

Научная статья
УДК 535.37, 546, 66(017+018)
doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.061

ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ Nb:Ta НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА, СТРУКТУРНЫЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЕРАМИК ОРТОНИОБАТОВ-ТАНТАЛАТОВ ЭРБИЯ

**М. В. Смирнов¹, О. Б. Щербина², Н. В. Сидоров³, М. Н. Палатников⁴,
С. М. Маслوبةва⁵, В. Б. Пикулев⁶**

^{1–5}Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева
Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

⁶Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия

¹*m.smirnov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2645-5524>*

²*o.shcherbina@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9591-0274>*

³*n.sidorov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1075-7421>*

⁴*m.palatnikov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9686-0563>*

⁵*s.masloboeva@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9954-8479>*

⁶*pikulev@petrsu.ru*

Аннотация

Приведены результаты исследования люминесцентных свойств, структурных и механических характеристик керамик $\text{ErNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ в зависимости от соотношения Nb:Ta. Установлено, что в монофазные керамики $\text{ErNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ ($x = 0.7$ и 1), структура которых описывается в моноклинной сингонии с пространственной группой симметрии $I2/a$, показывают наилучшие механические характеристики относительно других составов. Максимальная интенсивность фотолюминесценции наблюдается в керамике $\text{ErNb}_{0.1}\text{Ta}_{0.9}\text{O}_4$. Впервые зарегистрированы линии поглощения Er в спектре фотолюминесценции собственного свечения матрицы.

Ключевые слова:

ортониобат-танталат эрбия, фотолюминесценция, механические свойства, структурные характеристики, золь-гель синтез, керамика

Финансирование:

государственное задание по теме НИР № FMEZ-2022-0016.

Для цитирования:

Влияние соотношения Nb:Ta на люминесцентные свойства, структурные и механические характеристики керамик ортониобатов-танталатов эрбия / М. В. Смирнов [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2024. Т. 15, № 1. С. 366–372. doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.061.

Original article

THE EFFECT OF Nb:Ta RATIO ON THE LUMINESCENT PROPERTIES, STRUCTURAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF ERBIUM ORTHONIOBATES-TANTALATES CERAMICS

**M. V. Smirnov¹, O. B. Shcherbina², N. V. Sidorov³, M. N. Palatnikov⁴,
S. M. Masloboeva⁵, V. B. Pikulev⁶**

^{1–5}*I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials
of the Kola Science Centre of RAS, Apatity, Russia*

⁶*Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia*

¹*m.smirnov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2645-5524>*

²*o.shcherbina@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9591-0274>*

³*n.sidorov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1075-7421>*

⁴*m.palatnikov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9686-0563>*

⁵*s.masloboeva@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9954-8479>*

⁶*pikulev@petrsu.ru*

Abstract

The study of the dependence of luminescent properties, structural and mechanical characteristics of $\text{ErNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ ceramics on the Nb:Ta ratio was conducted. It was found that single phase $\text{ErNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ ceramics ($x = 0.7$ and 1), where their structure was described in monoclinic symmetry with the spatial symmetry group $I2/a$, showed the best

mechanical characteristics relative to other compositions. The maximum intensity of photoluminescence was observed in $\text{ErNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ ceramics. For the first time, Er absorption lines were on the photoluminescence spectrum of the host luminescence.

Keywords:

erbium orthoniobate-tantalate, photoluminescence, mechanical properties, structural characteristics, sol-gel synthesis, ceramics

Funding:

the state task on the topic of research No. FMEZ-2022-0016.

For citation:

The effect of Nb:Ta ratio on the luminescent properties, structural and mechanical characteristics of erbium orthoniobates-tantalates ceramics / M. V. Smirnov [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2024. Vol. 15, No. 1. P. 366–372. doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.061.

Введение

На сегодняшний день в связи с бурным развитием светодиодной промышленности, сцинтилляционной и лазерной техники, а также твердотельной квантовой электроники растёт спрос на люминесцентные материалы. При этом оксидные соединения на основе ортониобатов-танталатов щелочных и редкоземельных элементов, благодаря удачному сочетанию уникальных механических и люминесцентных характеристик, получают всё большее распространение как функциональные материалы различного назначения. Так, лазерный материал на основе кристалла $\text{YNbO}_4\text{:Nd}$ с непрерывным излучением при 1066 нм даёт эффективность преобразования 22,4 % [1]. В качестве датчика температуры можно использовать керамический люминофор $\text{YNbO}_4\text{:Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$, чувствительность к температуре которого составляет $83,8 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ при соотношении 0,5 мол. % $\text{Er}^{3+}/6$ мол. % Yb^{3+} [2].

Керамические твёрдые растворы ErVO_4 (V — элемент V группы) имеют широкий потенциал применения в качестве лазерных материалов и оптических преобразователей за счёт внутренней конверсии энергии по метастабильным уровням энергии иона Er^{3+} , приводящей, например, к механизмам up-люминесценции при возбуждении из ближнего ИК-диапазона [3]. Изменение соотношения между ниобием и танталом в керамике $\text{ErNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ ведёт к координационному беспорядку в окружении иона Er^{3+} и, как следствие, к анизотропии кристаллического поля, влияющего на систему уровней редкоземельного элемента. Есть основания полагать, что при определённом соотношении ниобия и тантала люминесцентные свойства смешанной керамики $\text{ErNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ могут значительно превосходить люминесцентные свойства индивидуальных соединений. В этой связи для создания новых материалов особенно актуальными являются исследования, направленные на поиск x -составов соединений $\text{ANb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ (A — редкоземельный элемент), обладающих оптимальными люминесцентными и механическими характеристиками. Ранее было установлено, что малые концентрации Ta ($x = 0,9$) в $\text{GdNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ резко увеличивают собственную люминесценцию матрицы. Интенсивность люминесценции соединений $\text{GdNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$, легированных малыми концентрациями Ta, в 3,0–6,5 раза превышает интенсивность люминесценции чистых GdNbO_4 и GdTaO_4 [4].

Целью данной работы является исследование поведения люминесцентных, механических и структурных характеристик керамических твёрдых растворов $\text{ErNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$, синтезированных по традиционной керамической технологии, в зависимости от изменения соотношения Nb:Ta.

Результаты исследований

Синтез порошков $\text{ErNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ ($x = 0, 0,1, 0,3, 0,5, 0,7, 0,9$ и 1) проводили золь-гель методом. Для синтеза использовали высокочистые фторидные Nb- и Ta-содержащие растворы или их смеси в объёмах, обеспечивающих заданный состав ниобато-танталатов. Растворы готовили путём растворения оксидов Nb_2O_5 и Ta_2O_5 в HF. Из исходных растворов гидроксиды ниобия, тантала или их смеси осаждали 25 %-м NH_4OH с последующей трёхкратной промывкой деионизированной водой для удаления ионов F^- ($T:V_{\text{ж}} = 1:3$) и сушили при температуре 100 °C. Затем к осадку добавляли раствор $\text{Er}(\text{NO}_3)_3$ с заданной концентрацией Er при соотношении $T:V_{\text{ж}} = 1:2$. Азотнокислые растворы эрбия получали растворением Er_2O_3 в HNO_3 . В образовавшуюся при перемешивании пульпу вводили 25 %-й раствор NH_4OH до pH ~8–9. После фильтрации и трёхкратной промывки осадка от ионов аммония

деионизированной водой при $T:V_{\text{ж}} = 1:4$ проводили его сушку при температуре примерно $140\text{ }^{\circ}\text{C}$, затем прокалку в печи сопротивления при $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 4 ч и размол в шаровой халцедоновой мельнице МК 1. Далее порошки прокаливали в течение 5 ч при $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Данные метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (масс-спектрометр Elan-9000 DRC-e) свидетельствуют о том, что с учётом объёмов растворов потери эрбия в фильтрах и промывных растворах для большинства исследуемых образцов составляют величину, значительно меньшую 0,1 мг при синтезе 30 г порошка. Отсюда можно сделать вывод, что гадолиний и европий практически полностью переходят из растворов $\text{Er}(\text{NO}_3)_3$ в гидроксидный осадок. Установлено методом рентгенофлуоресцентной спектрометрии на приборе «Спектроскан МАКС-GV», что концентрации Er, Nb, Ta близки к расчётным значениям в пределах допустимой погрешности используемого метода анализа (5 %). Установлено методом пирогидролиза, что концентрация фтора в порошках находится ниже предела чувствительности используемого метода анализа (менее $1 \cdot 10^{-3}\%$).

Из полученных порошков по традиционной керамической технологии были приготовлены керамические образцы в виде таблеток диаметром 10 мм и высотой 2–3 мм. Прессование таблеток проводили при нагрузке примерно $3,8\text{ кг/см}^2$. Таблетки спекали в электропечи КЭП 14/1400П при температуре $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 3 ч.

Рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализ керамических образцов выполнялся с помощью многофункционального рентгеновского дифрактометра Rigaku с программным обеспечением SmartLab Studio II. Скорость движения счётчика — $2^{\circ}/\text{мин}$ ($\text{CuK}\alpha$ -излучение, диапазон сканирования — $6\text{--}90^{\circ}$). Для идентификации фаз использовали базы данных ICDD (PDF 4, relies 2022).

Микроструктуру образцов керамики изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа ZEISS EVO 25 UltimMax 170 и анализировали по сканам SEM с помощью программы ScanMaster, предназначенной для математической обработки таких изображений и проведения на них измерений.

Механические свойства керамических образцов (микротвёрдость, модуль Юнга и трещиностойкость) исследовали контактным методом с помощью зондового микроскопа-нанотвердомера NanoScan по методикам, подробно описанным в работах [5–8]. Микротвёрдость керамик определялась методом сравнительной склерометрии [5], модуль Юнга — по кривым подвода [6]. Трещиностойкость K_{IC} определялась в соответствии с моделью [7, 8]. Во время испытания нагрузка составляла 15 мН. Чтобы снизить стандартную ошибку данных, полученные значения микротвёрдости и трещиностойкости усреднялись по десяти измерениям на 10 произвольных участках размером $60 \times 60\text{ мкм}$ для каждого образца.

Спектры фотолюминесценции исследуемых керамик были получены с помощью спектрографа SOL SL-100M, оснащённого ПЗС-детектором FLI ML 1107 BlackIlluminated (Hamamatsu), при возбуждении длиной волны 325 нм He-Cd лазера с мощностью непрерывного излучения 15 мВт. Рабочий диапазон длин волн составляет 360–800 нм с разрешением от 0,2 нм. Спектры фотолюминесценции исправлялись на инструментальный фон установки.

По данным рентгенофазового анализа керамики ErNbO_4 и $\text{ErNb}_{0,7}\text{Ta}_{0,3}\text{O}_4$ характеризуются моноклинной кристаллической решёткой с пространственной группой симметрии $I2/a$ (М-тип, β -фергусонит) ортониобата эрбия (ICDD, карточка 01-074-6536). Однофазный образец $\text{ErNb}_{0,1}\text{Ta}_{0,9}\text{O}_4$ кристаллизуется в другой полиморфной модификации структурного типа фергусонит (М'-фергусонит) с пространственной группой симметрии $P2_1/a$ (М'-тип) ортотанталата эрбия (ICDD, карточка 00-024-0407). Отличие последней структурной модификации от М-типа заключается в увеличенном объёме элементарной ячейки (примерно в 2 раза), в числе формульных единиц ($Z = 4$), а также в том, что Me стремится к тетраэдрической координации, а дисперсия значений длин связей в редкоземельном полиэдре (ErO_8) больше [9]. Остальные образцы являются двухфазными: ErTaO_4 (М'-тип) и $\text{ErNb}_{0,9}\text{Ta}_{0,1}\text{O}_4$ (М-тип) содержат 6 и 10 вес. % фазы Er_3TaO_7 и Er_3NbO_7 , характеризующиеся кубической сингонией с пространственной группой симметрии $Fm-3m$ (ICDD, карточка 00-024-0406 и 00-024-1080). В образце $\text{ErNb}_{0,3}\text{Ta}_{0,7}\text{O}_4$ содержатся две полиморфные модификации фергусонита: основная фаза ErTaO_4 с пространственной группой симметрии $I2$ и фазы в количестве 30 вес. % М'-типа. Структура керамического твёрдого раствора $\text{ErNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_4$ соответствует моноклинной

ячейке с пространственной группой симметрии $I2$ ортониобата и ортотанталата эрбия. Полнопрофильный анализ структуры образцов керамики $\text{ErNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ ($x = 1, 0,9, 0,7, 0,5$ и $0,3$) показал, что увеличение Ta в структуре приводит к увеличению периода a и уменьшению периодов b и c , а угол моноклинности β увеличивается в сторону больших значений, как следствие, элементарная ячейка подвергается большему искажению в составах керамики $\text{ErNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ с высоким содержанием Ta.

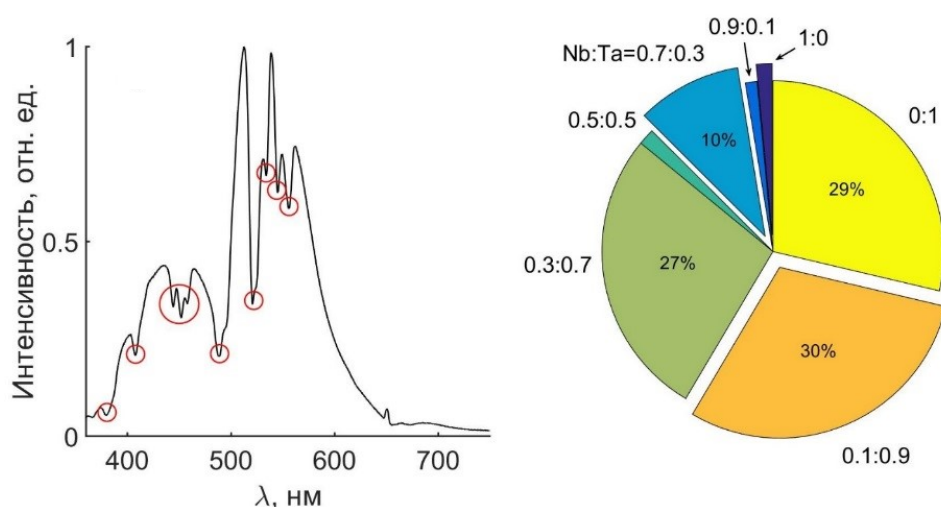
Керамические образцы $\text{ErNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ состоят из зёрен сходной морфологии, с выраженными границами. Наибольший разброс по размеру кристаллитов (от $\sim 0,7$ до ~ 10 мкм) наблюдается в образце ErNbO_4 (табл.). Вероятно, большой размер зёрен керамики ErNbO_4 может быть обусловлен температурой спекания керамики, приближающейся к точке плавления. Присутствие Ta в составе $\text{ErNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ приводит к уменьшению дисперсии размера зёрен керамики, и в среднем размер частиц варьируется примерно от 0,2 до 2,2 мкм при x , равном 0,9, 0,7, 0,5 и 0,3 (табл.). Следует также отметить, что керамические образцы $\text{ErNb}_{0,9}\text{Ta}_{0,1}\text{O}_4$ и ErTaO_4 , содержащие кубические фазы с пространственной группой симметрии $Fm-3m$ Er_3NbO_7 и Er_3TaO_7 , наиболее неоднородны и содержат отдельные зёрна размером более 3,0 мкм.

Механические характеристики и размер частиц керамических образцов $\text{ErNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$

Образец	Дисперсия размера частиц, мкм	Микротвёрдость, ГПа	Модуль Юнга, ГПа	Трещиностойкость, МПа м ^{0,5}
ErNbO_4	0,7–10	$6,11 \pm 0,86$	$297,6 \pm 10,8$	$1,44 \pm 0,2$
$\text{ErNb}_{0,9}\text{Ta}_{0,1}\text{O}_4$	0,19–2,2	$2,86 \pm 0,31$	$84,8 \pm 1,8$	$0,7 \pm 0,1$
$\text{ErNb}_{0,7}\text{Ta}_{0,3}\text{O}_4$	0,18–2,0	$5,68 \pm 1,0$	$162,4 \pm 6,9$	$1,20 \pm 0,1$
$\text{ErNb}_{0,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_4$	0,19–2,0	$3,82 \pm 0,33$	$137,7 \pm 4,3$	$1,10 \pm 0,1$
$\text{ErNb}_{0,3}\text{Ta}_{0,7}\text{O}_4$	0,18–2,0	$5,12 \pm 1,1$	$223,1 \pm 5,9$	$1,16 \pm 0,15$
$\text{ErNb}_{0,1}\text{Ta}_{0,9}\text{O}_4$	0,17–3,0	$3,4 \pm 0,361$	$98,8 \pm 2,7$	$0,94 \pm 0,1$
ErTaO_4	0,18–4,0	$4,2 \pm 0,9$	$139,3 \pm 6,8$	$1,06 \pm 0,1$

Механические характеристики керамики сильно зависят от фазового состава образцов. Наилучшими механическими характеристиками (микротвёрдость, модуль Юнга, трещиностойкость) обладают монофазные керамические образцы ErNbO_4 и $\text{ErNb}_{0,7}\text{Ta}_{0,3}\text{O}_4$ относительно других составов. Низкие механические характеристики образца $\text{ErNb}_{0,9}\text{Ta}_{0,1}\text{O}_4$ закономерно обусловлены присутствием в образце около 10 вес. % фазы кубического Er_3NbO_7 . Довольно высокие значения твёрдости и модуля Юнга керамического образца $\text{ErNb}_{0,3}\text{Ta}_{0,7}\text{O}_4$ объяснимы появлением в его составе, наряду с фазой β -фергусонита, фазы М-фергусонита, обладающего повышенными механическими характеристиками.

Первоначально рассмотрим особенности спектра фотолюминесценции ортониобата-танталата эрбия, а затем перейдём к анализу влияния соотношения Nb:Ta на эмиссионные свойства $\text{ErNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$. В левой части рисунка в качестве примера представлен нормированный спектр фотолюминесценции керамики ErTaO_4 , форма которого схожа для остальных керамических составов за исключением некоторых деталей, освещённых далее по тексту. Спектр фотолюминесценции состоит из широкой полосы люминесценции (~ 200 нм), обусловленной возбуждением излучательной рекомбинации собственных дефектных центров $\text{TaO}_{(4+2)-\delta}$ [10], на контуре которой впервые были зарегистрированы линии поглощения иона Er^{3+} . Последние проявляются в спектре при 380 (переход $^4I_{15/2} \rightarrow ^4G_{11/2}$), 408 (переход $^4I_{15/2} \rightarrow ^4H_{9/2}$), 444, 452, 458 (переходы $^4I_{15/2} \rightarrow ^4F_{3/2}$ и $^4F_{5/2}$), 489, 495 (переходы $^4I_{15/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$), 521, 525, 534, 545 и 556 нм (переходы $^4I_{15/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$ и $^4S_{3/2}$ иона Er^{3+} [3, 11]) (см. левую часть рисунка). Полоса при ~ 650 нм соответствует электро-дипольному переходу $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ иона Er^{3+} [3], и в зависимости от состава керамики количество полос излучения может меняться от одной до трёх. Таким образом, возбуждение люминесценции при 325 нм приводит первоначально к возбуждению эмиссии собственных центров свечения матрицы $\text{ErNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_4$ и к последующему перепоглощению этой эмиссии ионом Er^{3+} .



Нормированный спектр фотолюминесценции ($\lambda_{\text{возб}} = 325$ нм) керамики ErTaO₄ (слева) и процентное соотношение интегральной интенсивности люминесценции в керамиках ErNb_xTa_{1-x}O₄ (справа)

На рис. (правая часть) представлено процентное соотношение интегральной интенсивности керамик ErNb_xTa_{1-x}O₄ в зависимости от соотношения между ниобием и танталом. Видно, что в индивидуальных соединениях интенсивность люминесценции сильно отличается: в керамике ErTaO₄ она на 28 % выше, чем в керамике ErNbO₄. В смешанной керамике по мере увеличения отношения Nb:Ta в сторону дефицита Nb в общем происходит рост интенсивности люминесценции. Пороговое значение ниобия соответствует 0,5, выше которого наблюдается резкий рост интенсивности люминесценции, сопоставимый с люминесценцией ErTaO₄.

Выводы

Показано, что структура ErNb_xTa_{1-x}O₄ от $x = 1$ до $x = 0,5$ соответствует моноклинной кристаллической решётке ортониобата или ортотанталата эрбия (β -фергусонит). При увеличении Ta в ErNb_xTa_{1-x}O₄ (при $x = 0,3$ и менее) твёрдый раствор кристаллизуется в полиморфной модификации М-фергусонита.

Установлено, что наибольший размер частиц наблюдается в образце ErNbO₄. Присутствие Ta в составе ErNb_xTa_{1-x}O₄ приводит к резкому уменьшению дисперсии размера зёрен керамики. Установлено, что наилучшими механическими характеристиками относительно других составов обладают монофазные керамические образцы ErNbO₄ и ErNb_{0,7}Ta_{0,3}O₄.

В смешанной керамике ErNb_xTa_{1-x}O₄ по мере увеличения соотношения Nb:Ta в сторону дефицита Nb в общем происходит рост интенсивности люминесценции при возбуждении ближнем УФ-диапазоне ($\lambda_{\text{возб}} = 350$ нм). Максимальная интенсивность фотолюминесценции наблюдается в керамике состава ErNb_{0,1}Ta_{0,9}O₄. При этом впервые зарегистрирована совместно собственная люминесценция матрицы керамики ErNb_xTa_{1-x}O₄ и полосы поглощения эрбия.

Список источников

1. Structure, spectroscopic properties and laser performance of Nd:YNbO₄ at 1066 nm / S. Ding [et al.] // Opt. Mater. 2016. Vol. 62. P. 7–11.
2. Upconversion luminescence, temperature sensing properties and laser-induced heating effect of Er³⁺/Yb³⁺ co-doped YNbO₄ phosphors under 1550 nm excitation / X. Wang [et al.] // Sci. Rep. 2018. Vol. 8. P. 5736 (1–13).

3. Optical properties of undoped NdTaO₄, ErTaO₄ and YbTaO₄ ceramics / K. P. F. Siqueira [et al.] // J. Luminescence. 2016. Vol. 179. P. 146–153.
4. Luminescence properties of sol-gel derived ceramics GdNb_xTa_{1-x}O₄ and YNb_xTa_{1-x}O₄ solid solutions / M. N. Palatnikov [et al.] // Inorganic Materials. 2020. Vol. 56, No. 4. P. 437–464.
5. Malygin G. A. Plasticity and strength of micro- and nanocrystalline materials // Physics of the Solid State. 2007. Vol. 49. P. 1013–1033.
6. Maslenikov I. I., Reshetov V. N., Useinov A. S. Mapping the elastic modulus of a surface with a NanoScan 3D scanning microscope // Instrum. Exp. Tech. 2015. Vol. 58, No. 5. P. 711–717.
7. A critical evaluation of indentation techniques for measuring fracture toughness: II, Strength method / P. Chantikul [et al.] // J. Am. Ceram. Soc. 1981. Vol. 64, No. 9. P. 539–544.
8. A critical evaluation of indentation techniques for measuring fracture toughness: I, Direct crack measurements / G. R. Anstis [et al.] // J. Am. Ceram. Soc. 1981. Vol. 64, No. 9. P. 533–538.
9. Brixner L. H., Chen H.-Y. On the structural and luminescent properties of the M³⁺ LnTaO₄ rare earth tantalates // Chemical Etching Characteristics. 1983. Vol. 130. P. 2435–2443.
10. Blasse G., Bril A. Luminescence phenomena in compounds with fergusonite structure // J. Luminescence. 1970. Vol. 3. P. 109–131.
11. Absorption and emission characteristics of Er₃NbO₇ phosphor: A comparison with ErNbO₄ phosphor and Er:LiNbO₃ single crystal / D.-L. Zhang [et al.] // J. Luminescence. 2007. Vol. 127. P. 453–460.

References

1. Ding S., Peng F., Zhang Q., Luo J., Liu W., Sun D., Doua R., Suna G. Structure, spectroscopic properties and laser performance of Nd:YNbO₄ at 1066 nm. Optical Materials, 2016, Vol. 62, pp. 7–11.
2. Wang X., Li X., Zhong H., Xu S., Cheng L., Sun J., Zhang J., Li L., Chen B. Upconversion luminescence, temperature sensing properties and laser-induced heating effect of Er³⁺/Yb³⁺ co-doped YNbO₄ phosphors under 1550 nm excitation. Scientific Reports, 2018, Vol. 8, pp. 5736 (1–13).
3. Siqueira K. P. F., Carmo A. P., Bell M. J. V., Dias A. Optical properties of undoped NdTaO₄, ErTaO₄ and YbTaO₄ ceramics. Journal of Luminescence, 2016, Vol. 179, pp. 146–153.
4. Palatnikov M. N., Smirnov M. V., Masloboeva S. M., Shcherbina O. B., Sidorov N. V., Steblevskaya N. I., Belobeletskaya M. V. Luminescence properties of sol-gel derived ceramics GdNb_xTa_{1-x}O₄ and xTa_{1-x}O₄ solid solutions. Inorganic Materials, 2020, Vol. 56, No. 4, pp. 437–464.
5. Malygin G. A. Plasticity and strength of micro- and nanocrystalline materials. Physics of the Solid State, 2007, Vol. 49, pp. 1013–1033.
6. Maslenikov I. I., Reshetov V. N., Useinov A. S. Mapping the elastic modulus of a surface with a NanoScan 3D scanning microscope. Instruments and Experimental Techniques, 2015, Vol. 58, No. 5, pp. 711–717.
7. Chantikul P., Anstis G. R., Lawn B. R., Marshall D. B. A critical evaluation of indentation techniques for measuring fracture toughness: II, Strength method. Journal of the American Ceramic Society, 1981, Vol. 64, No. 9, pp. 539–544.
8. Anstis G. R., Chantikul P., Lawn B. R., Marshall D. B. A critical evaluation of indentation techniques for measuring fracture toughness: I, Direct crack measurements. Journal of the American Ceramic Society, 1981, Vol. 64, No. 9, pp. 533–538.
9. Brixner L. H., Chen H.-Y. On the structural and luminescent properties of the M³⁺ LnTaO₄ rare earth tantalates. Chemical Etching Characteristics, 1983, Vol. 130, pp. 2435–2443.
10. Blasse G., Bril A. Luminescence phenomena in compounds with fergusonite structure. Journal of Luminescence, 1970, Vol. 3, pp. 109–131.
11. Zhang D.-L., Hua P.-R., Cui Y.-M., Chen C.-H., Pun E. Y. B. Absorption and emission characteristics of Er₃NbO₇ phosphor: A comparison with ErNbO₄ phosphor and Er:LiNbO₃ single crystal. Journal of Luminescence, 2007, Vol. 127, pp. 453–460.