

Научная статья
УДК 541.135.4
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.3.009

СИНТЕЗ И ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК Ta-ЗАМЕЩЕННОГО ТВЕРДОГО ЭЛЕКТРОЛИТА $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$

Ирина Витальевна Бочарова¹, Галина Борисовна Куншина², Вадим Викторович Ефремов³

^{1–3}*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И.В. Тананаева
Кольского научного центра РАН, г. Апатиты, Россия*

¹*i.bocharova@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2421-4295>*

²*g.kunshina@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6530-7607>*

³*v.efremov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2407-7304>*

Аннотация

Исследован процесс синтеза порошков Ta-замещенного литийпроводящего твердого электролита номинального состава $\text{Li}_{6.52}\text{Al}_{0.08}\text{La}_3\text{Zr}_{1.75}\text{Ta}_{0.25}\text{O}_{12}$ (Ta-LLZ) методом плавления шихты, состоящей из низкоплавких кристаллогидратов $\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, с последующим твердофазным спеканием. На основе рентгенофазового и дифференциально-термического анализа установлены условия формирования монофазного Ta-LLZ кубической модификации, не содержащего непроводящих примесных фаз $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ и La_2O_3 . Методом спектроскопии электрохимического импеданса и потенциостатической хроноамперометрии определены удельная ионная ($\sim 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ См} \cdot \text{см}^{-1}$) и электронная проводимость ($< 1,7 \cdot 10^{-9} \text{ См} \cdot \text{см}^{-1}$). На основании изученных электрохимических характеристик Ta-LLZ является перспективным материалом для полностью твердотельных литий-ионных аккумуляторов.

Ключевые слова

литийпроводящий твердый электролит, синтез, ионная проводимость, электрохимический импеданс

Благодарности:

статья выполнена при поддержке федерального бюджета по теме государственного задания Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН № FMEZ-2022-0015.

Для цитирования:

Бочарова, И. В. Синтез и изучение электрохимических характеристик Ta-замещенного твердого электролита $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ / И. В. Бочарова, Г. В. Куншина, В. В. Ефремов // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 3. С. 54–59. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.3.009.

Original article

SYNTHESIS AND STUDY OF ELECTROCHEMICAL CHARACTERISTICS OF Ta-DOPED SOLID ELECTROLYTE $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$

Irina V. Bocharova¹, Galina B. Kunshina¹, Vadim V. Efremov³

^{1–3}*I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials
of the Kola Science Centre of the RAS, Apatity, Russia*

¹*i.bocharova@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2421-4295>*

²*g.kunshina@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6530-7607>*

³*v.efremov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2407-7304>*

Abstract

The process of synthesis of Ta-substituted lithium-conducting solid electrolyte powders with nominal composition $\text{Li}_{6.52}\text{Al}_{0.08}\text{La}_3\text{Zr}_{1.75}\text{Ta}_{0.25}\text{O}_{12}$ (Ta-LLZ) by melting a charge consisting of low-melting crystallohydrates $\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, followed by solid-phase sintering, is investigated. On the basis of X-ray phase and differential thermal analysis, the conditions for the formation of a monophasic cubic Ta-LLZ that does not contain nonconducting impurity phases $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ and La_2O_3 are established. The ionic ($\sim 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$) and electron conductivity ($< 1,7 \cdot 10^{-9} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$) were determined by electrochemical impedance spectroscopy and potentiostatic chronoamperometry. Based on the studied electrochemical characteristics, Ta-LLZ is a promising material for all solid-state lithium-ion batteries.

Keywords

lithium-conducting solid electrolyte, synthesis, ionic conductivity, electrochemical impedance

Acknowledgments:

the article was prepared with the support of the federal budget topic of the state assignment for Tananaev Institute of Chemistry — Subdivision of the Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences” No. FMEZ-2022-0015.

For citation:

Bocharova, I. V. Synthesis and study of electrochemical characteristics of Ta-doped solid electrolyte $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ / I. V. Bocharova, G. B. Kunshina, V. V. Efremov // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 3. P. 54–59. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.3.009.

Первое сообщение о высокой проводимости по иону Li^+ в новых литийсодержащих оксидах переходных металлов со структурой граната с номинальным составом $\text{Li}_5\text{La}_3\text{B}_2\text{O}_{12}$ ($\text{B} = \text{Nb}, \text{Ta}$) стимулировало обширные исследования по синтезу, структуре и проводящим свойствам литиевых гранатов [1]. В 2007 г. Р. Муруган [Murugan] с коллегами синтезировали высокопроводящий кубический $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ путем замены В на Zr в $\text{Li}_5\text{La}_3\text{B}_2\text{O}_{12}$, что доказывает, что структура граната может содержать до 7 ионов Li согласно химической формуле [2].

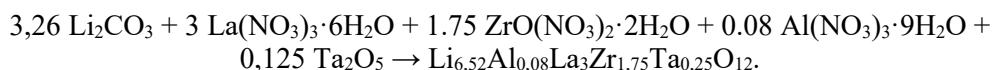
Среди твердых электролитов $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ со структурой граната привлек большое внимание из-за относительно высокой ионной проводимости ($>10^{-4}$ См/см при 25 °С), высокой химической и электрохимической стабильности по отношению к металлическому литию и высокого напряжения разложения (~6 В относительно Li^+/Li) [3]. Структура граната $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ имеет две кристаллические модификации — тетрагональную и кубическую. Литий-ионная проводимость тетрагональной модификации на два порядка ниже, чем у кубической модификации [4–5]. Кубическая модификация может быть стабилизирована частичным катионным замещением, для этого проводят легирование твердого электролита $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ ионами Al^{3+} , Ga^{3+} , Nb^{5+} , Ta^{5+} и др. [6–8]. Наибольшее число исследований посвящены частичной замене Li^+ на Al^{3+} , который является недорогой легирующей добавкой и может быть непреднамеренно введен в структуру граната при спекании в корундовых тиглях. Однако ион Al^{3+} блокирует позиции лития, что приводит к снижению концентрации Li^+ и замедлению диффузии Li^+ (в отличие от Ta^{5+} , который используется для замены Zr^{4+} , чтобы избежать уменьшения содержания Li^+) [9–10]. Синтез твердого электролита $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ методом твердофазных реакций предусматривает многостадийность: многократное измельчение в высокоэнергетических мельницах и продолжительное высокотемпературное спекание [11].

Цель настоящей работы заключалась в разработке метода синтеза Та-замещенного твердого электролита $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ кубической модификации с высокой ионной проводимостью для использования в литиевых аккумуляторах нового поколения (полностью твердотельные, литий-серные и литий-воздушные аккумуляторы).

Экспериментальная часть

Ранее был разработан способ получения Al-замещенного твердого электролита $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ методом плавления шихты с последующим твердофазным спеканием номинального состава $\text{Li}_{6,4}\text{Al}_{0,2}\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ (Al-LLZ) [12]. В качестве исходных веществ для синтеза Та-замещенного твердого электролита номинального состава $\text{Li}_{6,52}\text{Al}_{0,08}\text{La}_3\text{Zr}_{1,75}\text{Ta}_{0,25}\text{O}_{12}$ (Та-LLZ) аналогично [12] использовали $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ «ч.», $\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ «ч.д.а.», $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ «ч.д.а.», Li_2CO_3 «х.ч.» и Ta_2O_5 «ос.ч.». Были выбраны следующие составы: $\text{Li}_{6,75}\text{La}_3\text{Ta}_{0,25}\text{Zr}_{1,75}\text{O}_{12}$ (№ 1), $\text{Li}_{6,6}\text{La}_3\text{Ta}_{0,4}\text{Zr}_{1,6}\text{O}_{12}$ (№ 2), $\text{Li}_{6,52}\text{Al}_{0,08}\text{La}_3\text{Ta}_{0,25}\text{Zr}_{1,75}\text{O}_{12}$ (№ 3). По результатам рентгенофазового анализа состав № 1 имеет небольшую примесную фазу La_2O_3 , состав № 2 — La_2O_3 и $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ со структурой пироклора, образование которого происходит, возможно, из-за недостаточного количества лития в образце, состав № 3 — без примесей.

Состав шихты рассчитывали в соответствии со стехиометрией реакции:



Исключение составил Li_2CO_3 , который был взят в 20 %-м избытке.

Смесь исходных веществ помещали в корундовый тигель и подвергали термообработке в муфельной печи МИМП-3П с программным управлением со скоростью нагрева 10 град/мин в течение 4 ч при температуре 900 °С. Выход продукта составил 98–99 % от теоретического. После спекания продукт в виде рыхлого спека измельчали и получали порошок, из которого прессовали таблетки и спекали их под маточным порошком со скоростью нагрева 10 град/мин в интервале 20–1050 °С и 1 град/мин в интервале 1050–1180 °С с изотермической выдержкой при температуре 1180 °С в течение 9 ч.

Фазовый состав порошков твердого электролита Ta-LLZ определяли с использованием дифрактометра XRD-6000 Shimadzu ($\text{CuK}\alpha$ -излучение, графитовый монохроматор). Термическую стабильность и температуру плавления кубического Ta-LLZ исследовали методом дифференциально-термического анализа на синхронном термическом анализаторе NETZSCH STA 409 PC/PG (Netzsch, Германия) в интервале 20–1400 °С в корундовом тигле. Плотность таблеток рассчитывали как частное от деления массы образца на его объем, вычисленный из геометрических размеров цилиндрической таблетки. Размеры предварительно отшлифованного образца измеряли микрометром с точностью 0,01 мм, таблетку взвешивали на электронных весах ЛВ-210А с точностью 0,001 г.

Для изучения ионной проводимости применяли метод импедансной спектроскопии, в котором импеданс электрохимической ячейки (Z) измеряется как функция от частоты. Исследовали дисперсию комплексного импеданса образцов в симметричной экранированной ячейке $\text{C}/\text{Ta-LLZ}/\text{C}$ в диапазоне частот 10^3 – $2 \cdot 10^6$ Гц с амплитудой переменного сигнала 100 мВ. Измерения проводили импедансметром Z-2000 (Elins, Россия). Для изучения ионной проводимости образцы готовили в виде прессованных цилиндрических таблеток (d — 1,12 см, h — 0,16 см), на торцы которых после спекания при температуре 1180–1200 °С в течение 9 ч наносили графитовые электроды. Плотность спеченных таблеток достигала 65–69 % от теоретической ($\rho_{\text{теор}}$ — 5,26 г/см³). Число переноса иона Li^+ и значение электронной проводимости определяли методом потенциостатической хроноамперометрии с использованием потенциостата Р-8 (Elins, Россия).

Результаты и обсуждение

По данным рентгенофазового анализа установлено, что после спекания образца при температуре 900 °С в течение 4 ч образуется смесь кубической и тетрагональной фазы Ta-LLZ, а также La_2O_3 , Ta_2O_5 и ZrO_2 (рис. 1). При повышении температуры до 1180 °С образуется хорошо окристаллизованный монофазный Ta-LLZ кубической модификации (ICDD 04-023-7624).

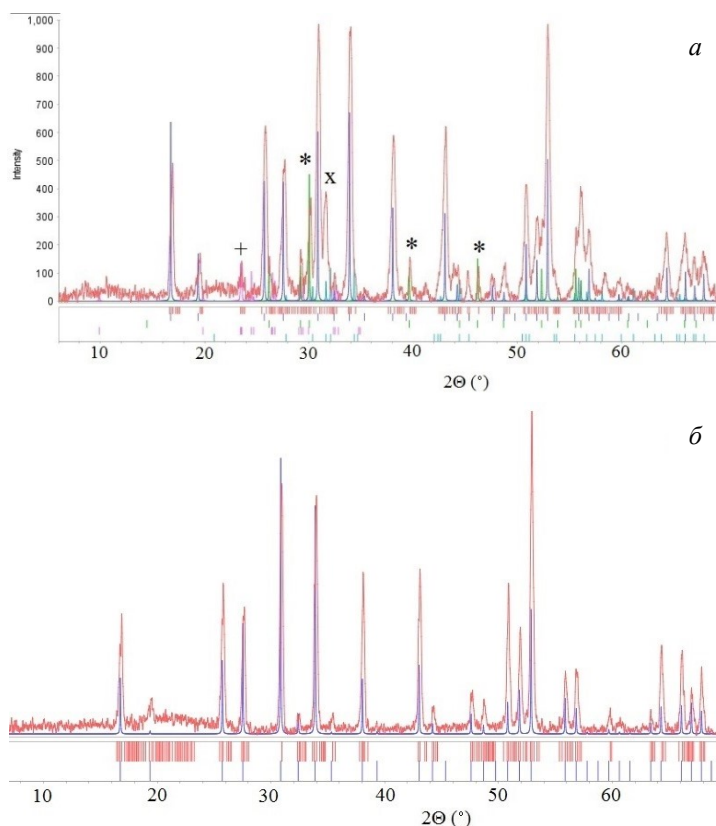


Рис. 1. Дифрактограммы образцов Ta-LLZ после спекания порошков при температуре 900 °С в течение 4 ч (а) и после спекания таблеток при 1180 °С в течение 9 ч (б) (* — La_2O_3 , + — Ta_2O_5 , x — ZrO_2)

Как следует из данных ДТА, никаких термических эффектов, фазовых переходов и изменения массы не было обнаружено на термограмме синтезированной керамики Ta-LLZ вплоть до температуры плавления. Начало термического эффекта процесса плавления Ta-LLZ на кривой ДСК составляло 1328 °С. Интенсивный эндотермический пик плавления был ярко выражен при температуре 1341 °С (в литературе данные о температуре плавления Ta-LLZ отсутствуют).

На рис. 2 представлен спектр электрохимического импеданса спеченной таблетки Ta-LLZ при комнатной температуре, на котором обозначены экспериментальные значения сопротивления и аппроксимационная кривая, полученная с помощью программы Zview2 (программа моделирования эквивалентных схем для анализа данных). Величину проводимости рассчитывали экстраполяцией высокочастотной части годографа на ось активных сопротивлений. Значение общей удельной ионной проводимости при комнатной температуре составило $1,1 \cdot 10^{-4}$ См/см.

Электронную проводимость определяли методом потенциостатической хроноамперометрии (регистрацией плотности тока как функции времени после включения поляризующего потенциала). Постоянное напряжение 1 В от потенциостата прикладывали к симметричной ячейке C/Ta-LLZ/C с блокирующими графитовыми электродами. Поляризационная хроноамперометрическая кривая Ta-LLZ представлена на рис. 3.

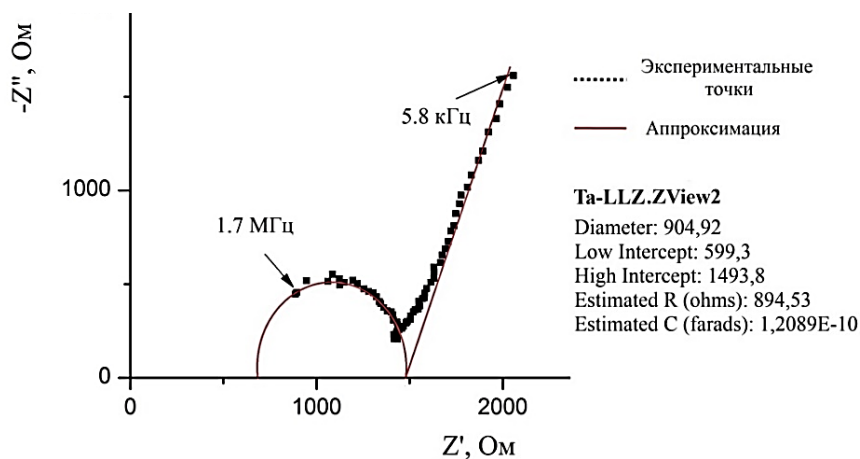


Рис. 2. Спектр электрохимического импеданса таблетки Ta-LLZ

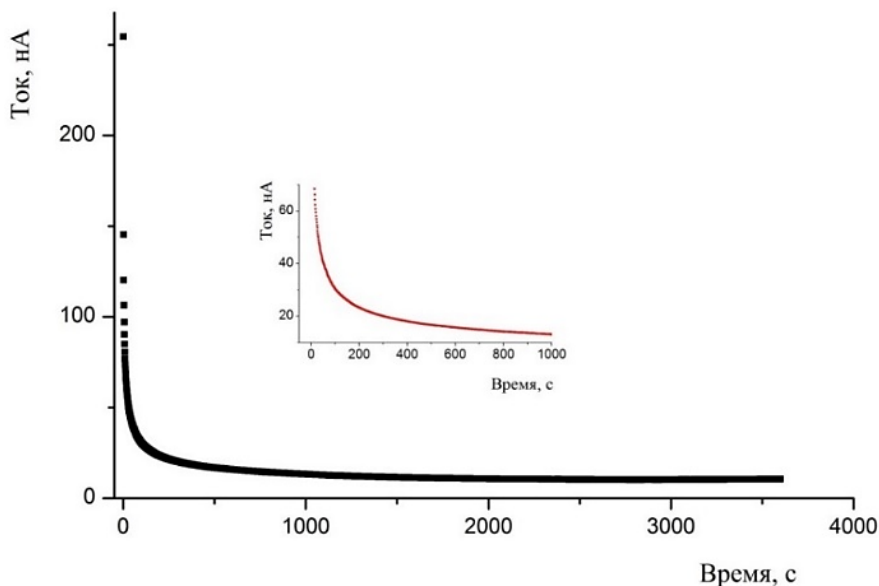


Рис. 3. Хроноамперометрическая кривая Ta-LLZ, измеренная при приложенном напряжении 1 В

Электронную проводимость рассчитывали по формуле

$$\sigma_e = \frac{I_{\text{ст}} h}{US},$$

где $I_{\text{ст}}$ — ток стабилизации, А; h — толщина таблетки; U — приложенное постоянное напряжение, В; S — площадь поперечного сечения таблетки.

Рассчитанное значение σ_e не превышало $1,7 \cdot 10^{-9}$ См/см, что на 5 порядков ниже величины ионной проводимости.

Для изучения температурной зависимости и определения энергии активации Ta-LLZ на образец наносили графитовые электроды, измерение проводили в режиме ступенчатого нагрева в интервале 25–120 °С. Энергия активации E_a составляет 0,3 эВ, что согласуется с известными данными для Ta-LLZ.

Выводы

Исследован процесс синтеза порошков Ta-LLZ, который заключается во взаимодействии компонентов шихты, состоящей из низкоплавких кристаллогидратов $(\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$), Ta_2O_5 и Li_2CO_3 с 20 %-м избытком при нагревании до температуры 900 °С. Установлено, что после спекания при 900 °С в течение 4 ч наряду с кубической образуется тетрагональная модификация Ta-LLZ. При повышении температуры до 1180 °С и спекании в виде таблеток в течение 9 ч образуется однофазный хорошо окристаллизованный Ta-LLZ. Никаких термических эффектов, фазовых переходов и изменения массы не было обнаружено на термограмме синтезированной керамики Ta-LLZ вплоть до температуры плавления (1341 °С).

Ионная проводимость составила $1,1 \cdot 10^{-4}$ См/см при комнатной температуре, а электронная не превышала $1,7 \cdot 10^{-9}$ См/см. Число переноса иона Li^+ составило 0,96. Соотношение между ионной и электронной проводимостью Ta-LLZ удовлетворяет требованиям, предъявляемым к материалам для разработки твердотельных устройств на их основе. Плотность таблеток после спекания в течение 9 ч достигала 65–69 % от теоретической, то есть получить таблетки с высокой плотностью не удалось. В дальнейшем планируется использовать метод искрового плазменного спекания для получения образцов Ta-LLZ с более высокой плотностью.

Список источников

1. Thangadurai V., Kaack H., Weppner W. Novel fast lithium ion conduction in garnet-type $\text{Li}_5\text{La}_3\text{M}_2\text{O}_{12}$ ($\text{M} = \text{Nb}, \text{Ta}$) // J. Am. Ceram. Soc. 2003. Vol. 86. P. 437–440.
2. Murugan R., Thangadurai V., Weppner W. Fast lithium ion conduction in garnet-type $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ // Angew. Chem. Int. Ed. 2007. Vol. 46. P. 7778–17781.
3. Thangadurai V., Narayanan S., Pinzaru D. Garnet-type solid-state fast Li ion conductors for Li batteries: critical review // Chem. Soc. Rev. 2014. Vol. 43. P. 4714–4727.
4. Synthesis and structure analysis of tetragonal $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ with the garnet-related type structure / J. Awaka [et al.] // J. Solid State Chem. 2009. Vol. 182. P. 2046–2052.
5. Optimization of the preparation conditions of $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ ceramic electrolyte for lithium power cells / E. A. Il'ina [et al.] // Russ. J. Appl. Chem. 2013. Vol. 86 (8). P. 1250–1255.
6. Rangasamy E., Wolfenstine J., Sakamoto J. The role of Al and Li concentration on the formation of cubic garnet solid electrolyte of nominal composition $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ // Solid State Ionics. 2012. Vol. 206. P. 28–32.
7. Shinawi H. E., Janek J. Stabilization of cubic lithium-stuffed garnets of the type “ $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ ” by addition of gallium // J. Power Sources. 2013. Vol. 225. P. 13–19.
8. Ohta S., Kobayashi T., Asaoka T. High lithium ionic conductivity in the garnet type oxide $\text{Li}_{7-x}\text{La}_3(\text{Zr}_{2-x}\text{Nb}_x)\text{O}_{12}$ ($x = 0-2$) // J. Power Sources. 2011. Vol. 196. P. 3342–3345.
9. Salimkhani H., Yurum A., Gursel S. A glance at the influence of different dopant elements on $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ garnets // Ionics. 2021. Vol. 27. P. 3673–3698.
10. Synergistic regulation of garnet-type Ta-doped $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ solid electrolyte by Li^+ concentration and Li^+ transport channel size / Y. Zhang [et al.] // Electrochim. Acta. 2019. Vol. 296. P. 823–829.
11. Multistep sintering to synthesize fast lithium garnets / [B. Xu et al.] // J. Power Sources. 2016. Vol. 302. P. 291–297.
12. Kunshina G. B., Ivanenko V. I., Bocharova I. V. Synthesis and study of conductivity of Al-substituted $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ // Russ. J. Electrochem. 2019. Vol. 55 (6). P. 734–740.

References

1. Thangadurai V., Kaack H., Weppner W. Novel fast lithium ion conduction in garnet-type $\text{Li}_5\text{La}_3\text{M}_2\text{O}_{12}$ ($\text{M} = \text{Nb}, \text{Ta}$). *Journal of the American Ceramic Society*, 2003, Vol. 86, pp. 437–440.
2. Murugan R., Thangadurai V., Weppner W. Fast lithium ion conduction in garnet-type $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$. *Angewandte Chemie International Edition*, 2007, Vol. 46, pp. 7778–7781.
3. Thangadurai V., Narayanan S., and Pinzaru D. Garnet-type solid-state fast Li ion conductors for Li batteries: critical review. *Chemical Society Reviews*, 2014, Vol. 43, pp. 4714–4727.
4. Awaka J., Kijima N., Hayakawa H., Akimoto J. Synthesis and structure analysis of tetragonal $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ with the garnet-related type structure. *Journal of Solid State Chemistry*, 2009, Vol. 182, pp. 2046–2052.
5. Il'ina E. A., Aleksandrov A. V., Raskovalov A. A., Batalov N. N. Optimization of the preparation conditions of $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ ceramic electrolyte for lithium power cells. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2013, Vol. 86, No. 8, pp. 1250–1255.
6. Rangasamy E., Wolfenstine J., Sakamoto J. The role of Al and Li concentration on the formation of cubic garnet solid electrolyte of nominal composition $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$. *Solid State Ionics*, 2012, Vol. 206, pp. 28–32.
7. Shinawi H. E., Janek J. Stabilization of cubic lithium-stuffed garnets of the type “ $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ ” by addition of gallium. *Journal of Power Sources*, 2013, vol. 225, pp. 13–19.
8. Ohta S., Kobayashi T., Asaoka T. High lithium ionic conductivity in the garnet type oxide $\text{Li}_{7-x}\text{La}_3(\text{Zr}_{2-x}\text{Nb}_x)\text{O}_{12}$ ($x = 0-2$). *Journal of Power Sources*, 2011, Vol. 196, pp. 3342–3345.
9. Salimkhani H., Yurum A., Gursel S. A glance at the influence of different dopant elements on $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ garnets. *Ionics*, 2021, Vol. 27, pp. 3673–3698.
10. Zhang Y., Deng J., Hu D., Chen F., Shen Q., Zhang L., Dong S. Synergistic regulation of garnet-type Ta-doped $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ solid electrolyte by Li^+ concentration and Li^+ transport channel size. *Electrochimica Acta*, 2019, Vol. 296, pp. 823–829.
11. Xu B., Duan H., Xia W., Guo Y., Kang H., Li H., Liu H. Multistep sintering to synthesize fast lithium garnets. *Journal of Power Sources*, 2016, Vol. 302, pp. 291–297.
12. Kunshina G. B., Ivanenko V. I., Bocharova I. V. Synthesis and study of conductivity of Al-substituted $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$. *Electrochemistry*, 2019, Vol. 55, No. 6, pp. 734–740.

Информация об авторах

И. В. Бочарова — младший научный сотрудник;

Г. Б. Куншина — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник;

В. В. Ефремов — кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

Information about the authors

I. V. Bocharova — Junior Researcher;

G. B. Kunshina — PhD (Engineering), Leading Researcher;

V. V. Efremov — PhD (Engineering), Senior Researcher.

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