

УДК 544.31

ТЕПЛОЕМКОСТЬ И ТЕРМИЧЕСКОЕ РАСШИРЕНИЕ M - EuTaO_4 © 2021 г. П. Г. Гагарин¹, А. В. Гуськов¹, В. Н. Гуськов^{1, *}, А. А. Ашмарин²,
Л. Х. Балдаев³, Е. Г. Сазонов², А. В. Хорошилов¹, К. С. Гавричев¹¹Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук,
Ленинский пр., 31, Москва, 119991 Россия²Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук,
Ленинский пр., 49, Москва, 119334 Россия³ООО Технологические системы защитных покрытий, ул. Южная, 9А, Щербинка, Москва, 108851 Россия

*e-mail: guskov@igic.ras.ru

Поступила в редакцию 23.07.2020 г.

После доработки 06.10.2020 г.

Принята к публикации 06.10.2020 г.

Определены температурные зависимости параметров кристаллической решетки в интервале 298–1273 К и молярной теплоемкости при 315–1335 К высокотемпературной керамики M - EuTaO_4 , охарактеризованной методами РФА, СЭМ и химического анализа.

Ключевые слова: ортотанталат европия, теплоемкость, термическое расширение

DOI: 10.31857/S0002337X21020068

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к практическому применению керамики на основе танталатов редкоземельных элементов (R) существует благодаря высоким температурам плавления, химической и электрохимической стабильности и уникально высокой плотности [1–4]. Танталаты R характеризуются ионной проводимостью и могут использоваться в топливных элементах [5, 6], служить люминесцентными и оптическими материалами [7–10], а также основой для сцинтилляционных детекторов [11–13]. Высокотемпературная стабильность и подходящие теплотехнические характеристики ортотанталатов R привлекают повышенное внимание разработчиков материалов для защитных (ЕВС) и термобарьерных (ТВС) покрытий для газотурбинных установок [14–18], поскольку они превосходят по техническим параметрам используемый в настоящее время стабилизированный иттрием диоксид циркония 8YSZ.

Среди танталатов различного состава, образующихся при взаимодействии оксидов R и тантала(V), наиболее изученными являются ортотанталаты с химической формулой RTaO_4 [19–21]. Кристаллическая структура этих соединений в ряду La–Lu (включая иттрий) определяется ионным радиусом R^{3+} , в результате чего ортотанталаты лантана, церия и празеодима с большим радиусом катиона кристаллизуются в орторомбической сингонии $Pbca$ [22], а остальных R, включая иттрий, – в моноклинной (см., например, [1, 2]). Известны две моно-

клинных модификации ортотанталатов R: M ($I2/a$, $Z = 4$) и M' ($P2/a$, $Z = 2$), отличающихся удвоенным объемом кристаллической решетки. При уменьшении ионного радиуса за счет лантаноидного сжатия (и увеличении атомной массы лантаноида) устойчивость M -модификации уменьшается, а M' -формы увеличивается, и ортотанталаты иттербия и лютеция кристаллизуются лишь в M' -модификации [23, 24], тогда как NdTaO_4 – только в структуре M -типа [25, 26]. При нагревании ортотанталатов Sm–Tm (а также иттрия [27, 28]) M' -типа происходит необратимый переход $M' \rightarrow M$. Причины необратимости до конца неясны и, возможно, носят кинетический характер, хотя имеется температурный интервал, в котором обе модификации могут сосуществовать [28, 29].

В работе [30] показано, что при кристаллизации тонких пленок ортотанталатов на оксиде алюминия при 1273 К возможно образование разных типов танталатов, поэтому при синтезе и термической обработке следует уделять повышенное внимание параметрам окончательного отжига. Это особенно касается керамического способа синтеза, когда недостаточно высокие температуры (<1500 К) приводят к неполному взаимодействию и образованию метастабильных фаз типа T' [31]. При нагревании как M' -, так и M -ортотанталатов до температур 1600–1700 К происходит фазовое превращение в тетрагональную модификацию T ($I4_1/a$, $Z = 4$) [32]. Это превращение обрати-

мо, однако охлаждение сопровождается переходом только в M -модификацию: $T \rightarrow M$.

Практическое использование керамики на основе ортотанталатов в качестве высокотемпературных защитных материалов связано с необходимостью изучения, во-первых, процессов термического расширения и проблем согласования коэффициентов термического расширения (КТР) защитного покрытия и промежуточных слоев; во-вторых, теплофизических характеристик материала: температуропроводности и теплопроводности, рассчитываемой с использованием теплоемкости; и, в-третьих, взаимодействия с окружающими материалами и газовыми средами [33]. Для решения первой задачи, как правило, применяют dilatometriю [15, 19], для определения температуропроводности применяют метод лазерной вспышки и с использованием оцененной обычно по правилу Неймана–Коппа теплоемкости рассчитывают теплопроводность [14, 15]. Наиболее трудоемкой и затратной задачей является третья: проблема сохранения работоспособности материалов в условиях высокотемпературного контакта с различными веществами в твердом, жидком и газообразном состояниях. Существенно упростить решение этой задачи можно при использовании термодинамического моделирования, для проведения которого необходимы достоверные термодинамические функции участвующих в процессе веществ. Результатом моделирования является определение конечного равновесного состояния физико-химической системы, позволяющее избежать кинетических осложнений. Для проведения такого моделирования предпочтительны экспериментальные данные, так как различные приближения для оценки теплоемкости, в том числе по правилу Неймана–Коппа, часто дают недостаточно точный результат [34].

Целью настоящей работы является измерение теплоемкости ортотанталата европия в диапазоне 315–1335 К и определение параметров термического расширения M -EuTaO₄ методом рентгеновской дифракции в области высоких температур.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Ортотанталат европия получали методом обратного осаждения водным раствором аммиака (NH₄OH, 25–28 мас. %, А.С.С., ООО “Химмед”) из водно-спиртового раствора хлорида тантала(V) 99.99% и сесквиоксида европия 99.99% производства ООО “Ланхит”, предварительно растворенного в соляной кислоте (35–38 мас. %, А.С.С. 20–4, ООО “Химмед”), с последующим обезвоживанием и ступенчатым отжигом полученного осадка (максимальная температура отжига 1673 К, 4 ч). Подробное описание синтеза приведено в [25, 26]. Идентификацию образца проводили, используя

рентгеновскую дифракцию на порошке (Bruker D8 Advance diffractometer (CuK_α-излучение, $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$, диапазон углов $2\theta = 10^\circ - 80^\circ$). Химический состав определяли с использованием оптического эмиссионного спектрометра Agilent 725 с индукционно связанной плазмой. Морфологию полученного образца изучали посредством электронного микроскопа (Cross Beam Zeiss NVision 40). Теплоемкость измеряли методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на приборе STA 449 F1 Jupiter (Netzsch) в соответствии с приведенными в [35] методиками. Молярную массу ортотанталата европия (396.90948 г/моль) рассчитывали по рекомендованным в [36] значениям атомных масс. Термическое расширение изучали методом высокотемпературной дифракции с использованием приставки HA-1001 и дифрактометра Shimadzu на излучении CuK_α, $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$ в интервале температур 298–1273 К [37].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

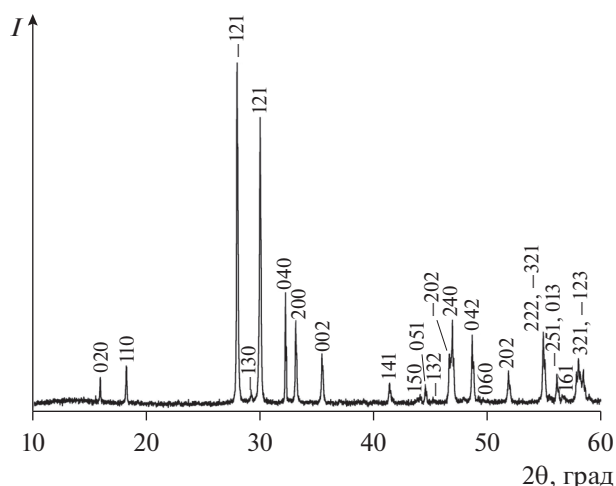
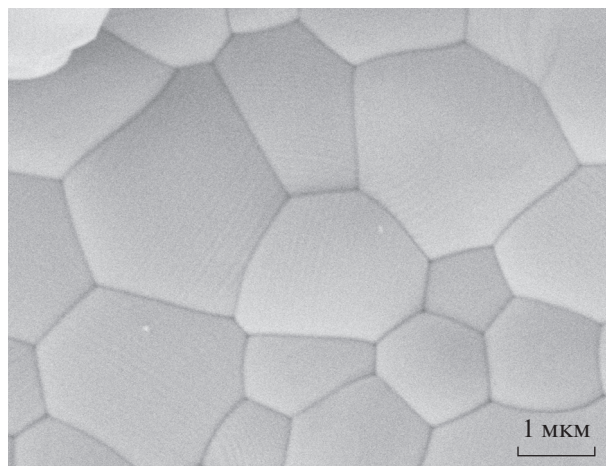
Для проведения исследований был синтезирован моноклинный ортотанталат европия M -EuTaO₄, который, по данным химического анализа, характеризовался атомным соотношением металлов Eu : Ta = 50.15 : 49.85 (± 0.20). Рентгенофазовый анализ (рис. 1) показал отсутствие посторонних фаз, рассчитанные параметры моноклинной решетки типа M ($I2/a$, $Z = 4$) приведены в табл. 1 и удовлетворительно согласуются с литературными значениями. Электронная микроскопия (рис. 2) и расчеты по ширине рефлексов (по Шереру) показали, что размеры частиц керамики составляют не менее 100 нм, что находится за пределами размерной шкалы нановеществ и не может оказать влияния на результаты калориметрических и рентгеновских исследований.

Термическое расширение изучали методом высокотемпературной дифракции на порошке керамики M -EuTaO₄ в интервале температур 298–1273 К с шагом 100 К. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Температурные зависимости параметров кристаллической решетки не содержат аномалий, связанных со структурными фазовыми переходами, что также согласуется с результатами измерения теплоемкости методом ДСК в интервале 315–1335 К. По полученной температурной зависимости объема элементарной ячейки V (табл. 2) рассчитаны приведенные в табл. 2 текущий (instantaneous) $\beta_V(i)$ и относительный (relative) $\beta_V(r)$ КТР, а также относительное объемное расширение TE :

$$\beta_V(i)(\text{K}^{-1}) = [1/V(T)][dV(T)/d(T)], \quad (1)$$

$$\beta_V(r)(\text{K}^{-1}) = [1/V(298 \text{ K})][dV(T)/d(T)], \quad (2)$$

Рис. 1. Дифрактограмма $M\text{-EuTaO}_4$.Рис. 2. Морфология керамики $M\text{-EuTaO}_4$.

$$TE(\%) = 100 \times [V(T) - V(298\text{ K})] / V(298\text{ K}). \quad (3)$$

Известно [32], что при повышении температуры до ~ 1630 К ортотанталат европия испытывает обратимое фазовое превращение с переходом в тетрагональную модификацию $M \leftrightarrow T$. Это изменение фазового состояния сопровождается повышением симметрии кристаллической решетки за счет выравнивания параметров a и c , а угол β становится равным 90° (рис. 3). Поэтому при нагревании ортотанталатов от комнатной до темпера-

туры фазового превращения наблюдается постепенное уменьшение параметра a и увеличение c . Однако изменение объема кристаллической ячейки остается положительным и носит характер слабой квадратичной зависимости:

$$V(\text{Å}^3) = 302.58 \pm 0.45 + (7.48 \pm 0.12) \times 10^{-3} T + (2.0845 \pm 0.7525) \times 10^{-6} T^2. \quad (4)$$

Таблица 1. Параметры кристаллической решетки $M\text{-EuTaO}_4$

a , Å	b , Å	c , Å	β , град	Источник
5.430(5)	11.101(6)	5.084(4)	95.62(2)	Настоящая работа
5.393	11.133	5.113	95.58	[1]
5.428	11.103	5.087	95.44	[2, 38]
5.429	11.098	5.088	95.7	[7]
5.4127	11.0740	5.0848	—	[14]
5.43	11.11	5.09	95.65	[15]
5.428	11.103	5.087	94.73	[20]

Таблица 2. Экспериментальные значения параметров кристаллической решетки $M\text{-EuTaO}_4$ в области 298–1273 К ($p = 101.3$ кПа)

T , К	a , Å	b , Å	c , Å	β , град	V , Å ³	$\beta_V(r) \times 10^5$, К ⁻¹	$\beta_V(i) \times 10^5$, К ⁻¹	TE , %
298	5.430	11.104	5.085	95.5	305.2	2.86	2.86	0
473	5.434	11.126	5.093	95.4	306.5	3.10	3.08	0.4
573	5.435	11.136	5.100	95.3	307.3	3.23	3.21	0.7
673	5.437	11.153	5.107	95.1	308.5	3.37	3.33	1.1
773	5.437	11.168	5.116	94.9	309.5	3.51	3.46	1.4
873	5.438	11.189	5.125	94.8	310.8	3.64	3.58	1.9
973	5.439	11.206	5.135	94.6	312.0	3.78	3.70	2.2
1073	5.436	11.226	5.146	94.3	313.2	3.92	3.82	2.6
1173	5.427	11.244	5.160	94.0	314.4	4.05	3.93	3.0
1273	5.420	11.263	5.170	93.0	315.2	4.19	4.06	3.3

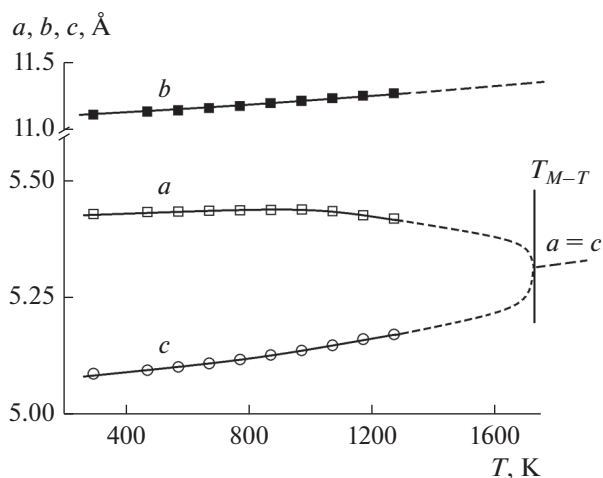


Рис. 3. Температурные зависимости параметров a , b и c кристаллической решетки M -EuTaO₄: сплошные линии – экспериментальные данные настоящей работы, штриховые линии – экстраполяции к высоким температурам и точке фазового перехода $M \leftrightarrow T$.

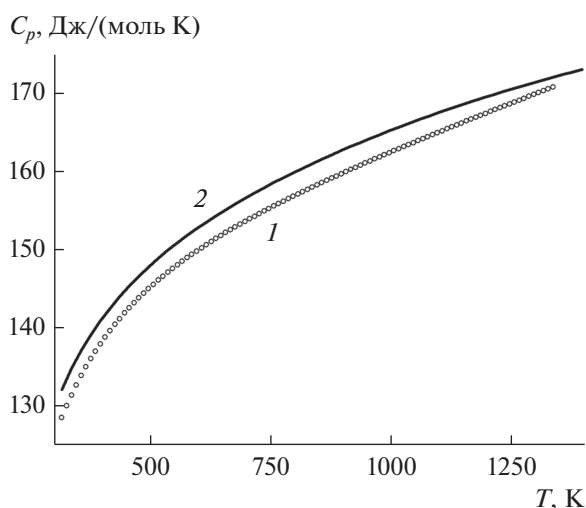


Рис. 4. Теплоемкость керамики M -EuTaO₄ в интервале температур 315–1335 К: 1 – экспериментальная кривая (ДСК), 2 – оценка по Нейману–Коппу.

Если в грубом приближении считать полученную керамику M -EuTaO₄ однородной, изотропной и имеющей кубическую структуру, то линейный КТР

$$\alpha_L(r) = \beta_V(r)/3 \quad (5)$$

будет равен при 298 К $9.5 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, а при 1173 К – $13.5 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, что вполне согласуется с приведенными в [19] значениями 9.75×10^{-6} и $12.35 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ соответственно.

Молярную теплоемкость керамики M -EuTaO₄ определяли методом ДСК в интервале температур

315–1335 К. В этом температурном интервале отсутствуют фазовые превращения и молярная теплоемкость хорошо аппроксимируется уравнением Майера–Келли [39]

$$C_{p,m}^{\circ} (\text{Дж}/(\text{моль К})) = 142.75 + 0.021947112T - 2091283.8/T^2 \quad (R = 0.9999). \quad (6)$$

Температурная зависимость молярной теплоемкости приведена на рис. 4 в сравнении с оценкой по Нейману–Коппу, выполненной на основе данных по теплоемкости простых оксидов: Eu₂O₃ [40] и Ta₂O₅ [41]. Как видно из рис. 4, оценка по Нейману–Коппу (кривая 2) дает завышенный примерно на 5–10% результат, что превышает погрешность метода ДСК (~2.5% [34]) и может привести к ошибкам в расчетах, особенно при экстраполяции к высоким температурам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом высокотемпературной рентгеновской дифракции определено изменение параметров кристаллической решетки M -EuTaO₄ в диапазоне температур 298–1273 К, рассчитаны объемные коэффициенты термического расширения и величина относительного расширения. Показано, что термическое расширение носит слабый квадратичный характер. Выполнены измерения молярной теплоемкости керамики M -EuTaO₄ в интервале 315–1335 К и показано отсутствие структурных аномалий в этой области.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 18-13-00025.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП ИОНХ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арсеньев П.А., Глушкова В.Б., Евдокимов А.А. и др. Соединения редкоземельных элементов. Цирконаты, гафнаты, ниобаты, танталаты, антимонаты. М.: Наука, 1985. 261 с.
2. Рождественский Ф.А., Зувев М.Г., Фатеев А.А. Танталаты трехвалентных металлов. М.: Наука, 1986. 168 с.
3. Osterloh F.E. Inorganic Materials as Catalysts for Photochemical Splitting of Water // Chem. Mater. 2008. V. 20. P. 35–54. <https://doi.org/10.1021/cm7024203>
4. Arakawa S., Shiotsy T., Hayashi S. Non-Arrhenius Temperature Dependence of Conductivity of Lanthanum Lithium Tantalate // J. Ceram. Soc. Jpn. 2005. V. 113. P. 317–319. <https://doi.org/10.2109/jcersj.113.317>

5. *Haugsrud R., Norby T.* Proton Conduction in Rare-Earth Ortho-Niobates and Ortho-Tantalates // *Nat. Mater.* 2006. V. 5. P. 193–196.
<https://doi.org/10.1038/nmat1591>
6. *Nyman M., Rodriguez M.A., Rohwer L.E.S. et al.* Unique LaTaO₄ Polymorph for Multiple Energy Applications // *Chem. Mater.* 2009. V. 21. P. 4731–4737.
<https://doi.org/10.1021/cm9020645>
7. *Brixner L.H., Chen H.* On the structural and luminescent properties of the M'LnTaO₄ Rare Earth Tantalates // *J. Electrochem. Soc.* 1983. V. 130. P. 2435–2443.
<https://doi.org/10.1149/1.2119609>
8. *Rozhdestvenskii F.A., Zuev M.G.* Designing Of Lanthanum-Tantalate-Based Luminophores // *J. Lumin.* 1983. V. 28. P. 465–473.
[https://doi.org/10.1016/0022-2313\(83\)90013-3](https://doi.org/10.1016/0022-2313(83)90013-3)
9. *Siqueira K.P.F., Carmo A.P., Bell M.J.V., Dias A.* Optical Properties of Undoped NdTaO₄, ErTaO₄ and YbTaO₄ Ceramics // *J. Lumin.* 2016. V. 179. P. 140–153.
<https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2016.06.054>
10. *Wang S., Jiang M., Gao L., Ma Z., Wang F.* Theoretical and Experimental Studies on the Crystal Structure, Electronic Structure and Optical Properties of SmTaO₄ // *Materials.* 2016. V. 9. № 1. P. 55.
<https://doi.org/10.3390/ma9010055>
11. *Dou R., Zhasng Q., Gao J., Chen Y., Ding S., Peng F., Liu W., Sun D.* Rare-Earth Tantalates and Niobates Single Crystals: Promising Scintillators and Laser Materials // *Crystals.* 2018. V. 8. P. 55.
<https://doi.org/10.3390/cryst8020055>
12. *Voloshyna O., Gerasimov J., Siletskiy O., Kurtsev D., Gorbacheva T., Hubenko K., Boiaryntseva I., Ivanov A., Spassky D., Omelkov S., Belsky A.* Fast ultradense GdTa_{1-x}Nb_xO₄ Scintillator Crystals // *Opt. Mater.* 2017. V. 66. P. 332–337.
<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.02.037>
13. *Nakauchi D., Koshimizu M., Okada G., Yanagida T.* Floating Zone Growth and Scintillation Properties of Undoped and Ce-Doped GdTaO₄ Crystals // *Radiat. Meas.* 2017. V. 106. P. 129–133.
<https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2017.03.033>
14. *Wang J., Chong X.Y., Zhiu R., Feng J.* Microstructure and Thermal Properties of RETaO₄ (RE = Nd, Eu, Gd, Dy, Er, Yb, Lu) as Promising Thermal Barrier Coating Materials // *Scr. Mater.* 2017. V. 126. P. 24–28.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.08.019>
15. *Chen L., Hu M., Wu P., Feng J.* Thermal Expansion Performance and Intrinsic Lattice Thermal Conductivity of Ferroelastic RETaO₄ Ceramics // *J. Am. Ceram. Soc.* 2019. V. 102. P. 4809–4821.
<https://doi.org/10.1111/jace.16328>
16. *Zhou Y., Gan G., Ge Z., Feng J.* Thermophysical Properties of SmTaO₄, Sm₃TaO₇ and SmTa₃O₉ Ceramics // *Mater. Res. Express.* 2020. V. 7. 015204.
<https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab669f>
17. *Shian S., Sarin P., Gurac M., Baram M., Kriven W.M., Clarke D.R.* The Tetragonal-Monoclinic, Ferroelastic Transformation in yttrium Tantalate and Effect of Zirconia Alloying // *Acta Mater.* 2014. V. 69. P. 196–202.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.01.054>
18. *Chen L., Song P., Feng J.* Influence of ZnO₂ Alloying Effect on the Thermophysical Properties of Fluorite-Type Eu₃TaO₇ Ceramics // *Scr. Mater.* 2018. V. 152. P. 117–121.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.03.042>
19. *Portnoi K.I., Timofeeva N.I., Salibekov S.E.* Synthesis of Tantalates R.E.E and Investigation of Theirs Physico-Chemical Properties // *Inorg. Mater.* 1970. V. 6. P. 289–293.
20. *Ma Z., Zheng J., Wang S., Gao L.* First-Principle Calculations of Crystal Structures, Electronic Structures, and Optical Properties of RETaO₄ (RE = Y, La, Sm, Eu, Dy, Er) // *Opt. Eng.* 2018. V. 57. 017107.
<https://doi.org/10.1117/1.OE.57.1.017107>
21. *Siqueira K.P.F., Carvalho G.B., Dias A.* Influence of the Processing Conditions and Chemical Environment on the Crystal Structures and Phonon Modes of Lanthanide Orthotantalates // *Dalton Trans.* 2011. V. 40. P. 9454–9460.
<https://doi.org/10.1039/c1dt10783f>
22. *Forbes T.Z., Numan M., Rodrigues M.A., Navrotsky A.* The Energetics of Lanthanum Tantalate Materials // *J. Solid State Chem.* 2010. V. 183. P. 2516–2521.
<https://doi.org/10.1016/j.jssc.2010.08.024>
23. *Guskov V.N., Khoroshilov A.V., Ryumin M.A., Kondrat'eva O.N., Guskov A.V., Gavrichev K.S.* Thermal Expansion and Thermodynamic Properties of M-YbTaO₄ Ceramics // *Ceram. Int.* 2020. V. 46. P. 5402–5406.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.10.296>
24. *Nikiforova G.E., Kondrat'eva O.N., Tyurin A.V., Ryumin M.A., Guskov V.N., Gavrichev K.S.* Thermophysical Properties of M'-LuTaO₄: Structural and Calorimetric Studies // *J. Alloys Compd.* 2019. V. 803. P. 1016–1022.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.354>
25. *Guskov V.N., Sazonov E.G., Tyurin A.V., Guskov A.V., Ryumin M.A., Gavrichev K.S.* Thermodynamic Properties of Monoclinic Neodymium Orthotantalate M-NdTaO₄ // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2019. V. 64. P. 1041–1046.
<https://doi.org/10.1134/S0036023619080059>
26. *Guskov V.N., Sazonov E.G., Khoroshilov A.V., Ryumin M.A., Guskov A.V., Gavrichev K.S.* Heat Capacity and Thermal Expansion of Neodymium Orthotantalate // *Inorg. Mater.* 2019. V. 55. P. 959–963.
<https://doi.org/10.1134/S0020168519090048>
27. *Ryumin M.A., Sazonov E.G., Guskov V.N., Nikiforova G.E., Gagarin P.G., Guskov A.V., Gavrichev K.S., Baldaev L.Kh., Mazilin I.V., Golushina L.N.* Low-Temperature Heat Capacity of Yttrium Orthotantalate // *Inorg. Mater.* 2016. V. 52. P. 1149–1154.
<https://doi.org/10.1134/S0020168516110145>
28. *Khoroshilov A.V., Ashmarin A.A., Guskov V.N., Sazonov E.G., Gavrichev K.S., Novotortsev V.M.* Heat Capacity and Thermal Expansion of Yttrium Tantalate // *Dokl. Phys. Chem.* 2019. V. 484. P. 12–14.
<https://doi.org/10.1134/S0012501619010032>
29. *Ryumin M.A., Sazonov E.G., Guskov V.N., Gagarin P.G., Khoroshilov A.V., Guskov A.V., Gavrichev K.S., Baldaev L.Kh., Mazilin I.V., Golushina L.N.* Thermodynamic properties of GdTaO₄ // *Inorg. Mater.* 2017. V.53. P. 728–733.
<https://doi.org/10.1134/S0020168517070147>

30. *Brunckova E., Kolev H., Kanuchova M.* X-ray Photoelectron Spectroscopy Study of Neodymium Niobate and Tantalite Precursor and Thin Films // *Surf. Interface Anal.* 2018. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1002/sia.6583>
31. *Siqueira K.P., Dias A.* Effect of the Processing Parameters on the Crystalline Structure of Lanthanide Orthotantalates // *Mater. Res.* 2014. V. 17(Suppl. 1). P. 167–173.
<https://doi.org/10.1590/S1516-14392013005000189>
32. *Stubičan V.S.* High-Temperature Transition in Rare-Earth Niobates and Tantalates // *J. Am. Ceram. Soc.* 1964. V. 47. P. 55–58.
<https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1964.tb15654.x>
33. *Thakare J.G., Pandey C., Mahapatra M.M., Mulik R.S.* Thermal Barrier Coatings—A State of the Art Review // *Met. Mater. Int.* 2020.
<https://doi.org/10.1007/s12540-020-00705-w>
34. *Leitner J., Vořka P., Sedmidubský D., Svoboda P.* Application of Neuman-Kopp Rule for the Estimation of Heat Capacity of Mixed Oxides // *Thermochim. Acta.* 2010. V. 497. P. 7–13.
<https://doi.org/10.1016/j.tca.2009.08.002>
35. *Ryumin M.A., Nikoiforova G.E., Tyurin A.V., Khoro-shilov A.V., Kondrat'eva O.N., Guskov V.N., Gavrichev K.S.* Heat capacity and Thermodynamic Functions of $\text{La}_2\text{Sn}_2\text{O}_7$ // *Inorg. Mater.* 2020. V. 56. P. 97–104.
<https://doi.org/10.1134/S00201685200101148>
36. *Wieser M.E.* Atomic Weights of the Elements 2005 (IUPAC Technical Report) // *Pure Appl. Chem.* 2006. V. 78. P. 2051–2066.
<https://doi.org/10.1351/pac200678112051>
37. *Kolomiets T.Yu., Tel'nova G.B., Ashmarin A.A., Chelpanov V.I., Solntsev K.A.* Synthesis and Sintering of Submicron Nd:YAG Particles Prepared from Carbonate Precursors // *Inorg. Mater.* 2017. V. 53. P. 874–882.
<https://doi.org/10.1134/s0020168517080076>
38. PDF № 01-074-6541
39. *Maier C.G., Kelley K.K.* An Equation for Representation of High Temperature Heat Content Data // *J. Am. Chem. Soc.* 1932. V. 54. P. 3243–3246.
<https://doi.org/10.1021/ja01347a029>
40. *Konings R.J.M., Beneš O., Kovács A. et al.* The Thermodynamic Properties of the f-Elements and Their Compounds. Part 2. The Lanthanide and Actinide Oxides // *J. Phys. Chem. Refer. Data.* 2014. V. 43. 013101.
<https://doi.org/10.1063/1.4825256>
41. *Jacob K.T., Shekhar C., Waseda Y.* An Update on the Thermodynamics of Ta_2O_5 // *J. Chem. Thermodyn.* 2009. V. 41. P. 748–753.
<https://doi.org/10.1016/j.jct.2008.12.006>