

Научная статья
УДК 546.271, 546.93
doi: 10.37614/2949-1215.2023.14.4.002

ВЛИЯНИЕ ГЕКСАБОРИДА КАЛЬЦИЯ НА ФАЗООБРАЗОВАНИЕ В СИСТЕМАХ ДИБОРИД ГАФНИЯ — ИРИДИЙ И ДИБОРИД ТАНТАЛА — ИРИДИЙ

Виктор Васильевич Лозанов¹, Наталья Ивановна Бакланова²

^{1,2}*Институт химии твёрдого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук,
Новосибирск, Россия*

¹*lozanov.25@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1169-8224>*

²*baklanova@solid.nsc.ru*

Аннотация

Исследовано влияние гексаборида кальция на взаимодействие HfB_2 и TaB_2 с иридием в зависимости от температуры и соотношения исходных реагентов. Показано, что замена половины диборида переходного металла на CaB_6 , а также повышение температуры приводят к значительному изменению фазового состава продуктов. Во всех смесях наблюдается образование кальций-иридий-содержащих фаз. Введение CaB_6 подавляет образование некоторых тройных боридов гафния и тантала, а также интерметаллида тантала. Результат необходимо учитывать при разработке высокотемпературных материалов.

Ключевые слова:

иридий, гексаборид кальция, тройные бориды, высокотемпературный синтез

Благодарности:

авторы выражают благодарность кандидату химических наук А. В. Ухиной, Т. А. Борисенко, Я. А. Никифорову и И. Б. Орехову. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-79-00019).

Для цитирования:

Лозанов В. В., Бакланова Н. И. Влияние гексаборида кальция на фазообразование в системах диборид гафния — иридий и диборид тантала — иридий // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 4. С. 15–20. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.4.002

Original article

THE EFFECT OF CALCIUM HEXABORIDE ON THE PHASE FORMATION IN THE HAFNIUM DIBORIDE — IRIDIUM AND TANTALUM DIBORIDE — IRIDIUM SYSTEMS

Victor V. Lozanov¹, Natalia I. Baklanova²

^{1,2}*Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia*

¹*lozanov.25@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1169-8224>*

²*baklanova@solid.nsc.ru*

Abstract

The effect of calcium hexaboride on the interaction of HfB_2 and TaB_2 with iridium was studied as a function of temperature and the ratio of initial reagents. It is shown that the replacement of half of the transition metal diboride by CaB_6 , as well as an increase in temperature, lead to a significant change in the phase composition of the products. In all mixtures, the formation of calcium-iridium-containing phases is observed. The introduction of CaB_6 suppresses the formation of some hafnium and tantalum ternary borides, as well as tantalum intermetallic. The result must be taken into account when developing high-temperature materials.

Keywords:

iridium, calcium hexaboride ternary borides, high temperature synthesis

Acknowledgments:

the authors are grateful to A. V. Ukhina (PhD), T. A. Borisenko, Ya. A. Nikiforov and I. B. Orekhov. This work was supported by the Russian Science Foundation (grant no. 22-79-00019).

For citation:

Lozanov V. V., Baklanova N. I. The effect of calcium hexaboride on the phase formation in the hafnium diboride — iridium and tantalum diboride — iridium systems // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 4. P. 15–20. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.4.002

Введение

Тугоплавкие бориды, включая дибориды тантала и гафния в сочетании с иридием, представляют большой интерес для современного материаловедения в качестве высокотемпературных материалов,

устойчивых к окислению в условиях воздействия тепловых потоков высокой мощности на воздухе [1–3]. Известно, что в сильно неравновесных условиях происходит диссипация тепловой энергии различными способами, например, за счёт излучения, термоэлектронной эмиссии и т. п. Теоретически повысить устойчивость любого материала к тепловым потокам возможно, если усилить один из путей отвода тепла [3–5]. Например, снижение работы выхода электронов (ϕ) материала увеличит диссипацию тепловой энергии за счёт усиления эффекта термоэлектронной эмиссии. В данной работе в качестве дополнительного компонента с низким значением ϕ предлагается использовать гексаборид кальция ($\phi = 2,86$ эВ, $T_{\text{пл}} = 2235$ °С).

Ранее было показано, что взаимодействие иридия с диборидом гафния или диборидом тантала приводит к формированию продуктов, качественный и количественный фазовые составы которых меняются в зависимости от температуры и исходного соотношения диборида металла и иридия [1, 2, 6, 7]. К сожалению, сведения о системах CaB_6 — HfB_2 — Ir и CaB_6 — TaB_2 — Ir отсутствуют в литературе. В качестве первого шага на пути исследования этих систем мы поставили цель изучить влияние добавок гексаборида кальция на фазовый состав продуктов, образующихся в системах HfB_2 — Ir и TaB_2 — Ir в интервале температур 1000–1600 °С.

Материалы и методы

Были подготовлены смеси порошков в мольном соотношении $(\text{MB}_2 + \text{CaB}_6):\text{Ir} = 1 : 1$ и $1 : 3$, где MB_2 — HfB_2 или TaB_2 . Соотношение между MB_2 и CaB_6 составляло $1 : 1$. Для сравнения также были приготовлены смеси $\text{MB}_2 : \text{Ir}$ в соотношении $1 : 1$ и $1 : 3$. Термообработка смесей была проведена в высоковакуумной ($\sim 10^{-5}$ торр) печи СНВЭ-1,7.3.1,7/20 (ООО «Призма», город Искитим, Россия). Смеси загружали в тигли из терморасширенного графита и нагревали до заданной температуры в интервале 1000–1600 °С с шагом 100 °С в течение 1 ч. После термообработки образцы перетирались в агатовой ступке. Учитывая высокую твёрдость продуктов реакции, нельзя исключать присутствие диоксида кремния в продуктах после перетирания в ступке [8]. Дифрактограммы продуктов реакции регистрировались на дифрактометре D8 Advance (Bruker, USA) и обрабатывались полнопрофильным методом Ритвелда с использованием программы TOPAS 4.2 (Bruker, USA). Для идентификации фаз использовали базу данных ICSD для HfB_2 (# 44315), TaB_2 (# 44588), Ir (# 64922), $\text{IrB}_{0,9}$ (# 42628), $\text{IrB}_{1,1}$ (# 24364), HfIr_3B_4 (# 1518), TaIr_3 (# 104566). Данные о кристаллических структурах $\text{HfIr}_3\text{B}_{0,45}$, CaB_6 , TaIr_2B_2 , $\text{Hf}_2\text{Ir}_5\text{B}_2$ были взяты из литературных источников [2, 9–11].

Результаты

Ранее нами было изучено взаимодействие в системе HfB_2 — Ir при различных соотношениях диборида гафния и иридия [2]. Было показано, что фазовый состав продуктов значительно меняется при повышении температуры от 1200 до 1300 °С. Так, при 1300 °С формируются тройные боридные фазы $\text{Hf}_2\text{Ir}_5\text{B}_2$, HfIr_3B_4 , $\text{HfIr}_{2,1}\text{B}_{1,3}$ и $\text{HfIr}_{5,7}\text{B}_{2,7}$ (последняя появляется только в смеси с соотношением $1 : 3$). Нами показано, что рефлексы фазы $\text{HfIr}_{2,1}\text{B}_{1,3}$ удовлетворительно описываются ($R\text{-Bragg} = 4,616$), если предположить, что элементарная ячейка этой фазы построена на основе $\text{Hf}_2\text{Ir}_5\text{B}_2$ при частичном замещении атома иридия в общей позиции $2c$ на атомы бора (рис. 1, таблица). Параметры элементарной ячейки равны соответственно $a = 5,6196(2)$ Å, $b = 11,5815(4)$ Å, $c = 3,7139(2)$ Å.

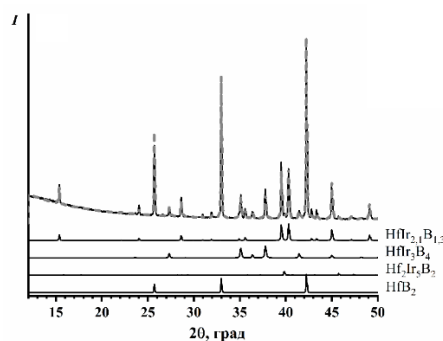


Рис. 1. Рентгенофазовый анализ продуктов смеси $\text{HfB}_2 : \text{Ir} = 1 : 1$ после прогрева при 1300 °С

Уточнённые координаты атомов для структуры борида $\text{HfIr}_{2,1}\text{B}_{1,3}$

Атом	Позиция	x	y	z	s. o. f
Ir1	4g	-0,0021(23)	0,2503(14)	1	1
Ir2	4h	0,2453(29)	0,36549(24)	1/2	1
Ir3	2c	0	1/2	0	0,2
Hf1	4h	0,7407(23)	0,39846(27)	1/2	1
B1	4g	-0,111	0,059	1	1
B2	2c	0	1/2	0	0,8

При добавлении в эту систему CaB_6 в смесях 1 : 1 и 1 : 3 уже при 1000 °С наблюдаются более интенсивные по сравнению с системой сравнения рефлексы $\text{IrB}_{0,9}$, $\text{IrB}_{1,1}$ и, вероятно, кальцийсодержащая фаза (рефлексы отмечены * на рис. 2, а). Повышение температуры до 1100–1200 °С приводит к исчезновению рефлексов фазы $\text{IrB}_{0,9}$, иридия и рефлексов, отмеченных *, и появлению рефлексов фаз HfIr_3B_4 и CaIr_4B_4 (рис. 2, а). Отметим, что рефлексы фазы CaIr_4B_4 полностью описываются в предположении, что структура аналогична известному ранее соединению LaIr_4B_4 (ICSD #100711). В интервале температур 1300–1500 °С качественный фазовый состав смесей 1 : 1 и 1 : 3 не меняется, меняются только соотношения фаз между собой. Можно напомнить, что в системе сравнения HfB_2 –Ir в этом температурном интервале наблюдался набор боридных фаз $\text{Hf}_2\text{Ir}_3\text{B}_2$, HfIr_3B_4 , $\text{HfIr}_{2,1}\text{B}_{1,3}$ и $\text{HfIr}_{5,7}\text{B}_{2,7}$ [2]. При 1600 °С появляются различия между смесями 1 : 1 и 1 : 3, которые заключаются в исчезновении рефлексов фазы CaIr_4B_4 в продуктах смеси 1 : 1 (см. рис. 2, б). Отметим, что в интервале температур 1300–1600 °С относительное содержание фазы CaIr_4B_4 стабильно снижается, а фазы HfIr_3B_4 — увеличивается, в результате чего можно осторожно предположить подавление реакций, ведущих к образованию CaIr_4B_4 . Колебания в относительном содержании фаз HfB_2 и CaB_6 также наблюдаются, однако изменения в их относительном содержании не столь существенны (HfB_2 уменьшается с 10,5 до 6,9 %, а CaB_6 увеличивается с 39,4 до 48,4 % в диапазоне 1300–1400 °С, а затем немного снижается до 41 %). Малые изменения в относительном содержании боридов HfB_2 и CaB_6 могут быть связаны с большой погрешностью оценки методом рентгенофазового анализа компонентов с сильно различающейся плотностью ($\rho(\text{CaB}_6) = 2,44 \text{ г/см}^3$, $\rho(\text{HfB}_2) = 11,16 \text{ г/см}^3$, $\rho(\text{CaIr}_4\text{B}_4) = 12,43 \text{ г/см}^3$, $\rho(\text{HfIr}_3\text{B}_4) = 15,41 \text{ г/см}^3$, $\rho(\text{IrB}_{1,1}) = 16,74 \text{ г/см}^3$). Вследствие высокой плотности иридийсодержащих продуктов глубина проникновения рентгеновского излучения в вещество ограничивается единицами микрометров, что не позволяет оценить состав по всему объёму порошкового продукта. Также следует отметить, что при 1600 °С в продуктах реакции становятся различимыми малоинтенсивные рефлексы борида иридия $\text{IrB}_{1,35}$, который ранее в системе HfB_2 –Ir не наблюдался.

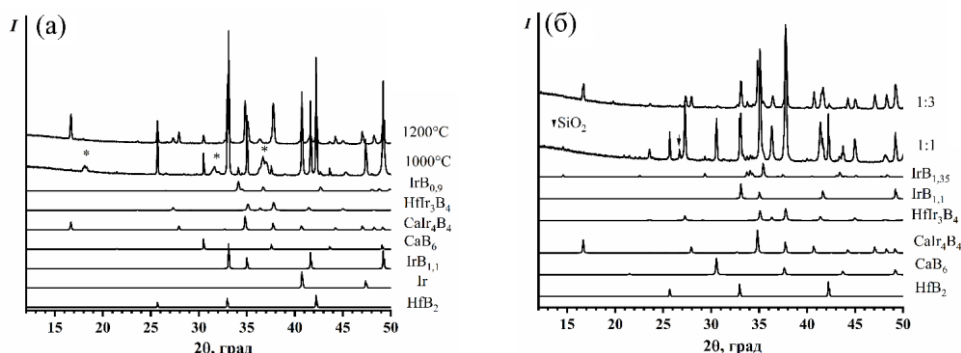


Рис. 2. Рентгенофазовый анализ продуктов смеси $(\text{HfB}_2 + \text{CaB}_6) : \text{Ir} = 1 : 1$ после прогрева при 1000 и 1200 °С (а), а также смесей 1 : 1 и 1 : 3 после прогрева при 1600 °С (б)

Рассмотрим фазообразование во второй системе сравнения — TaB_2 — Ir, соотношения $\text{TaB}_2 : \text{Ir} = 1 : 1$ и 1 : 3. Взаимодействие иридия с TaB_2 при 1000 °С приводит к появлению фазы $\text{IrB}_{0,9}$ (рис. 3, а, б). С повышением температуры до 1200 °С на рентгенограмме появляются рефлексы фаз TaIr_2B_2 , $\text{IrB}_{1,1}$ и TaIr_3 (смесь 1 : 1). Интересно отметить, что пики TaB_2 фазы в рентгенограмме можно отнести к элементарным ячейкам с двумя различными параметрами: $a = 3,094 \text{ Å}$, $c = 3,234 \text{ Å}$ и $a = 3,077 \text{ Å}$, $c = 3,270 \text{ Å}$

(расщепление рефлексов TaB_2 на рис. 3, а). Это наводит на мысль об изменении состава TaB_2 фазы в пределах области гомогенности и формировании твёрдых растворов на основе TaB_2 . Литературные данные подтверждают это предположение [12, 13]. В то же время в продуктах смеси 1 : 3 после термообработки при 1200 °С наблюдаются только $\text{IrB}_{0,9}$ и TaIr_3 . При увеличении температуры до 1300 °С в продуктах взаимодействия в смесях 1 : 1 и 1 : 3 наблюдаются фазы TaIr_2B_2 , $\text{IrB}_{1,1}$ и TaIr_3 , а также в небольших количествах непрореагировавший TaB_2 . Количественный РФА показывает, что повышение температуры приводит к изменению соотношения между фазами. Так, содержание фаз TaIr_3 и $\text{IrB}_{1,1}$ увеличивается, а содержание тройного борида TaIr_2B_2 уменьшается.

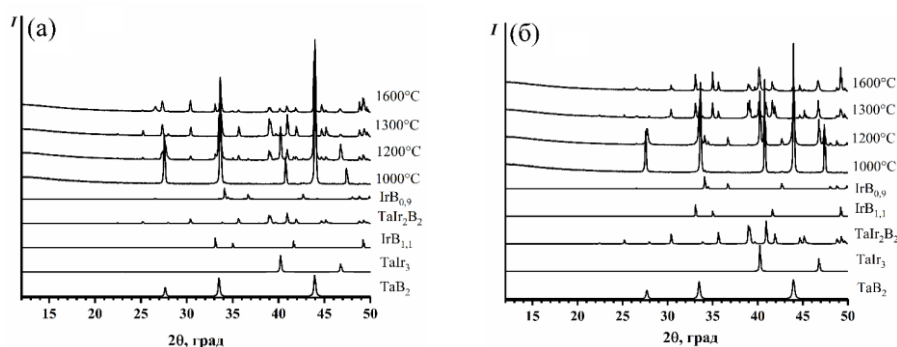


Рис. 3. Рентгенофазовый анализ продуктов смеси с соотношением $\text{TaB}_2 : \text{Ir} = 1 : 1$ (а), $1 : 3$ (б)

Добавление в систему CaB_6 приводит к некоторым изменениям в рентгенограммах продуктов, полученных при 1000 °С. Так, наблюдаются дополнительные по сравнению с системой сравнения рефлексы, которые можно отнести к $\text{IrB}_{1,1}$ и TaIr_3 . Кроме этого, присутствует ряд рефлексов при $2\theta \sim 18,3, 31,6, 36,9^\circ$ (рис. 4, а), которые наблюдались в продуктах для гафниевого аналога ($\text{HfB}_2 + \text{CaB}_6$) : Ir (обозначены как * на рис. 2, а). Увеличение температуры до 1200 °С приводит к появлению CaIr_4B_4 фазы и исчезновению $\text{IrB}_{0,9}$ и TaIr_3 (только в смеси 1 : 3 небольшое количество TaIr_3 всё ещё присутствует). В диапазоне температур 1300–1500 °С в обеих смесях в продуктах присутствует фаза CaIr_4B_4 , а также непрореагировавший TaB_2 . Важно отметить, что в продуктах реакции после термической обработки при 1300 °С и выше отсутствуют фазы TaIr_2B_2 и TaIr_3 , что может свидетельствовать в пользу более высокой термодинамической стабильности CaIr_4B_4 по сравнению с тройным боридом и интерметаллидом тантала. После термообработки при 1600 °С наблюдаются различия в фазовом составе продуктов, полученных в смесях с соотношением 1 : 1 и 1 : 3. В смеси с соотношением 1 : 1 помимо рефлексов фаз CaIr_4B_4 и $\text{IrB}_{1,1}$ появляются интенсивные рефлексы борида $\text{IrB}_{1,35}$, ранее не наблюдавшегося в системе сравнения TaB_2 — Ir. Отличительным признаком системы 1 : 3 является образование в продуктах фазы CaIr_2B_2 (~ 3 % (мас.)). Кроме того, на рентгенограмме появляется ряд рефлексов $2\theta \sim 17,9, 32,1, 36,2^\circ$, положение которых близко к положениям ранее наблюдавшихся широких рефлексов для продуктов, полученных при 1000 °С (обозначены как *, рис. 4, б). Выяснение природы этих рефлексов требует отдельного изучения.

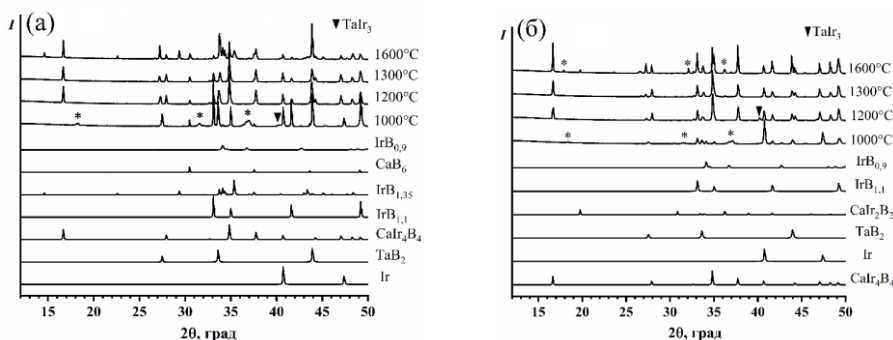


Рис. 4. Рентгенофазовый анализ продуктов смеси с соотношением $(\text{TaB}_2 + \text{CaB}_6) : \text{Ir} = 1 : 1$ (а), $1 : 3$ (б)

В системах, содержащих кальций, подавляется формирование большинства тройных боридов тантала и гафния, ранее наблюдавшихся в обеих системах сравнения. Во всём изученном интервале температур тройные бориды гафния, включая $\text{HfIr}_3\text{B}_{0.45}$, $\text{Hf}_2\text{Ir}_5\text{B}_2$, $\text{HfIr}_{2.1}\text{B}_{1.3}$ и $\text{HfIr}_{5.7}\text{B}_2$ (гафнийсодержащая система), а также TaIr_2B_2 (танталсодержащая система), в присутствии кальция не обнаруживаются методом РФА.

Таким образом, фазовые превращения, протекающие в многокомпонентных системах, содержащих дибориды переходных металлов, гексаборид кальция и иридий, являются сложными процессами, в которых присутствие кальция как четвёртого элемента оказывает значительное влияние на формирование фазового состава продуктов. Этот результат необходимо учитывать при разработке защитных материалов и покрытий для высокотемпературных приложений.

Список источников

1. Baklanova N. I., Lozanov V. V., Titov A. T. The first evidence of the high oxidation resistance of the novel ternary tantalum-iridium-boron phase// *Corros. Sci.* 2019. V. 160. P. 108178.
2. Lozanov V. V., Utkin A. V., Gavrilova T. A., Titov A. T., Beskrovny A. I., Letyagin G. A., Romanenko G. V., Baklanova N. I. New hard ternary Hf–Ir–B borides formed by reaction hafnium diboride with iridium// *J. Am. Ceram. Soc.* 2022. V. 105. P. 2323–2333.
3. Simonenko E. P., Sevast'yanov D. V., Simonenko N. P., Sevast'yanov V. G., Kuznetsov N. T. Promising ultra-high-temperature ceramic materials for aerospace applications// *Russ. J. Inorg. Chem.* 2013. V. 58, No. 14. P. 1669–1693.
4. Kolychev A. V., Kernozhitskii V. A., Chernyshov M. V. Thermionic Methods of Cooling for Thermostressed Elements of Advanced Reusable Launch Vehicles// *Russ. Aeronaut.* 2019. V. 62, No. 4. P. 669–674.
5. Hanquist K. M., Boyd I. D. Plasma Assisted Cooling of Hot Surfaces on Hypersonic Vehicles // *Front. Phys.* 2019. V. 7. P. 9.
6. Лозанов В. В., Бакланова Н. И., Бескровный А. И. Исследование продуктов взаимодействия иридия с W_2B и TaB_2 с применением метода времяпролётной нейтронографии // Конференция по использованию рассеяния нейтронов в исследовании конденсированных сред (РНИКС-2021): тез. докл. (Екатеринбург, 27 сентября — 1 октября 2021 г.). Екатеринбург, 2021. С. 169–170.
7. Лозанов В. В., Уткин А. В., Бакланова Н. И. Особенности химического взаимодействия металлического иридия с диборидами гафния и тантала при высоких температурах // XXIII Международная Черняевская конференция по химии, аналитике и технологии платиновых металлов: сб. тез. докл. (Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.). Новосибирск, 2022. С. 91.
8. Lozanov V. V., Baklanova N. I., Bannykh D. A., Titov A. T. Effect of Antimony on the Reaction of Hafnium Diboride with Iridium // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2022. V. 67. P. 1665–1671.
9. CaB_6 crystal structure: Datasheet from "PAULING FILE Multinaries Edition – 2012" in SpringerMaterials (https://materials.springer.com/isp/crystallographic/docs/sd_1721776).
10. Rogl P., Nowotny H. Studies of the (Sc, Zr, Hf) – (Rh, Ir) – B systems // *J. Less-Common Met.* 1979. V. 67. P. 41–50.
11. Górnicka K., Gui X., Wiendlocha B., Nguyen L. T., Xie W., Cava R. J. Klimczuk T. NbIr_2B_2 and TaIr_2B_2 — New low symmetry noncentrosymmetric superconductors with strong spin-orbit coupling // *Adv. Funkt. Mater.* 2021. V. 31. P. 2007960.
12. Lönnberg B. Thermal expansion studies on the group IV-VII transition metal diborides // *J. Less-Common Met.* 1988. V. 141. P. 145–156.
13. Okada Sh., Kudou K., Higashi I., Lundström T. Single crystals of TaB , Ta_5B_6 , Ta_3B_4 and TaB_2 , as obtained from high-temperature metal solutions, and their properties // *J. Cryst. Growth.* 1993. V. 128. P. 1120–1124.

References

1. Baklanova N. I., Lozanov V. V., Titov A. T. The first evidence of the high oxidation resistance of the novel ternary tantalum-iridium-boron phase. *Corros. Sci.*, 2019, vol. 160, p. 108178.
2. Lozanov V. V., Utkin A. V., Gavrilova T. A., Titov A. T., Beskrovny A. I., Letyagin G. A., Romanenko G. V., Baklanova N. I. New hard ternary Hf–Ir–B borides formed by reaction hafnium diboride with iridium. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2022, vol. 105, pp. 2323–2333.
3. Simonenko E. P., Sevast'yanov D. V., Simonenko N. P., Sevast'yanov V. G., Kuznetsov N. T. Promising ultra-high-temperature ceramic materials for aerospace applications. *Russ. J. Inorg. Chem.*, 2013, vol. 58, no. 14, pp. 1669–1693.
4. Kolychev A. V., Kernozhitskii V. A., Chernyshov M. V. Thermionic Methods of Cooling for Thermostressed Elements of Advanced Reusable Launch Vehicles. *Russ. Aeronaut.*, 2019, vol. 62, no. 4, pp. 669–674.
5. Hanquist K. M., Boyd I. D. Plasma Assisted Cooling of Hot Surfaces on Hypersonic Vehicles. *Front. Phys.*, 2019, vol. 7, p. 9.

6. Lozanov V. V., Baklanova N. I., Beskrovny A. I. Issledovanie produktov vzaimodeistviya iridiya s W_2B i TaB_2 s primeneniem metoda vremyaproletnoy neytronografii [Investigation of the products of the interaction of iridium with W_2B and TaB_2 using the method of time-of-flight neutron diffraction]. *Konferenciya po ispolzovaniyu rasseyaniya neytronov v issledovanii kondensirovannih sred: tez. dokl. (Yekaterinburg, 27 sentyabrya — 01 oktyabrya 2021 g.)* [Conference on the Use of Neutron Scattering in Condensed Matter Research (RNICS-2021): Book of Abstracts]. Yekaterinburg, 2011, pp. 169–170. (In Russ.).
7. Lozanov V. V., Utkin A. V., Baklanova N. I. Osobennosti himicheskogo vzaimodeistviya metallichesкого iridiya s diboridami gafniya i tantala pri vysokih temperaturah [Features of the chemical interaction of metallic iridium with hafnium and tantalum diborides at high temperatures]. *XXIII Mezhdunarodnaya Chernyaevskaya konferentsiya po himii, analitike i tehnologii platinovih metallov (Novosibirsk, 3–7 oktyabrya 2022 g.)* [XXIII International Chernyaev Conference in Chemistry, Analytics and Technology of Platinum Metals: Book of abstracts]. Novosibirsk, 2022, p. 91. (In Russ.).
8. Lozanov V. V., Baklanova N. I., Bannykh D. A., Titov A. T. Effect of Antimony on the Reaction of Hafnium Diboride with Iridium. *Russ. J. Inorg. Chem.*, 2022, vol. 67, pp. 1665–1671.
9. CaB_6 crystal structure: Datasheet from "PAULING FILE Multinaries Edition – 2012" in SpringerMaterials (https://materials.springer.com/isp/crystallographic/docs/sd_1721776).
10. Rogl P., Nowotny H. Studies of the (Sc, Zr, Hf) – (Rh, Ir) – B systems. *J. Less-Common Met.*, 1979, vol. 67, pp. 41–50.
11. Górnicka K., Gui X., Wiendlocha B., Nguyen L. T., Xie W., Cava R. J., Klimczuk T. $NbIr_2B_2$ and $TaIr_2B_2$ — New low symmetry noncentrosymmetric superconductors with strong spin-orbit coupling. *Adv. Funkt. Mater.*, 2021, vol. 31, p. 2007960.
12. Lönnberg B. Thermal expansion studies on the group IV–VII transition metal diborides. *J. Less-Common Met.*, 1988, vol. 141, pp. 145–156.
13. Okada Sh., Kudou K., Higashi I., Lundström T. Single crystals of TaB , Ta_5B_6 , Ta_3B_4 and TaB_2 , as obtained from high-temperature metal solutions, and their properties. *J. Cryst. Growth.*, 1993, vol. 128, pp. 1120–1124.

Информация об авторах

В. В. Лозанов — кандидат химических наук, старший научный сотрудник;
Н. И. Бакланова — доктор химических наук, ведущий научный сотрудник.

Information about the authors

V. V. Lozanov — PhD (Chemistry), Senior Researcher;
N. I. Baklanova — Dr. Sc. (Chemistry), Leading Researcher.

Статья поступила в редакцию 22.12.2022; одобрена после рецензирования 31.01.2023; принята к публикации 01.02.2023.
The article was submitted 22.12.2022; approved after reviewing 31.01.2023; accepted for publication 01.02.2023.