

Научная статья
УДК 66.091:546.34'73:621.355
doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.034

СИНТЕЗ НИКЕЛАТА ЛИТИЯ, БЛИЗКОГО К СТЕХИОМЕТРИЧЕСКОМУ СОСТАВУ, КОМБИНИРОВАННЫМ ПОДХОДОМ

**Кирилл Александрович Кесарев¹, Роман Иванович Корнейков²,
Вадим Викторович Ефремов³, Ольга Борисовна Щербина⁴**

^{1–4}*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева
Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия*

¹*keskirill@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0024-9282>*

²*r.korneikov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9178-364X>*

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

⁴*o.shcherbina@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9591-0274>*

Аннотация

Синтезирован никелат лития, близкий к стехиометрическому составу $\text{Li}_{1-x}\text{Ni}_{1+x}\text{O}_2$, комбинированным золь-гель методом с твердофазным окончанием. Данный подход является энергоэффективным, малозатратным, не требует использования дорогих прекурсоров (никель окисляется гипохлоритом натрия на стадии золь-гель синтеза). На основании экспериментально полученных данных установлены оптимальные параметры синтеза и разработана принципиальная технологическая схема синтеза $\text{Li}_{1-x}\text{Ni}_{1+x}\text{O}_2$. Определены физические свойства (размер частиц, удельная поверхность) и электрофизические свойства никелата лития (электронная, ионная проводимость).

Ключевые слова:

литий-ионные аккумуляторы, никелат лития, физические свойства, ионная и электронная проводимость, золь-гель метод, твердофазный метод

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-2020-0015.

Финансирование:

государственное задание по теме НИР № FMEZ-2020-0015.

Для цитирования:

Синтез никелата лития, близкого к стехиометрическому составу, комбинированным подходом / К. А. Кесарев [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2024. Т. 15, № 1. С. 212–220. doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.034.

Original article

SYNTHESIS OF LITHIUM NICKELATE OF ALMOST STOICHEOMETRIC COMPOSITION BY COMBINED APPROACH

Kirill A. Kesarev¹, Roman I. Korneikov², Vadim V. Efremov³, Olga B. Shcherbina⁴

^{1–4}*I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials
of the Kola Science Centre of RAS, Apatity, Russia*

¹*keskirill@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0024-9282>*

²*r.korneikov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9178-364X>*

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

⁴*o.shcherbina@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9591-0274>*

Abstract

Lithium nickelate of almost stoichiometric composition ($\text{Li}_{1-x}\text{Ni}_{1+x}\text{O}_2$) was synthesized using a combined sol-gel method with solid-phase termination. This approach is energy efficient, low-cost, and does not require the use of expensive precursors (nickel is oxidized with sodium hypochlorite at the sol-gel synthesis stage). Based on experimentally obtained data, optimal synthesis parameters were established and a basic technological scheme for the synthesis of $\text{Li}_{1-x}\text{Ni}_{1+x}\text{O}_2$ was developed. The electrical properties of lithium nickelate (electronic, ionic conductivity) and physical properties (particle size, specific surface area) were determined.

Keywords:

lithium nickelate, heat treatment, ionic conductivity, electronic conductivity, sol-gel method, solid phase method, lithium ion batteries

Acknowledgments:

the article was supported by the federal budget on the topic of the state assignment of Tananaev Institute of Chemistry of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences No. FMEZ-2020-0015.

Funding:

state assignment on the topic of research No. FMEZ-2020-0015.

For citation:

Synthesis of lithium nickelate of almost stoichiometric composition by combined approach / K. A. Kesarev [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2024. Vol. 15, No. 1. P. 212–220. doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.034.

Введение

Литий-ионные аккумуляторы являются перспективным и быстроразвивающимся видом энергонакопительных устройств, однако в некоторых сферах, как, к примеру, производство электромобилей, их применение ограничено в связи с низкой ёмкостью, циклируемостью аккумулятора. Производительность такого аккумулятора, в свою очередь, зависит от катодного материала. На данный момент в большинстве литий-ионных аккумуляторов в качестве катодного материала применяется кобальтат лития (LiCoO_2) либо литий-железо фосфат (LiFePO_4). Никелат лития (LiNiO_2) привлекает внимание в качестве катодного материала из-за его высокой разрядной ёмкости, низкой стоимости и экологичности [1], он также обладает наибольшей практической удельной ёмкостью из класса оксидов LiMO_2 (210 мАч/г при заряде до 4,2 В) [2]. Однако в промышленных масштабах его практически не используют (из-за сложностей получения стехиометрического LiNiO_2).

Из-за близости ионных радиусов двухвалентный никель занимает позиции лития, по этой причине возникает нестехиометрия никелата лития $\text{Li}_{1-x}\text{Ni}_{1+x}\text{O}_2$ [2]. Согласно литературным данным, в большинстве работ LiNiO_2 получают твердофазным методом (см., например, [3]). Данный метод требует длительной высокотемпературной термообработки порядка 24–72 ч, что, в свою очередь, приводит к укрупнению частиц (получаемый размер 3–5 мкм), тем самым ухудшаются электрохимические свойства получаемого материала. Золь-гель метод устраняет частично недостатки твердофазного метода, приводит к высокой гомогенизации получаемого продукта, но требует всё равно длительной термообработки. К примеру, в работе [4] для золь-гель синтеза никелата лития требовалась термообработка при 600 °С в течение 5 ч, затем при 800 °С продолжительностью 13 ч. Получаемый размер частиц составлял 3–5 мкм. Другие методы, к примеру спрей-пиролиз [5], сложны и требуют дорогостоящего оборудования. Существующие в настоящее время подходы не приводят к получению катодных материалов на основе никелата лития с необходимыми физическими параметрами, поэтому поиск новых способов синтеза является актуальным.

Экспериментальная часть

Синтез катодного материала на основе никелата лития осуществляли путём комбинирования золь-гель метода и твердофазного подхода. Использовались: гидроксид лития одноводный (чистоты 99,00 %, «Невареактив», Россия); никеля хлорид шестиводный (чистоты 97 %, «Невареактив», Россия). Соединения растворяли в деионизованной воде до нужной концентрации. Также использовали натрия гипохлорит (чистоты 99 %, «Невареактив», Россия) в виде готового раствора.

Для графического представления материалов использовали редакторы CorelDRAW (Corporation Corel, Canada), OriginPro 9.1 (OriginLab Corporation, Northampton, Massachusetts, USA), Chem 3D PRO (CambridgeSoft, United Kingdom). Математическую обработку SEM-изображений осуществляли программой ScanMaster (National research nuclear university (MEPHI), Moscow Engineering Physics Institute, Moscow, Russia).

Синтез проводили в термостате при температуре 65 °С. К 10-кратному мольному избытку раствора LiOH (по отношению к никелю) вводили раствор NiCl_2 . Далее смесь окисляли 3 %-м раствором NaClO (взятым с 20 %-м избытком на окисление катионов никеля). Синтез проводили в течение

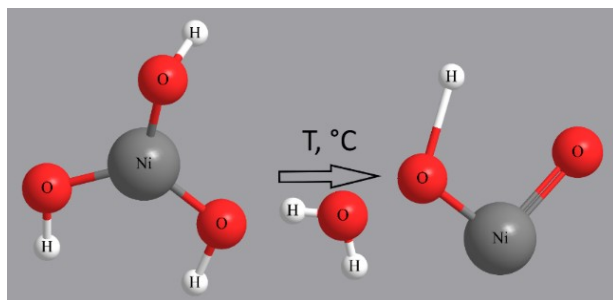


Рис. 1. Переход $\text{Ni}(\text{OH})_3$ при частичной дегидратации в NiOOH

1 ч. Далее суспензию упаривали и прокачивали при 700°C , после чего в дистиллированной воде проводили отмывку от маточного электролита.

При введении окислителя гипохлорита натрия образуется $\text{Ni}(\text{OH})_3$, который, частично теряя воду при термической обработке, переходит в NiOOH [1]. На рис. 1 представлена схема. Очень вероятно, что в растворе происходит лишь частичное замещение протона гидроксогрупп NiOOH на литий с образованием фазы NiOOLi , так как при фильтровании данной фазы образуется фаза с малым содержанием лития (рентгенограмма представлена на рис. 2).

Из рентгенограммы видно практически полное отсутствие пика $2\theta = 18^\circ$. Это говорит о присутствии оксида никеля либо фазы, сильно обеднённой литием.

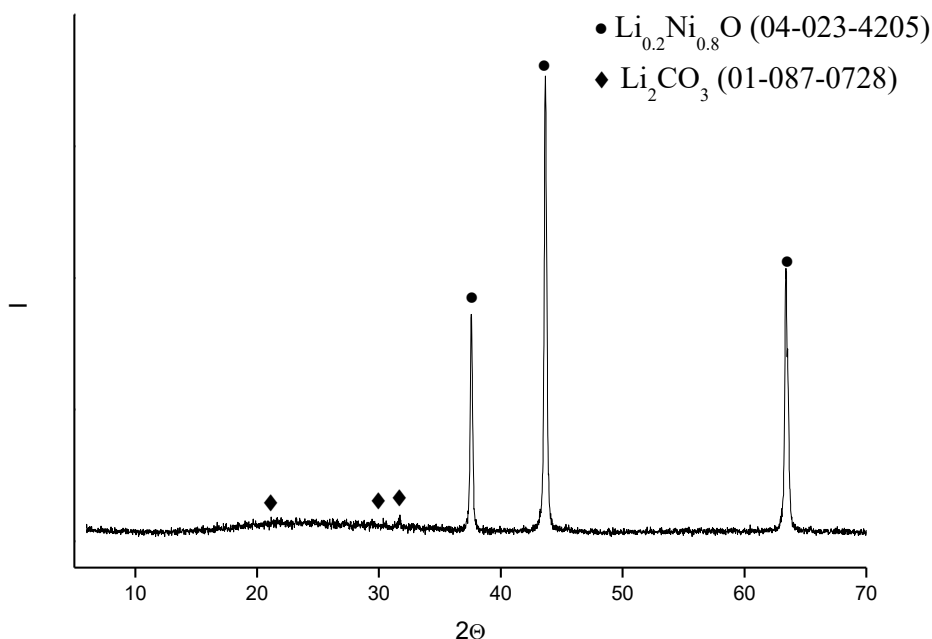


Рис. 2. Рентгенограмма неотмытого никелата лития, полученного без стадии твердофазного окончания

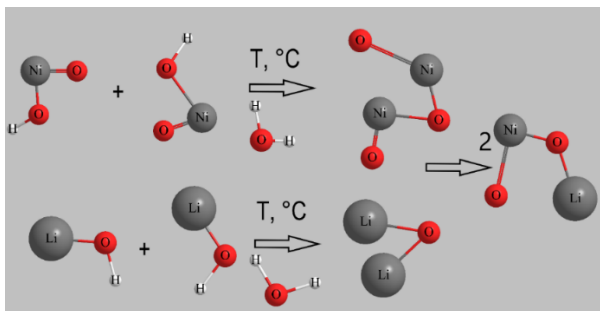


Рис. 3. Механизм образования никелата лития на стадии твердофазного окончания

Основное внедрение лития происходит при твердофазном спекании по механизму, представленному на рис. 3. Оксид никеля (III), взаимодействуя с оксидом лития при температуре, образует целевую фазу состава $\text{Li}_{1-x}\text{Ni}_{1+x}\text{O}_2$, в связи с чем и был сделан вывод о том, что без стадии твердофазного окончания получить целевое соединение не удастся. Карбонат лития образуется при взаимодействии гидроксида лития с углекислым газом атмосферы воздуха, которое усиливается при термической обработке. По этой причине после первой стадии синтеза осуществляли

упаривание суспензии до сухого остатка с последующим прокаливанием при температуре 700 °С в течение 1 ч. В результате происходит формирование никелата лития, близкого к стехиометрическому составу. Но вместе целевым продуктом присутствует карбонат лития, образованный при карбонизации гидроксида лития при высоких температурах. Для его удаления осуществляли стадию отмывки.

Экспериментально установлено, что снижение избытка гидроксида лития ($\text{Li:Ni} = 5:1$) приводит к образованию фазы с малым содержанием лития ($\text{Li}_{0,64}\text{Ni}_{1,36}\text{O}_2$) (рис. 4а); снижение времени термической обработки уменьшает содержание лития в целевой фазе $\text{Li}_{1-x}\text{Ni}_{1+x}\text{O}_2$ (время прокали образца $\text{Li}_{0,79}\text{Ni}_{1,21}\text{O}_2$ (рис. 4б) — 30 мин), образца $\text{Li}_{0,98}\text{Ni}_{1,02}\text{O}_2$ (рис. 4с) — 1 ч). Выбор температуры термообработки обусловлен анализом литературных данных. Повышение температуры (> 700 °С) приводит к укрупнению частиц и трансформации структуры из гексагональной в электрохимически неактивную кубическую (T 720 °С) [8], её снижение (до 500 °С) приводит к образованию фазы сильно «обеднённой» литием ($\text{Li}_{0,55}\text{Ni}_{1,45}\text{O}_2$ рис. 4д).

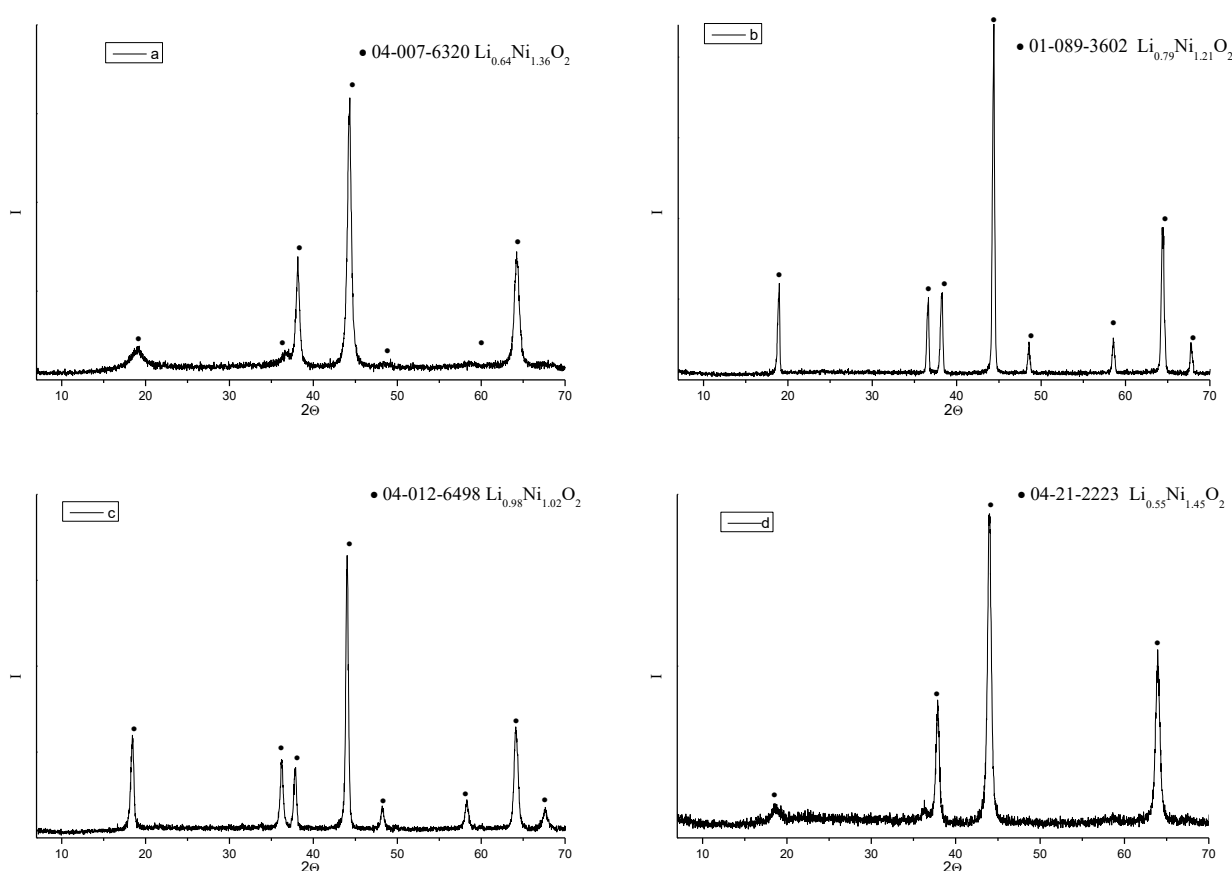


Рис. 4. Рентгенограммы $\text{Li}_{0,64}\text{Ni}_{1,36}\text{O}_2$ (а), $\text{Li}_{0,79}\text{Ni}_{1,21}\text{O}_2$ (б), $\text{Li}_{0,98}\text{Ni}_{1,02}\text{O}_2$ (с) и $\text{Li}_{0,55}\text{Ni}_{1,45}\text{O}_2$ (д)

Спечённый осадок отмывали от NaCl и Li_2CO_3 деионизированной водой при соотношении жидкой и твёрдой фаз, равном 100. При таком соотношении гидролитической деструкции синтезированного соединения не происходит. Установлено, что отмывка в других условиях (увеличение отношения фаз) приводит к гидролизу целевого соединения, в результате чего целевой продукт «обедняется» катионами лития. В результате был получен никелат лития, близкий к стехиометрическому составу, что подтверждается данными РФА (рис. 4), который осуществляли на дифрактометре Shimadzu XRD 6000 (Shimadzu Corporation, Япония) с $\text{CuK}\alpha$ -излучением, для идентификации фаз использовали базы данных ICDD, PDF-4+ 2021.

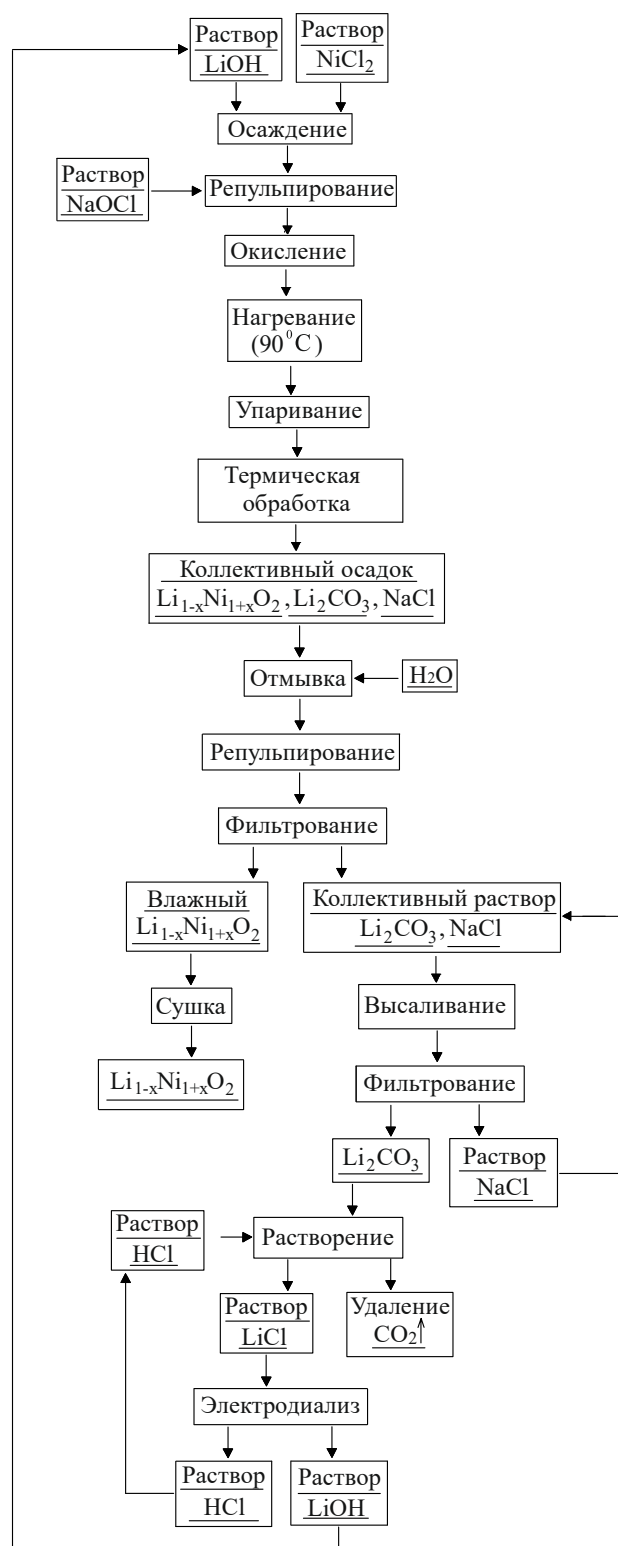


Рис. 5. Принципиальная технологическая схема получения монофазного никелата лития стехиометрического состава

По экспериментально найденным результатам разработана принципиальная технологическая схема получения никелата лития, близкого к стехиометрическому составу (рис. 5).

В работе определены и изучены физические параметры образцов никелата лития.

Для изучения микроструктуры частиц синтезированных порошков никелатов лития использовали сканирующий электронный микроскоп SEM LEO-420 (Carl Zeiss, Германия).

Средний размер частиц образцов, прокалённых при различной температуре, вычисляли по формуле Дебая — Шеррера, в приближении что частицы сферические.

$$d = \frac{k\lambda}{\beta \cdot \cos \theta},$$

где d — средний размер кристаллов; k — безразмерный коэффициент формы частиц (постоянная Шеррера); λ — длина волны рентгеновского излучения; β — ширина рефлекса на полувысоте (в радианах); θ — угол дифракции (брэгговский угол).

Ширину рефлекса на полувысоте (в радианах) рассчитывали в программном обеспечении Shimadzu (Япония) LabX XRD-6000с. Для расчёта размера частиц по формуле Дебая — Шеррера принимали: k — 0,9; λ — 0,154 Å (медный анод).

Удельную поверхность (S , г/м²) измеряли методом Брунауэра — Эммета — Теллера (BET) по низкотемпературной адсорбции азота на электронном измерителе удельной поверхности TriStar II 3020 (Micromeritics).

Для дальнейших электрофизических исследований из синтезированных порошков изготавливались таблетки с помощью прессформы и гидравлического пресса при давлении 1 т/см², после чего они спекались при 800 °С в течение 1 ч.

Электрофизические свойства исследовали импедансметром Solartron-1260 (AMETEK, Inc. (NYSE:AME), Solartron analytical, USA/UK) в диапазоне частот 0,1–10⁷ Гц. Electroды на плоской поверхности образца создавались путём магнетронного напыления тонкого слоя платины, после чего образец с нанесёнными электродами можно рассматривать как плоский

конденсатор. Метод обработки данных позволяет исключать вклад поляризационных эффектов (образование двойного электрического слоя) в измеряемые параметры [6] и корректно рассчитать значения статической удельной проводимости исследуемого объекта.

Результаты и обсуждение

Физические параметры синтезированных соединений на основе никелатов лития

Таблица 1

Состав образца	Физические параметры	
	$S_{уд}, м^2/г$	$D, нм^*$
$Li_{0,79}Ni_{1,21}O_2$	17,44	97,00
$Li_{0,98}Ni_{1,02}O_2$	22,85	20,53

* Термообработка осуществлялась при 700 °С.

Физические параметры синтезированных соединений на основе никелатов лития $Li_{0,79}Ni_{1,21}O_2$ и $Li_{0,98}Ni_{1,02}O_2$ представлены в табл. 1.

Нестехиометрия никелата лития возникает вследствие нестабильности никеля в степени окисленности Ni^{+3} при высокой температуре, из-за близости ионных радиусов ($r(Ni^{2+}) = 0,72\text{\AA}$; $r(Li^{+}) = 0,68\text{\AA}$) двухвалентный никель занимает позиции лития [2]. Видно, что удельная поверхность увеличивается, а размер частиц уменьшается с ростом содержания лития в образце.

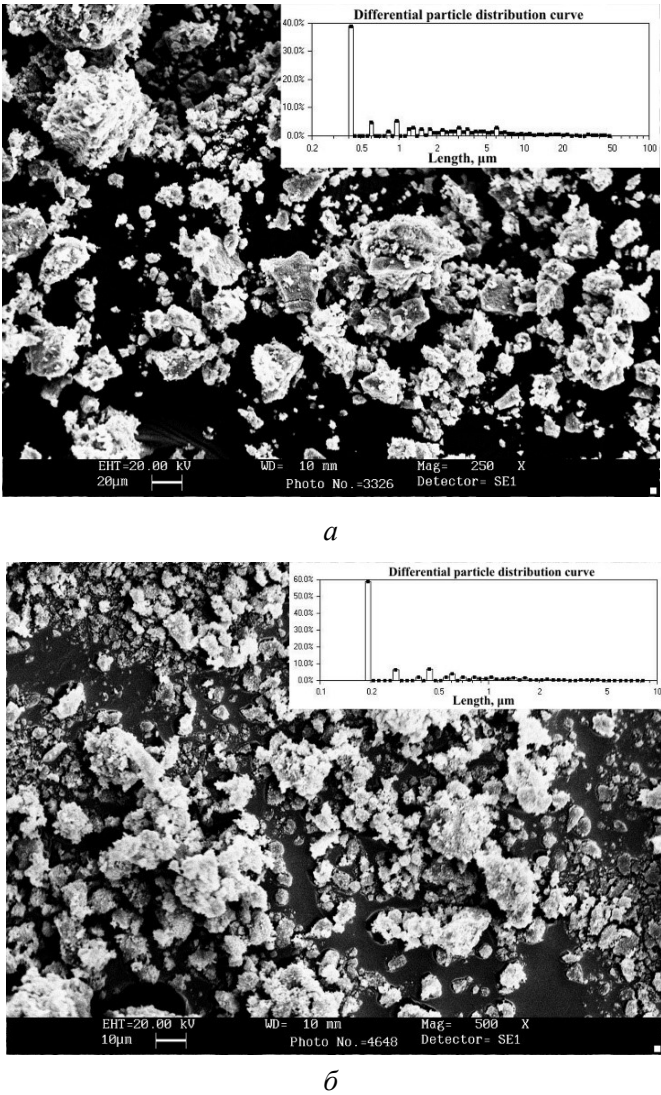


Рис 6. SEM-изображения образцов: *a* — $Li_{0,79}Ni_{1,21}O_2$; *б* — $Li_{0,98}Ni_{1,02}O_2$

На рис. 6 представлены SEM-изображения образцов: $\text{Li}_{0,79}\text{Ni}_{1,21}\text{O}_2$ (рис. 6а), $\text{Li}_{0,98}\text{Ni}_{1,02}\text{O}_2$ (рис. 6б). По данным SEM виден разброс частиц по размерам, частицы образуют агломераты. Размер агломератов варьируется в пределах 0,5–50 ($\text{Li}_{0,79}\text{Ni}_{1,21}\text{O}_2$) и 0,2–8 мкм ($\text{Li}_{0,98}\text{Ni}_{1,02}\text{O}_2$). Видно, что с приближением к стехиометрии размер частиц (агломератов) уменьшается).

Рассчитанный размер частиц по формуле Дебая — Шеррера, исходя из рентгенограммы, составил 97,00 и 20,53 нм для образцов $\text{Li}_{0,79}\text{Ni}_{1,21}\text{O}_2$ (рис. 6а) и $\text{Li}_{0,98}\text{Ni}_{1,02}\text{O}_2$ (рис. 6б). Данное расхождение возникает из-за того, что формула Дебая — Шеррера даёт размер первичных кристаллитов, то есть размер блоков, из которых состоит кристалл.

Электронная и ионная проводимость никелата лития ($\text{Li}_{1-x}\text{Ni}_{1+x}\text{O}_2$)

Сведения об электронной и ионной проводимости полученных образцов никелата лития $\text{Li}_{0,98}\text{Ni}_{1,02}\text{O}_2$ и $\text{Li}_{0,79}\text{Ni}_{1,21}\text{O}_2$ приведены в табл. 2. Проводимость изучалась при комнатной температуре. Сравнивая приведённые в табл. 2 значения, видим, что собственная удельная ионная проводимость σ_{ct} $\text{Li}_{0,98}\text{Ni}_{1,02}\text{O}_2$ в 2,5 раза выше, чем $\text{Li}_{0,79}\text{Ni}_{1,21}\text{O}_2$. По всей видимости, это связано с большим числом носителей заряда ($\text{Li}_{0,98}$ vs $\text{Li}_{0,79}$), что согласуется с работой [7] и более развитой площадью удельной поверхности.

Таблица 2

Параметры эквивалентной схемы замещения, полученные моделированием спектров импеданса некоторых составов образцов $\text{Li}_{1-x}\text{Ni}_{1+x}\text{O}_2$

Состав	R_s , Ом	R_{ct} , Ом	C_{ct} , Ф	$\frac{W_{\text{ct}}}{\text{Ом}\cdot\text{с}^{1/2}}$	C_{dl} , Ф	n_{dl}	σ_s , $\text{См}\cdot\text{м}^{-1}$	σ_{ct} , $\text{См}\cdot\text{м}^{-1}$
$\text{Li}_{0,98}\text{Ni}_{1,02}\text{O}_2$	31,02	257,43	$4,617\cdot 10^{-10}$	$0,995\cdot 10^6$	$3,429\cdot 10^{-6}$	0,6908	0,406	0,049
$\text{Li}_{0,79}\text{Ni}_{1,21}\text{O}_2$	22,896	644,8	$5,032\cdot 10^{-10}$	$1,355\cdot 10^6$	$2,513\cdot 10^{-6}$	0,7339	0,55	0,0197

Заключение

Предложен новый комбинированный подход получения никелата лития, который предполагает совмещение золь-гель и твердофазного синтеза. Данный подход не требует использования дорогостоящих окислителей, он малозатратен. Разработанная технологическая схема позволяет отказаться от дорогих прекурсоров и использовать менее энергетически затратные условия синтеза. Благодаря такому методу удалось получить наноразмерные порошки $\text{Li}_{1-x}\text{Ni}_{1+x}\text{O}_2$.

Определены оптимальные параметры синтеза, обеспечивающие получение образцов, близких к стехиометрическому составу (соотношение $\text{Li}:\text{Ni} = 10:1$, время обработки суспензии — 1 ч, время термообработки — 1 ч, температура термообработки — 700 °С).

Установлено что, термическая обработка при 700 °С в течение 1 ч обеспечивает формирование наноразмерных соединений с развитой удельной поверхностью, при этом уменьшение времени выдержки не способствует формированию более мелких наноразмерных частиц и более «насыщенной» катионами лития фазы.

Кроме того, в работе импеданс-спектроскопии исследованы электрохимические свойства методом некоторых составов, близких к стехиометрическим, но синтезированных при различных условиях. Определены электрохимические характеристики катодных материалов.

Установлено, что образец с близким к стехиометрическому составу ($\text{Li}_{0,98}\text{Ni}_{1,02}\text{O}_2$) обладает большей собственной удельной ионной проводимостью σ_{ct} , что, вероятно, обусловлено большим числом носителей заряда и более развитой удельной поверхностью. Экспериментально определённые электрохимические характеристики образца, близкого к стехиометрическому составу сопоставимы, с электрохимическими свойствами никелатов лития стехиометрического состава, полученных другими способами [7].

При получении конечного продукта предлагается перерабатывать отработанные растворы с целью регенерации продуктов, которые могут быть возвращены в «голову» технологической схемы. Минимизация отходов, повторное использование реагентов, снижение техногенной нагрузки на окружающую среду делает предлагаемую технологию более предпочтительной с экологической точки зрения.

Список источников

1. The proton exchange chemistry of layered $\text{Ni}(\text{OH})_2$ for two types of high-capacity cathode materials in rechargeable batteries / Y. Sun [et al.] // *Mat. Res. Bull.* 2009. Vol. 44, No. 1. P. 227–230.
2. Махонина Е. В., Первов В. С., Дубасова В. С. Оксидные материалы положительного электрода литий-ионных аккумуляторов // *Успехи химии*. 2004. Т. 73, № 10. С. 1075–1087.
3. Synthesis and characterization of LiNiO_2 compounds as cathodes for rechargeable lithium batteries / G. X. Wang [et al.] // *J. Power Sources*. 1998. Vol. 76. P. 141–146.
4. Song M. Y., Lee R. Synthesis by sol-gel method and electrochemical properties of LiNiO_2 cathode material for lithium secondary battery // *J. Power Sources*. 2002. Vol. 111, No. 1. P. 97–103.
5. Structural and optoelectrical properties of nanostructured LiNiO_2 thin films grown by spray pyrolysis technique / M. S. El-Bana [et al.] // *J. Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 705. P. 333–339.
6. Tsai Y. T., Whitmore D. H. Nonlinear least-squares analyses of complex impedance and admittance data for solid electrolytes // *Solid state ionics*. 1982. Т. 7, № 2. С. 129–139.
7. Amin R., Ravnsbæk D. B., Chiang Y.-M. Characterization of Electronic and Ionic Transport in $\text{Li}_{1-x}\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ (NCA) // *J. Electrochem. Soc.* 2015. Vol. 162, No. 7. P. A1163–A1169. <https://doi/10.1149/2.0171507jes>.

References

1. Sun Y., Pan J, Wan P., Liu X. The proton exchange chemistry of layered $\text{Ni}(\text{OH})_2$ for two types of high-capacity cathode materials in rechargeable batteries. *Materials Research Bulletin*, 2009, Vol. 44, No. 1, pp. 227–230.
2. Mahonina E. V, Pervov V. C., Dubacova V. C. Oksidnye materialy polozhitel'nogo elektroda litij-ionnykh akkumulyatorov [Oxide materials of the positive electrode of lithium-ion batteries]. *Uspekhi himii* [Advances in chemistry], 2004, Vol. 73, No. 10, pp. 1075–1087. (In Russ.).
3. Wang G. X., Zhong S., Bradhurst D. H., Dou S. X., Liu H. K. Synthesis and characterization of LiNiO_2 compounds as cathodes for rechargeable lithium batteries. *Journal of Power Sources*, 1998, Vol. 76, pp. 141–146.
4. Song M. Y., Lee R. Synthesis by sol-gel method and electrochemical properties of LiNiO_2 cathode material for lithium secondary battery. *Journal of power sources*, 2002, Vol. 111, No. 1, pp. 97–103.
5. El-Bana M. S., Radaf I., El M., Fouad S. S., Sakr G. B. Structural and optoelectrical properties of nanostructured LiNiO_2 thin films grown by spray pyrolysis technique. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, Vol. 705, pp. 333–339.
6. Tsai Y-T., Whitmore D. H. Nonlinear least-squares analyses of complex impedance and admittance data for solid electrolytes. *Solid state ionics*, 1982, Vol. 7, No. 2, pp. 129–139.
7. Amin R., Ravnsbæk D. B., Chiang Y. M. Characterization of electronic and ionic transport in $\text{Li}_{1-x}\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ (NCA). *Journal of the Electrochemical Society*, 2015, Vol. 162, No. 7, pp. A1163–A1169. <https://doi/10.1149/2.0171507jes>.

Информация об авторах

К. А. Кесарев — инженер-исследователь;
Р. И. Корнейков — кандидат технических наук, старший научный сотрудник;
В. В. Ефремов — кандидат технических наук, старший научный сотрудник;
О. Б. Щербина — кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

Information about the authors

K. A. Kesarev — Research Engineer;

R. I. Korneikov — PhD (Engineering), Senior Researcher;

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

O. B. Scherbina — PhD (Engineering), Senior Researcher.

Статья поступила в редакцию 08.04.2024; одобрена после рецензирования 10.04.2024; принята к публикации 12.04.2024.
The article was submitted 08.04.2024; approved after reviewing 10.04.2024; accepted for publication 12.04.2024.