

Научная статья

УДК 544.6.076.324.1

DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-66-75

Использование композитов на основе МУНТ и Si в качестве анодного материала в литий-ионных аккумуляторах

Алексей Валерьевич Заворин¹, Сергей Иванович Мосеенков²,
Светлана Геннадьевна Столярова³, Александр Владимирович Окотруб⁴,
Владимир Львович Кузнецов⁵

^{1, 2, 5}Институт катализа СО РАН
Новосибирск, Россия

^{3, 4}Институт неорганической химии СО РАН
Новосибирск, Россия

¹Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

¹zavorin@catalysis.ru

²moseenkov@catalysis.ru

³sv.stolyarova93@gmail.com

⁴spectrum@niic.nsc.ru

⁵kuznet@catalysis.ru

Аннотация

В работе проведено исследование возможности использования композитов на основе многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ), декорированных частицами кремния (Si) и карбида кремния (SiC) в качестве анодного материала в литий-ионных источниках тока. Композиты МУНТ-Si и МУНТ-SiC (с различным соотношением Si/SiC) получали путем высокотемпературной термической обработки МУНТ-Si с варьированием температуры прогрева (1040 и 1350 °C). Структура и фазовый состав исследуемых композитов были охарактеризованы с использованием методов ПЭМ и РФА. Определение удельной емкости композитов в качестве анодного материала проводили при плотностях тока от 0,05 до 2 А/г.

Ключевые слова

литий-ионный аккумулятор, многослойные углеродные нанотрубки, кремний, карбид кремния

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института катализа СО РАН (проект АААА-А21-121011390054-1). Исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Национальный центр исследования катализаторов». Электрохимические испытания композитов проводили в Институте неорганической химии СО РАН в рамках проекта 21031700314-5. Авторы благодарят А. В. Ищенко за исследования композитов МУНТ-Si, МУНТ-SiC-1040 °C, МУНТ-SiC-1350 °C методом электронной микроскопии и Ц.-О. Цэндсуреэна за исследования МУНТ, МУНТ-Si, МУНТ-SiC-1040 °C, МУНТ-SiC-1350 °C методом РФА.

Для цитирования

Заворин А. В., Мосеенков С. И., Столярова С. Г., Окотруб А. В., Кузнецов В. Л. Использование композитов на основе МУНТ и Si в качестве анодного материала в литий-ионных аккумуляторах // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 2. С. 66–75. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-66-75

© Заворин А. В., Мосеенков С. И., Столярова С. Г., Окотруб А. В., Кузнецов В. Л., 2023

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2023. Том 18, № 2
Siberian Journal of Physics, 2023, vol. 18, no. 2

Investigation of Composites Based on MWCNTs and Si as an Anode Material in Lithium-ion Batteries

Alexey V. Zavorin¹, Sergey I. Moseenkov²,
Svetlana G. Stolyarova³, Alexander V. Okotrub⁴,
Vladimir L. Kuznetsov⁵

^{1,2,5}Borisev Institute of Catalysis SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

^{3,4}Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

¹Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

¹zavorin@catalysis.ru

²moseenkov@catalysis.ru

³sv.stolyarova93@gmail.com

⁴spectrum@niic.nsc.ru

⁵kuznet@catalysis.ru

Abstract

In this work, we studied the possibility of using composites based on multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) decorated with silicon (Si) and silicon carbide (SiC) particles as an anode material in lithium-ion current sources. MWCNT-Si and MWCNT-SiC composites (with different Si/SiC ratios) were obtained by high-temperature heat treatment of MWCNT-Si at different temperatures (1040 and 1350 °C). The structure and phase composition of the composites were characterized by TEM and XRD methods. The determination of the specific capacity of composites as an anode material was carried out at current densities from 0,05 to 2 A/g.

Keywords

Li-ion battery, multi-walled carbon nanotubes, silicon, silicon carbide

Acknowledgment

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the governmental order for Borisev Institute of Catalysis (project AAAA-A21-121011390054-1). The studies were carried out using facilities of the shared research center "National center of investigation of catalysts" at Borisev Institute of Catalysis. Electrochemical tests of composites were carried out at the Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry SB RAS, within the framework of the project 21031700314-5. The authors are grateful to Ishchenko A.V. for the TEM characterization of MWCNT-Si, MWCNT -SiC-1040 °C, MWCNT -SiC-1350 °C composites and Tsendsuren Tsog-Ochir for studies of MWCNTs, MWCNT-Si, MWCNT -SiC-1040 °C, MWCNT -SiC-1350 °C by XRD method.

For citation

Zavorin A. V., Moseenkov S. I., Stolyarova S. G., Okotrub A. V., Kuznetsov V. L. Investigation of composites based on MWCNTs and Si as an anode material in lithium-ion batteries. *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 2, pp. 66–75 (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-66-75

Введение

За последние годы производство электронных устройств (мобильные телефоны, часы, автомобили и т. п.) выросло в несколько раз. С увеличением производства электроники вырос спрос на аккумуляторы, которые должны обеспечивать энергией электронные устройства на протяжении длительного времени. В 2013 г. мировой рынок аккумуляторов составлял 51 млрд долларов, в 2022 г. мировой рынок аккумуляторов составлял 99 млрд долларов, к 2027 г. ожидается рост мирового рынка до 250 млрд долларов (из них ~50 % Li-ion аккумуляторы).

В настоящее время в качестве анодного материала в литий-ионных батареях используются различные углеродные материалы: сажа, графит и др. Теоретическая удельная емкость анодов на основе углеродных материалов составляет ~370 мАч/г, так как для связывания 1 иона лития

требуется 6 атомов углерода [1–3]. Современные исследования в области разработки новых анодных материалов для литий-ионных источников тока показывают, что наиболее перспективными материалами в данной области являются композиты на основе кремния (обеспечивает связывание 4 атомов лития на 1 атом кремния – Li_4Si) и карбида кремния, теоретическая удельная емкость которых составляет 4200 мАч/г и 2600 мАч/г соответственно [4–9]. Вместе с тем кремний и карбид кремния не обладают достаточной ионной и электронной проводимостью, что ограничивает ток разряда таких материалов и не позволяет получать достаточной мощности с использованием анодов из этих материалов. Одним из путей повышения мощности (увеличения тока разряда) таких анодов может являться добавление многослойных углеродных нанотрубок с формированием 3-мерной проводящей структуры. Благодаря наличию уникальных структурных, механических и электрических свойств МУНТ [10–13], их использование в композитах с кремнием или карбидом кремния позволит увеличить электропроводность анодного материала и его механическую прочность, что, в свою очередь, позволит создавать материал с большими допустимыми токами заряда-разряда и увеличить его срок службы [1, 3, 14].

Целью данной работы являлось определение возможности использования композитов на основе МУНТ, модифицированных частицами Si и SiC, в качестве анодного материала в Li-ion-аккумуляторах.

1. Экспериментальная часть

В работе были использованы многослойные углеродные нанотрубки, полученные путем каталитического разложения этилена на Fe-Co-катализаторах [15]. Удаление остаточных примесей катализатора синтеза МУНТ проводили путем их кипячения в 15 масс. % соляной кислоте в течение 4 часов. После кислотной обработки для удаления ионов H^+ и Cl^- образец был промыт большим количеством дистиллированной воды. Полноту удаления контролировали путем измерения удельной электропроводности промывных вод (не более 20 мкСм/см). Сушку проводили в сушильном шкафу при $T = 80^\circ\text{C}$ в течение 3 суток.

Нанесение наноразмерных частиц кремния осуществляли методом газофазного химического осаждения (CVD) с использованием реакции термического разложения моносилана (99.994 %) на поверхность МУНТ в псевдооживленном слое при 500°C [14, 16]. Основные характеристики исходных МУНТ и полученного композита МУНТ-Si представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики исходных МУНТ и композита МУНТ-Si

Table 1

Main characteristics of initial MWCNTs and MWCNT-Si composite

Исходные МУНТ	Условия нанесения SiH_4	Содержание Si, вес %		$D_{\text{cp}} (D_{\text{min}}-D_{\text{max}}),$ частиц Si, нм	$S_{\text{уд}}$ (МУНТ-Si), м ² /г
		Метод сжигания	ЭДС*		
$\langle d \rangle = 9,5$ нм $S = 240$ м ² /г $\rho = 0,12$ г/см ³	$T = 500^\circ\text{C}$ в токе аргона (Ar/SiH ₄ =1/0,1), время нанесения – 5 ч	56	57	19,6 (7–33)	80,5

* – энергодисперсионная спектроскопия

Получение карбида кремния на поверхности МУНТ проводили путем термической обработки исходных композитов МУНТ-Si в вакууме (10^{-6} мбар, 60 мин.) при температурах 1040 и 1350 °С (композиты МУНТ-SiC – 1040 °С и МУНТ-SiC – 1350 °С). Образование частиц карбида кремния происходило в результате взаимодействия нанесенных частиц кремния со стенками МУНТ. Степень превращения Si в SiC (α_{SiC}) в полученных композитах МУНТ-SiC составляла по данным РФА 0,29 и 1 для образцов, полученных при 1040 °С и 1350 °С соответственно [15].

Определение удельной емкости наноразмерных анодных материалов на основе композитов МУНТ-Si и МУНТ-SiC проводили в ходе зарядно-разрядных тестовых испытаний. Электрохимические свойства образцов исследовались в ячейках типа «таблетка» форм-фактора CR2032 с литиевым противoeлектродом. Рабочие электроды были изготовлены методом прокатки электродного материала. Образцы (80 масс. %), super P (10 масс. %) и поливинилиденфторид (10 масс. %) смешивали с N-метил-2-пирролидиноном (NMP) и полученную суспензию наносили на медную фольгу диаметром 14 мм и толщиной 0,02 мм, а затем сушили при 80 °С в течение 12 ч в вакууме. Масса анодного материала на электроде составляла 0,4–0,5 мг. Электролитом служил 1,0 М раствор LiPF_6 в смеси этиленкарбонат / диметилкарбонат (1 : 1 по объему). Полученные ячейки тестировались в гальваностатическом режиме на зарядно/разрядной станции NEWARE CT-3008 (Neware Technology Ltd., Shenzhen, China) в диапазоне от 0,01 до 2,5 В при плотностях тока 0,05–2 А/г.

Исследование структуры и фазового состава композитов МУНТ-Si и МУНТ-SiC проводили с использованием просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ, микроскоп JEM-2010, JEOL) и метода рентгенофазового анализа (РФА, дифрактометр ARL X'TRA на медном излучении $\text{CuK}\alpha = 0,15418$ нм).

2. Результаты и обсуждение

2.1. Охарактеризование композитов МУНТ-Si и МУНТ-SiC

На рис. 1 приведены электронно-микроскопические снимки композитов МУНТ-Si, МУНТ-SiC – 1040 °С и МУНТ-SiC – 1350 °С.

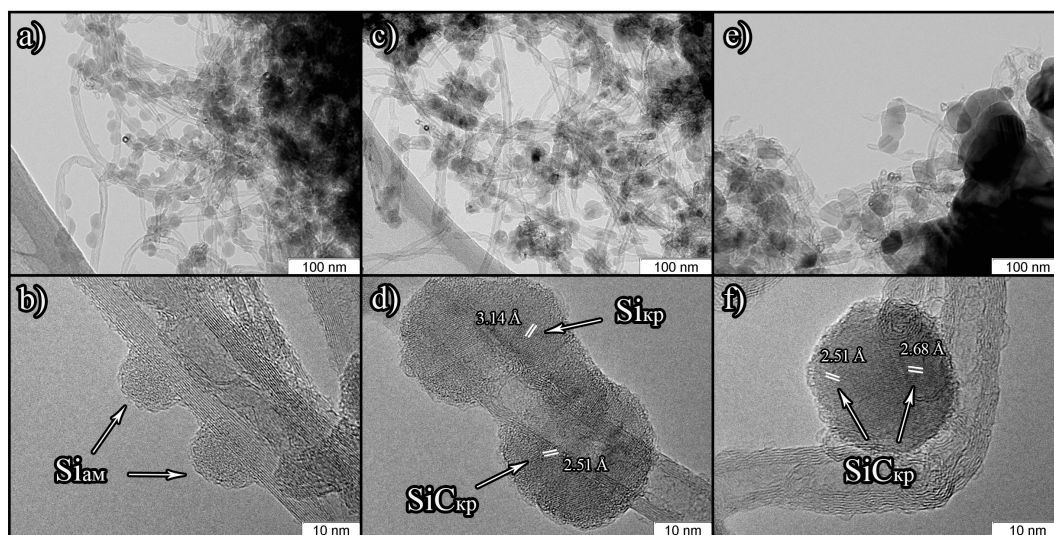


Рис. 1. Изображения ПЭМ: a, b – исходный композит МУНТ-Si; c, d – композит МУНТ-SiC – 1040 °С; e, f – композит МУНТ-SiC – 1350 °С

Fig. 1. TEM images: a, b – initial MWCNT-Si composite; c, d – MWCNT-SiC – 1040 °C composite; e, f – MWCNT-SiC – 1350 °C composite

Было установлено, что для исходных композитов характерно образование частиц кремния с аморфной структурой (рис. 1, *a, b*). Повышение температуры обработки до $T = 1040^\circ\text{C}$ приводит к перестройке структуры кремниевых частиц из аморфной в кристаллическую. Кроме того, при $T = 1040^\circ\text{C}$ происходит взаимодействие частиц кремния с поверхностью углеродных нанотрубок с образованием частиц SiC, что подтверждается данными ПЭМ (рис. 1, *c, d*) и наличием рефлексов на рентгенограммах (рис. 2, *a*).

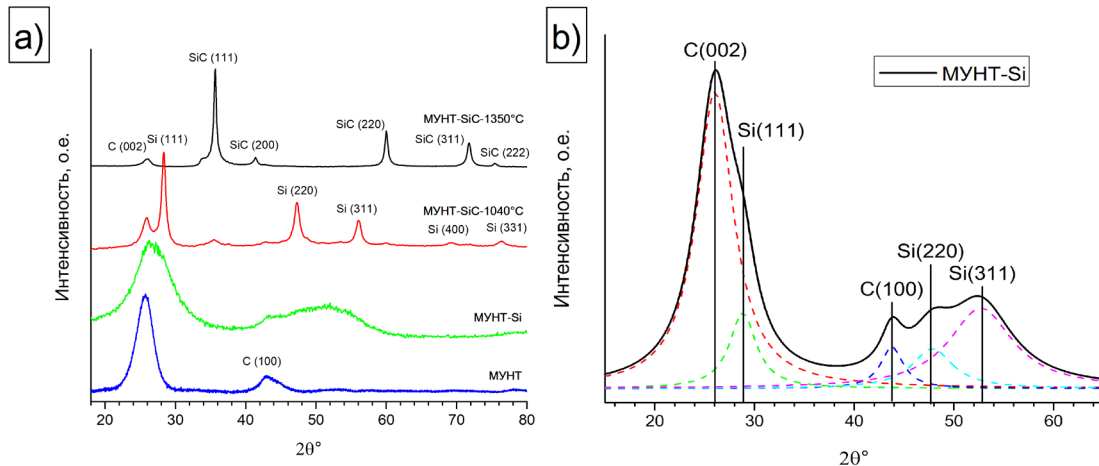


Рис. 2. *a* – рентгенограммы МУНТ, МУНТ-Si, МУНТ-SiC – 1040°C и МУНТ-SiC – 1350°C ; *b* – разложение рентгенограммы композита МУНТ-Si на компоненты C и Si

Fig. 2. *a* – X-ray diffraction patterns of MWCNTs, MWCNT-Si, MWCNT-SiC – 1040°C and MWCNT-SiC – 1350°C ; *b* – decomposition of the X-ray diffraction pattern of the MWCNT-Si composite into C and Si components

При температуре обработки 1040°C были зафиксированы рефлексы, соответствующие $\text{Si}_{\text{кр}}$ с кристаллографическими гранями $\{111\}$, $\{220\}$, $\{311\}$, $\{400\}$, $\{331\}$ и $\text{SiC}_{\text{кр}}$ с гранями $\{111\}$ и $\{200\}$. Также были зафиксированы межплоскостные расстояния (рис. 1, *d*), соответствующие кристаллическому кремнию ($3,14 \text{ \AA}$) и карбиду кремния ($2,51 \text{ \AA}$). Соотношение Si/SiC по данным РФА составило $0,71 : 0,29$. Увеличение температуры обработки до 1350°C приводит к полному расходу Si на образование SiC и спеканию первичных частиц карбида кремния в частицы неправильной формы размером более 50 нм (рис. 1, *e*) [17]. Так, на снимках ПЭМ наблюдались частицы с межплоскостными расстояниями (рис. 1, *f*), соответствующими только SiC ($2,51$ и $2,68 \text{ \AA}$).

С использованием РФА были зафиксированы рефлексы соответствующие $\text{SiC}_{\text{кр}}$ с кристаллографическими гранями $\{111\}$, $\{200\}$, $\{220\}$, $\{311\}$ и $\{222\}$. Кроме того, было зафиксировано уменьшение интенсивности рефлексов C(002) и C(100), что связано с расходом углерода при взаимодействии стенок МУНТ с частицами Si, сопровождающегося уменьшением количества стенок углеродных нанотрубок (соответствует уширению рефлексов C(002)).

Таким образом, структура полученных композитов была исследована двумя независимыми методами ПЭМ и РФА. Установлено, что в исходных композитах МУНТ-Si на поверхности углеродных нанотрубок содержатся частицы кремния с аморфной структурой. После температурной обработки при 1040°C происходит перестройка структуры кремния из аморфной в кристаллическую и образуются частицы карбида кремния. При увеличении температуры до 1350°C происходит полное расхождение кремниевых частиц на образование частиц карбида кремния.

2.2. Электрохимические свойства композитов МУНТ-Si и МУНТ-SiC

Полученные композиты МУНТ-Si и МУНТ-SiC были испытаны в качестве анодного материала в Li-ion-аккумуляторе. В результате проведенных измерений было определено, что исходная емкость анодного материала на основе композита МУНТ-Si равна 1600 мАч/г, которая уменьшается до ~600 мАч/г через 10 циклов заряда-разряда при токе 0,03 С (0,05 А/г) (рис. 3, а), что, по-видимому, связано с разрушением кремниевых частиц в процессе литирования.

Для полученных образцов композитов МУНТ-SiC также была исследована возможность использования их в качестве анодного материала литий-ионных аккумуляторов. Для этого было исследовано изменение удельной емкости в процессе заряда-разряда аккумуляторов с анодным материалом на основе композитов МУНТ-SiC, полученных при $T = 1040\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\alpha_{\text{SiC}} = 0,29$) и $T = 1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\alpha_{\text{SiC}} = 1$) [17].

На рис. 3, а представлены зависимости удельной емкости трех композитов от различной плотности тока для каждых 10 циклов. Установлено, что исходное значение удельной емкости для композита МУНТ-SiC – $1040\text{ }^{\circ}\text{C}$ достигает 1000 мАч/г. Через 10 циклов заряда-разряда емкость композитов падает до 570 мАч/г, уменьшение емкости, по-видимому, связано с разрушением непрореагировавших с поверхностью МУНТ частицами кремния. Композит МУНТ-SiC – $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$, содержащий на поверхности МУНТ только частицы карбида кремния, на протяжении всего времени тестирования, показал емкость композита ~ 170–180 мАч/г, что указывает на высокую стабильность частиц SiC на поверхности МУНТ в процессе заряда-разряда аккумуляторов.

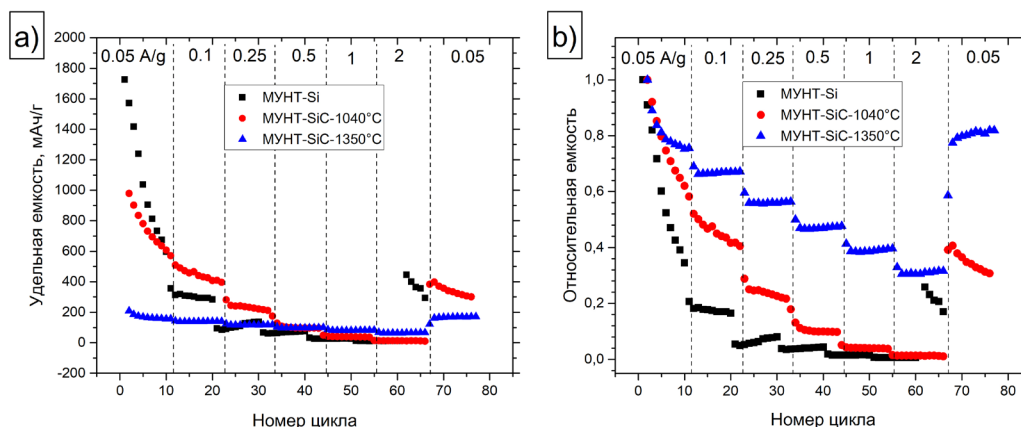


Рис. 3. Зависимость удельной (а) и относительной (б) емкости батарей с использованием анодного материала на основе композитов МУНТ-Si и МУНТ-SiC от приложенной плотности тока

Fig. 3. Dependence of the specific (a) and relative (b) capacity of batteries using an anode material based on MWCNT-Si and MWCNT-SiC composites on the applied current density

Таким образом, установлено, что анодный материал на основе композита МУНТ-SiC- $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\alpha_{\text{Si}} = 1$) демонстрирует наиболее стабильную работу в ходе электрохимических испытаний, демонстрируя потерю удельной емкости около 18 % от начального значения, после 80 циклов заряда-разряда, что меньше потерь удельной емкости композитов МУНТ-SiC – $1040\text{ }^{\circ}\text{C}$ (60–70 %) и МУНТ-Si (до 83 %). Такое различие в изменении емкости обусловливается различной структурой используемых композитов. В композитах МУНТ-Si и МУНТ-SiC – $1040\text{ }^{\circ}\text{C}$ высокая начальная удельная емкость обусловлена наличием частиц кремния на поверхности МУНТ, но в связи с тем, что при литировании происходит увеличение их объема в несколько раз [6], происходит разрушение частиц кремния, что приводит к необратимой потере емкости.

В композите МУНТ-SiC – 1350 °C на поверхности МУНТ присутствуют только частицы карбида кремния, которые обеспечивают стабильную работу анодного материала в процессах заряда-разряда. Также необходимо отметить, что при высоких токах заряда-разряда 10C (2A/г), анодный материал на основе композита МУНТ-SiC – 1350 °C демонстрирует потерю удельной емкости не более 60–70 %, а при последующих циклах заряда-разряда при токе 0,25C (0,05 A/г) удельная емкость такого анодного материала восстанавливается до 83 % от исходной. Это указывает, что полученные композиты МУНТ-SiC – 1350 °C могут быть использованы в высокомоощных аккумуляторах.

Полученные данные об удельной емкости композитов на основе МУНТ, модифицированных частицами Si и SiC, указывают на перспективность их возможного практического использования в качестве анодного материала в литий-ионных источниках тока: композиты МУНТ-Si демонстрируют высокую начальную удельную емкость и могут быть использованы в слаботочных высокеемких аккумуляторах, а МУНТ-SiC – высокую стабильность при высоких токах заряда-разряда, что открывает возможность их использования в силовых аккумуляторах. Для определения оптимального состава и структуры композита требуется проведение дополнительных исследований. Так, для композитов МУНТ-Si необходимо определить возможность замедления процесса разрушения частиц кремния, например, за счет нанесения стабилизирующего слоя углерода на поверхность частиц кремния или образования слоя SiO₂ на их поверхности. Для композитов МУНТ-SiC – возможность увеличения дисперсности частиц SiC на поверхности МУНТ для увеличения удельной емкости.

Заключение

Было проведено исследование композитов МУНТ-Si, МУНТ-SiC – 1040 °C и МУНТ-SiC – 1350 °C в качестве анодного материала в Li-ion-аккумуляторах. Установлено, что композиты МУНТ-Si и МУНТ-SiC – 1040 °C показали высокую начальную удельную емкость, которая обусловлена наличием частиц кремния. Вместе с тем данные композиты также демонстрируют наибольшую необратимую потерю удельной емкости в процессе циклирования (83 и 60–70 % соответственно) за счет разрушения частиц кремния в процессе литирования. В то же время композит МУНТ-SiC – 1350 °C в ходе электрохимических испытаний в качестве анодного материала показал наиболее стабильную работу по сравнению с остальными композитами даже при высоких токах заряда-разряда 10 C (2 A/г). В дальнейшем исследования по определению возможности использования композитов МУНТ-Si и МУНТ-SiC будут продолжены в направлении создания защитных покрытий на поверхности нанесенных частиц, нахождения оптимального состава и структуры композита, сочетающего в себе как высокую удельную емкость и мощность, так и длительную стабильную работу анодного материала.

Список литературы

1. **de las Casas C., LiW.** A Review of Application of Carbon Nanotubes for Lithium Ion Battery Anode Material // Journal of Power Sources. 2012. Vol. 208. P. 74–85. doi:10.1016/j.jpowsour.2012.02.013
2. **Lahiri I., Choi W.** Carbon Nanostructures in Lithium Ion Batteries: Past, Present, and Future // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. 2013. Vol. 38. P. 128–166. doi:10.1080/10408436.2012.729765
3. **Sehrawat P., Julien C., Islam S. S.** Carbon Nanotubes in Li-Ion Batteries: A Review // Materials Science and Engineering: B. 2016. Vol. 213. Vol. 12–40. doi:10.1016/j.mseb.2016.06.013
4. **Sun X., Shao C., Zhang F., Li Y., Wu Q.-H., Yang Y.** SiC Nanofibers as Long-Life Lithium-Ion Battery Anode Materials // Front. Chem. 2018. Vol. 6, № 166. doi:10.3389/fchem.2018.00166

5. **Sun K., Wang T., Gong W., Lu W., He X., Eddings E. G., Fan M.** Synthesis and Potential Applications of Silicon Carbide Nanomaterials / Nanocomposites // *Ceramics International*. 2022. Vol. 48. P. 32571–32587. doi:10.1016/j.ceramint.2022.07.204
6. **Park M.-H., Kim M. G., Joo J., Kim K., Kim J., Ahn S., Cui Y., Cho J.** Silicon Nanotube Battery Anodes. *Nano Letters* 2009, 9, 3844–3847, doi:10.1021/nl902058c.
7. **Li P., Zhao G., Zheng X., Xu X., Yao C., Sun W., Dou S. X.** Recent Progress on Silicon-Based Anode Materials for Practical Lithium-Ion Battery Applications // *Energy Storage Materials*. 2018. doi:10.1016/j.ensm.2018.07.014
8. **Chadha U., Hafiz M., Bhardwaj P., Padmanaban S., Sinha S., Hariharan S., Kabra D., Venkatarangan V., Khanna M., Selvaraj S. K., et al.** Theoretical Progresses in Silicon Anode Substitutes for Lithium-Ion Batteries // *Journal of Energy Storage*. 2022. Vol. 55. P. 105352. doi:10.1016/j.est.2022.105352
9. **Zhang H., Xu H.** Nanocrystalline Silicon Carbide Thin Film Electrodes for Lithium-Ion Batteries // *Solid State Ionics*. 2014. Vol. 263. P. 23–26. doi:10.1016/j.ssi.2014.04.020
10. **Fang S., Shen L., Zhang X.** Application of Carbon Nanotubes in Lithium-Ion Batteries // *Industrial Applications of Carbon Nanotubes*. Elsevier, 2017. P. 251–276.
11. **Mathur R. B., Singh B. P., Pande S.** Carbon Nanomaterials: Synthesis, Structure, Properties and Applications. CRC press: Boca Raton, 2017.
12. **Rathinavel S., Priyadharshini K., Panda D.** A Review on Carbon Nanotube: An Overview of Synthesis, Properties, Functionalization, Characterization, and the Application // *Materials Science and Engineering: B*. 2021. Vol. 268. P. 115095. doi:10.1016/j.mseb.2021.115095
13. **Miao M.** Electrical Conductivity of Pure Carbon Nanotube Yarns // *Carbon*. 2011. Vol. 49. P. 3755–3761. doi:10.1016/j.carbon.2011.05.008
14. **Coppey N., Noé L., Monthieux M., Caussat B.** Decorated Carbon Nanotubes by Silicon Deposition in Fluidized Bed for Li-Ion Battery Anodes // *Chemical Engineering Research and Design*. 2013. Vol. 91. P. 2491–2496. doi:10.1016/j.cherd.2013.01.002
15. **Kuznetsov V. L., Krasnikov D. V., Schmakov A. N., Elumeeva K. V.** In Situ and Ex Situ Time Resolved Study of Multi-Component Fe-Co Oxide Catalyst Activation during MWNT Synthesis: Multi-Component Fe-Co Oxide Catalyst Activation // *Phys. Status Solidi B*. 2012. Vol. 249. P. 2390–2394. doi:10.1002/pssb.201200120
16. **Zavorin A. V., Kuznetsov V. L., Moseenkov S. I., Tsendsuren T.-O., Volodin V. A., Galkin P. S., Ishchenko A. V.** Chemical Vapor Deposition of Silicon Nanoparticles on the Surface of Multiwalled Carbon Nanotubes // *Journal Struct. Chem*. 2020. Vol. 61. Vol. 617–627. doi:10.1134/S0022476620040162
17. **Заворин А. В., Мосеенков С. И., Селютин А. Г., Серкова А. Н., Цэндсүрэн Ц.-О., Кузнецов В. Л.** Влияние термической обработки на структуру композитов МУНТ-Si. 2022. С. 76–77 [Электронный ресурс]. URL: <http://Conf.Nsc.Ru/SRTCfM-2022/En/Invitation>

References

1. **de las Casas C., Li W.** A Review of Application of Carbon Nanotubes for Lithium Ion Battery Anode Material. *Journal of Power Sources* 2012, 208, 74–85, doi:10.1016/j.jpowsour.2012.02.013.
2. **Lahiri I., Choi W.** Carbon Nanostructures in Lithium Ion Batteries: Past, Present, and Future. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences* 2013, 38, 128–166, doi:10.1080/10408436.2012.729765.
3. **Sehrawat P., Julien C., Islam S. S.** Carbon Nanotubes in Li-Ion Batteries: A Review. *Materials Science and Engineering: B* 2016, 213, 12–40, doi:10.1016/j.mseb.2016.06.013.
4. **Sun X., Shao C., Zhang F., Li Y., Wu Q.-H., Yang Y.** SiC Nanofibers as Long-Life Lithium-Ion Battery Anode Materials. *Front. Chem*. 2018, 6, 166, doi:10.3389/fchem.2018.00166.

5. **Sun K., Wang T., Gong W., Lu W., He X., Eddings E. G., Fan M.** Synthesis and Potential Applications of Silicon Carbide Nanomaterials / Nanocomposites. *Ceramics International* 2022, 48, 32571–32587, doi:10.1016/j.ceramint.2022.07.204.
6. **Park M.-H., Kim M. G., Joo J., Kim K., Kim J., Ahn S., Cui Y., Cho J.** Silicon Nanotube Battery Anodes. *Nano Letters* 2009, 9, 3844–3847, doi:10.1021/nl902058c.
7. **Li P., Zhao G., Zheng X., Xu X., Yao C., Sun W., Dou S. X.** Recent Progress on Silicon-Based Anode Materials for Practical Lithium-Ion Battery Applications. *Energy Storage Materials* 2018, doi:10.1016/j.ensm.2018.07.014.
8. **Chadha U., Hafiz M., Bhardwaj P., Padmanaban S., Sinha S., Hariharan S., Kabra D., Venkatarangan V., Khanna M., Selvaraj S. K., et al.** Theoretical Progresses in Silicon Anode Substitutes for Lithium-Ion Batteries. *Journal of Energy Storage* 2022, 55, 105352, doi:10.1016/j.est.2022.105352.
9. **Zhang H., Xu H.** Nanocrystalline Silicon Carbide Thin Film Electrodes for Lithium-Ion Batteries. *Solid State Ionics* 2014, 263, 23–26, doi:10.1016/j.ssi.2014.04.020.
10. **Fang S., Shen L., Zhang X.** Application of Carbon Nanotubes in Lithium-Ion Batteries. In *Industrial Applications of Carbon Nanotubes*, Elsevier, 2017, pp. 251–276 ISBN 978-0-323-41481-4.
11. **Mathur R.B., Singh B.P., Pande S.** *Carbon Nanomaterials: Synthesis, Structure, Properties and Applications*, CRC press: Boca Raton, 2017, ISBN 978-1-4987-0210-2.
12. **Rathinavel S., Priyadharshini K., Panda D.** A Review on Carbon Nanotube: An Overview of Synthesis, Properties, Functionalization, Characterization, and the Application. *Materials Science and Engineering: B* 2021, 268, 115095, doi:10.1016/j.mseb.2021.115095.
13. **Miao M.** Electrical Conductivity of Pure Carbon Nanotube Yarns. *Carbon* 2011, 49, 3755–3761, doi:10.1016/j.carbon.2011.05.008.
14. **Coppey N., Noé L., Monthieux M., Caussat B.** Decorated Carbon Nanotubes by Silicon Deposition in Fluidized Bed for Li-Ion Battery Anodes. *Chemical Engineering Research and Design* 2013, 91, 2491–2496, doi:10.1016/j.cherd.2013.01.002.
15. **Kuznetsov V. L., Krasnikov D. V., Schmakov A. N., Elumeeva K. V.** In Situ and Ex Situ Time Resolved Study of Multi-Component Fe-Co Oxide Catalyst Activation during MWNT Synthesis: Multi-Component Fe-Co Oxide Catalyst Activation. *Phys. Status Solidi B* 2012, 249, 2390–2394, doi:10.1002/pssb.201200120.
16. **Zavorin A. V., Kuznetsov V. L., Moseenkov S. I., Tsendsuren T.-O., Volodin V. A., Galkin P. S., Ishchenko A. V.** Chemical Vapor Deposition of Silicon Nanoparticles on the Surface of Multiwalled Carbon Nanotubes. *J Struct Chem* 2020, 61, 617–627, doi:10.1134/S0022476620040162.
17. **Zavorin A. V., Moseenkov S. I., Selyutin A. G., Serkova A. N., Tsendsuren T.-O., Kuznetsov V. L.** Effect of Heat Treatment on the Structure of MWCNT-Si Composites. 2022. P. 76-77. [Electronic resource]. URL: <http://Conf.Nsc.Ru/SRTCfM-2022/En/Invitation>

Сведения об авторах

Алексей Валерьевич Заворин, аспирант

Сергей Иванович Мосеенков, кандидат химических наук

Светлана Геннадьевна Столярова, кандидат химических наук

Александр Владимирович Окотруб, доктор физико-математических наук

Владимир Львович Кузнецов, кандидат химических наук

Information about the Authors

Alexey V. Zavorin, Post-Graduate Student

Sergey I. Moseenkov, Candidate of Chemical Sciences

Svetlana G. Stolyarova, Candidate of Chemical Sciences, Researcher

Alexander V. Okotrub, Doctor of Science (Physics and Mathematics)

Vladimir L. Kuznetsov, Candidate of Chemical Sciences

*Статья поступила в редакцию 12.04.2023; одобрена после рецензирования 17.04.2023;
принята к публикации 13.05.2023*

*The article was submitted 12.04.2023; approved after reviewing 17.04.2023;
accepted for publication 13.05.2023*