

УДК 621.355.9

DOI 10.46960/2658-6754\_2022\_2\_16

**ПРОИЗВОДСТВО ТВЕРДОГО ЭЛЕКТРОЛИТА  
 $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$  ДЛЯ НАТРИЙ-ИОННОГО  
АККУМУЛЯТОРА**

**К.К. Нго**

Технологический университет имени Лэ Куи Дона  
Ханой, Вьетнам  
e-mail: quyenkazan@gmail.com

**В.Н. Нгуен**

Ханойский архитектурный университет  
Ханой, Вьетнам  
e-mail: quyenkazan@gmail.com

**В.Н. То**

Технологический университет имени Лэ Куи Дона  
Ханой, Вьетнам  
e-mail: quyenkazan@gmail.com

**В.К. Нгуен**

Технологический университет имени Лэ Куи Дона  
Ханой, Вьетнам  
e-mail: quyenkazan@gmail.com

**Ч.Ш. Лыонг**

Технологический университет имени Лэ Куи Дона  
Ханой, Вьетнам  
e-mail: quyenkazan@gmail.com

**Т.Ф. Доан**

Технологический университет имени Лэ Куи Дона  
Ханой, Вьетнам  
e-mail: quyenkazan@gmail.com

**М.Т. Фам**

Технологический университет имени Лэ Куи Дона  
Ханой, Вьетнам  
e-mail: quyenkazan@gmail.com

**Т.Т. Нгуен**

Вьетнамская Академия наук и технологий  
Ханой, Вьетнам  
e-mail: quyenkazan@gmail.com

Представлены результаты исследования влияния условий изготовления и работы на электропроводность твердого электролита  $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$ . Давление гранулирования перед спеканием сильно влияет на чистоту, а также на проводимость электролита. При давлении прессования 8 тонн/см<sup>2</sup> электролит имеет наибольшую электропроводность при комнатной температуре. Результаты исследования показали, что твердый электролит  $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$  имеет наибольшую электропроводность при работе при температуре 100 °С.

**Ключевые слова:** натрий-ионный аккумулятор, твердый электролит,  $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$ .

**Для цитирования:** Нго К.К., Нгуен В.Н., То В.Н., Нгуен В.К., Льюнг Ч.Ш., Доан Т.Ф., Фам М.Т., Нгуен Т.Т. Производство твердого электролита  $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$  для натрий-ионного аккумулятора // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 2. С. 16-29. DOI: 10.46960/2658-6754\_2022\_2\_16

## **PRODUCTION OF SOLID ELECTROLYTE $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$ FOR SODIUM-ION BATTERY**

**Q.Q. Ngo**

Le Qui Don Technological University  
Hanoi, Vietnam  
e-mail: quyenkazan@gmail.com

**V.N. Nguyen**

Hanoi University of Architecture  
Hanoi, Vietnam  
e-mail: quyenkazan@gmail.com

**V.N. To**

Le Qui Don Technological University  
Hanoi, Vietnam  
e-mail: quyenkazan@gmail.com

**V.K. Nguyen**

Le Qui Don Technological University  
Hanoi, Vietnam  
e-mail: quyenkazan@gmail.com

**T.S. Luong**

Le Qui Don Technological University  
Hanoi, Vietnam  
e-mail: quyenkazan@gmail.com

**T.Ph. Doan**

Le Qui Don Technological University  
Hanoi, Vietnam  
e-mail: quyenkazan@gmail.com

**M.T. Pham**

Le Qui Don Technological University  
Hanoi, Vietnam  
e-mail: quyenkazan@gmail.com

**T.T. Nguyen**

Vietnam Academy of Science and Technology  
Hanoi, Vietnam  
e-mail: quyenkazan@gmail.com

**Abstract.** This paper presents the results of investigating the influence of fabrication and working conditions on the conductivity of solid electrolyte  $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$ . With the same material made from the starting precursors, the pellet pressure before sintering greatly affects the purity, as well as the conductivity of the electrolyte. With a pressing pressure of 8 tons/cm<sup>2</sup>, the material has the highest conductivity in working conditions at room temperature, solid electrolyte  $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$  has the highest conductivity when working at 100 °C.

**Keywords:** sodium ion battery, solid electrolyte,  $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$ .

**For citation:** Q.Q. Ngo, V.N. Nguyen, V.N. To, V.K. Nguyen, T.S. Luong, T.Ph. Doan, M.T. Pham and T.T. Nguyen, “Production of solid electrolyte  $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$  for sodium-ion battery”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 16-29, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754\_2022\_2\_16

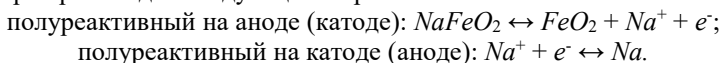
**I. Введение**

Спрос на компоненты для хранения энергии растет, что стимулирует рост числа исследований в области аккумуляторов. В последние годы вырос интерес к натрий-ионным аккумуляторам, которые в силу их низкой стоимости и высокой емкости заменяют литий-ионные аккумуляторы. Материал  $\text{O}_3\text{-NaMnO}_2$ , примененный в качестве катода для натрий-ионного аккумулятора, дает разрядную емкость 185 мАч/г при 0,1 С и сохраняет 71 % емкости после 20 циклов [1]; материал  $\text{O}_3\text{-NaNi}_{1/3}\text{Fe}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$  сохраняет 76 % емкости после 150 циклов [2].

Натрий-ионные батареи состоят из катода (соединения оксидов переходных металлов и натрия), анода (металлический натрий) и электролита. Помимо материала электродов, очень важную роль в рабочем процессе аккумуляторов играет электролит. В большинстве ионных аккумуляторов используются жидкие электролиты, обладающие преимуществом высокой проводимости. Однако при их зарядке существует потенциальный риск возгорания и взрыва. Альтернативой является использование твердых электролитов, полностью исключающих опасность возгорания и взрыва.

В качестве твердых электролитов для натрий-ионных аккумуляторов используются такие материалы как  $Na_3PS_4$ ,  $Na_2S-P_2S_5$  и  $Na_2Se-Ga_2Se_3-GeSe_2$  [3-5]. Керамические электролиты, такие как  $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$ ,  $Na_{3+x}Sc_2Si_xP_{3-x}O_{12}$  и  $Na_{1.3}Al_{0.3}Ti_{1.7}(PO_4)_3$  [6-9], также показали высокую стабильность при воздействии воздуха и низкой температуры, влаги [10]. Но низкая ионная проводимость и высокое электрическое сопротивление между электродом и границей электролита являются ограничением, которое необходимо преодолеть для продолжения исследований в данном направлении [11]. Кроме того, тот факт, что электролит проводит ионы при высоких температурах, также является препятствием для применения полностью твердотельных ионных аккумуляторов. В данной работе основное внимание сосредоточено на изучении влияния условий синтеза на свойства твердого электролита  $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$ , который может проводить ионы при комнатной температуре.

Механизм миграции ионов  $Na^+$  в твердых неорганических электролитах показан на рис. 1 [12]. В частности, ионы  $Na^+$  могут двигаться по трем механизмам: движение по границам зерен, перемещение за счет вытеснения ионов  $Na^+$ , имеющихся в электролите, и, наконец, перемещение по отверстиям в твердом электролите. Химическая реакция в натрий-ионном аккумуляторе происходит следующим образом:



Поскольку  $Na$  и  $P$  могут испаряться в процессе синтеза при высоких температурах,  $ZrO_2$  может оставаться на границе зерен, что препятствует переносу ионов  $Na^+$ . Удаление примесей  $ZrO_2$  при синтезе  $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$  можно осуществить путем оптимизации соотношения прекурсоров и поддержания температуры спекания на уровне 1100 °C в течение 18-ти часов. Однако даже при достижении синтезируемой фазы давление предварительного спекания по-прежнему оказывает большое влияние на ионную проводимость в твердом электролите. Исходя из этого, перед процессом спекания твердый электролит прессуют с различным давлением и измеряют электропроводность для оптимизации процесса изготовления электролитного материала для натрий-ионного аккумулятора [13].

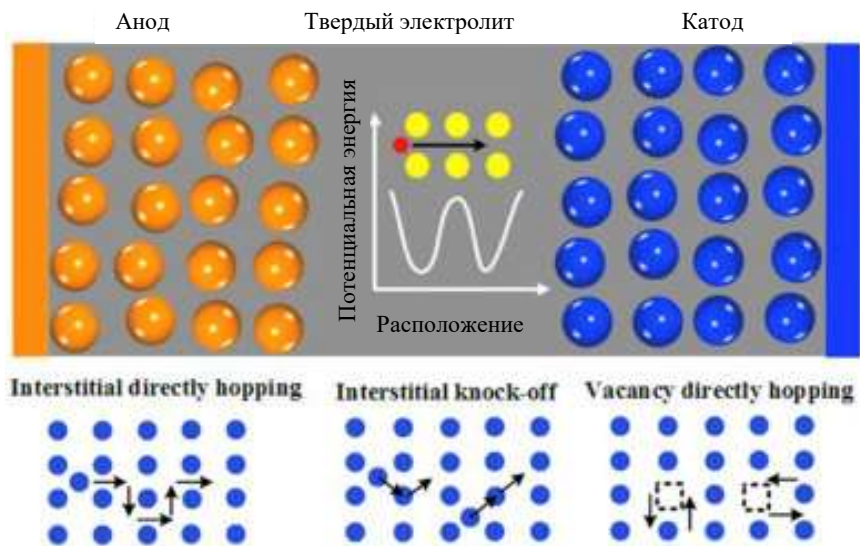


Рис. 1. Типы ионной диффузии в твердотельных неорганических электролитах

Fig. 1. Types of ionic diffusion in solid-state inorganic electrolytes

## II. Экспериментальная часть

Материал  $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$  синтезировали методом твердофазной реакции из исходных материалов  $Na_2CO_3$ ,  $ZrO_2$ ,  $SiO_2$  и  $NH_4H_2PO_4$ , которые растирались в течение 24 ч в этаноле. Перед обжигом исходные материалы сушили в печи при  $155\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 12 ч с последующим отжигом при  $900\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 12 ч. Затем порошок тщательно измельчали и прессовали в таблетки в форме дисков диаметром 15 мм и толщиной 1 мм перед нагреванием при  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 18 ч для получения твердого электролита.

Проводимость таблеток  $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$  измеряли методом электрохимического импеданса (ЭИС). Блокирующие электроды изготавливаются путем нанесения серебра на обе стороны таблеток твердого электролита. Кристаллическую структуру материала определяли с помощью рентгеновской дифракции (XRD), морфологию поперечного сечения  $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$  наблюдали с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM).

Таблетка с твердым электролитом  $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$  была превращена в полностью твердотельную батарею CR2032 для исследования емкости и

цикла заряда-разряда. Для уменьшения внутреннего сопротивления при переходе ионов  $Na^+$  через границу твердой фазы катод изготавливают путем измельчения смеси  $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$ ,  $NaFeO_2$ , токопроводящий углеродный черный *Super P*, ацетиленовой сажи и нафiona в заданном соотношении с последующим покрытием одной стороны таблетки электролита.

### III. Результаты и обсуждение

Результаты рентгеноструктурного анализа образцов, изготовленных при различных давлениях, показали, что дифракционные пики для всех образцов представляли собой характерные пики структуры типа *NASICON* (PDF №35-0412) (рис. 2).

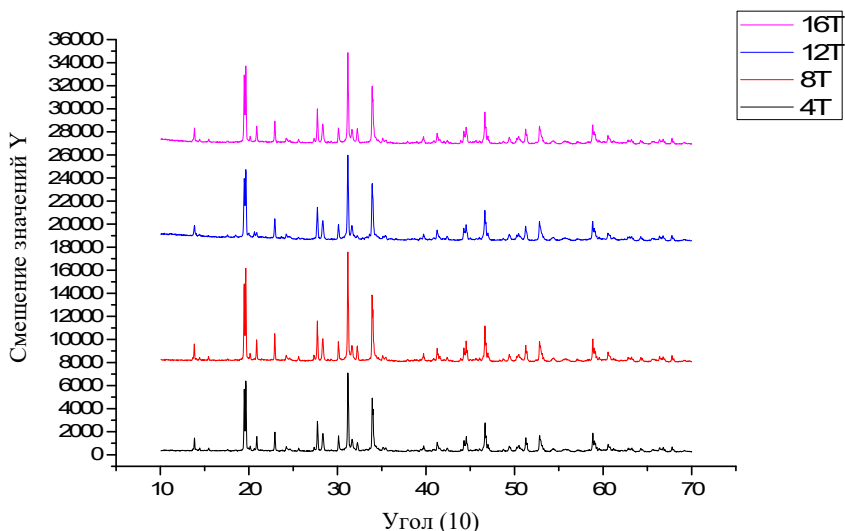


Рис. 2. Рентгенодифракционный спектр образцов  $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$  (Т – т/см<sup>2</sup>)

Fig. 2. X-ray diffraction spectrum of samples  $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$  (Т – t/cm<sup>2</sup>)

Все образцы, изготовленные при различных давлениях, показали относительно высокую чистоту с постоянными решетки  $a = 15,657$ ,  $b = 9,139$  и  $c = 9,109$ . Чистота материала сильно зависит от соотношения и легирования прекурсоров и особенно от температуры спекания. Фаза  $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$  образуется только при температурах выше 1100 °С. Примеси в продукте ограничивают добавлением  $Na_2CO_3$  и  $NH_4H_2PO_4$ , которые выпаривают при высокой температуре [3]. Хотя чистота почти одинакова, проводимость между образцами значительно отличается от образования фазы  $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$ , которая в основном зависит от температуры спекания.

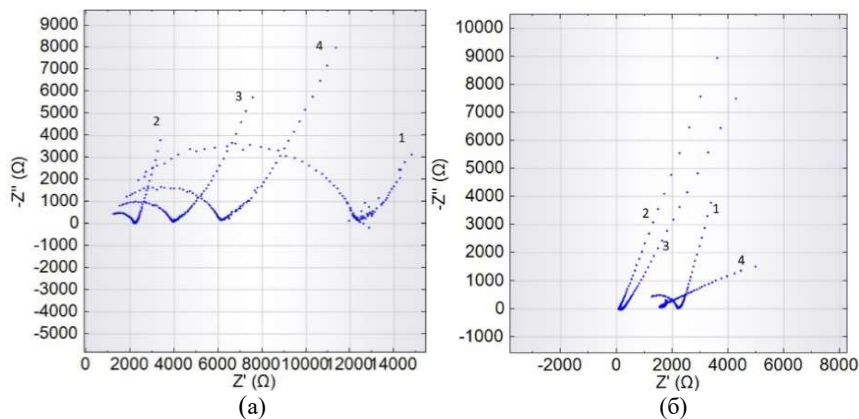
Электропроводность материалов определяли методом импедансной спектроскопии ЭИС. Влияние давления гранул на проводимость твердого электролита показано на рис. 3 (а). Диаграмма Найквиста показывает, что твердый электролит, изготовленный при давлении 8 т/см<sup>2</sup>, имеет наименьший радиус полуокружности, а это значит, что общее сопротивление зерен и сопротивление границ зерен материала малы. Так, твердый электролит, изготовленный при давлении 8 т/см<sup>2</sup>, имеет наилучшую ионную проводимость с проводимостью  $1,72 \cdot 10^{-4}$  См·см<sup>-1</sup>. Этот результат по сравнению с некоторыми электролитами в предыдущих исследованиях является вполне положительным (табл. 1). В последующих опытах приготовление электролита осуществлялось при этом давлении.

Таблица 1.  
Электропроводность некоторых твердых электролитов

Table 1.  
Electrical conductivity of some solid electrolytes

Твердый электролит	Проводимость, См·см <sup>-1</sup>	Источник
<i>Na<sub>3</sub>AlH<sub>6</sub></i>	$5 \times 10^{-7}$	[14]
<i>Na<sub>3</sub>PS<sub>4</sub></i>	$\sim 10^{-4}$	[15]
<i>PEO-NASICON</i>	$4,4 \sim 6,0 \times 10^{-5}$	[15]
<i>PCL-PTMC:NaFSI</i>	$10^{-5}$	[16]
<i>Na<sub>3</sub>BS<sub>3</sub></i>	$1,1 \times 10^{-5}$	[17]
<i>Na<sub>10</sub>GeP<sub>2</sub>S<sub>12</sub></i>	$10^{-5}$	[18]
<i>Na<sub>3</sub>Zr<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>PO<sub>12</sub></i>	$1,72 \times 10^{-4}$	в этом исследовании

В отличие от обычных жидких электролитов, проводимость твердых электролитов сильно зависит от температуры окружающей среды. Повышение температуры делает ионы более подвижными. Однако при высоких температурах узлы решетки будут сильно вибрировать, вызывая эффект торможения движения ионов и уменьшая проводимость. Результаты импедансной спектроскопии при различных температурах представлены на рис. 3(б). Видно, что при повышении температуры до 80 и 100 °С. полуокружность практически исчезает. При температуре 200 °С. радиус полуокружности быстро увеличивается, что объясняется колебаниями узлов решетки, препятствующих движению ионов *Na<sup>+</sup>*.



**Рис. 3. Влияние давления на электропроводность материала (1 – 4 т/см<sup>2</sup>, 2 – 8 т/см<sup>2</sup>, 3 – 12 т/см<sup>2</sup>, 4 – 16 т/см<sup>2</sup>) (а); влияние температуры на проводимость материала (1 – 25 °С, 2 – 80 °С, 3 – 100 °С, 4 – 200 °С) (б)**

**Fig. 3. Effect of pressure on the electrical conductivity of a material (1 – 4 t/cm<sup>2</sup>, 2 – 8 t/cm<sup>2</sup>, 3 – 12 t/cm<sup>2</sup>, 4 – 16 t/cm<sup>2</sup>) (a); influence of temperature on material conductivity (1 – 25 °С, 2 – 80 °С, 3 – 100 °С, 4 – 200 °С) (b)**

Полученное на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) изображение твердого электролита  $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$  после спекания при 1100 °С в течение 18 ч показано на рис. 4(а). Видно, что поперечное сечение имеет плотную бесшовную форму, с небольшими границами зерен, что позволяет ионам легко перемещаться в электролите. Хотя проводимость твердого электролита  $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$  достаточно высока при комнатной температуре, при работе в натрий-ионных батареях движение ионов через границу электрод-электролит затруднено. Это делает рабочую емкость батареи низкой, а способность к циклированию невысокой. Уменьшение внутреннего сопротивления может быть достигнуто за счет изготовления катода из  $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$ , материала анода – супер-П, ацетиленовой сажи и нафiona (нафионизация электрода). Результаты представлены на рис. 4(б), в первом цикле разрядная емкость аккумулятора довольно высокая (78 мАч/г), однако периодичность не стабильна, при этом емкость снижается на 50 % после 16 циклов заряда-разряда.



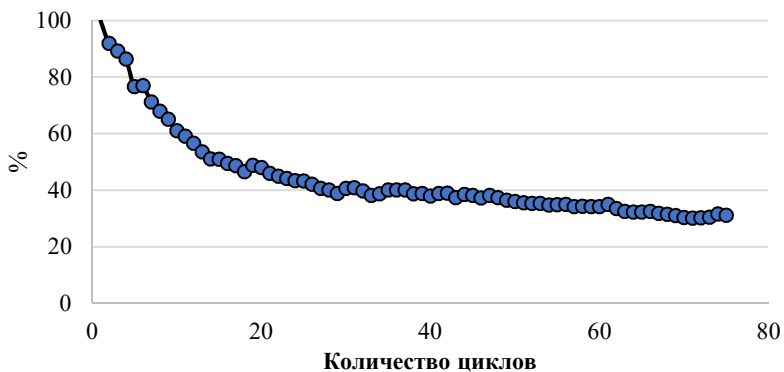
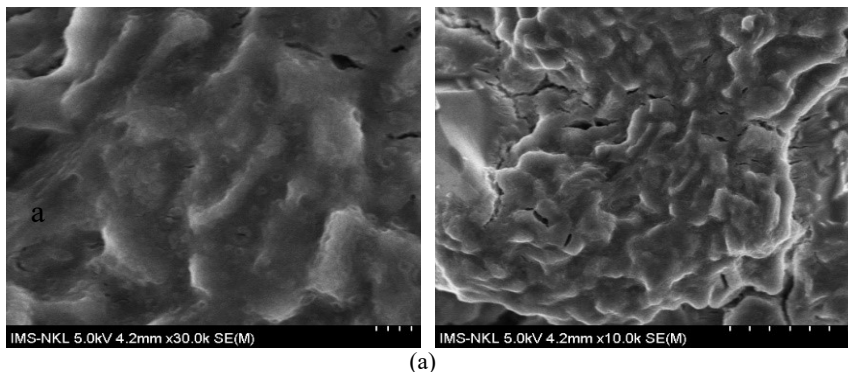


Рис. 4. СЭМ-изображение электролита (а);  
периодизация твердотельной натрий-ионной батареи (б)

Fig. 4. SEM image of the electrolyte (a);  
periodization of a solid-state sodium-ion battery (b)

Описанное выше явление можно объяснить тем, что, возможно, в первых циклах ион  $Na^+$  покидает металлический  $Na$ -электрод и заполняет вакансии на катоде. Однако, поскольку сопротивление все еще велико, в следующих циклах при зарядке эти ионы не высвобождаются полностью, чтобы вернуться к аноду, что затрудняет быстрое снижение емкости. Однако эффективность разряда была значительно улучшена по сравнению с нанесением материала анода непосредственно на поверхность электролита без нафенионизации (емкость всего 21 мАч/г, количество циклов разряда менее 10).

#### IV. Выводы

Твердый электролит из керамического материала  $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$  обладает хорошей ионной проводимостью даже при комнатной температуре с проводимостью  $1,72 \cdot 10^{-4}$  См·см<sup>-1</sup>. В процессе синтеза, помимо соотношения прекурсоров и температуры спекания, давление гранул также сильно влияет на ионную проводимость материала.

Результаты исследований показывают, что при давлении 8 т/см<sup>2</sup> продукт представляет собой таблетку твердого электролита бесшовного сечения с наименьшей границей зерен, создающую благоприятные условия для процесса ионной проводимости.

Твердый электролит  $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$  имеет хорошую проводимость при комнатной температуре до 100 °С и нестабилен при более высоких температурах. Процесс нафюнизации помогает полностью твердотельному аккумулятору достичь относительно высокой емкости (78 мАч/г).

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Вьетнамского национального фонда развития науки и технологий (NAFOSTED), грант 15/2020/TN.*

© Нго К.К., 2022

© Нгуен В.Н., 2022

© То В.Н., 2022

© Нгуен В.К., 2022

© Льюнг Ч.Ш., 2022

© Доан Т.Ф., 2022

© Фам М.Т., 2022

© Нгуен Т.Т., 2022

*Поступила в редакцию 04.05.2022*

*Received 04.05.2022*

#### Библиографический список

- [1] Zhang R., Lu Z., Yang Y., Shi W. First-principles investigation of the monoclinic  $\text{NaMnO}_2$  cathode material for rechargeable Na-ion batteries // *Current Applied Physics*. 2018. Vol. 18. Is. 11. P. 1431-1435. DOI: 10.1016/j.cap.2018.08.011
- [2] Kim D., Lee E., Slater M., Lu W., Rood S., Johnson C.S. Layered  $\text{Na}[\text{Ni}_{1/3}\text{Fe}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}]\text{O}_2$  cathodes for Na-ion battery application // *Electrochemistry Communications*. 2012. Vol. 18. P. 66-69. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.12.116
- [3] Ruana H., Guo F., Liu J., Song S., Jiang N., Cheng B. Optimization of  $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$  ceramic electrolyte and interface for high performance solid-state sodium battery // *Ceramics International*. 2019. Vol. 45. Is. 2. Part A. P. 1770-1776. DOI: 10.1016/J.CERAMINT.2018.10.062

- [4] Hayashi A., Noi K., Sakuda A., Tatsumisago M. Superionic glass-ceramic electrolytes for room-temperature rechargeable sodium batteries // *Nature Communications*. 2012. Vol. 3. Art. no. 856. DOI: 10.1038/ncomms1843
- [5] Noi K., Hayashi A., Tatsumisago M. Structure and properties of the  $\text{Na}_2\text{S}-\text{P}_2\text{S}_5$  glasses and glass-ceramics prepared by mechanical milling // *Journal of Power Sources*. 2014. Vol. 269. P. 260-265. DOI: 10.1016/J.JPOWSOUR.2014.06.158
- [6] Kim S.K., Mao A.W., Sen S., Kim S. Fast Na-Ion conduction in a chalcogenide glass-ceramic in the ternary system  $\text{Na}_2\text{Se}-\text{Ga}_2\text{Se}_3-\text{GeSe}$  // *Chemistry of Materials*. 2014. Vol. 26. No. 19. P. 5695-5699. DOI: 10.1021/cm502542p
- [7] Noguchi Y., Kobayashi E., Plashnitsa L.S., Okada S., Yamaki J. Fabrication and performances of all solid-state symmetric sodium battery based on NASICON-related compounds // *Electrochimica Acta*. 2013. Vol. 101. P. 59-65. DOI: 10.1016/J.ELECTACTA.2012.11.038
- [8] Lalère F., Leriche J.B., Courty M., Boulineau S., Viallet V., Masquelier C., Seznec V. An all-solid state NASICON sodium battery operating at 200 °C // *Journal of Power Sources*. 2014. Vol. 247. P. 975-980. DOI: 10.1016/J.JPOWSOUR.2013.09.051
- [9] Guin M., Tietz F., Guillon O. New promising NASICON material as solid electrolyte for sodium-ion batteries: correlation between composition, crystal structure and ionic conductivity of  $\text{Na}_{3+x}\text{Sc}_2\text{Si}_x\text{P}_{3-x}\text{O}_{12}$  // *Solid State Ionics*. 2016. Vol. 293. P. 18-26. DOI: 10.1016/J.SSI.2016.06.005
- [10] Khakpour Z. Influence of M:  $\text{Ce}^{4+}$ ,  $\text{Gd}^{3+}$  and  $\text{Yb}^{3+}$  substituted  $\text{Na}_{3+x}\text{Zr}_{2-x}\text{M}_x\text{Si}_2\text{PO}_{12}$  solid NASICON electrolytes on sintering, microstructure and conductivity // *Electrochimica Acta*. 2016. Vol. 196. P. 337-347. DOI: 10.1016/J.RLECTACTA.2016.02.199
- [11] Zhang Z. et al. A self-forming composite electrolyte for solid-state sodium battery with ultralong cycle life // *Advanced Energy Materials*. 2016. Vol. 7. Is. 4. P. 160-196. DOI: 10.1002/aenm.201601196
- [12] Zhang B., Tan R., Yang L., Zheng J., Zhang K., Mo S., Lin Z., Pan F. Mechanisms and properties of ion-transport in inorganic solid electrolytes // *Energy Storage Materials*. 2018. Vol. 10. P. 139-159. DOI: 10.1016/J.ENSMS.2017.08.015
- [13] Fuentes R.O., Figueiredo F.M., Marques F.M.B., Franco J.L. Influence of microstructure on the electrical properties of NASICON materials // *Solid State Ionics*. 2001. Vol. 140. Is. 1-2. P. 173-179. DOI: 10.1016/S0167-2738(01)00701-9
- [14] Kim J., Yoon K., Park I., Kang K. Progress in the development of sodium-ion solid electrolytes // *Small Methods*. 2017. Vol. 1. Is. 10. P. 12. DOI: 10.1002/SMTD.201700219
- [15] Wang Y., Song S., Xu C., Hu N., Molenda J., Lu L. Development of solid-state electrolytes for sodium-ion battery - A short review // *Nano Materials Science*. 2019. Vol. 1. Is. 2. P. 91-100. DOI: 10.1016/J.NANOMS.2019.02.007
- [16] Sangeland C., Younesi R., Mindemark J., Brandell D. Towards room temperature operation of all-solid-state Na-ion batteries through polyester-polycarbonate-based polymer electrolytes // *Energy Storage Materials*. 2019. Vol. 19. P. 31-38. DOI: 10.1016/J.ENSMS.2019.03.022

- [17] Tsuji F., Nasu A., Hotehama C., Sakuda A., Tatsumisago M., Hayashi A. Preparation and characterization of sodium-ion conductive  $\text{Na}_3\text{BS}_3$  glass and glass–ceramic electrolytes // *Materials Advanced*. 2021. Vol. 2. Is. 5. P. 1676-1682. DOI: 10.1039/D0MA00777C
- [18] Hayashi A., Masuzawa N., Yubuchi S., Tsuji F., Hotehama C., Sakuda A., Tatsumisago M. A sodium-ion sulfide solid electrolyte with unprecedented conductivity at room temperature// *Nature Communications*. 2019. Vol. 10. Art. no. 5266. DOI: 10.1038/s41467-019-13178-2

### References

- [1] R. Zhang, Z. Lu, Y. Yang and W. Shi, “First-principles investigation of the monoclinic  $\text{NaMnO}_2$  cathode material for rechargeable Na-ion batteries”, *Current Applied Physics*, vol. 18, is. 11, pp. 1431-1435, Nov. 2018. DOI: 10.1016/j.cap.2018.08.011
- [2] D. Kim, E. Lee, M. Slater, W. Lu, S. Rood and C.S. Johnson, “Layered  $\text{Na}[\text{Ni}_{1/3}\text{Fe}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}]\text{O}_2$  cathodes for Na-ion battery application”, *Electrochemistry Communications*, vol. 18, pp. 66-69, 2012. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.12.116
- [3] Y. Ruana, F. Guo, J. Liu, S. Song, N. Jiang and B. Cheng, “Optimization of  $\text{Na}_3\text{Zr}_2\text{Si}_2\text{PO}_{12}$  ceramic electrolyte and interface for high performance solid-state sodium battery”, *Ceramics International*, vol. 45, is. 2, part A, pp.1770-1776, Feb. 2019. DOI: 10.1016/J.CERAMINT.2018.10.062
- [4] A. Hayashi, K. Noi, A. Sakuda and M. Tatsumisago, “Superionic glass-ceramic electrolytes for room-temperature rechargeable sodium batteries”, *Nature Communications*, vol. 3, art. no. 856, May 2012. DOI: 10.1038/ncomms1843
- [5] K. Noi, A. Hayashi and M. Tatsumisago, “Structure and properties of the  $\text{Na}_2\text{S}-\text{P}_2\text{S}_5$  glasses and glass-ceramics prepared by mechanical milling”, *Journal of Power Sources*, vol. 269, pp. 260-265, Dec. 2014. DOI: 10.1016/J.JPOW-SOUR.2014.06.158
- [6] S.K. Kim, A.W. Mao, S. Sen and S. Kim, “Fast Na-Ion conduction in a chalcogenide glass-ceramic in the ternary system  $\text{Na}_2\text{Se}-\text{Ga}_2\text{Se}_3-\text{GeSe}$ ”, *Chemistry of Materials*, vol. 236, no. 19, pp. 5695-5699, Sept. 2014. DOI: 10.1021/cm502542p
- [7] Y. Noguchi, E. Kobayashi, L.S. Plashnitsa, S. Okada and J. Yamaki, “Fabrication and performances of all solid-state symmetric sodium battery based on NASICON-related compounds”, *Electrochimica Acta*, vol. 101, pp. 59-65, July 2013. DOI: 10.1016/J.ELECTACTA.2012.11.038
- [8] F. Lalère, J.B. Leriche, M. Courty, S. Boulineau, V. Viallet, C. Masquelier and V. Seznec, “An all-solid state NASICON sodium battery operating at 200 °C”, *Journal of Power Sources*, vol. 247, pp. 975-980, Feb. 2014. DOI: 10.1016/J.JPOW-SOUR.2013.09.051
- [9] M. Guin, F. Tietz and O. Guillon, “New promising NASICON material as solid electrolyte for sodium-ion batteries: correlation between composition, crystal structure and ionic conductivity of  $\text{Na}_{3-x}\text{Sc}_x\text{Si}_x\text{P}_{3-x}\text{O}_{12}$ ”, *Solid State Ionics*, vol. 293, pp. 18-26, Oct. 2016. DOI: 10.1016/J.SSI.2016.06.005

- [10] Z. Khakpour, "Influence of M: Ce<sup>4+</sup>, Gd<sup>3+</sup> and Yb<sup>3+</sup> substituted Na<sub>3+x</sub>Zr<sub>2-x</sub>M<sub>x</sub>Si<sub>2</sub>PO<sub>12</sub> solid NASICON electrolytes on sintering, microstructure and conductivity", *Electrochimica Acta*, vol. 196, pp. 337-347, Apr. 2016. DOI: 10.1016/J.RLECTACTA.2016.02.199
- [11] Z. Zhang et al., "A self-forming composite electrolyte for solid-state sodium battery with ultralong cycle life", *Advanced Energy Materials*, vol. 7, is. 4, pp. 160-196, Oct. 2016. DOI: 10.1002/aenm.201601196
- [12] B. Zhang, R. Tan, L. Yang, J. Zheng, K. Zhang, S. Mo, Z. Lin and F. Pan, "Mechanisms and properties of ion-transport in inorganic solid electrolytes", *Energy Storage Materials*, vol. 10, pp. 139-159, Jan. 2018. DOI: 10.1016/J.ENSMS.2017.08.015
- [13] R.O. Fuentes, F.M. Figueiredo, F.M.B. Marques and J.I. Franco, "Influence of microstructure on the electrical properties of NASICON materials", *Solid State Ionics*, vol. 140, is. 1-2, pp. 173-179, March 2001. DOI: 10.1016/S0167-2738(01)00701-9
- [14] J. Kim, K. Yoon, I. Park and K. Kang, "Progress in the development of sodium-ion solid electrolytes", *Small Methods*, vol. 1, is. 10, pp. 12, Sept. 2017. DOI: 10.1002/SMTD.201700219
- [15] Y. Wang, S. Song, C. Xu, N. Hu, J. Molenda and L. Lu, "Development of solid-state electrolytes for sodium-ion battery - A short review", *Nano Materials Science*, vol. 1, is. 2, pp. 91-100, June 2019. DOI: 10.1016/J.NANOMS.2019.02.007
- [16] C. Sangeland, R. Younesi, J. Mindemark, and D. Brandell, "Towards room temperature operation of all-solid-state Na-ion batteries through polyester-polycarbonate-based polymer electrolytes", *Energy Storage Materials*, vol. 19, pp. 31-38, May 2019. DOI: 10.1016/J.ENSMS.2019.03.022
- [17] F. Tsuji, A. Nasu, C. Hotehama, A. Sakuda, M. Tatsumisago and A. Hayashi, "Preparation and characterization of sodium-ion conductive Na<sub>3</sub>BS<sub>3</sub> glass and glass-ceramic electrolytes", *Materials Advanced*, vol. 2, is. 5, pp. 1676-1682, Feb. 2021. DOI: 10.1039/D0MA00777C
- [18] A. Hayashi, N. Masuzawa, S. Yubuchi, F. Tsuji, C. Hotehama, A. Sakuda, M. Tatsumisago, "A sodium-ion sulfide solid electrolyte with unprecedented conductivity at room temperature", *Nature Communications*, vol. 10, art. no. 5266, Nov. 2019. DOI: 10.1038/s41467-019-13178-2

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Нго Куи Куен**, кандидат технических наук, преподаватель Технологического университета им. Лэ Куи Дона, г. Ханой, Вьетнам.

**Quy Q. Ngo**, Cand. Sci. (Eng.), lecturer of the Le Qui Don Technological University, Hanoi, Vietnam.

**Ван Нгйа Нгуен**, кандидат химических наук, преподаватель Ханойского архитектурного университета, г. Ханой, Вьетнам.

**Van N. Nguyen**, Cand. Sci. (Chem.), lecturer of the Hanoi University of Architecture, Hanoi, Vietnam.

**Ван Нгуен То**, преподаватель Технологического университета им. Лэ Куи Дона, г. Ханой, Вьетнам.

**Ван Ку Нгуен**, преподаватель Технологического университета им. Лэ Куи Дона, г. Ханой, Вьетнам.

**Чунг Шон Лыонг**, преподаватель Технологического университета им. Лэ Куи Дона, г. Ханой, Вьетнам.

**Тьен Фат Доан**, преподаватель Технологического университета им. Лэ Куи Дона, г. Ханой, Вьетнам.

**Мань Тхао Фам**, кандидат химических наук, преподаватель Технологического университета им. Лэ Куи Дона, г. Ханой, Вьетнам.

**Тьен Тхань Нгуен**, преподаватель Вьетнамской Академии наук и технологий, г. Ханой, Вьетнам.

**Van N. To**, lecturer of the Le Qui Don Technological University, Hanoi, Vietnam.

**Van K. Nguyen**, lecturer of the Le Qui Don Technological University, Hanoi, Vietnam.

**Trung S. Luong**, lecturer of the Le Qui Don Technological University, Hanoi, Vietnam.

**Tien Ph. Doan**, lecturer of the Le Qui Don Technological University, Hanoi, Vietnam.

**Manh T. Pham**, Cand. Sci. (Chem.), lecturer of the Le Qui Don Technological University, Hanoi, Vietnam.

**Tien T. Nguyen**, lecturer of the Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam.