

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ. ДИЭЛЕКТРИКИ

MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY. DIELECTRICS

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2022. Т. 25, № 2. С. 115—124.
DOI: 10.17073/1609-3577-2022-2-115-124

УДК 621.315.592:548.73

Теплопроводность монокристаллов твердых растворов на основе диоксида циркония, стабилизированных оксидами скандия, иттрия, гадолиния и иттербия

© 2022 г. Д. А. Агарков¹, М. А. Борик², Г. М. Кораблева¹,
А. В. Кулебякин², Е. Е. Ломонова², Ф. О. Милович³, В. А. Мызина²,
П. А. Попов⁴, Н. Ю. Табачкова^{2,3,✉}

¹ *Институт физики твердого тела Российской академии наук,
ул. Акад. Осипьяна, д. 2, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия*

² *Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,
ул. Вавилова, д. 38, Москва, 119991, Россия*

³ *Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Россия*

⁴ *Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского,
ул. Бежицкая, д. 14, Брянск, 241036, Россия*

✉ Автор для переписки: tabachkova@gmail.com

Аннотация. В работе приведены результаты исследования фазового состава и теплопроводности кристаллов твердых растворов $(\text{ZrO}_2)_{0,9}(\text{R}_2\text{O}_3)_{0,1}$ где $\text{R} = (\text{Gd}, \text{Yb}, \text{Sc}, \text{Y})$, $(\text{ZrO}_2)_{0,9}(\text{Sc}_2\text{O}_3)_{0,09}(\text{Gd}_2\text{O}_3)_{0,01}$ и $(\text{ZrO}_2)_{0,9}(\text{Sc}_2\text{O}_3)_{0,09}(\text{Yb}_2\text{O}_3)_{0,01}$. Кристаллы выращивали методом направленной кристаллизации расплава в холодном контейнере. Исследования фазового состава кристаллов проводили методом рентгеновской дифрактометрии и комбинационного рассеяния света. Теплопроводность кристаллов изучали абсолютным стационарным методом продольного теплового потока в интервале температур 50—300 К.

Показано, что при суммарной концентрации стабилизирующих оксидов 10 % (мол.) фазовый состав кристаллов зависит от величины ионного радиуса стабилизирующего катиона. Минимальные значения теплопроводности в диапазоне температур 50—150 К имеют кристаллы $(\text{ZrO}_2)_{0,9}(\text{Sc}_2\text{O}_3)_{0,1}$, а при температуре 300 К — твердые растворы $(\text{ZrO}_2)_{0,9}(\text{Gd}_2\text{O}_3)_{0,1}$.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что основное влияние на теплопроводность оказывает фазовый состав и величина ионного радиуса стабилизирующего катиона. При этом фонное рассеяние, связанное с различиями массы катионов солегирующего оксида, оказывает на теплопроводность меньшее значение.

Ключевые слова: диоксид циркония, рост кристаллов, теплопроводность, фазовый анализ

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 19–72–10113.

Исследование структуры выполнены на оборудовании ЦКП «Материаловедение и металлургия» Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075–15–2021–696).

Для цитирования: Агарков Д.А., Борик М.А., Кorableва Г.М., Кулебякин А.В., Ломонова Е.Е., Милович Ф.О., Мызина В.А., Попов П.А., Табачкова Н.Ю. Теплопроводность монокристаллов твердых растворов на основе диоксида циркония, стабилизированных оксидами скандия, иттрия, гадолиния и иттербия. *Известия вузов. Материалы электрон. техники.* 2022; 25(2): 115–124. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-2-115-124>

Thermal conductivity of single crystals zirconia stabilized by scandium, yttrium, gadolinium, and ytterbium oxides

D. A. Agarkov¹, M. A. Borik², G. M. Korableva¹, A. V. Kulebyakin², E. E. Lomonova², F. O. Milovich³, V. A. Myzina², P. A. Popov⁴, N. Yu. Tabachkova^{2,3,✉}

¹ *Institute of Solid State Physics, Russian Academy of Sciences,
2 Acad. Ossipyan Str., Chernogolovka, Moscow District 142432, Russia*

² *Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences,
38 Vavilov Str., Moscow 119991, Russia*

³ *National University of Science and Technology MISiS,
4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russia*

⁴ *Ivan Petrovsky Bryansk State University, 14 Bezhitskaya Str., Bryansk 241036, Russia*

✉ *Corresponding author: ntabachkova@gmail.com*

Abstract. The phase composition and heat conductivity of $(\text{ZrO}_2)_{0.9}(\text{R}_2\text{O}_3)_{0.1}$ solid solution single crystals have been studied, where $R = (\text{Gd}, \text{Yb}, \text{Sc}, \text{Y}), (\text{ZrO}_2)_{0.9}(\text{Sc}_2\text{O}_3)_{0.09}(\text{Gd}_2\text{O}_3)_{0.01}$ and $(\text{ZrO}_2)_{0.9}(\text{Sc}_2\text{O}_3)_{0.09}(\text{Yb}_2\text{O}_3)_{0.01}$. Single crystals have been grown by directional melt crystallization in a cold skull. The phase composition of the crystals has been studied using X-ray diffraction and Raman spectroscopy. The heat conductivity of the crystals has been studied using the absolute steady-state technique of longitudinal heat flow in the 50–300 K range. We show that at a total stabilizing oxide concentration of 10 mol.% the phase composition of the crystals depends on the ionic radius of the stabilizing cation. The $(\text{ZrO}_2)_{0.9}(\text{Sc}_2\text{O}_3)_{0.1}$ crystals have the lowest heat conductivity in the 50–300 K range while the $(\text{ZrO}_2)_{0.9}(\text{Gd}_2\text{O}_3)_{0.1}$ solid solutions have the lowest heat conductivity at 300 K. Analysis of the experimental data suggests that the heat conductivity of the crystals depends mainly on the phase composition and ionic radius of the stabilizing cation. Phonon scattering caused by the difference in the weight of the co-doping oxide cation has a smaller effect on the heat conductivity.

Keywords: zirconia, crystal growth, heat conductivity, phase analysis

Acknowledgments: This work was carried out with financial support under RNF Grant 19–72–10113. The structure was studied at the Joint Use Center for Materials Science and Metallurgy of the National University of Science and Technology MISiS with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075–15–2021–696).

For citation: Agarkov D.A., Borik M.A., Korableva G.M., Kulebyakin A.V., Lomonova E.E., Milovich F.O., Myzina V.A., Popov P.A., Tabachkova N.Yu. Thermal conductivity of single crystals zirconia stabilized by scandium, yttrium, gadolinium, and ytterbium oxides. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2022; 25(2): 115—124. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-2-115-124>

Введение

Материалы на основе диоксида циркония в настоящее время широко используются в современной технике [1—3]. Сочетание тугоплавкости, высоких коэффициентов термического расширения, химической инертности, ионной проводимости, высоких механических свойств делает материалы на основе диоксида циркония привлекательными для многих применений в условиях высоких температур и агрессивных сред. Благодаря таким свойствам как биоинертность и биосовместимость, высокая вязкость разрушения и прочность эти материалы широко используются в медицине [4—5]. Оптические характеристики монокристаллов и прозрачной керамики на основе диоксида циркония делают их привлекательными для ряда применений в фотонике, микро и наноэлектронике [6].

Диоксид циркония при нормальном давлении имеет три полиморфных модификации: моноклинную, тетрагональную и кубическую, которые стабильны в определенных температурных интервалах. Для стабилизации высокотемпературных тетрагональной и кубической фаз при комнатной температуре, в диоксид циркония обычно вводят оксиды щелочно-земельных, редкоземельных элементов, иттрия или скандия [7—9]. Состав, условия получения и термообработки твердых растворов на основе диоксида циркония влияют на их фазовый состав, структуру, тепло- и электрофизические характеристики [10—12].

Твердые растворы на основе ZrO_2 широко используются также в качестве теплоизолирующих защитных покрытий. Такие покрытия работают в условиях повышенных температур и должны обладать низкой теплопроводностью и высокими механическими характеристиками, необходимыми для их долговременной эксплуатации [13—16].

Многие типы кристаллов с неупорядоченной структурой, включая твердые растворы на основе диоксида циркония, в широком диапазоне температур ($0,1 < T < 300$ К) обладают низкой теплопроводностью, характерной для аморфных твердых тел [17]. Это вероятно свидетельствует о существенном вкладе фононного рассеяния в механизм теплопроводности [18—22]. Гетеровалентное замещение катионов Zr^{4+} на катионы стабилизирующей оксида R^{3+} приводит к возникновению дефектов различного типа (кислородные вакансии, катионы R^{3+} , а также дефектные комплексы) [23—26]. Эти дефекты структуры влияют на интенсивность про-

цессов фононного рассеяния в твердых растворах диоксида циркония. Поэтому на теплопроводность твердых растворов может оказывать влияние вид и концентрация стабилизирующего оксида.

Как правило, исследования теплофизических свойств материалов на основе диоксида циркония проводили на керамических образцах [10]. Применение монокристаллических образцов для исследования влияния структурных особенностей материала на величину теплопроводности позволяет получать данные, исключая влияние границ зерен, пор и других особенностей, присущих поликристаллическим керамическим материалам.

Теплопроводность монокристаллических твердых растворов $ZrO_2—Y_2O_3$ с кубической и тетрагональной структурой исследована в работах [27—28]. Анализ температурной зависимости теплопроводности был выполнен с учетом фазового состава, особенностей локальной структуры и электрофизических характеристик этих монокристаллов. Было показано, что разная концентрация Y_2O_3 и соответственно разное количество вакансий в твердых растворах на основе диоксида циркония приводит к изменению значений теплопроводности.

Целью настоящей работы было исследование влияния катиона стабилизирующего оксида (Gd, Yb, Sc, Y) на теплопроводность монокристаллов твердых растворов на основе ZrO_2 . Концентрация стабилизирующего оксида, во всех исследуемых твердых растворах, составляла 10 % (мол.).

Образцы и методы исследования

Кристаллы твердых растворов $(ZrO_2)_{0,9}(R_2O_3)_{0,1}$ где $R = (Gd, Yb, Sc, Y)$, $(ZrO_2)_{0,9}(Sc_2O_3)_{0,09}(Gd_2O_3)_{0,01}$ и $(ZrO_2)_{0,9}(Sc_2O_3)_{0,09}(Yb_2O_3)_{0,01}$ выращивали методом направленной кристаллизации расплава в холодном контейнере диаметром 130 мм со скоростью роста 10 мм/ч [29]. Рост кристаллов осуществлялся на установке «Кристалл-407» (частота — 5,28 МГц, максимальная выходная мощность 60 кВт). Масса загрузки составляла 6 кг. Для приготовления шихты использовали порошки ZrO_2 , Y_2O_3 , Gd_2O_3 , Yb_2O_3 и Sc_2O_3 чистотой не менее 99,99 %.

Фазовый состав образцов исследовали методом рентгеновской дифрактометрии на установке Bruker D8 и спектроскопии комбинационного рассеяния света. В качестве источника возбуждения использовали лазер с длиной волны 633 нм.

Экспериментальное определение теплопроводности кристаллов осуществляли абсолютным ста-

ционарным методом продольного теплового потока в температурном интервале 50—300 К. Погрешность определения абсолютной величины теплопроводности не превышала $\pm 6\%$. Образцы в виде параллелепипедов с размерами $7 \times 7 \times 20$ мм³ были вырезаны из кристаллов вдоль оси роста, кристаллографическая ориентация была произвольной.

Результаты и их обсуждение

Было выращено две серии кристаллов: твердые растворы ZrO_2 стабилизированные 10% (мол.) Yb_2O_3 , Y_2O_3 , Gd_2O_3 или Sc_2O_3 обозначенные далее по тексту как 10YbSZ, 10YSZ, 10GdSZ и 10ScSZ соответственно, и твердые растворы ZrO_2 стабилизированные совместно 9% (мол.) Sc_2O_3 и 1% (мол.) Gd_2O_3 или 1% (мол.) Yb_2O_3 , обозначенные далее по тексту как 9Sc1GdSZ и 9Sc1YbSZ соответственно.

Кристаллы твердых растворов 10ScSZ и 9Sc1GdSZ были неоднородными, имели светорассеяние, но не содержали трещин. Остальные исследованные кристаллы были однородными, прозрачными монокристаллами.

По данным рентгеновской дифрактометрии кристаллы 10YbSZ, 10YSZ и 10GdSZ обладали кубической флюоритовой структурой и были однофазными во всем объеме кристаллов. Кристалл 10ScSZ представлял собой смесь двух фаз — кубической и ромбоэдрической модификации ZrO_2 . На рис. 1 приведены спектры КРС для первой серии исследуемых кристаллов. Спектры кристаллов 10ScSZ показывают наличие в них ромбоэдрической фазы, а спектры КРС кристаллов 10YbSZ, 10YSZ, 10GdSZ характерны для кубической фазы.

На рис. 2 представлены графики температурных зависимостей теплопроводности $k(T)$ кристаллов ZrO_2 стабилизированных 10% (мол.) Yb_2O_3 , Y_2O_3 , Gd_2O_3 или Sc_2O_3 .

Как следует из данных приведенных на рис. 2 в диапазоне температур от 50 до 150 К наименьшими значениями теплопроводности обладает кристалл 10ScSZ. На низкие значения теплопроводности данного кристалла оказывает влияние его фазовый состав, а именно наличие в объеме кристалла смеси ромбоэдрической и кубической модификаций ZrO_2 . Следует отметить, что система $ZrO_2—Sc_2O_3$ с точки зрения фазового состава и наличия фазовых переходов является более сложной по сравнению с системами $ZrO_2—R_2O_3$ ($R — Y, Yb, Gd$). В отличие от твердых растворов $ZrO_2—R_2O_3$ ($R — Y, Yb, Gd$), характеризующихся кубической структурой в достаточно широком диапазоне концентраций, кубические твердые растворы в системе $ZrO_2—Sc_2O_3$ существуют в узком диапазоне концентраций от ~ 8 до 12% (мол.) Sc_2O_3 [30—32]. Существуют несколько вариантов фазовых диаграмм $ZrO_2—Sc_2O_3$, для которых фазовые границы не совпадают. Как было

показано в ряде работ [33—36], стабилизация диоксида циркония оксидами с разными размерами радиуса катиона приводит к образованию в твердом растворе разной дефектной структуры, как в анионной, так и в катионной подрешетках. Показано, что в кристаллах с большим ионным радиусом катиона (например, Y^{3+} , Gd^{3+}) кислородные вакансии преимущественно занимают первую координационную сферу по отношению к ионам Zr^{4+} и вторую координационную сферу по отношению к большим катионам. В твердых растворах с малым ионным радиусом, близким к ионному радиусу катиона основы (например, Sc^{3+} , Yb^{3+}), для кисло-

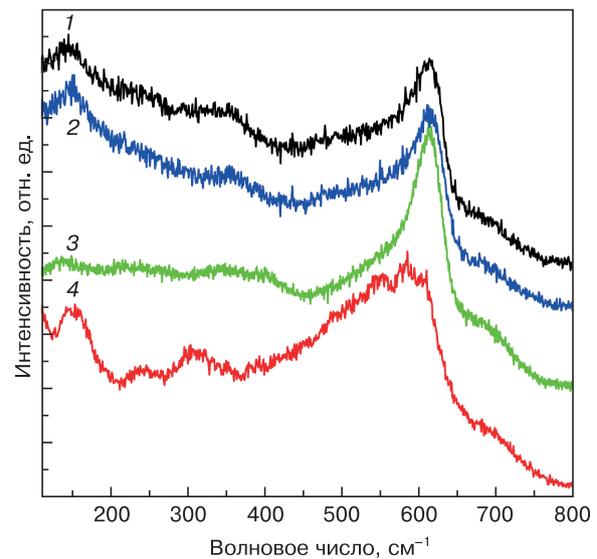


Рис. 1. Спектры КРС кристаллов: 1 — 10GdSZ; 2 — 10YSZ; 3 — 10YbSZ; 4 — 10ScSZ

Fig. 1. Raman spectra of crystals: (1) 10GdSZ, (2) 10YSZ, (3) 10YbSZ and (4) 10ScSZ

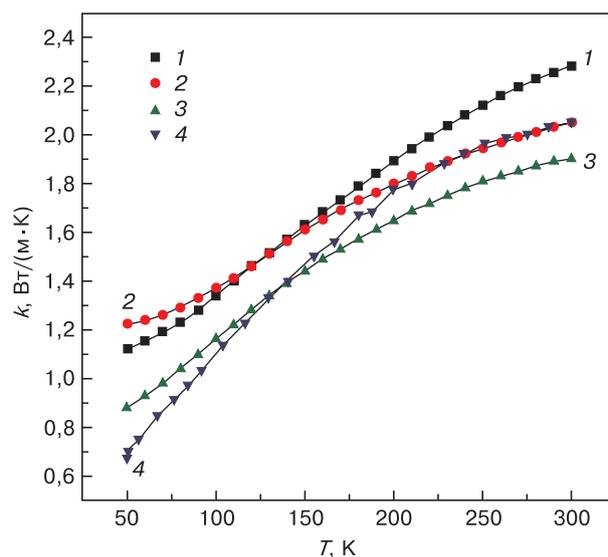


Рис. 2. Температурная зависимость теплопроводности кристаллов: 1 — 10YSZ; 2 — 10YbSZ; 3 — 10GdSZ; 4 — 10ScSZ

Fig. 2. Heat conductivity of crystals as a function of temperature: (1) 10YSZ, (2) 10YbSZ, (3) 10GdSZ and (4) 10ScSZ

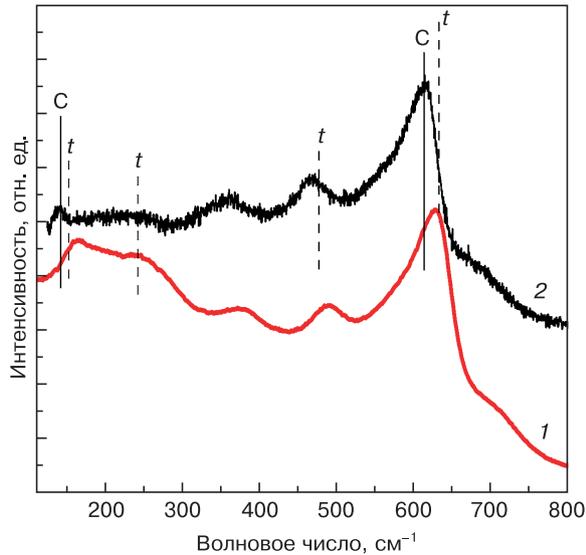


Рис. 3. Спектры КРС кристаллов:
1 — 9Sc1YbSZ; 2 — 9Sc1GdSZ

Fig. 3. Raman spectra of crystals: (1) 9Sc1YbSZ and (2) 9Sc1GdSZ

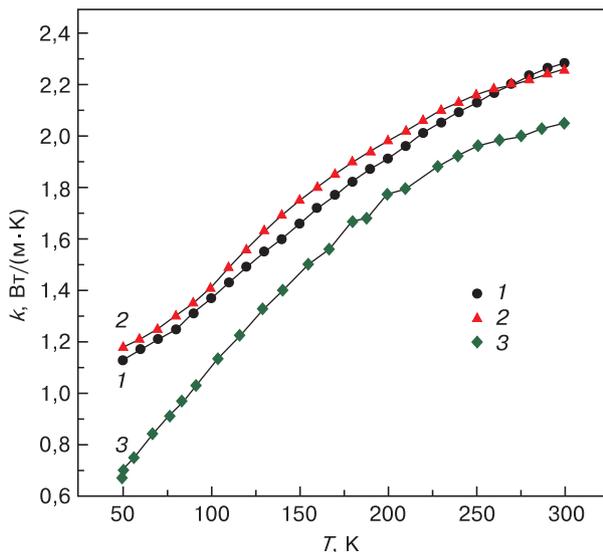


Рис. 4. Температурные зависимости теплопроводности $k(T)$ кристаллов:
1 — 9Sc1GdSZ; 2 — 9Sc1YbSZ; 3 — 10ScSZ

Fig. 4. Heat conductivity of crystals as a function of temperature $k(T)$: (1) 9Sc1GdSZ, (2) 9Sc1YbSZ and (3) 10ScSZ

родной вакансии существует одинаковая вероятность занять первую и вторую координационные сферы по отношению к ионам Zr^{4+} , что приводит к большей степени неупорядоченности структуры твердого раствора. При увеличении концентрации стабилизирующего оксида образование сложных дефектных комплексов, упорядочение в катионной и анионной подрешетках, образование новых фаз зависит, в частности, от величины ионного радиуса катиона стабилизирующего оксида [37].

Несмотря на разницу в значениях теплопроводности при низких температурах (50—150 К) для кристаллов 10YbSZ и 10ScSZ, связанную с разным фазовым составом, увеличение температуры при-

водит к тому, что теплопроводность этих кристаллов становится практически одинаковой при 300 К. Малые ионные радиусы катионов Sc^{3+} и Yb^{3+} , приводящие к разнообразию дефектной структуры и большей степени неупорядоченности в катионной и анионной подрешетках [37], вызывают сильное фонное рассеяние, сохраняющее высокую интенсивность и при повышении температуры. Разница в массе катионов Sc^{3+} и Yb^{3+} сказывается на величине теплопроводности гораздо в меньшей степени.

При низких температурах значения теплопроводности кристаллов 10GdSZ выше, чем у кристаллов 10ScSZ. Но в диапазоне температур 150—300 К значения теплопроводности для кристаллов 10GdSZ имеют минимальные значения из всех исследуемых образцов данной серии кристаллов. Размер катионов Gd^{3+} больше, чем Y^{3+} , Yb^{3+} и Sc^{3+} , это может вызывать большие напряжения и нарушения в катионной подрешетке и привести к более низкой теплопроводности кристаллов 10GdSZ по сравнению с другими твердыми растворами при температуре 300 К.

Для модифицирования структуры, физико-химических свойств твердых растворов часто используют стабилизацию оксида циркония несколькими стабилизирующими оксидами [13, 14, 20, 21]. Нами было исследовано влияние на теплопроводность дополнительного легирования оксидами гадолиния и иттербия твердых растворов, стабилизированных оксидом скандия. Проведено сравнение теплопроводности кристаллов 9Sc1GdSZ и 9Sc1YbSZ с кристаллами 10ScSZ, для которых сохраняется общая концентрация введенных стабилизирующих оксидов 10 % (мол.) и, соответственно, число кислородных вакансий вызванных гетеровалентным замещением.

По данным фазового анализа кристаллы 9Sc1GdSZ представляли собой смесь фаз тетрагональной и кубической модификации ZrO_2 . Кристаллы 9Sc1YbSZ имели кубическую флюоритовую структуру. На рис. 3 приведены спектры КРС кристаллов 9Sc1GdSZ и 9Sc1YbSZ.

Таким образом, замещение 1 % (мол.) Sc_2O_3 в кристаллах 10ScSZ на 1 % (мол.) Gd_2O_3 или Yb_2O_3 приводит к получению кристаллов с разным фазовым составом.

На рис. 4 приведены температурные зависимости теплопроводности $k(T)$ кристаллов 9Sc1GdSZ и 9Sc1YbSZ. Для сравнения на данном графике приведена также температурная зависимость теплопроводности твердого раствора 10ScSZ.

Значения теплопроводности кристаллов 9Sc1GdSZ и 9Sc1YbSZ близки и выше теплопроводности кристаллов 10ScSZ во всем исследуемом диапазоне температур.

Таким образом, при солегировании диоксида циркония двумя видами стабилизирующего оксида

может меняться характер $k(T)$ и величина теплопроводности по сравнению с теплопроводностью кристаллов, стабилизированных только оксидом скандия. Солегирирование диоксида циркония двумя стабилизирующими оксидами, при сохранении суммарной концентрации 10 % (мол.) должно привести к изменению дефектности катионной подрешетки. При солегирировании оксидами, один из которых имеет малый размер ионного радиуса ($R_{Sc^{3+}} = 0,87$), а другой большой размер ионного радиуса ($R_{Gd^{3+}} = 1,053$) катиона, меняется характер напряжений в кристаллической решетке. Кроме того, меняется характер формирования дефектных комплексов от статистического распределения кислородных вакансий относительно катионов Zr^{4+} и Sc^{3+} до преимущественного расположения кислородных вакансий рядом с большим катионом стабилизирующего оксида Gd^{3+} . При солегирировании оксидами, каждый из которых имеет малый размер радиуса катиона ($R_{Sc^{3+}} = 0,87$ и $R_{Yb^{3+}} = 0,985$), эти изменения происходят в существенно меньшей степени. Кроме того, влияние на теплопроводность оказывает и фазовый состав кристалла.

Изменение фазового состава кристаллов 9Sc1GdSZ и 9Sc1YbSZ приводит к повышению теплопроводности по сравнению с теплопроводностью

кристаллов 10ScSZ. Меньшее влияние оказывает фоновое рассеяние, связанное с различиями радиусов и массы катионов солегирующего оксида.

Заключение

Методом направленной кристаллизации расплава в холодном тигле выращены кристаллы твердых растворов $(ZrO_2)_{0,9}(R_2O_3)_{0,1}$ где $R = (Gd, Yb, Sc, Y)$, $(ZrO_2)_{0,9}(Sc_2O_3)_{0,09}(Gd_2O_3)_{0,01}$ и $(ZrO_2)_{0,9}(Sc_2O_3)_{0,09}(Yb_2O_3)_{0,01}$. Концентрация стабилизирующего оксида, во всех исследуемых твердых растворах, составляла 10 % (мол.).

Показано, что на теплопроводность твердых растворов на основе ZrO_2 существенное влияние оказывает фазовый состав кристаллов. Присутствие в кристаллах $(ZrO_2)_{0,9}(Sc_2O_3)_{0,1}$ смеси кубической и ромбоэдрической модификаций ZrO_2 приводит к тому, что теплопроводность данных кристаллов в диапазоне температур 50—100 К является наименьшей для исследованных кристаллов. При температуре 300 К разница в массе катионов Sc^{3+} и Yb^{3+} практически не сказывается на величине теплопроводности. Преимущественное влияние на теплопроводность оказывает величина ионного радиуса стабилизирующего катиона.

Библиографический список

- Basu R.N. Materials for solid oxide fuel cells. In: *Recent trends in fuel cell science and technology*. New York, USA: Springer; 2007: 286—331. https://doi.org/10.1007/978-0-387-68815-2_12
- Clarke D.R., Oechsner M., Padture N.P. Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines. *MRS Bulletin*. 2012; 37(10): 891—898. <https://doi.org/10.1557/mrs.2012.232>
- Yildirim H., Pachter R. Extrinsic dopant effects on oxygen vacancy formation energies in ZrO_2 with implication for memristive device performance. *ACS Applied Electronic Materials*. 2019; 1(4): 467—477. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.8b00090>
- Maccauro P.G. Zirconia as a ceramic biomaterial. *Biomaterials*. 1999; 20(1): 1—25. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(98\)00010-6](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(98)00010-6)
- Chevalier J., Liens A., Reveron H., Zhang F., Reynaud P., Douillard T., Preiss L., Sergob V., Lugh V., Swaind M., Courtois N. Forty years after the promise of «ceramic steel?»: Zirconia-based composites with a metal-like mechanical behavior. *Journal of the American Ceramic Society*. 2020; 103(3): 1482—1513. <https://doi.org/10.1111/jace.16903>
- Buzynin A.N., Grishina T.N., Kiselyov T.V., Kosuhina L.A., Kravchenko N.V., Lomonova E.E., Panov V.A., Sidorov M.S., Trishenkov M.A., Filachev A.M. Zirconia-based solid solutions — new materials of photoelectronics. *Optical Memory & Neural Networks*. 2009; 18: 312—321. <https://doi.org/10.3103/S1060992X09040109>
- Hannink R.H.J., Kelly P.M., Muddle B.C. Transformation toughening in zirconia-containing ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*. 2000; 83(3): 461—477. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01221.x>
- Chevalier J., Gremillard L., Virkar A.V., Clarke D.R. The tetragonal–monoclinic transformation in zirconia: lessons learned and future. *Journal of the American Ceramic Society*. 2009; 92(9): 1901—1920. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2009.03278.x>
- Basu B., Vleugels J., Biest O.V.D. Microstructure–toughness–wear relationship of tetragonal zirconia ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*. 2004; 24(7): 2031—2040. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(03\)00355-8](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(03)00355-8)
- Sharma A., Witz G., Howell P.C., Hitchman N. Interplay of the phase and the chemical composition of the powder feedstock on the properties of porous 8YSZ thermal barrier coatings. *Journal of the European Ceramic Society*. 2021; 41(6): 3706—3716. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceram-soc.2020.10.062>
- Fèvre M., Finel A., Caudron R., Mévrel R. Local order and thermal conductivity in yttria-stabilized zirconia. II. Numerical and experimental investigations of thermal conductivity. *Physical review B*. 2005; 72: 104118—1—104118—7. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.104118>
- Hasselmann D.P.H., Johnson L.F., Bente H.D., Syed R., Lee H.M., Swain M.V. Thermal diffusivity and conductivity of dense polycrystalline ZrO_2 ceramics: a survey. *American Ceramic Society Bulletin*. 1987; 66(5): 799—806.
- Wang X., Guo L., Zhang H., Gong S., Guo H. Structural evolution and thermal conductivities of $(Gd_{1-x}Yb_x)_2Zr_2O_7$ ($x = 0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1$) ceramics for thermal barrier coatings. *Ceramics International*. 2015; 41(10A): 12621—12625. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.06.090>
- Ma W., Gao Y., Zhang J., Bai Y., Jia R., Dong H., Wang R., Bao M. Phase composition, microstructure and

- thermophysical properties of the $\text{Sr}_x(\text{Zr}_{0.9}\text{Y}_{0.05}\text{Yb}_{0.05})\text{O}_{1.95+x}$ ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*. 2021; 41(4): 2734—2745. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceram-soc.2020.12.031>
15. Lakiza S.M., Hrechanyuk M.I., Red'ko V.P., Ruban O.K., Tyshchenko Ja.S., Makudera A.O., Dudnik O.V. The role of hafnium in modern thermal barrier coatings. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2021; 60: 70—89. <https://doi.org/10.1007/s11106-021-00217-1>
16. Yuan J., Zhou X., Dong S., Jiang J., Deng L., Song W., Dingwell D.B., Cao X. Plasma sprayed 18 mol% $\text{YO}_{1.5}$ stabilized hafnia as potential thermal barrier coating. *Ceramics International*. 2021; 47(10A): 14515—14526. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.02.031>
17. Cahill D.G., Watson S.K., Pohl R.O. Lower limit to the thermal conductivity of disordered crystals. *Physical Review B*. 1992; 46: 6131—6140. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.46.6131>
18. Youngblood G.E., Rice R.W., Ingel R.I. Thermal diffusivity of partially and fully stabilized (yttria) zirconia single crystals. *Journal of the American Ceramic Society*. 1988; 71(4): 255—260. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1988.tb05856.x>
19. Bisson J.-F., Fournier D., Poulain M., Lavigne O., Mervrel R. Thermal conductivity of yttria–zirconia single crystals determined with spatially resolved infrared thermography. *Journal of the American Ceramic Society*. 2000; 83(8): 1993—1998. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01502.x>
20. Fan W., Wang Z., Bai Y., Che J.W., Wang R.J., Ma F., Tao W.Z., Liang G.Y. Improved properties of scandia and yttria co-doped zirconia as a potential thermal barrier material for high temperature applications. *Journal of the European Ceramic Society*. 2018; 38(13): 4502—4511. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.06.002>
21. Shi Q., Yuan W., Chao X., Zhu Z. Phase stability, thermal conductivity and crystal growth behavior of Re_2O_3 (Re = La, Yb, Ce, Gd) co-doped Y_2O_3 stabilized ZrO_2 powder. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 2017; 84: 341—348. <https://doi.org/10.1007/s10971-017-4483-z>
22. Chen D., Wang Q., Liu Y., Ning X. Microstructure, thermal characteristics, and thermal cycling behavior of the ternary rare earth oxides (La_2O_3 , Gd_2O_3 , and Yb_2O_3) co-doped YSZ coatings. *Surface & Coatings Technology*. 2020; 403: 126387. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126387>
23. Goff J.P., Hayes W., Hull S., Hutchings M.T., Clausen K.N. Defect structure of yttria-stabilized zirconia and its influence on the ionic conductivity at elevated temperatures. *Physical Review B*. 1999; 59: 14202—14219. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.59.14202>
24. Li Y., Gong J., Xie Y., Chen Y. Analysis of non-linear Arrhenius behavior of ionic conduction in cubic zirconia stabilized with yttria and calcia. *Journal of Materials Science Letters*. 2002; 21: 157—159. <https://doi.org/10.1023/A:1014253400747>
25. Norberg S.T., Hull S., Ahmed I., Eriksson S.G., Marrocchelli D., Madden P.A., Li P., Irvine J.T.S. Structural disorder in doped zirconias. Part I: the $\text{Zr}_{0.8}\text{Sc}_{0.2-x}\text{Y}_x\text{O}_{1.9}$ ($0 \leq x \leq 0.2$) system. *Chemistry of Materials*. 2011; 23(6): 1356—1364. <https://doi.org/10.1021/cm102808k>
26. Marrocchelli D., Madden P.A., Norberg S.T., Hull S. Structural disorder in doped zirconias. Part II: vacancy ordering effects and the conductivity maximum. *Chemistry of Materials*. 2011; 23(6): 1365—1373. <https://doi.org/10.1021/cm102809t>
27. Popov P.A., Solomennik V.D., Lomonova E.E., Borik M.A., Myzina V.A. Thermal conductivity of single crystal $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ solid solutions in the temperature range 50–300 K. *Physics of the Solid State*. 2012; 54(3): 658—661. <https://doi.org/10.1134/S1063783412030250>
28. Borik M.A., Volkova T.V., Kulebyakin A.V., Kuritsyna I.E., Lomonova E.E., Myzina V.A., Milovich F.O., Ryabochkina P.A., Tabachkova N.Yu., Zentsova A.I., Popov P.A. Thermal conductivity of cubic ZrO_2 single crystals stabilized with yttrium oxide. *Physics of the Solid State*. 2020; 62(1): 235—239. <https://doi.org/10.1134/S1063783420010072>
29. Кузьминов Ю.С., Ломонова Е.Е., Осико В.В. Тугоплавкие материалы из холодного тигля. М.: Наука; 2004. 369 с.
30. Ruh R., Garrett H.J., Domagala R.F., Patel V.A. The system zirconia–scandia. *Journal of the American Ceramic Society*. 1977; 60(9–10): 399—403. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1977.tb15521.x>
31. Yashima M., Kakihana M., Yoshimura M. Metastable–stable phase diagrams in the zirconia–containing systems utilized in solid–oxide fuel cell application. *Solid State Ionics*. 1996; 86–88(Pt 2): 1131—1149. [https://doi.org/10.1016/0167-2738\(96\)00386-4](https://doi.org/10.1016/0167-2738(96)00386-4)
32. Chiba R., Yoshimura F., Yamaki J., Ishii T., Yonezawa T., Endou K. Ionic conductivity and morphology in Sc_2O_3 and Al_2O_3 doped ZrO_2 films prepared by the sol–gel method. *Solid State Ionics*. 1997; 104(3–4): 259—266. [https://doi.org/10.1016/S0167-2738\(97\)00423-2](https://doi.org/10.1016/S0167-2738(97)00423-2)
33. Arachi Y., Suzuki M., Asai T., Emura S., Kamiyama T., Izumi F. High-temperature structure of Sc_2O_3 -doped ZrO_2 . *Solid State Ionics*. 2004; 175(1–4): 119—121. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2004.09.025>
34. Huang H., Hsieh C.-H., Kim N., Stebbins J., Prinz F. Structure, local environment, and ionic conduction in scandia stabilized zirconia. *Solid State Ionics*. 2008; 179(27–32): 1441—1445. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2008.02.061>
35. Agarkov D.A., Borik M.A., Volkova T.V., Eliseeva G.M., Kulebyakin A.V., Larina N.A., Lomonova E.E., Myzina V.A., Ryabochkina P.A., Tabachkova N.Yu. Phase composition and local structure of scandia and yttria stabilized zirconia solid solution. *Journal of Luminescence*. 2020; 222: 117170. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117170>
36. Borik M.A., Gerasimov M.V., Kulebyakin A.V., Larina N.A., Lomonova E.E., Milovich F.O., Myzina V.A., Ryabochkina P.A., Sidorova N.V., Tabachkova N.Y. Structure and phase transformations in scandia, yttria, ytterbia and ceria doped zirconia base solid solutions during directional melt crystallization. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020; 844: 156040. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156040>
37. Borik M.A., Kulebyakin A.V., Lomonova E.E., Myzina V.A., Popov P.A., Milovich F.O., Tabachkova N.Yu. Thermal conductivity of single-crystal ZrO_2 -based solid solutions stabilized with scandium and yttrium oxides in the temperature range 50–300 K. *Physics of the Solid State*. 2018; 60(12): 2672—2677. <https://doi.org/10.1134/S1063783418120090>

References

1. Basu R.N. Materials for solid oxide fuel cells. In: *Recent trends in fuel cell science and technology*. New York, USA: Springer; 2007: 286—331. https://doi.org/10.1007/978-0-387-68815-2_12
2. Clarke D.R., Oechsner M., Padture N.P. Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines. *MRS Bulletin*. 2012; 37(10): 891—898. <https://doi.org/10.1557/mrs.2012.232>
3. Yildirim H., Pachter R. Extrinsic dopant effects on oxygen vacancy formation energies in ZrO₂ with implication for memristive device performance. *ACS Applied Electronic Materials*. 2019; 1(4): 467—477. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.8b00090>
4. Maccauro P.G. Zirconia as a ceramic biomaterial. *Biomaterials*. 1999; 20(1): 1—25. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(98\)00010-6](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(98)00010-6)
5. Chevalier J., Liens A., Reveron H., Zhang F., Reynaud P., Douillard T., Preiss L., Sergob V., Lughì V., Swaind M., Courtois N. Forty years after the promise of «ceramic steel?»: Zirconia-based composites with a metal-like mechanical behavior. *Journal of the American Ceramic Society*. 2020; 103(3): 1482—1513. <https://doi.org/10.1111/jace.16903>
6. Buzynin A.N., Grishina T.N., Kiselyov T.V., Kosuhina L.A., Kravchenko N.V., Lomonova E.E., Panov V.A., Sidorov M.S., Trishenkov M.A., Filachev A.M. Zirconia-based solid solutions – new materials of photoelectronics. *Optical Memory & Neural Networks*. 2009; 18: 312—321. <https://doi.org/10.3103/S1060992X09040109>
7. Hannink R.H.J., Kelly P.M., Muddle B.C. Transformation toughening in zirconia-containing ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*. 2000; 83(3): 461—487. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01221.x>
8. Chevalier J., Gremillard L., Virkar A.V., Clarke D.R. The tetragonal-monoclinic transformation in zirconia: lessons learned and future. *Journal of the American Ceramic Society*. 2009; 92(9): 1901—1920. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2009.03278.x>
9. Basu B., Vleugels J., Biest O.V.D. Microstructure-toughness-wear relationship of tetragonal zirconia ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*. 2004; 24(7): 2031—2040. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(03\)00355-8](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(03)00355-8)
10. Sharma A., Witz G., Howell P.C., Hitchman N. Interplay of the phase and the chemical composition of the powder feedstock on the properties of porous 8YSZ thermal barrier coatings. *Journal of the European Ceramic Society*. 2021; 41(6): 3706—3716. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceram-soc.2020.10.062>
11. Fèvre M., Finel A., Caudron R., Mèvrel R. Local order and thermal conductivity in yttria-stabilized zirconia. II. Numerical and experimental investigations of thermal conductivity. *Physical review B*. 2005; 72: 104118—1—104118—7. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.104118>
12. Hasselman D.P.H., Johnson L.F., Benten H.D., Syed R., Lee H.M., Swain M.V. Thermal diffusivity and conductivity of dense polycrystalline ZrO₂ ceramics: a survey. *American Ceramic Society Bulletin*. 1987; 66(5): 799—806.
13. Wang X., Guo L., Zhang H., Gong S., Guo H. Structural evolution and thermal conductivities of (Gd_{1-x}Yb_x)₂Zr₂O₇ (x = 0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1) ceramics for thermal barrier coatings. *Ceramics International*. 2015; 41(10A): 12621—12625. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.06.090>
14. Ma W., Gao Y., Zhang J., Bai Y., Jia R., Dong H., Wang R., Bao M. Phase composition, microstructure and thermophysical properties of the Sr_x(Zr_{0.9}Y_{0.05}Yb_{0.05})O_{1.95+x} ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*. 2021; 41(4): 2734—2745. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceram-soc.2020.12.031>
15. Lakiza S.M., Hrechanyuk M.I., Red'ko V.P., Ruban O.K., Tyshchenko Ja.S., Makudera A.O., Dudnik O.V. The role of hafnium in modern thermal barrier coatings. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2021; 60: 70—89. <https://doi.org/10.1007/s11106-021-00217-1>
16. Yuan J., Zhou X., Dong S., Jiang J., Deng L., Song W., Dingwell D.B., Cao X. Plasma sprayed 18 mol% YO_{1.5} stabilized hafnia as potential thermal barrier coating. *Ceramics International*. 2021; 47(10A): 14515—14526. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.02.031>
17. Cahill D.G., Watson S.K., Pohl R.O. Lower limit to the thermal conductivity of disordered crystals. *Physical Review B*. 1992; 46: 6131—6140. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.46.6131>
18. Youngblood G.E., Rice R.W., Ingel R.I. Thermal diffusivity of partially and fully stabilized (yttria) zirconia single crystals. *Journal of the American Ceramic Society*. 1988; 71(4): 255—260. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1988.tb05856.x>
19. Bisson J.-F., Fournier D., Poulain M., Lavigne O., Mervrel R. Thermal conductivity of yttria-zirconia single crystals determined with spatially resolved infrared thermography. *Journal of the American Ceramic Society*. 2000; 83(8): 1993—1998. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01502.x>
20. Fan W., Wang Z., Bai Y., Che J.W., Wang R.J., Ma F., Tao W.Z., Liang G.Y. Improved properties of scandia and yttria co-doped zirconia as a potential thermal barrier material for high temperature applications. *Journal of the European Ceramic Society*. 2018; 38(13): 4502—4511. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.06.002>
21. Shi Q., Yuan W., Chao X., Zhu Z. Phase stability, thermal conductivity and crystal growth behavior of Re₂O₃ (Re = La, Yb, Ce, Gd) co-doped Y₂O₃ stabilized ZrO₂ powder. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 2017; 84: 341—348. <https://doi.org/10.1007/s10971-017-4483-z>
22. Chen D., Wang Q., Liu Y., Ning X. Microstructure, thermal characteristics, and thermal cycling behavior of the ternary rare earth oxides (La₂O₃, Gd₂O₃, and Yb₂O₃) co-doped YSZ coatings. *Surface & Coatings Technology*. 2020; 403: 126387. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126387>
23. Goff J.P., Hayes W., Hull S., Hutchings M.T., Clausen K.N. Defect structure of yttria-stabilized zirconia and its influence on the ionic conductivity at elevated temperatures. *Physical Review B*. 1999; 59: 14202—14219. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.59.14202>
24. Li Y., Gong J., Xie Y., Chen Y. Analysis of non-linear Arrhenius behavior of ionic conduction in cubic zirconia stabilized with yttria and calcia. *Journal of Materials Science Letters*. 2002; 21: 157—159. <https://doi.org/10.1023/A:1014253400747>
25. Norberg S.T., Hull S., Ahmed I., Eriksson S.G., Marrocchelli D., Madden P.A., Li P., Irvine J.T.S. Structural disorder in doped zirconias. Part I: the Zr_{0.8}Sc_{0.2-x}Y_xO_{1.9} (0.0 ≤ x ≤ 0.2) system. *Chemistry of Materials*. 2011; 23(6): 1356—1364. <https://doi.org/10.1021/cm102808k>

26. Marrocchelli D., Madden P.A., Norberg S.T., Hull S. Structural disorder in doped zirconias. Part II: vacancy ordering effects and the conductivity maximum. *Chemistry of Materials*. 2011; 23(6): 1365—1373. <https://doi.org/10.1021/cm102809t>
27. Popov P.A., Solomennik V.D., Lomonova E.E., Borik M.A., Myzina V.A. Thermal conductivity of single crystal ZrO_2 — Y_2O_3 solid solutions in the temperature range 50–300 K. *Physics of the Solid State*. 2012; 54(3): 658—661. <https://doi.org/10.1134/S1063783412030250>
28. Borik M.A., Volkova T.V., Kulebyakin A.V., Kuritsyna I.E., Lomonova E.E., Myzina V.A., Milovich F.O., Ryabochkina P.A., Tabachkova N.Yu., Zentsova A.I., Popov P.A. Thermal conductivity of cubic ZrO_2 single crystals stabilized with yttrium oxide. *Physics of the Solid State*. 2020; 62(1): 235—239. <https://doi.org/10.1134/S1063783420010072>
29. Kuzminov Yu.S., Lomonova E.E., Osiko V.V. Refractory materials from a cold crucible. Moscow: Nauka; 2004. 369 p. (In Russ.)
30. Ruh R., Garrett H.J., Domagala R.F., Patel V.A. The system zirconia–scandia. *Journal of the American Ceramic Society*. 1977; 60(9–10): 399—403. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1977.tb15521.x>
31. Yashima M., Kakihana M., Yoshimura M. Metastable–stable phase diagrams in the zirconia–containing systems utilized in solid–oxide fuel cell application. *Solid State Ionics*. 1996; 86–88(Part 2): 1131—1149. [https://doi.org/10.1016/0167-2738\(96\)00386-4](https://doi.org/10.1016/0167-2738(96)00386-4)
32. Chiba R., Yoshimura F., Yamaki J., Ishii T., Yonezawa T., Endou K. Ionic conductivity and morphology in Sc_2O_3 and Al_2O_3 doped ZrO_2 films prepared by the sol–gel method. *Solid State Ionics*. 1997; 104(3–4): 259—266. [https://doi.org/10.1016/S0167-2738\(97\)00423-2](https://doi.org/10.1016/S0167-2738(97)00423-2)
33. Arachi Y., Suzuki M., Asai T., Emura S., Kamiyama T., Izumi F. High–temperature structure of Sc_2O_3 –doped ZrO_2 . *Solid State Ionics*. 2004; 175(1–4): 119—121. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2004.09.025>
34. Huang H., Hsieh C.–H., Kim N., Stebbins J., Prinz F. Structure, local environment, and ionic conduction in scandia stabilized zirconia. *Solid State Ionics*. 2008; 179(27–32): 1441—1445. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2008.02.061>
35. Agarkov D.A., Borik M.A., Volkova T.V., Eliseeva G.M., Kulebyakin A.V., Larina N.A., Lomonova E.E., Myzina V.A., Ryabochkina P.A., Tabachkova N.Yu. Phase composition and local structure of scandia and yttria stabilized zirconia solid solution. *Journal of Luminescence*. 2020; 222: 117170. <https://doi.org/10.1016/j.jlum.2020.117170>
36. Borik M.A., Gerasimov M.V., Kulebyakin A.V., Larina N.A., Lomonova E.E., Milovich F.O., Myzina V.A., Ryabochkina P.A., Sidorova N.V., Tabachkova N.Y. Structure and phase transformations in scandia, yttria, ytterbia and ceria doped zirconia base solid solutions during directional melt crystallization. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020; 844: 156040. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156040>
37. Borik M.A., Kulebyakin A.V., Lomonova E.E., Myzina V.A., Popov P.A., Milovich F.O., Tabachkova N.Yu. Thermal conductivity of single–crystal ZrO_2 –based solid solutions stabilized with scandium and yttrium oxides in the temperature range 50–300 K. *Physics of the Solid State*. 2018; 60(12): 2672—2677. <https://doi.org/10.1134/S1063783418120090>

Информация об авторах / Information about the authors

Агарков Дмитрий Александрович — канд. физ.–мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики твердого тела Российской академии наук, ул. Акад. Осипьяна, д. 2, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9650-6951>; e-mail: agarkov@issp.ac.ru

Борик Михаил Александрович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, ул. Вавилова, д. 38, Москва, 119991, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9799-3720>; e-mail: borik@lst.gpi.ru

Кorableва Галина Максимовна — младший научный сотрудник, Институт физики твердого тела Российской академии наук, ул. Акад. Осипьяна, д. 2, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6353-5753>; e-mail: eliseevagm@issp.ac.ru

Кулебякин Алексей Владимирович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, ул. Вавилова, д. 38, Москва, 119991, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9005-4795>; e-mail: kulebyakin@lst.gpu.ru

Ломонова Елена Евгеньевна — доктор техн. наук, зав. лабораторией, Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, ул. Вавилова, д. 38, Москва, 119991, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6662-8808>; e-mail: lomonova@lst.gpi.ru

Милович Филипп Олегович — канд. физ.–мат. наук, доцент кафедры материаловедения полупроводников

Dmitrii A. Agarkov — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Senior Researcher, Institute of Solid State Physics, Russian Academy of Sciences, 2 Acad. Ossipyan Str., Chernogolovka, Moscow District 142432, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9650-6951>; e-mail: agarkov@issp.ac.ru

Mikhail A. Borik — Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, 38 Vavilov Str., Moscow 119991, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9799-3720>; e-mail: borik@lst.gpi.ru

Galina M. Korableva — Junior Researcher, Institute of Solid State Physics, Russian Academy of Sciences, 2 Acad. Ossipyan Str., Chernogolovka, Moscow District 142432, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6353-5753>; e-mail: eliseevagm@issp.ac.ru

Aleksej V. Kulebyakin — Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, 38 Vavilov Str., Moscow 119991, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9005-4795>; e-mail: kulebyakin@lst.gpu.ru

Elena E. Lomonova — Dr. Sci. (Eng.), Head Laboratory, Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, 38 Vavilov Str., Moscow 119991, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6662-8808>; e-mail: lomonova@lst.gpi.ru

Filipp O. Milovich — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Associate Professor of Department of Materials Science of Semiconductors

и диэлектриков, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4327-1877>; e-mail: philippmilovich@gmail.com

Мызина Валентина Алексеевна — научный сотрудник, Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, ул. Вавилова, д. 38, Москва, 119991, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5602-9126>; e-mail: vamyzina@lst.gpi.ru

Попов Павел Аркадьевич — доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры экспериментальной и теоретической физики, Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского, ул. Бежицкая, д. 14, Брянск, 241036, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7555-1390>; e-mail: tfbgubry@mail.ru

Табачкова Наталия Юрьевна — канд. физ.-мат. наук, Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, ул. Вавилова, д. 38, Москва, 119991, Россия; доцент кафедры материаловедения полупроводников и диэлектриков, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0169-5014>; e-mail: ntabachkova@gmail.com

and Dielectrics, National University of Science and Technology MISiS, 4-1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4327-1877>; e-mail: philippmilovich@gmail.com

Valentina A. Myzina — Researcher, Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, 38 Vavilov Str., Moscow 119991, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5602-9126>; e-mail: vamyzina@lst.gpi.ru

Pavel A. Popov — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Experimental and Theoretical Physics, Ivan Petrovsky Bryansk State University, 14 Bezhitskaya Str., Bryansk 241036, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7555-1390>; e-mail: tfbgubry@mail.ru

Nataliya Yu. Tabachkova — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, 38 Vavilov Str., Moscow 119991, Russia; Associate Professor of Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics, National University of Science and Technology MISiS, 4-1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0169-5014>; e-mail: ntabachkova@gmail.com

* * *