

УДК 541.136

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ КАТОДА ЛИТИЙ-ИОННОГО АККУМУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ ОРТОСИЛИКАТА ЖЕЛЕЗА(II)-ЛИТИЯ

А. С. Акмаев^{1,2}, А. В. Иванищев^{1✉}, И. А. Иванищева¹, К. С. Рыбаков¹, С. В. Махов¹, А. А. Коржаков¹, Д. И. Морозов¹, А. Диксит³

¹ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»
410012, Россия, Саратов, Астраханская, 83

²Центр энергетических наук и технологий, Сколковский институт науки и технологий,
Инновационный Центр Сколково
143026, Россия, Москва, Нобеля, 3

³Департамент физики и центр солнечной энергетики, Индийский институт технологий Джодхпур
342037, Индия, Карвар, India, NH65 Nagaur Road

✉ E-mail: ivanischevav@inbox.ru

Поступила в редакцию: 21.01.2019 / Принята: 25.02.2019 / Опубликовано онлайн: 24.06.2019

Рассмотрены различные стратегии синтеза перспективных электродных материалов литий-ионного аккумулятора (ЛИА) на основе ортосиликата железа(II)-лития ($\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$) с использованием широко распространенных, экологически безопасных и недорогих исходных веществ. Полученные материалы представляют собой многокомпонентные электроактивные композиты, включающие помимо основного литий-аккумулирующего компонента также вспомогательные структурообразующие и электропроводящие компоненты на основе продуктов пиролитического разложения органических соединений. Исследованы структурные и морфологические особенности полученных материалов ЛИА с использованием методов рентгеновской дифракции, сканирующей электронной микроскопии, лазерной дифракционной granulometрии. Электрохимические свойства материалов исследовались методом постоянноточковой хронопотенциометрии (гальваностатический заряд-разряд). Была определена зависимость электрохимических свойств от условий синтеза. Обратимая циклируемая электрохимическая ёмкость электродов на основе $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ достигала 220 мА·ч/г на начальных циклах заряда-разряда.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, катодные материалы, ортосиликат железа(II)-лития, структура, морфология, granulometрический состав, электрохимические характеристики.

Peculiarities of Obtaining and Electrochemical Properties of Lithium-Ion Battery Cathode Materials Based on Iron(II)-Lithium Orthosilicate

Aleksei S. Akmaev^{1,2}, <http://orcid.org/0000-0002-9512-0595>, alexeyakmaev@gmail.com
Aleksandr V. Ivanishchev^{1✉}, <http://orcid.org/0000-0001-9116-4809>, ivanischevav@inbox.ru
Irina A. Ivanishcheva¹, <http://orcid.org/0000-0001-7782-2369>, chemistryrus@mail.ru
Kirill S. Rybakov¹, <http://orcid.org/0000-0003-4821-2910>, rybakov-ks@ya.ru
Semen V. Makhov¹, <http://orcid.org/0000-0002-0938-9660>, semen_mahov@mail.ru
Aleksei A. Korzhakov¹, <http://orcid.org/0000-0001-9361-8165>, korzhakov.lesha@yandex.ru
Dmitrii I. Morozov¹, <http://orcid.org/0000-0002-8846-893X>, morozovdi1995@mail.ru
Ambesh Dixit³, <https://orcid.org/0000-0003-2285-0754>, ambesh@iitj.ac.in

¹Saratov State University

83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

²Center for Energy Science and Technology, Skolkovo Institute of Science and Technology,
Skolkovo Innovation Center

3 Nobel St., Moscow 143026, Russia

³Department of Physics & Center for Solar Energy, Indian Institute of Technology Jodhpur
NH65 Nagaur Road, Karwar 342037, India

Received: 21.01.2019 / Accepted: 25.02.2019 / Published online: 24.06.2019

Various strategies for the synthesis of promising electrode materials for lithium-ion battery (LIB) based on iron(II)-lithium orthosilicate ($\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$) using widely distributed, environmentally friendly and inexpensive starting materials are considered. The materials obtained are multicomponent electroactive composites that include, in addition to the main lithium accumulating component, also auxiliary structure-forming and electrically conductive components based on the products of the pyrolytic decomposition of organic compounds. The structural and morphological features of the obtained LIB's materials were studied using X-ray diffraction, scanning electron microscopy, laser particle size distribution analyzer. The electrochemical properties of materials were studied by the method of constant current chronopotentiometry (galvanostatic charge-discharge). The dependence of electrochemical properties on synthesis conditions was determined. The reversible cyclic electrochemical capacity of $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ electrodes reached 220 mAh/g in the initial charge-discharge cycles.

Keywords: lithium-ion battery, cathode materials, iron (II)-lithium orthosilicate, structure, morphology, particle size distribution, electrochemical characteristics.

DOI: <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2019-19-2-63-71>

ВВЕДЕНИЕ

Литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) являются наиболее энергоёмкими среди перезаряжаемых химических источников энергии и приобретают все большее значение в сегменте крупногабаритных автономных источников электроснабжения, используемых в электромобилях и системах распределенной энергетики [1]. На сегодняшний день основными катодными материалами, применяемыми в литий-ионных аккумуляторах, являются LiCoO_2 , LiFePO_4 , LiMn_2O_4 , а также их различные производные. В то же время каждый из этих материалов не лишен определенных недостатков, влияющих на безопасность при работе в составе аккумулятора, срок службы, стоимость, состоящих в негативном воздействии на окружающую среду в процессе их производства и утилизации [2]. В связи с этим актуальной проблемой является поиск альтернативных катодных материалов, которым не будут присущи упомянутые недостатки. Одним из таких перспективных катодных материалов является силикат железа-лития ($\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$), который впервые был исследован в работе [3] в 2005 году. Данная структура была описана как орторомбическая с параметрами кристаллической решетки: $a = 6.2661(5)$ $b = 5.3295(5)$ $c = 5.0148(4)$; пространственная группа: $\text{Pmn}2_1$. Полученные результаты согласуются с данными работы Tarte и Cahay [4], в которой была показана изоструктурность силикатов и Li_3PO_4 . Очевидным недостатком ортосиликата железа-лития является

его довольно низкая электронная проводимость ($10^{-14} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$). Теоретическая ёмкость данного материала при извлечении двух ионов лития могла бы составить около 333 мА·ч/г [5,6]. Однако этому мешает то, что железо не склонно проявлять степень окисления +4, поэтому подвижным оказывается лишь один ион лития, а максимально реализуемая ёмкость может составить половину от теоретической, т. е. около 165 мА·ч/г. Среди преимуществ $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ следует отметить нетоксичность, потенциально низкую стоимость и высокий уровень безопасности при работе.

В силу очевидных преимуществ ортосиликата железа-лития он привлекает интерес множества научных групп по всему миру. Разнообразие методов синтеза, применяемых исследователями для его получения, довольно велико. Однако получение фазово чистого продукта оказалось непростой задачей. Так, в литературе встречаются упоминания о попытках синтеза материала с использованием золь-гель метода. К примеру, в работе [7] удалось получить фазово чистый $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ с частицами округлой формы, однако, по их словам, процесс был сложным и трудоёмким. Метод синтеза с микроволновой активацией применили в работе [8] для получения высокодисперсного материала, при этом процесс протекал довольно непродолжительное время. Но, как известно, воспроизводимость характеристик продуктов, полученных данным методом, довольно

низка в силу бурного протекания процесса и сложности поддержания условий.

Учитывая особенности всех перечисленных выше методов синтеза ортосиликата железа-лития, мы остановили свой выбор на твердофазном методе как варианте компромисса простоты реализации и управляемости синтетическим процессом. В качестве положительного примера использования именно такого подхода мы выбрали опыт авторов [3], которые указывают на возможность синтеза ортосиликата железа-лития путем термического отжига предварительно гомогенизированной смеси исходных веществ. Электрохимические испытания такого материала при несколько повышенной температуре (60°C) показали возможность обратимого извлечения одного иона Li^+ и достижения удельной ёмкости 165 мА·ч/г под током менее 0.1С и при потенциале около 3 В.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для синтеза исследуемого электродного материала $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ применялись следующие прекурсоры: гидроксид лития моногидрат ($\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$, содержание основного компонента $w > 0.99$, ОАО «Завод редких металлов», Россия), силикагель (SiO_2 аморфный, содержание основного компонента $w > 0.99$, «Реахим», Россия), оксалат железа(II) дигидрат ($\text{FeC}_2\text{O}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, содержание основного компонента $w > 0.99$, «Реахим», Россия), оксид железа(III) (Fe_2O_3 , содержание основного компонента $w > 0.99$, «Реахим», Россия).

Прекурсоры, содержащие SiO_2 , отличаются невысокой реакционной способностью, и для интенсификации синтетического процесса требуется активация реакционной смеси. Механохимическая активация смеси исходных веществ, взятых в стехиометрическом соотношении в соответствии с реакцией синтеза $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$, проводилась в стальных барабанах, заполненных стальными мелющими телами в среде ацетона с использованием планетарной мельницы-активатора АГО-2 в течение 20 минут. Отделен-

ная от мелющих тел предварительно высушенная при комнатной температуре смесь подвергалась термообработке, которая осуществлялась в трубчатой печи в атмосфере аргона. Скорость нагрева до требуемой температуры составляла 10°C/мин, охлаждение после выдержки заданной длительности – неконтролируемое, вместе с печью при выключенном нагреве.

В нашей предыдущей работе [9] была описана методика синтеза $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$, в ходе разработки которой были последовательно испытаны различные прекурсоры. В качестве литий-содержащих исходных веществ применялись его соли: Li_2CO_3 , LiOH , Li_2SiO_3 (данное соединение являлось источником как лития, так и кремния). Наряду с оксидом железа с невысокой реакционной способностью применялся более активный оксалат железа FeC_2O_4 . Использовались различные комбинации прекурсоров для получения оптимальной реакционной способности исходной смеси.

В результате проведенной работы по оптимизации условий синтетического процесса мы остановились на следующих основных его параметрах. Набор прекурсоров был следующим: моногидрат гидроксида лития, оксид железа(III), силикагель, а также добавка ацетиленовой сажи для повышения электропроводности конечного продукта. Оптимальное содержание электропроводящей углеродной добавки составило 8 мас.%. Термическая обработка осуществлялась в инертной атмосфере аргона при температуре 750°C/730°C, нагрев 10°C/мин, выдержка в течение 20/24 часов, охлаждение после выдержки – неконтролируемое, вместе с печью при выключенном нагреве. Основные условия синтеза различных образцов сведены в таблицу.

Рентгеновская дифрактометрия образцов $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ проводилась с использованием дифрактометра STOE STADI P (STOE, Чехия) в монохроматическом рентгеновском излучении $\text{CuK}\alpha_1$ ($\lambda = 1.540598 \text{ \AA}$). Сканирующая электронная микроскопия материалов была выполнена с использованием микро-

скопа JEOL JEM 2100F (JEOL, Япония). Гранулометрический анализ материалов проводился на лазерном дифракционном анализаторе размеров частиц SHIMADZU SALD-2201 (SHIMADZU, Япония); перед анализом образцы проходили ультразвуковую обработку в среде ацетона длительностью, необходимой для установления стабильной картины распределения частиц по размерам.

Условия синтеза образцов $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$

Synthesis conditions of $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ samples

Номер образца	Температура термообработки, °С	Длительность термообработки, ч
Образец 1	750	24
Образец 2	750	20
Образец 3	730	24
Образец 4	730	20

Электродный композит готовили путем смешения активного материала, сажи и поливинилиденфторида (ПВДФ) в соотношении 80 : 10 : 10 мас.% соответственно. Полимерное связующее вводили в смесь в виде раствора в N-метилпирролидоне. Гомогенизацию компонентов выполняли с использованием ультразвуковой обработки в течение 10 мин. Полученную жидкую смесь наносили на алюминиевую фольгу с использованием универсального аппликатора «Dr.Blade» (Sailing International, Китай), высушивали в атмосферном сушильном шкафу при 100°C в течение двух часов, прокатывали на металлических вальцах с регулируемым зазором, после чего вырезали электроды в форме диска диаметром 16 мм.

Электроды тестировались в трехэлектродных электрохимических ячейках с электродом сравнения и противэлектродом из металлического лития. Сборка ячеек проводилась в атмосфере сухого аргона в перчаточном боксе. В качестве электролита использовали 1M раствор LiClO_4 в смеси пропиленкарбонат (ПК) : диметоксиэтан (ДМЭ) = 7 : 3 по объему.

Электрохимические измерения выполнялись с использованием многоканального потенциостата/гальваностата Elins/P-

20X8 (Элинс, Россия), зарядно-разрядных модулей Neware/BTS10V10mA (Neware Technology Limited, Китай) и Бустер/УЗР 0.03–10 (Бустер, Россия). Все электродные потенциалы измерялись относительно металлического литиевого электрода сравнения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование структурных и морфологических характеристик композитного электродного материала $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$

Дифференциальная гранулометрическая кривая распределения $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$, полученная с использованием лазерного дифракционного анализатора размеров частиц, имеет на своем ходе несимметричный уширенный пик в диапазоне 0.3–8 мкм (рис. 1). Слабо выраженные перегибы на левой части пика являются результатом суперпозиции нескольких пиков с максимумами при 0.7, 2 и 4 мкм. Одной из возможных причин полидисперсности материала является его неоднородная агломерированность.

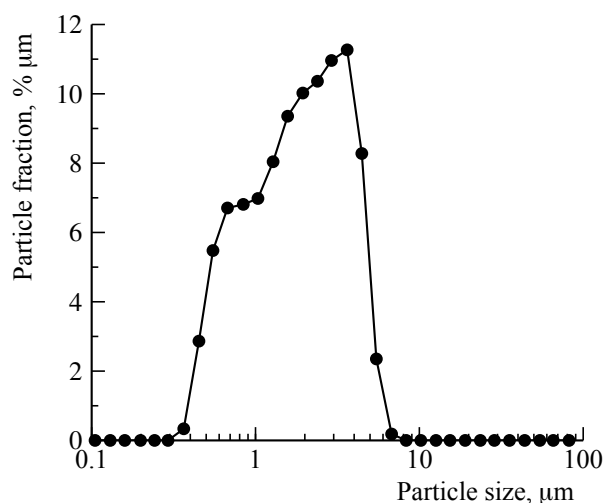


Рис. 1. Дифференциальная функция распределения частиц электродного материала $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ по размерам, полученная с использованием метода лазерного дифракционного анализатора размеров частиц

Fig. 1. Differential function of particles size distribution for $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ electrode material, obtained using laser beam diffraction particle size analyser

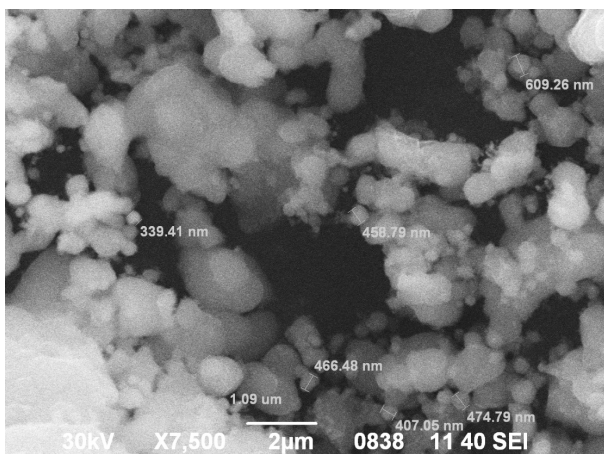


Рис. 2. Сканирующая электронная микроскопия образца $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$

Fig. 2. Scanning electron microscopy for the $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ sample

Данные сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ (рис. 2) подтверждают выводы о полидисперсности и агломерированности материала: в нем присутствуют довольно мелкие частицы размером несколько десятых мкм, средние 1–2 мкм, а также довольно крупные – около 5–7 мкм. Агломераты имеют довольно плотную структуру, устойчивую к непродолжительному воздействию ультразвуковой обработки.

Результаты рентгеновской дифрактометрии $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ представлены на рис. 3. Качественный анализ рентгенограммы показывает присутствие в образце наряду с основным компонентом ($\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$) также небольших количеств кристаллических примесей: как способных к обратимой или частично обратимой интеркаляции лития (LiFeO_2), так и неактивных в отношении нее, например остаточных количеств прекурсоров для синтеза (Li_2SiO_3). Эти обстоятельства являются следствием особенностей синтетического процесса. В частности, прекурсоры углеродной электропроводящей матрицы, чье присутствие является необходимым для обеспечения приемлемого уровня электропроводности композита, одновременно частично блокируют контакт частиц исходных веществ, что приводит к их неполному превращению в процессе синте-

за. Повышение фазовой чистоты целевого продукта возможно при условии повышения дисперсности и гомогенности исходной смеси, что требует радикального изменения схемы синтеза, в частности наноструктурирования исходных компонентов.

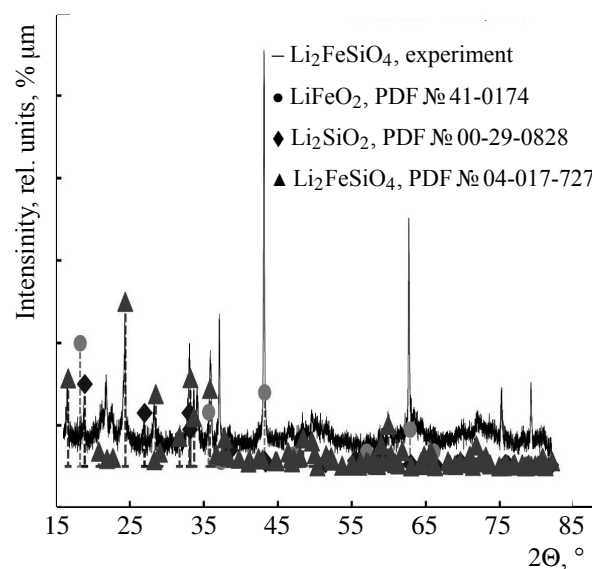


Рис. 3. Рентгеновская дифрактограмма образца $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ с данными картотеки PDF для кристаллических соединений, присутствующих в составе образца

Fig 3. XRD pattern for the $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ sample with PDF cards for crystal compounds in the sample composition

Исследование электрохимических характеристик композитного электродного материала $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$

На рис. 4, а–г представлены результаты гальваностатического циклирования образцов, обозначенных в таблице. В результате проведенных экспериментов было установлено, что оптимальным прекурсором для формирования электропроводящего покрытия на образцах на основе ортосиликата железа-лития является ацетиленовая сажа. Оптимальным же содержанием электропроводного компонента является 8 мас.%. Именно это количество использовалось для синтеза электродного материала $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$. Вариации условий синтеза лежали в области температурного режима и длительности термической обработки.

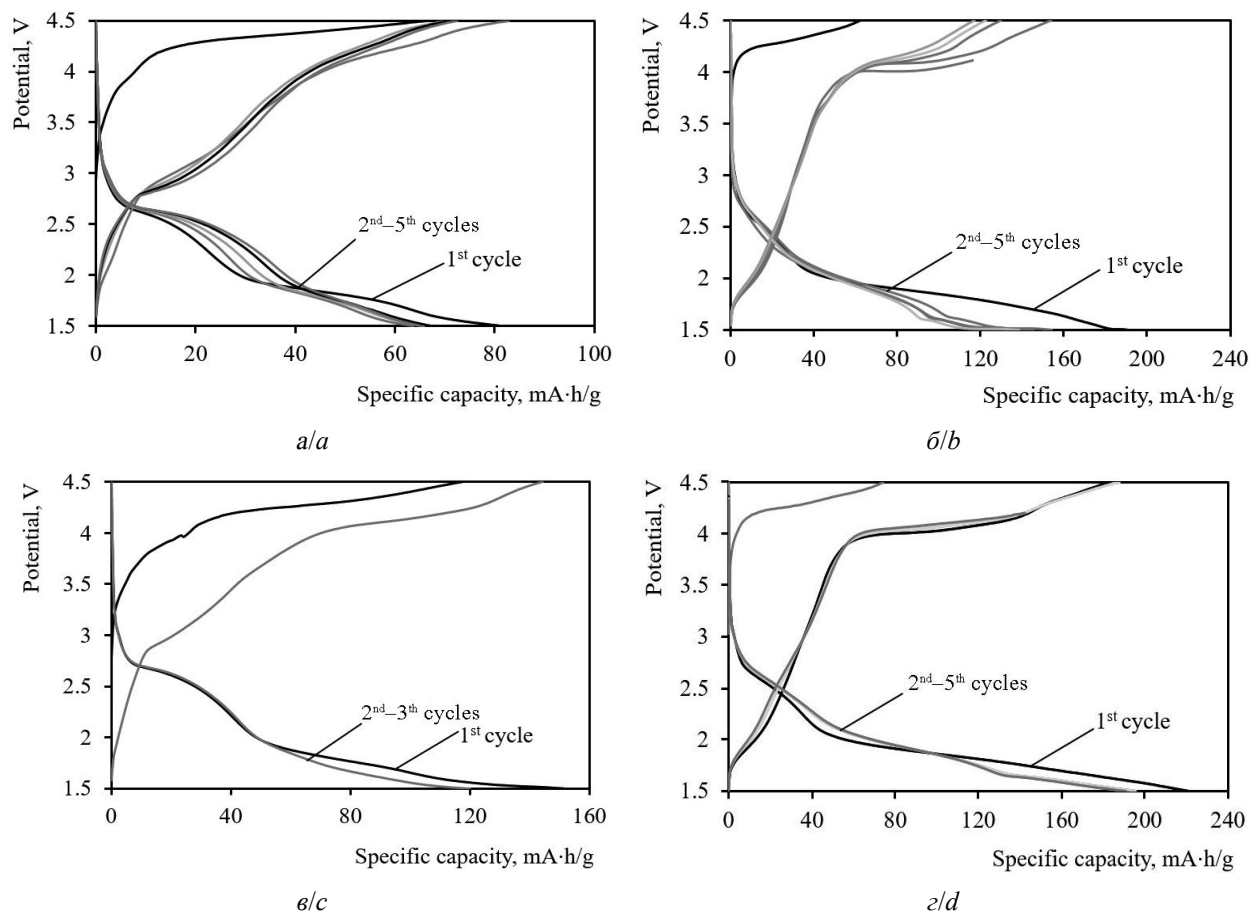


Рис. 4. Гальваностатические зарядно-разрядные кривые $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ электрода: *a* – образец 1, *б* – образец 2, *в* – образец 3, *г* – образец 4 (скорость циклирования 0.02C)

Fig. 4. Galvanostatic charging-discharging curves for the $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ samples: *a* – sample 1, *b* – sample 2, *c* – sample 3, *d* – sample 4 (cycling rate is 0.02C)

Из представленных на рис. 4, *a* гальваностатических зарядно-разрядных кривых электродов на основе образца 1 (750°C, 24 ч) видно, что максимальное значение удельной ёмкости на начальных циклах – около 80 мА·ч/г, что соответствует примерно половине теоретической ёмкости, исходя из возможности извлечения одного иона лития.

Смягчение условий синтетического процесса – снижение температуры и сокращение длительности термообработки – положительным образом отразились на величине циклируемой ёмкости. Так, для образца 2 (рис. 4, *б*) на первом цикле наблюдается некоторое превышение теоретического уровня ёмкости, возможно, обусловленное вкладом побочных процессов. Для образца 3

(рис. 4, *в*) стабилизация ёмкости вблизи теоретического уровня происходит уже с первого цикла. Для образца 4 (рис. 4, *г*), полученного при 730°C в течение 20 ч, на первом цикле наблюдается ёмкость, существенно превышающая теоретический уровень – около 220 мА·ч/г. В дальнейшем ёмкость продолжает снижаться. Данный факт также может свидетельствовать, что источником этой избыточной ёмкости является примесь интеркалируемых литием кристаллических фаз, отличных от основной фазы $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$. Постепенное снижение ёмкости от цикла к циклу может быть обусловлено выводом этих дополнительных фаз из токообразующего процесса по причине их разупорядочения и потери интеркаляционных свойств.

Возможно, теми же причинами обусловлены результаты других исследователей: например, в работе Wang с соавторами [10] при изготовлении 3D-композита с применением углеродных нанотрубок удалось достичь значения ёмкости 214 мА·ч/г на малых скоростях (0.02C). При этом отмечалась проблема достаточно быстрой деградации ёмкости при циклировании. Впрочем, деградация ёмкости может быть присуща и основной кристаллической интеркалируемой литием фазе $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$. Данный факт можно объяснить энергетически не вполне выгодным положением железа в тетраэдре структуры $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$. В ходе повторяющихся циклов обратимой интеркаляции лития железо, вероятнее всего, стремится занять более выгодную для себя позицию. Этот процесс, вместе с тем, приводит и к частичному разупорядочению структуры материала. Решением данной проблемы может быть продолжение подбора условий синтеза для более точного определения условий фазового перехода, при котором достигается максимальная стабилизация и упорядочение структуры.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-53-45004) и Департамента науки и технологии правительства Индии (проект № INT/RUS/RFBR/320).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе была выполнена оптимизация условий синтеза интеркалируемого литием электродного материала $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ с использованием широко распространенных, экологически безопасных и недорогих исходных веществ. Для повышения реакционной способности исходных реагентов применялся метод механохимической активации и гомогенизации смеси в планетарной шаровой мельнице. Структурные и морфологические особенности композита были исследованы методами рентгеновской дифракции, сканирующей электронной микроскопии, лазерной дифракционной гранулометрии.

Электрохимические свойства материалов тестировались методом постоянноточковой хронопотенциометрии (гальваностатический заряд-разряд). Была выявлена взаимосвязь электрохимического поведения материалов и условий синтеза. Для большинства испытанных образцов был достигнут теоретический уровень удельной циклируемой ёмкости.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 18-53-45004) and Department of Science and Technology of the Government of Republic of India (project No. INT/RUS/RFBR/320).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goodenough J. B., Kim Y. Challenges for rechargeable batteries // J. Power Sources. 2011. Vol. 196. P. 6688–6694.
2. Deng C., Zhang S., Fu B., Yang S., Ma L. Characterization of $\text{Li}_2\text{MnSiO}_4$ and $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ cathode materials synthesized via a citric acid assisted sol-gel method // Mater. Chem. Phys. 2010. Vol. 120. P. 14–17.
3. Nytén A., Abouimrane A., Armand M., Gustafsson T., Thomas J. O. Electrochemical performance of $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ as a new Li-battery cathode material // Electrochem. Commun. 2005. Vol. 7. P. 156–160.
4. Tarte P., Cahay R. Synthesis and structure of a new series of $\text{Li}_2\text{X(II)GeO}_4$ and $\text{Li}_2\text{X(II)SiO}_4$ structurally related to Li_3PO_4 // C.R. Acad. Sci. Paris. 1970. Vol. 139. P. 777–780.
5. Zheng Z., Wang Y., Zhang A., Zhang T., Cheng F., Tao Z., Chen J. Porous $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ nanocomposite as the cathode material of lithium-ion batteries // J. Power Sources. 2012. Vol. 198. P. 229–235.
6. Larsson P., Ahuja R., Nytén A., Thomas J. O. An *ab initio* study of the Li-ion battery cathode material $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ // Electrochem. Commun. 2006. Vol. 8. P. 797–800.
7. Qu L., Fang S., Yang L., Hirano S. I. $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ cathode material synthesized by template-assisted sol-gel process with Fe_2O_3 microsphere // J. Power Sources. 2012. Vol. 217. P. 243–247.

8. Peng Z. D., Cao Y. B., Hu G. R., Du K., Gao X. G., Xiao Z. W. Microwave synthesis of $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ cathode materials for lithium-ion batteries // *Chinese Chem. Lett.* 2009. Vol. 20. P. 1000–1004.

9. Ivanishchev A. V., Churikov A. V., Akmaev A. S., Ushakov A. V., Ivanishcheva I. A., Gamayunova I. M., Sneha M. J., Dixit A. The Synthesis, Structure, and

Electrochemical Properties of $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ -Based Lithium-Accumulating Electrode Material // *Russ. J. Electrochem.* 2017. Vol. 53. P. 302–311.

10. Wang W., Liang H., Zhang L., Savilov S. V., Ni J., Li L. Carbon nanotube directed three-dimensional porous $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ composite for lithium batteries // *Nano Res.* 2017. Vol. 10. P. 229–237.

REFERENCES

1. Goodenough J. B., Kim Y. Challenges for rechargeable batteries. *J. Power Sources*, 2011, vol. 196, pp. 6688–6694.

2. Deng C., Zhang S., Fu B., Yang S., Ma L. Characterization of $\text{Li}_2\text{MnSiO}_4$ and $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ cathode materials synthesized via a citric acid assisted sol-gel method. *Mater. Chem. Phys.*, 2010, vol. 120, pp. 14–17.

3. Nytén A., Abouimrane A., Armand M., Gustafsson T., Thomas J. O. Electrochemical performance of $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ as a new Li-battery cathode material. *Electrochem. Commun.*, 2005, vol. 7, pp. 156–160.

4. Tarte P., Cahay R. Synthesis and structure of a new series of $\text{Li}_2\text{X(II)GeO}_4$ and $\text{Li}_2\text{X(II)SiO}_4$ structurally related to Li_3PO_4 . *C.R. Acad. Sci. Paris*, 1970, vol. 139, pp. 777–780.

5. Zheng Z., Wang Y., Zhang A., Zhang T., Cheng F., Tao Z., Chen J. Porous $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ nanocomposite as the cathode material of lithium-ion batteries. *J. Power Sources*, 2012, vol. 198, pp. 229–235.

6. Larsson P., Ahuja R., Nytén A., Thomas J. O. An *ab initio* study of the Li-ion battery cathode

material $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$. *Electrochem. Commun.*, 2006, vol. 8, pp. 797–800.

7. Qu L., Fang S., Yang L., Hirano S. I. $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ cathode material synthesized by template-assisted sol-gel process with Fe_2O_3 microsphere. *J. Power Sources*, 2012, vol. 217, pp. 243–247.

8. Peng Z. D., Cao Y. B., Hu G. R., Du K., Gao X. G., Xiao Z. W. Microwave synthesis of $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ cathode materials for lithium-ion batteries. *Chinese Chem. Lett.*, 2009, vol. 20, pp. 1000–1004.

9. Ivanishchev A. V., Churikov A. V., Akmaev A. S., Ushakov A. V., Ivanishcheva I. A., Gamayunova I. M., Sneha M. J., Dixit A. The Synthesis, Structure, and Electrochemical Properties of $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ -Based Lithium-Accumulating Electrode Material. *Russ. J. Electrochem.*, 2017, vol. 53, pp. 302–311.

10. Wang W., Liang H., Zhang L., Savilov S. V., Ni J., Li L. Carbon nanotube directed three-dimensional porous $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ composite for lithium batteries. *Nano Res.*, 2017, vol. 10, pp. 229–237.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Акмаев Алексей Сергеевич – аспирант кафедры физической химии, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского», Институт химии, г. Саратов. Служебный тел.: +7(8452)51-64-13, e-mail: alexeyakmaev@gmail.com

Иванищев Александр Викторович – доктор химических наук, профессор кафедры физической химии, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского», Институт химии, г. Саратов. Служебный тел.: +7(8452)51-64-13, e-mail: ivanishchevav@inbox.ru

Иванищева Ирина Анатольевна – кандидат химических наук, доцент кафедры физической химии, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского», Институт химии, г. Саратов. Служебный тел.: +7(8452)51-64-13, e-mail: ivanishchevav@inbox.ru

Рыбаков Кирилл Сергеевич – магистрант кафедры физической химии, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского», Институт химии, г. Саратов. Служебный тел.: +7(8452)51-64-13, e-mail: rybakov-ks@ya.ru

Махов Семён Викторович – аспирант кафедры физической химии, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского», Институт химии, г. Саратов. Служебный тел.: +7(8452)51-64-13, e-mail: rybakov-ks@ya.ru

Коржаков Алексей Алексеевич – аспирант кафедры физической химии, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского», Институт химии, г. Саратов. Служебный тел.: +7(8452)51-64-13, e-mail: korjakov.lesha@yandex.ru

Морозов Дмитрий Игоревич – магистрант кафедры физической химии, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского», Институт химии, г. Саратов. Служебный тел.: +7(8452)51-64-13, e-mail: morozovdi1995@mail.ru

Амбеш Диксит – associate professor, Департамент физики и центр солнечной энергетики, Индийский институт технологий Джодхпур (Раджастан, Индия), e-mail: ambesh@iitj.ac.in

Библиографическое описание статьи

Акмаев А. С., Иванищев А. В., Иванищева И. А., Рыбаков К. С., Махов С. В., Коржаков А. А., Морозов Д. И., Диксит А. Особенности получения и электрохимические свойства материалов катода литий-ионного аккумулятора на основе ортосиликата железа(II)-лития // *Электрохимическая энергетика*. 2019. Т. 19, № 2. С. 63–71. DOI: <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2019-19-2-63-71>

For citation

Akmaev A. S., Ivanishchev A. V., Ivanishcheva I. A., Rybakov K. S., Makhov S. V., Korzhakov A. A., Morozov D. I., Dixit A. Peculiarities of Obtaining and Electrochemical Properties of Lithium-Ion Battery Cathode Materials Based on Iron(II)-Lithium Orthosilicate. *Electrochemical Energetics*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 63–71 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2019-19-2-63-71>