

Научная статья
УДК 546.832:546.284-31:546.655.4:54-31:53.091
doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.044

СИНТЕЗ ЦЕРИЙСОДЕРЖАЩИХ ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ СИЛИКАТА ГАФНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕХАНОАКТИВАЦИИ

Олег Алексеевич Кузьменков¹, Александр Михайлович Калинин²

^{1,2}*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева
Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия*

¹*o.kuzmenkov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7646-2058>*

²*a.kalinkin@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3668-8578>*

Аннотация

Изучены процессы, протекающие в ходе синтеза Ce-содержащих твёрдых растворов на основе силиката гафния твёрдофазным методом с применением механоактивации. Механоактивация смеси оксидов кремния, гафния и церия с мольным отношением $\text{SiO}_2 : \text{HfO}_2 : \text{CeO}_2 = 1 : 0,9 : 0,1$ проводилась в лабораторной планетарной мельнице АГО-2 при центробежном факторе 40 g в течение 10 мин. В работе применялись реактивные оксиды гафния и церия. В качестве кремнезёмсодержащего компонента использовались реактивный гидратированный кремнезём и кремнезём, полученный из шлака комбината «Печenganikel». При одинаковых условиях синтеза для обеих исходных композиций получены близкие результаты. С помощью рентгенофазового анализа показано, что после прокаливания механоактивированных смесей оксидов при температуре 1200–1400 °С основной фазой является HfSiO_4 (гафнон) с тетрагональной кристаллической решёткой, содержащий изоморфное включение церия. В качестве примесной фазы присутствует гафний, содержащий твёрдый раствор на основе диоксида церия (церианита). С помощью метода Ритвельда рассчитаны составы фаз в прокалённых смесях и составы полученных твёрдых растворов на основе закона Вегарда.

Ключевые слова:

гафнон, церианит, твердые растворы, твердофазный синтез, механоактивация

Благодарности:

статья выполнена при поддержке федерального бюджета по теме государственного задания Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья Кольского научного центра РАН № FMEZ-2023-0018.

Финансирование:

государственное задание по теме НИР № FMEZ-2023-0018.

Для цитирования:

Кузьменков О. А., Калинин А. М. Синтез церийсодержащих твёрдых растворов на основе силиката гафния с применением механоактивации // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2024. Т. 15, № 1. С. 269–275. doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.044.

Original article

SYNTHESIS CERIUM-CONTAINING SOLID SOLUTIONS BASED ON HAFNIUM SILICATE USING MECHANICAL ACTIVATION

Oleg A. Kuzmenkov¹, Alexandr M. Kalinkin²

^{1,2}*I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials
of the Kola Science Centre of RAS, Apatity, Russia*

¹*o.kuzmenkov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7646-2058>*

²*a.kalinkin@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3668-8578>*

Abstract

The processes occurring during the synthesis of Ce-containing solid solutions based on hafnium silicate by the solid-phase method using mechanical activation were studied. Mechanical activation of a mixture of silicon, hafnium and cerium oxides with a molar ratio of $\text{SiO}_2 : \text{HfO}_2 : \text{CeO}_2 = 1 : 0,9 : 0,1$ was carried out in a laboratory planetary mill AGO-2 at a centrifugal factor of 40 g for 10 min. Reactive hafnium and cerium oxides were used in this work. Reactive hydrated silica and silica obtained from the slag of the “Pechenganikel” plant were used as a silica-containing component. Under identical synthesis conditions, similar results were obtained for both starting compositions. Using X-ray diffraction analysis, it was shown that after calcination of mechanically activated mixtures of oxides at 1200–1400 °C, the main phase was

HfSiO₄ (hafnon) with a tetragonal crystal lattice, containing an isomorphous inclusion of cerium. A hafnium-containing solid solution based on cerium dioxide (cerianite) was present as an impurity phase. Using the Rietveld method, the compositions of phases in calcined mixtures were calculated, as well as the compositions of the resulting solid solutions based on Vegard's law.

Keywords:

hafnon, cerianite, solid solutions, solid-state synthesis, mechanical activation

Acknowledgements:

the article was supported by the federal budget on the topic of the state assignment of the Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials of the Kola Science Centre of RAS No. FMEZ-2023-0018.

Funding:

state assignment on the topic of research No. FMEZ-2023-0018.

For citation:

Kuzmenkov O. A., Kalinkin A. M. Synthesis cerium-containing solid solutions based on hafnium silicate using mechanical activation // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2024. Vol. 15, No. 1. P. 269–275. doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.044.

Силикат гафния (гафнон) HfSiO₄ изоструктурен циркону ZrSiO₄ и имеет тетрагональную структуру с пространственной группой $I4_1/amd$ [1], образует с цирконом твёрдые растворы [2]. Обычно он встречается как второстепенный компонент в природных цирконах [3] и реже как основная фаза в природных комплексах, где циркон является второстепенной фазой [4]. Благодаря своим термическим и электрофизическим свойствам (стойкость к термическому удару, низкий коэффициент расширения в широком диапазоне температур, высокая теплопроводность, низкая относительная диэлектрическая проницаемость и низкие диэлектрические потери) [5, 6] гафнон является перспективным высокоэффективным термостойким материалом [5], используется в полупроводниковых приборах [7] или в качестве микроволновой подложки для электронной передачи данных [6]. Для получения HfSiO₄ используют твердофазный метод [2, 6, 8–12], золь-гель метод [5, 12, 13], синтез в солевом расплаве [1], физическое осаждение из газовой фазы [14] и гидротермальный синтез [15, 16].

Кроме того, поскольку керамика цирконового типа (например, ZrSiO₄ и HfSiO₄) изоструктурна силикатам актиноидов A⁴⁺SiO₄, а также благодаря своей высокой химической стабильности, она была предложена в качестве потенциальных актинид-специфичных матриц для иммобилизации радионуклидов, связанных с высокоактивными ядерными отходами и, более конкретно, избытком плутония, полученного от демонтированного ядерного оружия [17–19]. В частности, соединения (Hf, Pu)SiO₄ были получены Б. Е. Бураковым с сотрудниками золь-гель методом [20]. Эти эксперименты показали, что содержание плутония в таких материалах не может превышать 7 мас. %. Из-за высокой радиоактивности и опасности работы с плутонием в качестве его аналога используют церий, так как эти элементы имеют очень близкие ионные радиусы: $R(\text{Pu}^{4+}) = 0,96 \text{ \AA}$, $R(\text{Ce}^{4+}) = 0,97 \text{ \AA}$ [21].

Цель данного исследования — синтез церийсодержащих твёрдых растворов на основе гафнона твердофазным методом с применением предварительной механоактивации (МА) и определение их состава.

Материалы и методы

Для синтеза применялись оксиды гафния HfO₂ и церия CeO₂ квалификации х. ч. В качестве кремнезёмсодержащего компонента использовались реактивный аморфный SiO₂·xH₂O (удельная поверхность — 292 м²/г, содержание H₂O — 17,07 мас. %) и гидратированный кремнезём, полученный из шлака комбината «Печенганикель» (удельная поверхность — 710 м²/г, содержание H₂O — 35,62 мас. %) [22]. Мольное соотношение оксидов в обеих композициях составляло: SiO₂ : HfO₂ : CeO₂ = 1 : 0,9 : 0,1. Механоактивацию выполняли в лабораторной планетарно-шаровой мельнице АГО-2 при центробежном факторе 40 g в течение 10 мин. Эксперимент проводился с использованием стальных шаров и барабанов, при этом загрузка в барабаны осуществлялась исходя из соотношения вещество : шары = 1 : 20. На втором этапе синтеза смеси после МА прокаливали при различных температурах в интервале от 1000 до 1400 °С в течение 3 ч. Прокаливание образцов проводилось в электропечи SNOL 6.7/1300 и RHF-1600. Рентгенофазовый анализ (РФА) проводили на дифрактометре Rigaku Miniflex-600 (Cu-Kα-излучение). Съёмка рентгенограмм проводилась со скоростью 2° (2θ) в минуту. Для моделирования профилей пиков использовали метод фундаментальных

параметров [23]. Параметры решёток и массовое содержание соединений рассчитывали с помощью программного обеспечения Rigaku SmatLab Studio II. Удельную поверхность определяли методом низкотемпературной адсорбции азота с помощью анализатора Flow-Sorb II 2300 (Micromeritics).

Результаты и обсуждение

Рентгенограммы механоактивированных смесей после прокаливания представлены на рис. 1. Из приведённых данных видно, что рефлексы диоксида гафния полностью исчезают после термообработки при 1200 °C и выше, при этом основной фазой является гафнон. Также следует отметить, что во всех рентгенограммах присутствуют пики, соответствующие церианиту CeO_2 (куб.).

Иммобилизация радиоактивного оксида плутония, а в данном случае оксида церия, происходит за счёт вхождения церия в кристаллическую решётку силиката гафния. Согласно полученным данным РФА, при прокаливании смесей образуются Ce-содержащие смеси на основе гафнона и Hf-содержащие твёрдые растворы на основе CeO_2 (церианита). На рис. 2 представлены основные пики гафнона (200) и церианита (111) в рентгенограммах прокаленных образцов. По отношению к пику (200) HfSiO_4 (PDF № 04-010-0519) соответствующие рефлексы для синтезированных образцов находятся в области меньших углов 2θ , то есть размер элементарной ячейки гафнона в образцах больше по сравнению со справочными значениями для 100 % HfSiO_4 . Поскольку радиус Hf^{4+} (0,78 Å) меньше радиуса Ce^{4+} (0,97 Å), то это указывает на образование твёрдых растворов $(\text{Hf,Ce})\text{SiO}_4$. В случае церианита ситуация обратная — пики (111) находятся по правую сторону от такого же пика 100 % CeO_2 (PDF № 00-067-0123). Это позволяет сделать вывод об изоморфном замещении церия гафнием в церианите. Отчётливо видно, что при увеличении температуры прокаливания наблюдается смещение пиков (200) и (111) в сторону увеличения угла 2θ , что свидетельствует об уменьшении параметров решётки гафнона и церианита, то есть происходит снижение концентрации Ce в гафноне и обогащение церианита гафнием.

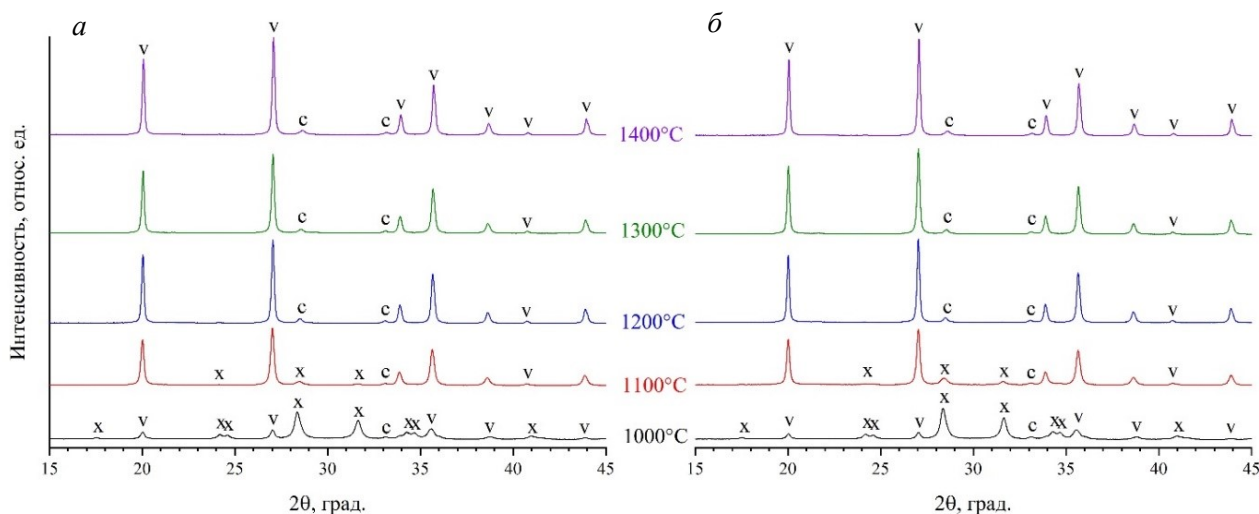


Рис. 1. Рентгенограммы механоактивированных смесей $\text{SiO}_2 + \text{HfO}_2 + \text{CeO}_2$ после термической обработки в течение 3 ч при различных температурах: *a* — SiO_2 реактивный; *б* — SiO_2 из шлака. Обозначения твёрдых фаз: *v* — HfSiO_4 тетраг. (PDF № 04-010-0519); *c* — CeO_2 куб. (PDF № 00-067-0123); *x* — HfO_2 монокл. (PDF № 00-043-1017)

На основе вычисленных по методу Ритвельда параметров решёток гафнона и церианита по закону Вегарда было рассчитано содержание церия в гафноне и гафния в церианите (рис. 3). В образцах, прокалённых при 1200 и 1300 °C, концентрация Ce в гафноне практически постоянна для двух композиций и находится в диапазоне 2,3–2,7 ат. %. При повышении температуры отжига до 1400 °C содержание Ce в гафноне падает до 1,0–1,3 ат. %. Для церианита наблюдается монотонный рост концентрации Hf от 1 до 7–8 ат. % с повышением температуры от 1200 до 1400 °C (см. рис. 3).

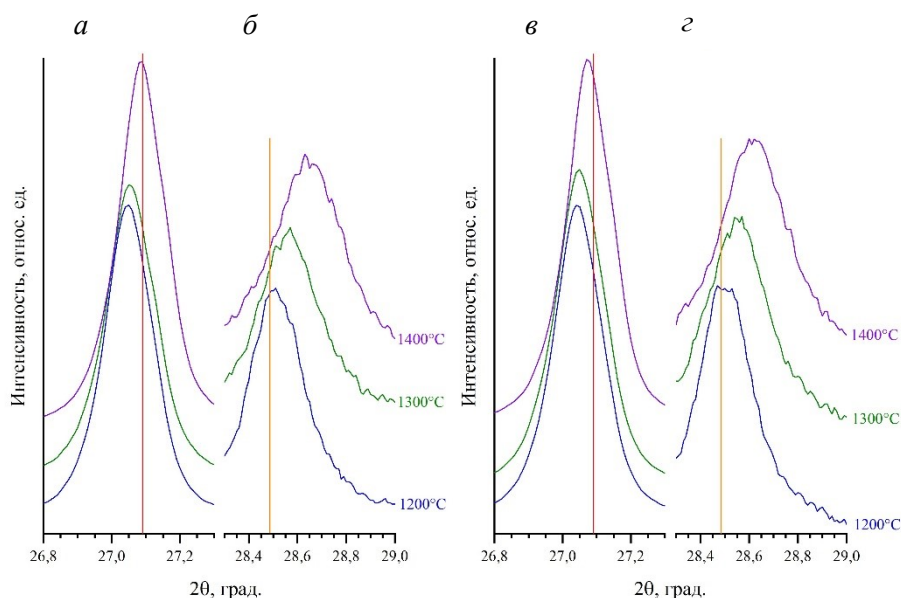


Рис. 2. Основные пики гафнона (200) и церианита (111), образцов, прокалённых при 1200, 1300 и 1400 °С: *а* — SiO_2 реактивный, пики (200); *б* — SiO_2 реактивный, пики (111); *в* — SiO_2 из шлака, пики (200); *г* — SiO_2 из шлака, пики (111). Вертикальными красными и оранжевыми линиями изображены положения основных пиков (200) HfSiO_4 (PDF № 04-010-0519) и (111) CeO_2 (PDF № 00-067-0123) соответственно

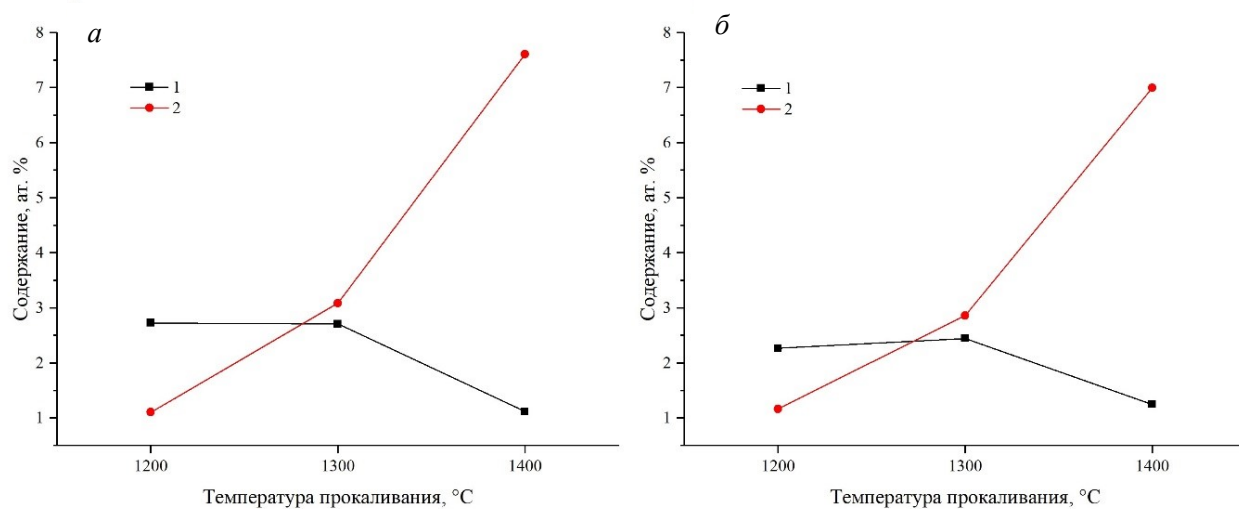


Рис. 3. Содержание Се в гафноне (1) и Hf в церианите (2) в зависимости от температуры прокаливания МА-смесей: *а* — SiO_2 реактивный; *б* — SiO_2 из шлака

Следует отметить, что во всех прокалённых МА-смесях, помимо гафнона и церианита, содержалось 1–2 мас. % гематита. Гематит появляется в результате окисления металлического железа, образовавшегося за счёт самоистирания шаров и барабанов мельницы при МА. Ниже приводятся содержания фаз в предположении отсутствия гематита, который не участвует в образовании твёрдых растворов. Значения содержания церианита в образцах, рассчитанные по методу Ритвельда, как функция температуры прокаливания представлены на рис. 4. Для композиций с реактивным кремнезёмом и кремнезёмом из шлака эти зависимости весьма близки.

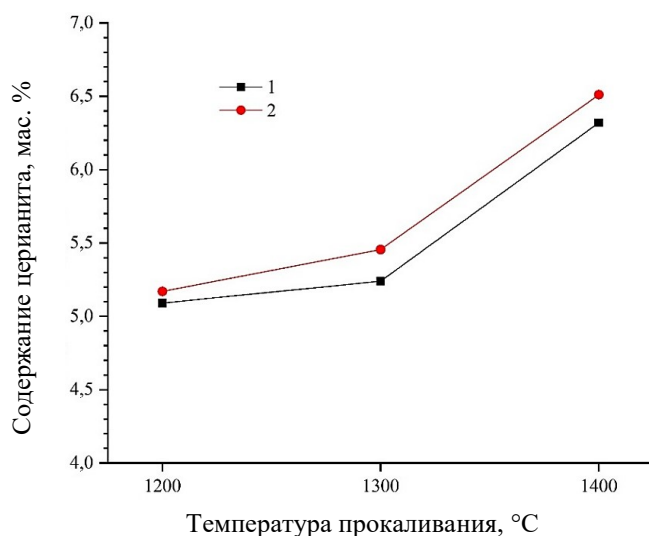


Рис. 4. Рассчитанные по методу Ритвельда содержания церианита в образцах в зависимости от температуры прокаливания МА-смесей: 1 — SiO_2 реактивный; 2 — SiO_2 из шлака

В интервале температур 1200–1300 °C доля церианита меняется незначительно и составляет 5,1–5,5 мас. %. С ростом температуры до 1400 °C содержание церианита повышается до 6,3–6,5 мас. %.

Выводы

По результатам проведённых исследований можно сделать следующие выводы.

Синтезированы Се-содержащие твёрдые растворы на основе силиката гафния (гафнона) твердофазным методом с применением предварительной МА-смеси оксидов кремния (реактивного и выделенного из шлаков цветной металлургии), оксидов гафния и церия в центробежно-планетарной мельнице АГО-2 в течение 10 мин. Результаты, полученные для композиций с реактивным кремнезёмом и кремнезёмом из шлака, оказались весьма близки. Это указывает на

возможность применения последнего для синтеза матриц на основе гафнона для иммобилизации радиоактивных отходов. По данным РФА, показано, диоксид гафния полностью реагирует с кремнезёмом после термообработки МА-смеси в течение 3 ч при 1200 °C и выше. При этом основной фазой является Се-содержащий гафнон $(\text{Hf,Ce})\text{SiO}_4$, и в заметно меньшем количестве присутствует Hf-содержащий церианит $(\text{Ce,Hf})\text{O}_2$. Наибольшая для условий проведённых экспериментов концентрация Се в гафноне соответствует области температур прокаливания 1200–1300 °C (2,3–2,7 ат. %), что согласуется с данными работы [11]. С ростом температуры она падает. Содержание церианита с увеличением температуры отжига от 1200 до 1400 °C имеет тенденцию к росту (от ~5 до ~6,5 мас. %).

Список источников

1. Speer J. A., Cooper B. Crystal structure of synthetic hafnon, HfSiO_4 , comparison with zircon and the actinide orthosilicates // *Am. Mineral.* 1982. Vol. 67. P. 804–808.
2. Solution properties of the system ZrSiO_4 - HfSiO_4 : a computational and experimental study / A. Cota [et al.] // *J. Physical Chemistry C*. 2013. Vol. 117, Iss. 19. P. 10013–10019.
3. Hoskin P. W. O., Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis // *Rev. Mineral. Geochem.* 2003. Vol. 53, Is. 1. P. 27–62.
4. Neves J. M. C., Nunes J. E. L., Sahama T. G. High hafnium members of the zircon-hafnon series from the granite pegmatites of Zambézia, Mozambique // *Contr. Mineral. and Petrol.* 1974. Vol. 48. P. 73–80.
5. Kanno Y. Effect of dopants on the formation of hafnon via a sol-gel route // *J. Mater. Sci. Lett.* 1993. Vol. 12. P. 1807–1809.
6. Hafnium silicate: a new microwave dielectric ceramic with low thermal expansivity / J. Varghese [et al.] // *Dalton Trans.* 2015. Vol. 44. P. 5146–5152.
7. Manoun B., Downs R. T., Saxena S. K. A high-pressure Raman spectroscopic study of hafnon, HfSiO_4 // *Am. Mineral.* 2006. Vol. 91, No. 11–12. P. 1888–1892.
8. A transient liquid-like phase in the displacement cascades of zircon, hafnon and thorite / A. Meldrum [et al.] // *Nature* 1998. Vol. 395. P. 56–58.
9. Radiation effects in zircon, hafnon and thorite: implications for Pu disposal / A. Meldrum [et al.] // *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 1998. Vol. 540. P. 395–400.
10. Radiation effect in zircon / R. C. Ewing [et al.] // *Rev. Mineral. Geochem.* 2003. P. 387–426.

11. Synthesis and study of ^{239}Pu -doped ceramics based on zircon, $(\text{Zr,Pu})\text{SiO}_4$, and hafnon, $(\text{Hf,Pu})\text{SiO}_4$ / B. E. Burakov [et al.] // *Mater. Res. Soc. Proc.* 2000. Vol. 663. P. 307–313.
12. Ramakrishnan S. S., Gokhale K. V., Subbarao E. C. Solid solubility in the system zircon-hafnon // *Mater. Res. Bull.* 1969. Vol. 4, Iss. 5. P. 323–327.
13. Salt D. J., Hornung G. Synthesis and X-ray study of hafnium silicate // *J. Am. Ceram. Soc.* 1967. Vol. 50, Iss. 10. P. 549–550.
14. Nuclear quadrupole interaction in hafnon / A. Vasquez [et al.] // *Rev. Bras. Fis.* 1973. Vol. 3. P. 311–315.
15. O'Neill H. St. C. Free energy of formation of zircon and hafnon // *Am. Mineral.* 2006. Vol. 91. P. 1134–1141.
16. PAC study in the $\text{HfO}_2\text{--SiO}_2$ system / C. Y. Chain [et al.] // *J. Alloys Compd.* 2010. Vol. 495. P. 527–531.
17. Jaeger H., McBride S. P. Perturbed angular correlation measurement of the electric field gradient at ^{181}Ta in ZrSiO_4 and HfSiO_4 // *Hyperfine Interact.* 2007. Vol. 177. P. 51–56.
18. Hafnium silicate formation by ultra-violet/ozone oxidation of hafnium silicide / P. Punchaipetch [et al.] // *Thin Solid Films.* 2003. Vol. 425. P. 68–71.
19. McNeil A. G., Linnen R. L., Flemming R. L. Hydrothermal synthesis of columbite-(Mn), tantalite-(Mn), hafnon and zircon at 800–850 °C and 200 MPa // *Can. Mineral.* 2015. Vol. 53. P. 1073–1081.
20. Soft hydrothermal synthesis of hafnon, HfSiO_4 / P. Estevenon [et al.] // *Cryst. Growth Des.* 2020. Vol. 20. P. 1820–1828.
21. Phase and microstructural evolutions of the $\text{CeO}_2\text{--ZrO}_2\text{--SiO}_2$ system synthesized by the sol-gel method / H. Tu [et al.] // *Ceram. Int.* 2015. Vol. 41, Iss. 6. P. 8046–8050.
22. Deep Processing of Dump Slag from the Copper-Nickel Industry / A. G. Kasikov [et al.] // *Metals.* 2023. Vol. 13, No. 7. P. 1265.
23. Cheary R. W., Coelho A. A fundamental parameters approach to X-ray line-profile fitting // *J. Appl. Cryst.* 1992. Vol. 25. P. 109–121.

References

1. Speer J. A., Cooper B. Crystal structure of synthetic hafnon, HfSiO_4 , comparison with zircon and the actinide orthosilicates. *American Mineralogist*, 1982, Vol. 67, pp. 804–808.
2. Cota A., Burton B. P., Chaín P., Pavón E., Alba M. D. Solution properties of the system $\text{ZrSiO}_4\text{--HfSiO}_4$: a computational and experimental study. *Journal of Physical Chemistry C*, 2013, Vol. 117, Iss. 19, pp. 10013–10019.
3. Hoskin P. W., Schaltegger U. the composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, Vol. 53, Iss. 1, pp. 27–62.
4. Neves J. M. C., Nunes J. E. L., Sahama T. G. High hafnium members of the zircon–hafnon series from the granite pegmatites of Zambézia, Mozambique. *Contrib Mineral Petrol*, 1974, Vol. 48, pp. 73–80.
5. Kanno Y. Effect of dopants on the formation of hafnon via a sol-gel route. *Journal of Materials Science Letters*, 1993, Vol. 12, pp. 1807–1809.
6. Varghese J., Joseph T., Surendran K. P., Rajan T. P., Sebastian M. T. Hafnium silicate: a new microwave dielectric ceramic with low thermal expansivity. *Dalton Transactions*, 2015, Vol. 44, pp. 5146–5152.
7. Manoun B., Downs R.T., Saxena S. K. A high-pressure Raman spectroscopic study of hafnon, HfSiO_4 . *American Mineralogist*, 2006, Vol. 91, No. 11–12, pp. 1888–1892.
8. Meldrum A., Zinkle S. J., Boatner L. A., Ewing R. C. A transient liquid-like phase in the displacement cascades of zircon, hafnon and thorite. *Nature*, 1998, Vol. 395, pp. 56–58.
9. Meldrum A., Zinkle S. J., Boatner L.A., Wu M., Mu R., Ueda A., Henderson D. O., Ewing R. C. Radiation effects in zircon, hafnon and thorite: implications for Pu disposal. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 1998, Vol. 540, pp. 395–400.
10. Ewing R. C., Meldrum A., Wang L., Weber W. J., Corrales L. R. Radiation effect in zircon. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, pp. 387–426.

11. Burakov B. E., Anderson E. B., Zamoryanskay M. V., Yagovkina M. A., Strykanova E. E., Nikolaeva E. V. Synthesis and study of ^{239}Pu -doped ceramics based on zircon, $(\text{Zr,Pu})\text{SiO}_4$, and hafnon, $(\text{Hf,Pu})\text{SiO}_4$. Materials Research Society Symposium Proceedings, 2000, Vol. 663, pp. 307–313.
12. Ramakrishnan S. S., Gokhale K. V., Subbarao E. C. Solid solubility in the system zircon-hafnon. Materials Research Bulletin, 1969, Vol. 4, Iss. 5, pp. 323–327.
13. Salt D. J., Hornung G. Synthesis and X-ray study of hafnium silicate. Journal of the American Ceramic Society, 1967, Vol. 50, Iss. 10, pp. 549–550.
14. Vasquez A., Rodgers J. D., Maciel A., Fraga E. R. Nuclear quadrupole interaction in hafnon. Brazilian Journal of Physical Activity and Health, 1973, Vol. 3, pp. 311–315.
15. O'Neill H. St. C. Free energy of formation of zircon and hafnon. American Mineralogist, 2006, Vol. 91, pp. 1134–1141.
16. Chain C. Y., Damonte L. C., Ferrari S., Muñoz E., Rodríguez Torres C., Pasquevich A. F. PAC study in the $\text{HfO}_2\text{--SiO}_2$ system. Journal of Alloys and Compounds, 2010, Vol. 495, pp. 527–531.
17. Jaeger H., McBride S. P. Perturbed angular correlation measurement of the electric field gradient at ^{181}Ta in ZrSiO_4 and HfSiO_4 . Hyperfine Interactions, 2007, Vol. 177, pp. 51–56.
18. Punchaipetch P., Pant G., Quevedo-Lopez M., Zhang H., El-Bouanani M., Kim M. J., Wallace R. M., Gnade B. E. Hafnium silicate formation by ultra-violet/ozone oxidation of hafnium silicide. Thin Solid Films, 2003, Vol. 425, pp. 68–71.
19. McNeil A. G., Linnen R. L., Flemming R. L. Hydrothermal synthesis of columbite-(Mn), tantalite-(Mn), hafnon and zircon at 800–850 °C and 200 MPa. Canadian Mineralogist, 2015, Vol. 53, pp. 1073–1081.
20. Estevenon P., Kaczmarek T., Rafiuddin M.R., Welcomme E., Szenknect S., Mesbah A., Moisy P., Poinssot C., Dacheux N. Soft hydrothermal synthesis of hafnon, HfSiO_4 . Crystal Growth & Design, 2020, Vol. 20, pp. 1820–1828.
21. Tu H., Duan T., Ding Y., Lu X., Tang Y. Phase and microstructural evolutions of the $\text{CeO}_2\text{--ZrO}_2\text{--SiO}_2$ system synthesized by the sol-gel method. Ceramics International, 2015, Vol. 41, Iss. 6, pp. 8046–8050.
22. Kasikov A. G., Shchelokova E. A., Timoshchik O. A., Semushin V. V. Deep Processing of Dump Slag from the Copper-Nickel Industry. Metals, 2023, Vol. 13, No. 7, pp. 1265.
23. Cheary R. W., Coelho A. A fundamental parameters approach to X-ray line-profile fitting. Journal of Applied Crystallography, 1992, Vol. 25, pp. 109–121.

Информация об авторах

О. А. Кузьменков — аспирант;

А. М. Калинин — доктор химических наук, главный научный сотрудник.

Information about the authors

O. A. Kuzmenkov — Postgraduate Student;

A. M. Kalinkin — Dr. Sc. (Chemistry), Principal Researcher.

Статья поступила в редакцию 08.04.2024; одобрена после рецензирования 10.04.2024; принята к публикации 12.04.2024.
The article was submitted 08.04.2024; approved after reviewing 10.04.2024; accepted for publication 12.04.2024.