbTaO_4 наблюдаются одиночные широкие полосы люминесценции с максимумами при 393 и 399 нм соответственно. При этом интенсивность люминесценции в последнем случае в 4 раза выше. Проявление одной полосы излучения в спектрах

фотолюминесценции керамик YbNbO_4 и YbTaO_4 при возбуждении в области ближнего УФ говорит о наличии центров свечения, природа которых связана $\text{NbO}_{4/6}$ и $\text{TaO}_{4/6}$ группами. Максимальная интенсивность люминесценции NbO_4 групп (400, 420 и 440 нм для YNbO_4 [6]) наблюдается в области собственного поглощения ниобатов редкоземельных элементов ($\lambda_{\text{возб}} \approx 260$ нм). Люминесценция TaO_4 групп (310 и 490 нм для YTaO_4 и GdTao_4 [7]) имеет максимальное значение при возбуждении излучением более жесткого УФ ($\lambda_{\text{возб}} \approx 200\text{--}225$ нм), и по мере увеличения длины волны возбуждения происходит значительное уменьшение интенсивности люминесценции TaO_4 групп [6]. При этом в соединении LaTaO_4 со структурой, отличной от фергусонита, люминесценция TaO_4 групп проявляется при 395 нм ($\lambda_{\text{возб}} \approx 254$ нм) [8]. Следовательно, преобладание в 4 раза интенсивности люминесценции $\text{TaO}_{4/6}$ групп над $\text{NbO}_{4/6}$ группами (см. рис. 1) можно связать с наличием дефектных центров свечения, которые обычно излучают в «сине-зеленой» области спектра [7], или со структурными перестройками соединения YbTaO_4 .

В керамиках $\text{YbNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ ($x = 1; 0,9; 0,7; 0,5; 0,3; 0,1$ и 0) проявляются новые спектральные особенности, которые присущи только смешанным керамическим твердым растворам. При $x = 0,1\text{--}0,7$ в спектре наблюдаются две широкие полосы люминесценции в областях 360–470 и 470–600 нм (см. рис. 1). Максимальное смещение положения полосы люминесценции при ~400 нм достигает порядка $\Delta\lambda = 29$ нм для составов $\text{YbNb}_{0,1}\text{Ta}_{0,9}\text{O}_4$ и $\text{YbNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_4$. Это может говорить о чувствительности данной полосы излучения к изоморфным замещениям Nb/Ta в структуре керамики $\text{YbNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$. Данный факт согласуется со смещением люминесцентного гало в длинноволновую область спектра при добавлении Nb в матрицу YTao_4 [7]. С другой стороны, полоса при 517 нм менее подвержена смещению относительно изменения состава керамики: наибольшее смещение составляет $\Delta\lambda = 5$ нм для составов $\text{YbNb}_{0,1}\text{Ta}_{0,9}\text{O}_4$ и $\text{YbNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_4$.

Следует отметить, что небольшое содержание Nb ($x = 0,1$) в матрице YbTaO_4 приводит к значительному росту интенсивности фотолюминесценции (на 75 %) относительно индивидуальной керамики YbTaO_4 .

Спектры up -люминесценции исследуемых керамик были получены с помощью спектрофлуориметра AvaSpec-3648 (производитель Avantes, Нидерланды) при возбуждении длиной волны 980 нм одномодовым лазерным модулем KLM-N980 инфракрасного диапазона с мощностью непрерывного излучения 120/200 мВт.

На рисунке 2 представлены спектры фотолюминесценции керамических твердых растворов $\text{YbNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ ($x = 1; 0,9; 0,7; 0,5; 0,3; 0,1$ и 0) при возбуждении длиной волны 980 нм.

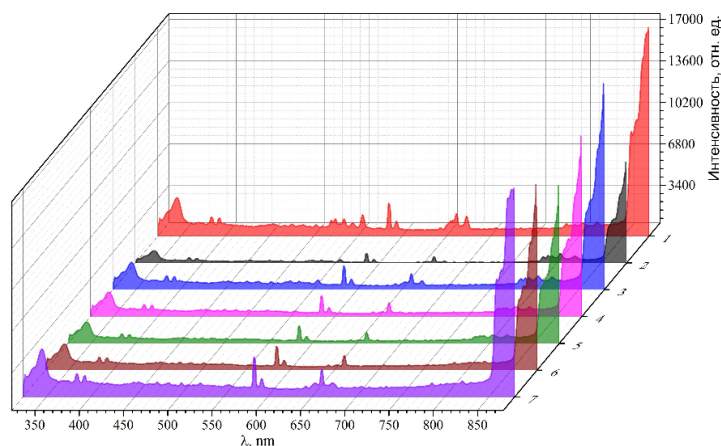


Рис. 2. Спектры люминесценции в видимой области керамических ТР $\text{YbNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ при возбуждении длиной волны 980 нм: 1 — $x = 1$; 2 — $x = 0,9$; 3 — $x = 0,7$; 4 — $x = 0,5$; 5 — $x = 0,3$; 6 — $x = 0,1$; 7 — $x = 0$

При возбуждении $\lambda_{\text{возб}} = 980$ нм наблюдается широкая полоса люминесценции в области (~870 нм) и ряд малоинтенсивных пиков (~345, 385, 393, 524, 555, 585, 661 и 800 нм) по всей области спектра. Часть малоинтенсивных линий обусловлены излучательными переходами редкоземельных элементов группы лантаноидов, которые могут присутствовать в виде неконтролируемых количеств в исследуемых

образцах $\text{YbNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ ($x = 1; 0,9; 0,7; 0,5; 0,3; 0,1$ и 0). Например, ввиду наиболее эффективного трансфера энергии при ир-люминесценции между Yb и Er [9] пики в области $\sim 555, 651$ и 800 нм (см. рис. 2) можно связать с переходами $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{I}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ и $^2\text{H}_{11/2}$, $^2\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ иона Er^{3+} [9]. Проявление пика при ~ 585 нм связано с магнито-дипольным переходом $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_1$ иона Eu^{3+} , вероятность излучения которого слабо зависит от координационного окружения редкоземельного иона [10]. Вследствие высокой чувствительности люминесцентного анализа к небольшим количествам химических элементов с незаполненными d- и f-орбиталями, такие элементы могут служить маркерами для отработки технологии получения керамики. Люминесценция при ~ 870 нм (см. рис. 2) связана с основным переходом $^2\text{F}_{5/2} \rightarrow ^2\text{F}_{7/2}$ иона Yb^{3+} , и наибольшая его интенсивность наблюдается в ближней ИК-области спектра в области возбуждения ~ 980 нм [11].

Выводы

Показано, что исследуемые твердые растворы $\text{YbNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ кристаллизуются в зависимости от соотношения Nb/Ta в составе либо в структуре фергусонита- β с моноклинной ячейкой ортоиниобата иттербия (ICDD, карточка 01-081-1976 SPGR: I2/c (15), $Z = 4,00$, либо в форме фергусонита- β ортотанталата иттербия, карточка 04-015-1861 SPGR I2/a (15), $Z = 4,00$. При увеличении Ta (при $x = 0,3$ и менее) в $\text{YbNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ образуется моноклинная разновидность М-фергусонита YbTaO_4 (карточка 00-024-1416) с пространственной группой SPGR: P2/a и двумя формульными единицами на ячейку $Z = 2,00$.

Определены механические характеристики керамических ТР $\text{YbNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ ($x = 0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1$). Наилучшими механическими характеристиками: микротвердостью ($H = 8,6 \pm 0,8$ ГПа), модулем Юнга ($E = 218,3 \pm 3,8$ ГПа) обладает монофазный керамический образец YbTaO_4 .

Изучены люминесцентные свойства керамических образцов при возбуждении УФ ($\lambda_{\text{возб}} = 325$ нм) и ИК ($\lambda_{\text{возб}} = 980$ нм) частями спектра. В индивидуальных соединениях YbNbO_4 и YbTaO_4 наблюдаются одиночные широкие полосы люминесценции с максимумами при 393 и 399 нм соответственно. Интенсивность люминесценции YbTaO_4 в 4 раза выше, чем YbNbO_4 .

Продemonстрировано, что в керамиках $\text{YbNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ ($x = 1; 0,9; 0,7; 0,5; 0,3; 0,1$ и 0) проявляются новые спектральные особенности, которые присущи только смешанным керамическим твердым растворам. При $x = 0,1-0,7$ в спектре наблюдаются две широкие полосы люминесценции в областях $360-470$ и $470-600$ нм. Смещение положения полос люминесценции обусловлено чувствительностью данной полосы излучения к изоморфным замещениям Nb/Ta в структуре керамики $\text{YbNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$. Небольшое содержание Nb ($x = 0,1$) в матрице ортотанталата иттербия приводит к значительному росту интенсивности фотолюминесценции (на 75 %) относительно индивидуальной керамики YbTaO_4 .

Показано, что ТР $\text{YbNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ обладают ир-конверсионной люминесценцией: при возбуждении $\lambda_{\text{возб}} = 980$ нм в спектре смешанных ортоиниобатов-ортотанталатов иттербия наблюдается широкая полоса люминесценции в области (~ 870 нм), связанная с основным переходом $^2\text{F}_{5/2} \rightarrow ^2\text{F}_{7/2}$ иона Yb^{3+} . При этом появление малоинтенсивных линий в спектре обусловлены излучательными переходами редкоземельных элементов группы лантаноидов, которые могут присутствовать в виде неконтролируемых количеств в исследуемых образцах $\text{YbNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ ($x = 1; 0,9; 0,7; 0,5; 0,3; 0,1$ и 0). Вследствие высокой чувствительности люминесцентного анализа [16] к небольшим количествам химических элементов с незаполненными d- и f-орбиталями, такие элементы могут служить маркерами для отработки технологии синтеза люминесцентных составов.

Список источников

1. Zhang F. General Introduction to Upconversion Luminescence Materials // Nanostructure Science and Technology. 2015. Springer, Berlin, Heidelberg. P. 1–20.
2. Mader H. S., Kele P., Saleh S. M., Wolfbeis O. S. Upconverting luminescent nanoparticles for use in bioconjugation and bioimaging // Curr Opin Chem Biol. 2010. Vol. 14, iss. 5. P. 582–96.
3. Mikhalyova E. A., Pavlishchuk V. V. Modern Approaches to the Tuning of the Lanthanide ($3+$) Coordination Compound Luminescent Characteristics: A Review // Theor Exp Chem. 2019. 201955. P. 293–315.
4. Wang R., Zhang F.: NIR luminescent nanomaterials for biomedical imaging // J. Mater. Chem. B. 2014. Vol. 2. P. 2422–2443.
5. Wu F., Wu P., Zhou Y., Chong X., Fen J. The thermo-mechanical properties and ferroelastic phase transition of RENbO_4 ($\text{RE} = \text{Y, La, Nd, Sm, Gd, Dy, Yb}$) ceramic // J Am Ceram Soc. 2020. Vol. 103. P. 2727–2740.

6. Popovici E. J., Imre-Lucaci F., Muresan L., Stefan M., Bica E., Grecu R., Indrea E. Spectral investigations on niobium and rare earth activated yttrium tantalate powders // *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 2008. Vol. 10, iss. 9. P. 2334–2337.
7. Voloshyna O., Boiaryntseva I., Spassky D., Sidletskiy O. Luminescence properties of the yttrium and gadolinium tantalate-niobates // *Solid State Phenomena*. 2015. Vol. 230. P. 172–177.
8. Blasse G., Bril A. Luminescence phenomena in compounds with fergusonite structure. *J. Luminescence*. 1970. Vol. 3. P. 109–131.
9. Wang X., Li X., Zhang Y., Chen B. Optical transition and near-infrared upconversion luminescence properties of $\text{YNbO}_4:\text{Er}^{3+}$, Tb^{3+} phosphors // *J. of Luminescence*. 2023. Vol. 263. P. 120055(1-9).
10. Binnemans K. Interpretation of europium(III) spectra // *Coordination Chemistry Reviews*. 2015. Vol. 295. P. 1–45.
11. Singh A. K., Singh S. K., Gupta B. K., Prakash R., Rai S. B. Probing a highly efficient dual mode: down-upconversion luminescence and temperature sensing performance of rare-earth oxide phosphors // *Dalton Transactions*. 2013. Vol. 42. P. 1065–1072.

References

1. Zhang F. General Introduction to Upconversion Luminescence Materials. *Nanostructure Science and Technology*, 2015, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 1–20.
2. Mader H. S., Kele P., Saleh S. M., Wolfbeis O. S. Upconverting luminescent nanoparticles for use in bioconjugation and bioimaging. *Curr Opin Chem Biol.*, 2010, vol. 14, iss. 5, pp. 582–96.
3. Mikhalyova E. A., Pavlishchuk V. V. Modern Approaches to the Tuning of the Lanthanide (3+) Coordination Compound Luminescent Characteristics: A Review. *Theor Exp Chem*, 2019, 201955, pp. 293–315.
4. Wang R., Zhang F.: NIR luminescent nanomaterials for biomedical imaging. *J. Mater. Chem. B*, 2014, vol. 2, pp. 2422–2443.
5. Wu F., Wu P., Zhou Y., Chong X., Fen J. The thermo-mechanical properties and ferroelastic phase transition of RENbO_4 (RE = Y, La, Nd, Sm, Gd, Dy, Yb) ceramics. *J Am Ceram Soc.*, 2020, vol. 103, pp. 2727–2740.
6. Popovici E. J., Imre-Lucaci F., Muresan L., Stefan M., Bica E., Grecu R., Indrea E. Spectral investigations on niobium and rare earth activated yttrium tantalate powders. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2008, vol. 10, iss. 9, pp. 2334–2337.
7. Voloshyna O., Boiaryntseva I., Spassky D., Sidletskiy O. Luminescence properties of the yttrium and gadolinium tantalate-niobates. *Solid State Phenomena*, 2015, vol. 230, pp. 172–177.
8. Blasse G., Bril A. Luminescence phenomena in compounds with fergusonite structure. *J. Luminescence*, 1970, vol. 3, pp. 109–131.
9. Wang X., Li X., Zhang Y., Chen B. Optical transition and near-infrared upconversion luminescence properties of $\text{YNbO}_4:\text{Er}^{3+}$, Tb^{3+} phosphors. *J. of Luminescence*, 2023, vol. 263, p. 120055(1-9).
10. Binnemans K. Interpretation of europium(III) spectra. *Coordination Chemistry Reviews*, 2015, vol. 295, pp. 1–45.
11. Singh A. K., Singh S. K., Gupta B. K., Prakash R., Rai S. B. Probing a highly efficient dual mode: down-upconversion luminescence and temperature sensing performance of rare-earth oxide phosphors. *Dalton Transactions*, 2013, vol. 42, pp. 1065–1072.

Информация об авторах

М. В. Смирнов — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник;

О. Б. Щербина — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник;

С. М. Маслобоева — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник;

Е. В. Зеленина — кандидат технических наук, доцент кафедры ТОМ СПбГТИ(ТУ);

М. Н. Палатников — доктор технических наук, главный научный сотрудник.

Information about the authors

M. V. Smirnov — PhD (Physics & Mathematics), Researcher;

O. B. Shcherbina — PhD (Engineering), Leading Researcher;

S. M. Masloboeva — PhD (Engineering), Leading Researcher;

E. V. Zelenina — PhD (Engineering), Assistant Professor in Material science department of Saint Petersburg State Institute of Technology;

M. N. Palatnikov — DSc (Engineering), Principal Researcher.

Статья поступила в редакцию 20.05.2025; одобрена после рецензирования 10.06.2025; принята к публикации 24.06.2022.
The article was submitted 20.05.2022; approved after reviewing 10.06.2022; accepted for publication 24.06.2025.