



ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА СЕГОДНЯ

Тезисы докладов
второй всероссийской
молодежной научной конференции

Екатеринбург, 17 мая 2024 года

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ПЕРВОГО ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ Б. Н. ЕЛЬЦИНА
УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА СЕГОДНЯ

Тезисы докладов второй всероссийской
молодежной научной конференции

Екатеринбург, 17 мая 2024 года

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2024

УДК 620.92:661.96 (063)
ББК 31.15 я43+24.121 я43
В62

Редакционная коллегия:

В. А. Черепанова, Н. А. Тарасова, П. С. Першин,
Д. А. Медведев, А. В. Суздальцев, М. А. Машковцев,
А. А. Трофимов, М. В. Ерпалов, Ю. П. Зайков

В62 Водородная энергетика сегодня : тезисы докладов второй молодежной научной конференции. Екатеринбург, 17 мая 2024 г. / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Уральское отделение Российской академии наук. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2024. — 108 с. : ил. — ISBN 978-5-7996-3870-2. — Текст : электронный.

ISBN 978-5-7996-3870-2

В сборнике представлены результаты исследований в области водородной энергетики: технологии получения функциональных материалов и покрытий и создание устройств для современной энергетики; физическая химия и электрохимия новых керамических и композиционных материалов, а также материалов на основе стекла; актуальные задачи разработки новых коррозионностойких и жаропрочных сплавов; экологические аспекты современной энергетики.

Для специалистов, занимающихся вопросами теоретической и экспериментальной химии, а также студентов, аспирантов и научных сотрудников.

УДК 620.92:661.96 (063)
ББК 31.15 я43+24.121 я43

Ионный перенос в Sm-замещенном слоистом перовските на основе BaLaInO_4^*

Е. В. Абакумова^{1,2}, А. О. Бедарькова^{1,2},
Н. А. Тарасова^{1,2}, И. Е. Анимица^{1,2}

¹Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

²Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН

На данный момент для традиционного производства энергии земные запасы ископаемого топлива ограничены и сопровождаются вредными выбросами в окружающую среду. Поэтому как никогда актуален поиск новых и экологических чистых способов. Сегодня существуют разные альтернативные источники получения энергии: солнечная энергия, геотермальная энергия, ветро- и гидроэнергия и т. д. Среди прочих в последние годы привлекает все больше внимание отрасль энергетики, основанная на использовании водородного топлива. Несмотря на то, что эта область на данный момент только набирает обороты, однако за последние десятилетия сформировались фундаментальные знания, благодаря которым были сделаны, например, следующие прорывы: проект ENE FARM на японских топливных элементах микрокомпонентной теплоэнергетики (2014), первый автомобиль Toyota на водородных топливных элементах (2016) и другое. Эти события предполагают перспективы для внедрения водородной энергетики в качестве основного способа получения энергии. В качестве источника энергии одним из самых исследуемых является твердооксидный топливный элемент (ТОТЭ). Но на данный момент ведется поиск материалов, удовлетворяющих всем условиям для эксплуатации ТОТЭ. В свою очередь основными элементами ТОТЭ являются катод, анод и электролит. В качестве электролитических материалов могут использоваться материалы со структурой Раддлеса — Поппера (РП). Структура РП представляет собой блоки октаэдров, чередующихся с блоками каменной соли.

* Работа выполнена при поддержке фонда РФФ, проект № 22-79-1003.

В настоящей работе получен новый Sm-замещенный материал путем допирования индата бария-лантана, исследована его структура и физико-химические свойства. Показано, что введения допирующей добавки приводит к увеличению значений электропроводности до двух порядков величины. Установлено, что в условиях влажного воздуха при температурах ниже 450 °С наблюдается преобладание протонной проводимости.

Морфология и структура пленок PbS, допированных NH₄Cl и NH₄I

**Р. К. Абдурахимова^{1,2}, С. С. Туленин¹,
Н. М. Леонова¹, А. В. Суздальцев^{1,2}**

*¹Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина*

²Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН

Сульфид свинца является одним из наиболее распространенных узкозонных полупроводниковых халькогенидов с регулируемым взаимодействием *s*-электронов катиона Pb²⁺ с валентными *p*-электронами аниона S²⁻ [1–2]. Он характеризуется высокой диэлектрической проницаемостью, коэффициентом поглощения в видимой и ближней инфракрасной областях спектра, подвижностью и концентрацией носителей заряда, а также возможностью значительного расширения запрещенной зоны E_g от 0,4 до 5,2 эВ [3]. Упомянутые функциональные свойства PbS делают его перспективным материалом для создания эффективных фотоэлектрических преобразователей, фоторезисторов, температурно-чувствительных датчиков, детекторов в инфракрасной области спектра [4].

К настоящему времени уже выполнены исследования по получению пленок PbS на поверхности кремниевых подложек [5]. В данной работе изучено влияние допирующих добавок на морфологию и структуру пленок PbS на основе коммерческого кремния. Пленки PbS осаждали на поверхность кремниевых подложек из водных сред

при температуре 80 °С с сенсibiliзирующими добавками NH_4Cl и NH_4I .

Морфология и элементный состав. По результатам SEM- и SFM-анализов образцов выявлено, что NH_4Cl оказывает более заметное влияние на рост частиц PbS, в отличие от NH_4I , где частицы сульфида свинца в меньшей степени выражены.

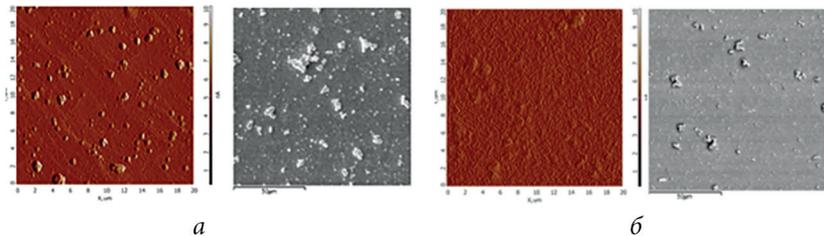


Рис. 1. SFM- и SEM-образцов с пленками PbS, допированных NH_4Cl (а) и NH_4I (б)

Элементный состав образцов был определен методом рентгено-флуоресцентного анализа. Полученные результаты приведены в табл. 1

Таблица 1

Элементный состав пленок PbS на подложке кремния

Добавки	Содержание элемента (wt %)			
	Pb	S	Si	I
NH_4Cl	10,5	34,7	55	0
NH_4I	1,7	13	84	0,29

Литература

1. Castillo-Sánchez B.Y., González L. A. Chemically deposited PbS thin films by reaction media with glycine for use in photovoltaics // Mat. Sci. Semicond. Proc. 2021. Vol. 121. P. 105405.
2. Zamin M., Balayeva N. O. PbS nanostructures: a review of recent advances // Mat. Today Sust. 2023. Vol. 21. P. 100305.
3. Kumar D., Bai R., Chaudhary S., Pandya D. K. Enhanced photoelectrochemical response for hydrogen generation in self-assembled aligned ZnO/PbS

core/shell nanorod arrays grown by chemical bath deposition // *Mat. Today Energy*. 2017. Vol. 6. P. 105–114.

4. Lead sulfide films with low iron doping: Correlation between iron position and optical properties evolution / E. V. Mostovshchikova, V. I. Voronin, L. N. Maskaeva, I. V. Vaganova et al. // *J. All. & Comp.* 2021. Vol. 852. P. 156932.

5. Production of PbS/Si structures by the hydrochemical deposition: composition, structure and properties / R. K. Abdurakhimova, S. S. Tulenin, N. M. Leonova, A. S. Shmygalev et al. // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2023. Vol. 34. P. 2113.

Разработка и исследование высокопроизводительных наноструктурированных мембранных материалов в водородных процессах*

Г. А. Андреев¹, П. Д. Пушанкина¹, А. И. Симонов¹,

Н. А. Прохоров¹, С. Н. Иванин¹,

М. В. Папежук¹, И. С. Петриев^{1,2}

¹Кубанский государственный университет

²Южный научный центр РАН

Мембраны на основе палладия являются перспективным материалом для получения и очистки водорода [1, 2]. Однако мембраны из чистого палладия склоны к водородному охрупчиванию и обладают высокой стоимостью. Решением представляется легирование их другими неблагородными металлами, например медью. Вместе с тем такие мембраны при низких температурах (25–300 °С) практически не проницаемы. Поэтому целью работы была разработка и исследование высокопроизводительных в водородных процессах наноструктурированных мембранных материалов, способных работать в широком температурном диапазоне. В ходе работы были

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и при финансировании Кубанского научного фонда в рамках проекта № 24-19-20070, <https://rscf.ru/project/24-19-20070/>.

получены Pd-Cu_{40%} по трем методам: плавки и проката с промежуточными отжигами (М1), магнетронного распыления с применением сплошной мишени (М2) и составной мишени (М3). На поверхности полученных пленок методом электрохимического осаждения было нанесено модифицирующее палладиевое покрытие. Образцы полученных Pd-Cu_{40%} пленок исследовались в качестве мембран в процессах транспорта водорода (рис. 1). В результате проведенной работы можно сделать вывод, что достаточно перспективным методом получения бездефектных тонкопленочных материалов с высокой проницаемостью является метод магнетронного напыления.

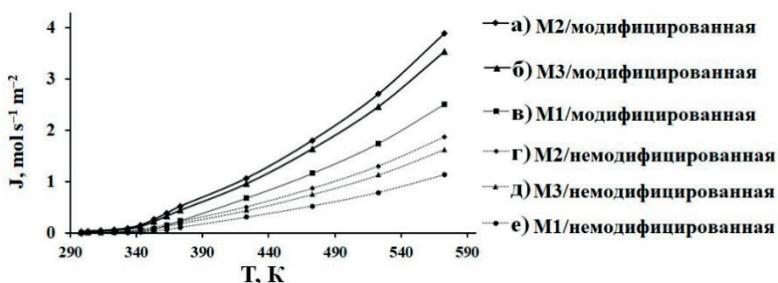


Рис. 1. Температурная зависимость плотности потока водорода через Pd-Cu_{40%} мембраны

При этом использование разрабатываемых наноструктурированных мембранных материалов позволит значительно интенсифицировать транспорт водорода и снизить рабочие температуры, что положительно скажется на уменьшении энергетических затрат в процессе получения высокочистого водорода.

Литература

1. Filipov S. P., Yaroslavtsev A. B. Hydrogen energy: development prospects and materials // Russian Chemical Reviews. 2021. V. 90, № 6. P. 627–643.
2. Basile The recent areas of applicability of palladium based membrane technologies for hydrogen production from methane and natural gas: A review / S. M. Jokar, A. Farokhnia, M. Tavakolian, M. Pejman et al. // Int. J. Hydrogen Energy. 2023. Vol. 48, № 16. P. 6451–6476.

Генератор выработки электроэнергии на твердооксидном топливном элементе и паровом риформинге

Р. Д. Арасланов, А. В. Долгих, И. А. Вялых

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

В настоящее время твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ) за счет высокого КПД относительно бензиновых и дизельных генераторов получают все большее широкое распространение [1]. Данные батареи предназначены для выработки электроэнергии (ЭЭ) с помощью электрохимических реакций окисления водорода или синтеза газа.

Разобрав основные доступные способы проведения процесса риформинга метана, а именно паровую конверсию, высокотемпературную конверсию и автотермическую конверсию, можно сделать вывод, что парциальное и автотермическое окисление малоэффективно в установках выработки электроэнергии в связи с низкой степенью утилизации тепла химических реакций на ТОТЭ.

Таким образом, принимается, что основной вариант ведения процесса получения водорода достигается за счет паровой конвер-

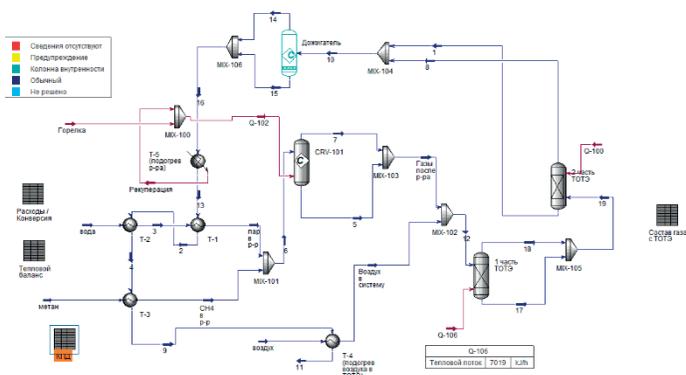


Рис. 1. Материальный и тепловой баланс установки выработки электроэнергии на ТОТЭ

сии метана [2]. И, исходя из разного температурного режима, был рассчитан тепловой баланс парциального процесса риформинга в установке ЭЭ и выявлено, что КПД данной установки составляет 61,3 % (рис. 1). Такой высокий КПД позволяет сделать вывод, что процесс является экологически эффективной технологией.

Литература

1. *Farhana K., Mahamude A. Sh. F., Kadirgama K.* Comparing hydrogen fuel cost of production from various sources — a competitive analysis // *Energy Conversion and Management*. 2024. Vol. 302. P. 118088

2. *Di Nardo A., Portarapillo M., Russo D., Di Benedetto A.* Hydrogen production via steam reforming of different fuels: thermodynamic comparison // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 55. P. 1143.

Влияние длительности помола на свойства порошков стабилизированного диоксида циркония для формирования функциональной керамики

**Р. М. Бастриков^{1,2}, Д. О. Поливода^{1,2}, М. И. Тюшняков^{1,2},
М. А. Машковцев^{1,2}, Н. А. Тарасова^{1,2}**

¹*Уральский федеральный университет*

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

²*Институт высокотемпературный электрохимии УрО РАН*

Благодаря высокой ионной проводимости при температуре выше 850 °С, повышенной термодинамической стабильности, высокой механической прочности и доступности прекурсоров для синтеза, порошки стабилизированного диоксида циркония являются одними из наиболее часто используемых материалов для ТОТЭ. Несмотря на давнюю известность диоксида циркония как твердого электролита в ТОТЭ, существует множество нерешенных вопросов, таких как выбор стабилизатора, способ его введения и сама технология синтеза порошков стабилизированного диоксида циркония.

В рамках работы было проведено исследование влияния длительности помола на удельную поверхность и размер частиц стабилизированного диоксида циркония. Путем одновременной подачи в реактор азотнокислого циркония с предварительной стабилизацией нитратом иттрия и водного раствора аммиака при постоянном $\text{pH} = 8$ синтезировали порошок стабилизированного диоксида циркония. Полученный осадок просушили и обожгли при температурах 1050 и 1150 °С. Далее осуществляли помол каждого образца в течение двух часов. Зависимость удельной площади поверхности и размера частиц от длительности помола приведена на рис. 1.

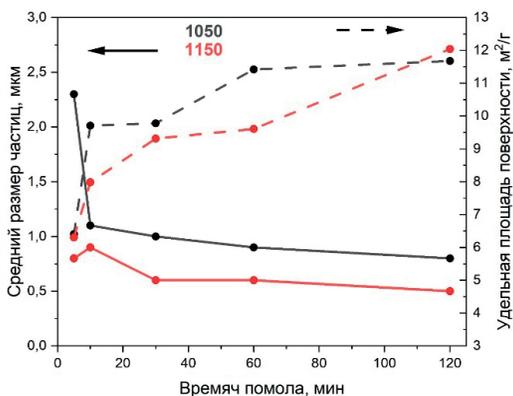


Рис. 1. Изменение удельной поверхности и среднего размера частиц от длительности помола

У порошка 1050 °С значительный рост площади удельной поверхности происходит на первых 10 минутах помола, тогда как у порошка 1150 °С рост происходит только во время второго часа помола.

Использование прямой газификации для получения водорода из рисовой шелухи

В. В. Безруких

*Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого*

В современном мире, а в частности в России, как одного из самых больших экспортеров сельскохозяйственной продукции в мире, актуальна проблема утилизации и использования сельскохозяйственных отходов, которых с увеличением объема производства пищевых товаров становится все больше. Наибольшим ростом производства среди агрокультурных видов на данный момент обладает рис, а в соответствии с этим обуславливается и рост производства рисовой шелухи [1].

Одним из наиболее эффективных видов утилизации данного отхода является газификация [2], которая позволяет получать генераторный газ, который обладает потенциалом для получения ряда полезных продуктов из рисовой шелухи: редкоземельные металлы, горючие газы, в том числе водород и окись углерода и прочее. Состав рисовой шелухи представлен взят из исследования [3].

В данной работе был произведен анализ газообразных продуктов прямой паровоздушной газификации рисовой шелухи (табл. 1), рассчитанных по методике профессора Н. Н. Доброхотова с внесением корректировок для используемого топлива (расход пара (кг. п./кг. т.) — 0,15; расход воздуха (кг. в./кг. т.): 1,01).

Таблица 1

**Состав газообразных продуктов прямой
газификации рисовой шелухи.**

Компонент	CO	CO ₂	H ₂	N ₂	H ₂ S	CH ₄
Состав газа (на сухое состояние), %	25,2	8,9	18,2	42,8	<0,1	4,9

Из полученных данных видно, что даже при небольшом расходе насыщенного пара в ходе газификации шелухи наблюдается значительный выход водорода, что говорит о потенциале данного вида топлива в разрезе его использования для выработки водорода для

химических или энергетических нужд. При повышении параметров пара и самого процесса можно добиться большего выхода водорода, по расчетам возможно увеличение выхода водорода при прямой газификации рисовой шелухи до 34,6 %.

Литература

1. Global Rice Husk Ash Market Research Report Forecast 2017–2022. Published by S&P Consulting, February 2019. URL: <https://www.24marketreports.com/agriculture/global-rice-husk-ash-market-research-report-forecast-2017-to-2022> (accessed: 03.03.2024).

2. *Логинов С. В., Масалевич А. И., Мешков С. А., Миславский Б. В.* Обзор способов и оборудования для утилизации отходов растениеводства. Реализация низкотемпературного пиролиза и газификации в пилотной и мобильной установках // Изв. СПбГТИ (ТУ). 2020. № 55. С. 75–84.

3. Agricultural waste-derived biochars from co-hydrothermal gasification of rice husk and chicken manure and their adsorption performance for dimethoate / H. Zhang, R. Zhang, W. Li, Zh. Ling et al. // Journal of Hazardous Materials. 2022. Vol. 429. P. 128248.

Разработка компонентной базы полимерных графитсодержащих покрытий*

**Л. Л. Хименко, С. А. Котельников,
Р. А. Бердников, Д. М. Калугина**

*Пермский национальный исследовательский
политехнический университет*

Полимерные материалы перспективны в качестве основы защитных покрытий, однако чистые полимеры не могут служить эффективными барьерами для водорода [1, 2]. Поскольку углерод-

* Исследование проведено при финансовой поддержке Минобрнауки России, проект FSNM-2023–0004 «Водородная энергетика. Материалы и технология хранения, транспортировки и применения водорода и водородсодержащих смесей».

ные материалы способны аккумулировать водород, в том числе и в среде органических соединений [3], их применение в качестве наполнителей может существенно снизить водородопроницаемость. Одним из перспективных, экологичных и доступных материалов такого рода является терморасширенный графит (ТРГ).

В настоящей работе оценены физико-механические характеристики исходной полимерной полиэфир-изоцианатной системы (рис. 1), исследована возможность модификации наполнителя ТРГ путем внесения добавок в составе-генератор и обработки прекурсоров, полученные образцы ТРГ изучены методом сканирующей электронной микроскопии.

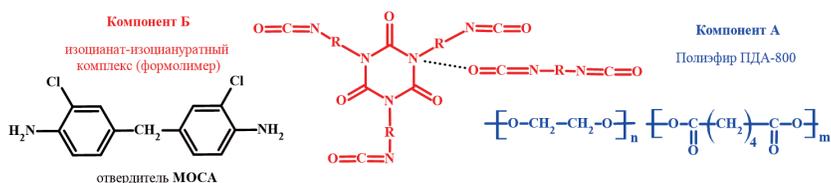


Рис. 1. Компоненты олимерной основы покрытия

Литература

1. Грязнов В. М., Ермилова М. М., Заводченко С. И., Орехова Н. В. Проницаемость некоторых металлополимерных мембран для водорода // Высокомолекулярные соединения. 1993. Т. 35, № 3. С. 325–329.
2. Задорожный М. Ю., Стругова Д. В., Геодакян К. В., Олифирова Л. К. Водородосорбционные свойства интерметаллического соединения TiFe с нанесенным защитным полимерным покрытием // Совр. проблемы науки и образования. 2013. № 5. С. 680.
3. Солдатов А. П. Некаталитическое гидрирование нафталина в наноразмерных мембранных реакторах с аккумулированным водородом и регулируемое изменение объема их реакционной зоны // Журнал физ. химии. 2017. Т. 91. № 5. С. 897–902.

Получение двумерных дендритных электролитических осадков

П. Д. Богунова¹, А. А. Чернышев^{1,2}, А. Б. Даринцева¹

¹Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

²Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН

Электролитические осадки обладают разветвленной структурой. Электрокристаллизация из водных растворов электролитов в условиях ограниченной диффузии приводит к образованию двумерных осадков. Использование разбавленных растворов электролитов и высоких значений тока или напряжения способствует получению высокоразвитых осадков.

В работе проводится исследование кристаллизации металлов в тонкощелевой ячейке, имеющей зазор толщиной 1 мм. В качестве катода использовали медную проволоку диаметром 0,45 мм, анодом служила пластина из восстанавливающего металла. Ток или напряжение поддерживали с помощью программируемого источника тока RIGOL DP 711. Рост осадка записывали на видеокамеру Sony HDR-PJ650E. В ходе экспериментов были получены осадки кадмия, меди, свинца из водных растворов электролитов. На рис. 1 показаны отдельные кадры из видеозаписи роста свинца.

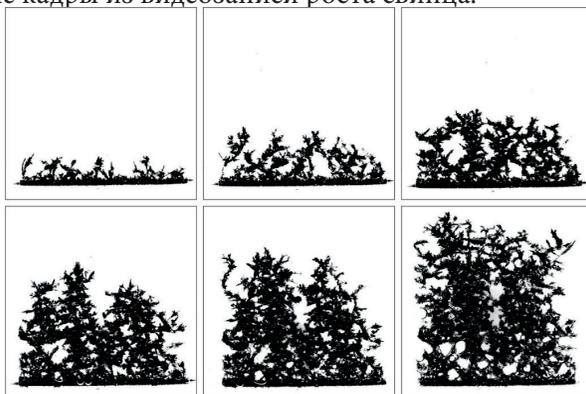


Рис. 1. Рост дендритов в электролите состава $0,5 \text{ M Pb(NO}_3)_2 + 1 \text{ M NaNO}_3 + 0,5 \text{ M HNO}_3$ при постоянном токе $0,1 \text{ A}$

В ходе обработки рассчитывали фрактальную размерность полученных осадков с использованием ППП FrakOut!. Используя программное обеспечение JMicroVision, определяли площадь заполнения дендритного осадка поверхности ячейки, периметр осадка и среднюю высоту осадка. Для каждого набора экспериментальных данных проводили подобные исследования.

Структура и спектрально-люминесцентные свойства керамик, изготовленных методом одноосного прессования порошков из плавных твердых растворов ZrO_2 - Sc_2O_3 - Eu_2O_3

**Е. М. Бузаева¹, П. А. Рябочкина¹, Е. Е. Ломонова²,
Е. И. Чернов³, И. Е. Курицына⁴**

¹*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева*

²*Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН*

³*Научно-производственное предприятие АО «ЭКОН»*

⁴*Институт физики твердого тела им. А. А. Осипьяна РАН*

Материалы на основе диоксида циркония характеризуются уникальными физико-химическими свойствами и актуальны для применения в качестве твердых электролитов для твердооксидных топливных элементов. Отдельного внимания заслуживают керамические твердые электролиты на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидами иттрия и скандия [1]. Известно, что на структуру и физические характеристики керамических материалов значительным образом влияют метод и условия их изготовления.

В настоящей работе был реализован метод изготовления образцов керамик $(ZrO_2)_{0,909}(Sc_2O_3)_{0,09}(Eu_2O_3)_{0,001}$ и $(ZrO_2)_{0,899}(Sc_2O_3)_{0,10}(Eu_2O_3)_{0,001}$ из порошков, плавных твердых растворов аналогичного состава, полученных направленной кристаллизацией расплава в холодном контейнере. Формование образцов осуществлялось методом одно-

осного прессования с последующим спеканием в атмосфере воздуха в течение двух часов при температуре 1680 °С.

Проведен сравнительный анализ структуры, фазового состава и спектрально-люминесцентных характеристик полученных керамических образцов с исходными кристаллами. Также для всех образцов керамик проведены измерения ионной проводимости.

По результатам исследования фазового состава было выявлено, что все образцы являются однофазными и обладают кубической структурой типа флюорита. Для керамики $(\text{ZrO}_2)_{0,909}(\text{Sc}_2\text{O}_3)_{0,09}(\text{Eu}_2\text{O}_3)_{0,001}$ параметр кристаллической решетки a составляет 5,086 Å, а для керамики $(\text{ZrO}_2)_{0,899}(\text{Sc}_2\text{O}_3)_{0,10}(\text{Eu}_2\text{O}_3)_{0,001}$ — $a = 5,087$ Å. Стоит отметить, что исходные кристаллы и полученные из них порошки характеризуются другим фазовым составом.

Спектрально-люминесцентные свойства полученных керамик были изучены методом оптической спектроскопии. Анализ спектров люминесценции всех образцов керамик выявил наличие неконтролируемой примеси в виде твердого раствора Cr_2O_3 - Al_2O_3 , появление которой связано с технологическими условиями их синтеза. Показано, что данная примесь имеет неравномерное распределение и локализуется на поверхности керамик в виде отдельных включений.

Литература

1. Synthesis and characterization of ZrO_2 and YSZ thin films / Y. Mansilla et al. // Materials Today. Proceedings. 2019. Vol. 14. P. 92–95.

Влияние цинка как допанта на парциальные проводимости гексагонального перовскита



А. В. Бушуева, Д. В. Корона, И. Е. Анимица

Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

На сегодняшний день водородная энергетика является одним из наиболее актуальных направлений развития альтернативных источников энергии. Она основана на разработке и использовании твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ), которые требуют постоянного поиска и разработки новых материалов — компонентов ТОТЭ, обладающих комплексом необходимых функциональных свойств (высокая ионная/электронная проводимость, химическая и термическая устойчивость, механическая прочность).

$\text{Ba}_7\text{In}_6\text{Al}_2\text{O}_{19}$ — сложный оксид, являющийся структурой когерентного сращения двух блоков кислород-дефицитной перовскитоподобной фазы $\text{Ba}_2\text{InAlO}_5$ и блока катион-дефицитной фазы $\text{Ba}_3\text{In}_4\text{O}_9$. Цинк как допант выбран по следующим причинам: образование кислородных вакансий, так как заряд акцепторной примеси Zn'_{In} или Zn'_{Al} будет компенсироваться появлением соответствующего числа вакансий кислорода; допирование цинком повышает спекаемость образцов, следовательно, позволяет получить более плотную керамику, что необходимо для керамики как электролита — компонента ТОТЭ.

В настоящей работе синтезированы новые фазы $\text{Ba}_7\text{In}_6\text{Al}_2\text{O}_{19}$, $\text{Ba}_7\text{In}_{5,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Al}_2\text{O}_{18,95}$, $\text{Ba}_7\text{In}_6\text{Al}_{1,9}\text{Zn}_{0,1}\text{O}_{18,95}$, $\text{Ba}_7\text{In}_6\text{Al}_{1,95}\text{Zn}_{0,05}\text{O}_{18,975}$, $\text{Ba}_7\text{In}_6\text{Al}_{1,85}\text{Zn}_{0,15}\text{O}_{18}$ методом твердофазного синтеза из карбоната бария и оксидов соответствующих металлов; после каждой термообработки (постадийный синтез в диапазоне температур 800–1200 °С) проводилось перетирание образцов в агатовой ступке в среде этилового спирта.

* Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда и правительства Свердловской области № 24-13-20026.

Метод электрохимического импеданса был использован для измерения зависимостей электропроводности от температуры и pO_2 при различных влажностях атмосферы. Проведена дифференциация проводимости на парциальные вклады из анализа зависимостей «проводимость — pO_2 ».

Исследования, включая ИК-спектроскопию и термогравиметрический анализ, показали, что Zn-допированные системы на основе $Ba_7In_6Al_2O_{19}$ способны к инкорпорированию молекул воды из газовой фазы, а также к проявлению протонной проводимости.

**Исследование ионной проводимости
слоистого перовскита $SrLaAlO_4$ в контексте
высокотемпературных твердооксидных
топливных элементов**

**Д. А. Васин¹, И. Е. Анимица^{1,2},
Д. В. Корона^{1,2}, А. Р. Шарафутдинов¹**

*¹Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина*

²Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН

В настоящее время зеленая энергетика является одним из приоритетных направлений развития науки и технологий. Зеленая энергетика предполагает использование возобновляемых источников энергии, которые не загрязняют окружающую среду и не истощают природные ресурсы. Среди таких источников энергии можно выделить солнечную, ветровую, гидроэлектрическую, геотермальную, биомассовую и другие. Однако для эффективного преобразования, хранения и передачи энергии необходимы высокопроизводительные твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ), которые могут работать при высоких температурах и давлениях. ТОТЭ представляют собой электрохимические устройства, которые прямо преобразуют химическую энергию топлива в электрическую энергию с высокой эффективностью и низким уровнем выбросов.

Один из ключевых элементов ТОТЭ — электролит, который обеспечивает ионную проводимость между анодом и катодом. Электролит должен обладать высокой термической и химической стабильностью, низкой электронной проводимостью и достаточной механической прочностью. Кроме того, электролит должен иметь минимальное сопротивление при контакте с электродами, чтобы уменьшить потери энергии. В последнее время активно исследуются слоистые перовскиты, которые представляют собой класс оксидных соединений с общей формулой $AA'_nB_nO_{3n+1}$, где А — щелочноземельный металл, А' — редкоземельный металл и В — трехвалентный металл. Слоистые перовскиты обладают интересными транспортными свойствами, такими как высокая ионная проводимость и низкая теплопроводность. Эти свойства обусловлены наличием слоев со структурой АО, которые разделяют слои с фазой перовскита. Одним из представителей этого класса является $SrLaAlO_4$, который имеет тетрагональную структуру с пространственной группой $I4/mmm$.

В данной работе представлены результаты исследования транспортных свойств $SrLaAlO_4$ в широком диапазоне температур и pO_2 . Показана высокая доля ионной проводимости для широкого интервала парциальных давлений кислорода во влажной и сухой атмосферах.

Исследование влияния условий синтеза на фазовый состав диоксида циркония

М. Р. Галиаскарова¹

*¹Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина*

Циркониевая керамика используется в атомной промышленности, в металлургии для желобов, в автомобилестроении, в авиационной и космической отрасли, в медицине для эндопротезирования головки искусственных тазобедренных суставов, а также в роли

зубных протезов [1]. Условия синтеза порошка диоксида циркония оказывают значительное влияние на размеры и морфологию частиц, а также на его фазовый состав, что в свою очередь влияет на эффективность формования конечного изделия, его прочность и долговечность.

В данной работе было исследовано влияние условий синтеза на фазовый состав порошка диоксида циркония. Диоксид циркония был получен путем контролируемого осаждения при постоянном значении pH из тетрахлоридного предшественника. Для этого раствор циркония дозировали в емкость с постоянной скоростью равной 5 мл/мин. Для поддержания постоянного значения pH = 6 ед. контролируемо дозировали раствор аммиака. Каждый из образцов после осаждения был поделен на четыре части. Первую часть сразу после осаждения фильтровали (обозначены Zr-6-БП, где 6 — значение pH осаждения). Вторая часть была многократно промыта разбавленным раствором аммиака (Zr-6-П). Третья часть была подвержена гидротермальной обработке в автоклаве при нагреве до 130 °С с последующим охлаждением до комнатной температуры (Zr-6-ГТО). Четвертая часть была промыта разбавленным раствором аммиака и подвержена термообработке в автоклаве (Zr-6-П-ГТО). Все образцы после проведения обработок фильтровали, затем сушили при 40 °С и обжигали при температурах 500, 550, 600, 650 и 700 °С. Гранулометрический и фазовый состав полученных образцов исследовали при помощи метода лазерной дифракции и рентгенофазового анализа, соответственно.

Исследование показало, что обработка осадка гидратированного диоксида циркония, а именно промывка пасты гидроксидов и последующая гидротермальная обработка суспензии способствуют менее прочному агрегированию частиц диоксида циркония в ходе термической обработки, что приводит к увеличению доли тетрагональной фазы диоксида циркония.

Литература

1. Федоров П. П., Яроцкая Е. Г. Диоксид циркония. Обзор // Конденсированные среды и межфазные границы. 2021. № 23 (2). С. 169–187.

Исследование влияния критериев подобия на результаты моделирования процессов горения водорода в модельной камере сгорания

С. Ф. Гилязова, А. В. Самородов, Н. И. Гураков

*Самарский национальный исследовательский университет
им. академика С. П. Королева*

Наиболее перспективным из альтернативных источников энергии для работы газотурбинных установок является водородное топливо, которое обладает высокой энергетической плотностью и не содержит углерод, поэтому его использование в качестве топлива для ГТУ является актуальной задачей.

Использование водорода в качестве источника энергии сопряжено с определенными трудностями, такими как: 1) высокая вероятность проскока пламени в камерах сгорания ГТУ с установленными в горелочном устройстве лопаточными завихрителями, используемыми для закрутки потока; 2) изменение локализации фронта пламени, что может привести к прогару элементов камеры сгорания; 3) увеличивается вероятность неустойчивого горения. Для прогнозирования данных явлений на этапе проектирования горелочного устройства для сжигания водорода целесообразно использовать инструменты численного моделирования процессов в камере сгорания. При этом в существующие модели горения, реализованные в коммерческих программных продуктах, адаптированы в основном для сжигания метана и других углеводородных топлив. Поэтому в рамках данного исследования поставлена задача адаптации существующих моделей для горения водорода.

В качестве объекта исследования выбрана модельная камера сгорания с установленным кластерным горелочным устройством. Экспериментальные и расчетные исследования выполнены при температуре подаваемого воздуха 673 К и атмосферном давлении. В результате проведено расчетно-экспериментальное исследование влияния критериев подобия (число Шмидта, число Прандтля, число Льюиса) [1], на температуру и концентрацию компонентов на выходе из камеры сгорания. Исследовано также влияние равномерности

подачи водорода в зону горения на эмиссию оксидов азота (NO_x), образующихся вследствие процессов горения. Получено, что наиболее влияющим фактором, на образование NO_x является равномерность распределения топлива и заданное число Шмидта, причем при большей степени неравномерности распределения топлива увеличивается и влияние числа Шмидта на результаты расчетов.

Литература

1. *Dinkelacker F., Bhuvaneshwaran M., Muppala S. P. R.* Modelling and simulation of lean premixed turbulent methane/hydrogen/air flames with an effective Lewis number approach // *Combustion and Flame*. 2011. Vol. 158 (9). P. 1742–1749.

Протонный перенос в Sr-замещенных слоистых перовскитах на основе BaLaInO_4

В. Д. Гнатюк¹, Е. В. Абакумова^{1,2}, А. О. Бедарькова^{1,2},
Н. А. Тарасова^{1,2}, И. Е. Анимица^{1,2}

¹Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

²Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН

Важной задачей в области прикладного материаловедения является создание эффективных функциональных материалов для использования в различных электрохимических устройствах в качестве источников и преобразователей энергии. Основными компонентами таких устройств являются электролиты и электроды. Примером такого устройства является протонный керамический топливный элемент, который преобразует энергию реакции окисления водорода в электрическую энергию. Сложные оксиды со структурой слоистого перовскита являются одними из наиболее изученных материалов, подходящих для использования в качестве электролита в таких устройствах. Эти материалы могут быть описаны общей формулой $\text{AA}'_n\text{B}_n\text{O}_{n+1}$, где А — щелочноземельный

металл, A' — редкоземельный металл и B — трехвалентный металл. Преимущество использования протонпроводящих сложнооксидных материалов заключается в возможности снижения рабочих температур (до 300–500 °C) при сохранении высокой ионной (O^{2-} , H^+) проводимости.

В предыдущих исследованиях в качестве протонных проводников были изучены монослойные перовскиты $AA'BO_4$ ($n = 1$), такие как $BaNdScO_4$, $SrLaInO_4$ и другие составы на их основе. Недавно была открыта фаза $BaLaInO_4$ со структурой Раддлсдена — Поппера, представляющая новый класс протонных проводников. Исследования показали, что донорное и акцепторное допирование катионных подрешеток увеличивает протонную и кислородно-ионную проводимость вплоть до 1,5 порядка. Таким образом, проведение изовалентного замещения катионной подрешетки $BaLaInO_4$ имеет большое значение для более глубокого понимания протонного транспорта в подобных структурах.

В данном исследовании проведено изовалентное допирование Ba-подрешетки $BaLaInO_4$ ионами Sr^{2+} , проведена рентгенофазовая аттестация образцов и изучены их физико-химические свойства, включая возможность интеркаляции воды и протонного переноса.

Показатель эффективности работы твердооксидного электролизера

А. И. Голоднова¹, М. В. Ерпалов¹

¹*Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН*

В данной работе рассматривается характеристика эффективности твердооксидного электролизера. Для ее оценки у таких устройств используется коэффициент полезного использования электрической энергии.

С точки зрения термодинамики для электролизеров, являющихся электрохимическими устройствами, коэффициент полезного использования электрической энергии представляет собой отноше-

ние энтальпии к изменению энергии Гиббса химических реакций в процессе электролиза CO_2 и H_2O :

$$\eta_{\text{тд}} = \frac{\Delta H}{\Delta G},$$

где ΔG — энергия Гиббса, а ΔH — энтальпия химической реакции [1].

Оценку данного параметра проводили для электролизера, в котором получают синтез газ. При этом рассматривали случаи выхода продуктов с различным соотношением H_2/CO в диапазоне температур 700–850 °С. Результаты оценки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значение коэффициента полезного использования электрической энергии для составов синтез газа с разным соотношением H_2/CO

№	Температура, °С	700	750	800	850
1	Коэффициент полезного использования электрической энергии при соотношении $\text{H}_2/\text{CO} = 2,35/1$	1,124	1,142	1,146	1,153
2	Коэффициент полезного использования электрической энергии при соотношении $\text{H}_2/\text{CO} = 2/1$	1,156	1,171	1,175	1,118

Следует отметить, что полученные результаты согласуются с данными, полученными Пальгугевым С. Ф. и Нейуминым А. Д., касательно того, что коэффициент полезного использования электрической энергии может превышать 1 [1]. Этот факт связан с тем, что затраты энергии складываются из низопотенциального тепла для электролиза топлива с высокопотенциальным теплом подводимым в электролизер [2]. Кроме того, наблюдается повышение коэффициента полезного использования электрической энергии в случае повышения содержания H_2 в получаемом топливе, связано со снижением содержания воды на входе в электролизер, соответственно снижением затрат на ее разложение.

Литература

1. Пальгугев С. Ф., Нейумин А. Д., Федин В. В. Получение водорода электролизом паров воды в электролизере с твердым электролитом // Физиче-

ская химия солевых расплавов и твердых электролитов : сб. ст. УНЦ АН СССР. 1978. № 26. С. 102.

2. *Перфильев М. В., Демин А. К., Кузин Б. Л., Липилин А. С.* Высокотемпературный электролиз газов. М., Наука, 1988. 288 с.

Обратимые электродные материалы на основе (La, Sr)FeO_{3-δ}: совместимость с электролитным материалом на основе (La, Sr)(Ga, Mg)O_{3-δ}*

Е. В. Гордеев^{1,2}, Т. А. Кузнецова¹, Д. А. Осинкин^{1,2}

¹*Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН*

²*Уральский федеральный университет*

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

В качестве перспективной конструкции твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) с точки зрения упрощения их производства все чаще рассматривается симметричный дизайн. Такая конструкция отличается от классической тем, что электродные слои полностью идентичны по химическому и фазовому составу. Поэтому электродные материалы должны быть стабильны в окислительной и восстановительной атмосферах, а также не взаимодействовать с электролитом во время эксплуатации. Было выдвинуто предположение, что для предотвращения взаимодействия между функциональными слоями электрохимических устройств и снижения негативного влияния диффузии катионов необходимо, чтобы все компоненты устройства имели близкий ионный состав. Целью настоящего исследования было определение химической совместимости электродного и электролитного материалов, наиболее перспективных для применения в симметричных ячейках при сближении их ионного состава.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00040, <https://rscf.ru/project/24-19-00040/>

Электродные материалы состава $\text{La}_{0,6}\text{Sr}_{0,4}\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x\text{O}_{3-\delta}$, где $x = 0; 0,1; 0,2$ и $0,3$ (LSF, LSFG0,1, LSFG0,2 и LSFG0,3, соответственно), а также электролитные материалы $\text{La}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{Mg}_{0,2}\text{O}_{3-\delta}$ (LSGM) и $(\text{La}_{0,8}\text{Sr}_{0,2})_{0,98}\text{Ga}_{0,7}\text{Fe}_{0,1}\text{Mg}_{0,2}\text{O}_{3-\delta}$ (LSGFM) были синтезированы твердофазным методом при температуре обжига 1100 и 1450 °С для электродных и электролитных порошков, соответственно. Определения химического взаимодействия осуществлялось путем смешивания эквивалентных масс электролитных и электродных материалов в шаровой мельнице с последующей термообработкой при 1150 °С в течение 2 ч в атмосфере воздуха. Фазовую чистоту определяли на дифрактометре D/MAX-2200 (Rigaku, Japan).

После термообработки в смесях LSGM со всеми электродными материалами, а также в LSGFM с LSF образуется примесные низкпроводящие фазы $\text{SrLaGa}_3\text{O}_7$ и $\text{Sr}_2\text{Ga}_2\text{O}_5$, что говорит о взаимодействии между собой компонентов смеси. При смешении LSGFM с электродными материалами, содержащий катионы галлия, примесных фаз не обнаружено.

Электротранспортные свойства материалов

состава $\text{Nd}_{1-x}\text{Ba}_x\text{FeO}_{3-\delta}$

М. А. Гордеева^{1,2}, Д. А. Медведев^{1,2}

¹Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН

²Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

В последние годы наблюдается рост числа исследований, посвященных твердооксидным топливным элементам (ТОТЭ), которые представляют собой устройства, способные преобразовать химическую энергию в электрическую. Классические ТОТЭ, как правило, состоят из плотного электролита, пористого металлокерамического анода и пористого оксидного катода. В последние годы наблюдается интерес к материалам, которые могут быть использованы в качестве катода и анода одновременно (симметричные электроды). В качест-

ве таких материалов могут быть использованы ферриты, которые обладают смешанной ионной и электронной проводимостью. Данное исследование посвящено изучению электропроводности материалов на основе феррита неодима-бария состава $\text{Nd}_{1-x}\text{Ba}_x\text{FeO}_{3-\delta}$ ($x = 0,4, 0,5, 0,6$) в окислительной и в восстановительной атмосферах.

Для получения порошков был использован цитрат-нитратный метод сжигания. Из порошков формировали керамические образцы для измерения электропроводности четырехзондовым методом на постоянном токе во влажных атмосферах воздуха, азота и водорода (рис. 1).

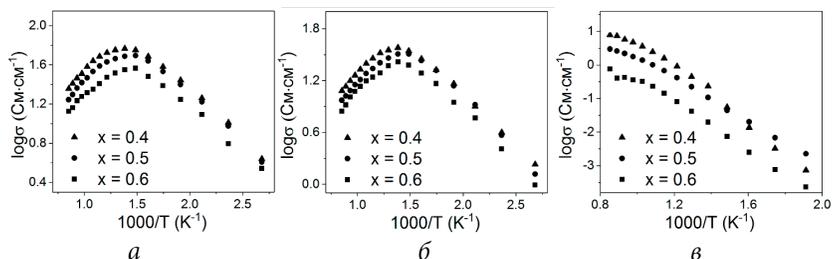


Рис. 1. Температурные зависимости электропроводности керамических образцов $\text{Nd}_{1-x}\text{Ba}_x\text{FeO}_{3-\delta}$ в атмосфере: а — воздуха (+3 % H_2O); б — N_2 (+3 % H_2O); в — H_2 (+3 % H_2O)

При измерениях в атмосфере воздуха и азота проводимость сначала возрастает с увеличением температуры, достигает максимума и затем уменьшается. Подобная тенденция связана с потерей кислорода из решетки и образованием кислородных вакансий в области высоких температур. Этот процесс сопровождается восстановлением ионов железа и, следовательно, уменьшением числа носителей заряда, что приводит к уменьшению проводимости. В восстановительных условиях процесс десорбции кислорода с поверхности и восстановление ионов железа протекает глубже и при более низких температурах, что объясняет низкие значения проводимости во влажном водороде.

.....
Синтез и физико-химические свойства
Fe-замещенного
слоистого перовскита на основе BaLaInO₄*

К. Давлетбаев^{1,2}, Е. В. Абакумова^{1,2},
А. О. Бедарькова^{1,2}, Н. А. Тарасова^{1,2}, И. Е. Анимица^{1,2}

¹*Уральский федеральный университет*

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

²*Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН*
.....

Использование водорода в качестве источника дешевой и чистой энергии является одной из приоритетнейших целей для обеспечения энергетической и экономической безопасности современного общества. На сегодняшний день ведутся активные исследования материалов способных в дальнейшем найти применение в водородной энергетике. Так, применение находят топливные элементы на основе твердых оксидов, способные функционировать при высоких температурах. Стремление к понижению значений рабочих температур привело к открытию соединений, ионный транспорт которых обусловлен движением ионов водорода — протонных проводников. Данный класс веществ характеризуется пониженными значениями рабочих температур — 300–700 °С, а также большим диапазоном соединений, которые могут быть отнесены к указанному классу. Также одним из важнейших параметров, влияющим на долговечность и предсказуемость топливного элемента, является сходная химическая природа материала катода и анода.

Широкое распространение получили соединения с блочно-слоевой структурой, характеризующиеся наличием последовательно чередующихся перовскитных блоков и находящимися между ними слоями со структурой типа каменной соли, общую формулу которых можно представить в виде (АО)(А'ВО₃). Слоистое строение позволяет достигать на порядок величины больших значений концентрации протонов в сравнении с классическими перовскитами. На протонную проводимость соединений напрямую влияет

* Работа выполнена при поддержке фонда РФФИ, проект № 22-79-1003.

внедрение в кристаллическую решетку иных ионов. Внедрение в кристаллическую решетку протонного проводника ионов переходного металла повышает значения электронной проводимости соединения, что позволяет использовать его в качестве электрода топливного элемента.

В настоящей работе был синтезирован ряд железозамещенных слоистых перовскитов на основе $BaLaInO_4$, для характеристики гомогенности полученных систем был применен рентгенофазовый анализ. Было отмечено уменьшение параметров и повышение симметрии кристаллической решетки составов при увеличении концентрации железа. Были получены и проанализированы электрические свойства с помощью двухконтактного и четырехконтактного методов при варьировании параметров среды (T , pH_2O , pO_2).

Эколого-экономические перспективы H_2 в качестве энергоносителя*

А. А. Двиганинов, Г. С. Чеботарева
*Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина*

В настоящее время глобальный рынок водорода как энергоносителя находится на этапе своего становления. Этот сектор включает получение, хранение, транспортировку и потребление H_2 в качестве альтернативы углеводородному топливу. В работе изучены эколого-экономические особенности производства и использования H_2 как энергоносителя, который в зависимости от технологии получения и сырья разделяется на «зеленый», «оранжевый», «серый», «голубой», «бурый» и «бирюзовый» [1]. Предложенные авторами эколого-экономические показатели по видам H_2 и их сравнительная оценка

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-78-01242, <https://rscf.ru/project/23-78-01242>.

от минимального (0) до максимального (10) значений представлены на рис. 1 [2, 3].

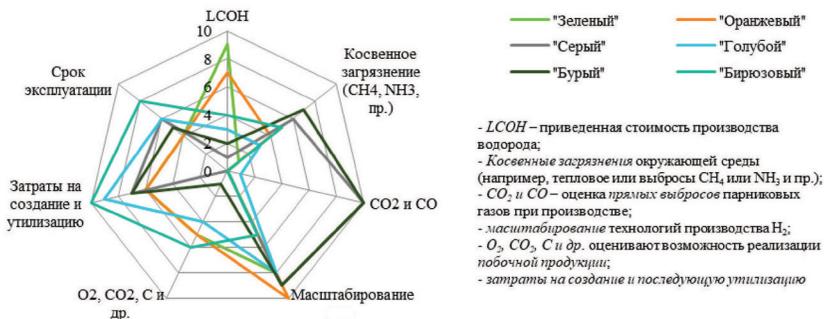


Рис. 1. Оценка эколого-экономических показателей технологий H_2 как энергоносителя

Среди преимуществ технологий H_2 как энергоносителя выделяют *технические* — отсутствие зависимости от нестабильных погодных условий, возможность хранения и транспортировки, производство из разнообразных ресурсов, а также *экологические* — снижение «углеродного следа» за счет отсутствия выбросов оксидов углерода в атмосферу при сгорании. Основные экономические недостатки — вторичность и высокая энергоемкость.

Литература

1. Макарян И. А., Седов И. В. Оценка экономической эффективности масштабов получения водорода различными методами // Рос. хим. журнал. 2021. № 65 (1). С. 62–76.
2. Веселов Ф., Соляник А. Экономика производства водорода с учетом экспорта и российского рынка // Энергетическая политика. 2022. № 4 (170). С. 58–67.
3. Рябов Г. А. Водород, как энергоноситель и средство снижения выбросов парниковых газов // Электрические станции. 2022. № 8. С. 2–9.

Синтез и свойства поверхностно-модифицированных частиц полисурьмяной кислоты оксидом ванадия

А. В. Димитренко, Ф. А. Ярошенко
Челябинский государственный университет

В настоящее время водородные топливные элементы (ВТЭ) стали ведущей технологией экологически чистой энергии с большим потенциалом для различных применений, таких как портативные источники питания, транспорт и стационарное производство электроэнергии. Но у данных элементов есть недостаток: падение проводимости протонопроводящей мембраны при повышенных температурах и низкой относительной влажности. Уменьшить это можно за счет введения в поры протонпроводящей мембраны наночастиц поверхностно-модифицированной полисурьмяной кислоты (ПСК). Известно, что, благодаря введению ПСК в полимерную матрицу, происходит увеличение влагонезависимости полученных композиционных мембран [1], а модификация поверхности приводит к расширению рабочего интервала температур.

Целью данной работы является синтез поверхностно модифицированных частиц ПСК оксидом ванадия и исследование ее свойств.

Синтез частиц типа ядро-оболочка на основе ПСК и оксида ванадия проводили путем приливания равных объемов предварительно полученной суспензии ПСК и 5 % раствора ванадата натрия. Осадок выдерживали в маточном растворе в течение трех недель, далее отмывали до отрицательной реакции на хлорид-ионы, сушили при температуре 110 °С в течение часа. После поверхностной модификации полученный образец представлял собой мелкодисперсный порошок светло-зеленого цвета.

Рентгенофазовый анализ поверхностно-модифицированных частиц показал, что фазовый состав полученных частиц соответствует ПСК. ПЭМ и РЭМ установили, что синтезированные образцы имеют размер от 20 до 200 нм, форма частиц близка к сферической, распределение элементов Na, Sb и V равномерное по всей площади

частицы. Термический анализ показал, что процессы дегидратации протекают в три стадии в температурном интервале до 450 °С.

Литература

1. Ярошенко Ф. А., Бурмистров В. А. Синтез и исследование протонной проводимости гибридных материалов на основе перфторированных сульфокатионитных мембран МФ-4СК, модифицированных полисульфурной кислотой // Мембраны и мембранные технологии. 2018. Т. 8, № 4. С. 249–253.

Влияние гранулометрического состава порошков стабилизированного диоксида циркония на процесс формования слитков для вакуумно-лучевого испарения

**М. А. Домашенков^{1,2}, С. В. Буйначев^{1,2}, Н. Д. Бородин¹,
В. А. Корнеев^{1,2}, М. А. Машковцев^{1,2}**

*¹Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина*

²Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН

В ходе исследования было установлено, что при массовом соотношении мелкодисперсного и крупнодисперсного порошков, равном 1 : 3, достигается плотность слитков 4 г/см³ и объемная пористость 30 %.

Целью данной работы было исследование влияния гранулометрического состава порошка циркония стабилизированного иттрием (YSZ) на процесс формования слитков для ВЛИ [1]. В ходе исследования были изучены параметры порошков и слитков после спекания. Для формирования слитков использовались различные по характеристикам порошки и их смеси. В табл. 1 представлены характеристики порошков, и их смесей.

Таблица 1

Характеристики порошков и их соотношения

Порошок	Насыпная плотность, г/см ³	Средний массовый диаметр частиц, мкм	Объем пор, мл/г	Удельная поверхность, м ² /г	Температура обжига, °С
Крупнодисперсный 1	2,28	26	0,073	24,00	900
Крупнодисперсный 2	1,39	39	0,157	54,65	700
Крупнодисперсный 3	1,44	48	0,134	29,37	800
Мелкодисперсный	1,8	10	0,167	60,25	850

Пресс-порошки

Наименование пресс-порошка	Масса, г	Соотношение	Описание
А	1280	Без смешивания	Только крупнодисперсный 1
Б	1280	Без смешивания	Только крупнодисперсный 3
В	1280	Без смешивания	Только мелкодисперсный
Г	1280	1 : 2	Отношение мелкодисперсного и крупнодисперсного 1
Д	1280	1 : 3	Отношение мелкодисперсного и крупнодисперсного 2
Е	1280	1 : 3	Отношение мелкодисперсного и крупнодисперсного 3

В процессе пропитки пресс-порошка А образовались крупные комки из-за низкой удельной поверхности частиц крупнодисперсного порошка 1. Слитки из пресс-порошка В имели низкую плотность после спекания из-за низкой плотности частиц мелкодисперсного порошка. При обжиге слитков из пресс-порошка Д появились дефекты на поверхности слитка. Наиболее подходящим оказался пресс-порошок Г, после обжига при 1300 °С слиток обладал плотностью 3,95 г/см³, имел однородную пористость с отсутствием сколов и поверхностных дефектов.

Литература

1. LaYZrO/YSZ double ceramic layer thermal barrier coatings by EB-PVD: Thermal performance, morphology and failure behavior / G. Liu, Z. Shen, L. He, R. Mu et al. // *Materialia*. 2023. Vol. 27. Article 101661.

Протонный перенос в La-допированных слоистых перовскитах на основе BaLaInO₄

Завиралова В.Д.¹, Е. В. Абакумова^{1,2}, А. О. Бедарькова^{1,2},
Н. А. Тарасова^{1,2}, И. Е. Анимица^{1,2}

¹Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

²Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН

В современном мире обостряются проблемы в области энергетики, связанные с истощением невозобновляемых ресурсов, а также выбросами и отходами при производстве электричества. Ведется большая работа по поиску решений, в том числе развитие новых передовых технологий аккумулирования и преобразования энергии.

На фоне декарбонизации мировой экономики особое место занимает водородная энергетика, где разрабатываются и совершенствуются различные твердооксидные топливные элементы, в которых осуществляется преобразование химической энергии, запасенной в водороде и кислороде, в электрическую при высокой

температуре. Таким образом, ключевыми задачами отрасли являются повышение их ионной проводимости и уменьшение рабочей температуры, то есть улучшение эффективности. ТОТЭ находят широкое применение в различных электрохимических устройствах для генерирования энергии.

Ранее были описаны свойства фазы BaLaInO_4 со структурой Раддлсдена — Поппера. Данные соединения являются перспективными ионными проводниками. В общем случае электропроводность возрастает с увеличением концентрации переносчиков заряда и ростом их подвижности. Так, в результате допирования происходит разупорядочение структуры, что сказывается на геометрических параметрах элементарных ячеек, а следовательно, и на проводимости соединений за счет образования вакансий. Кроме того, это повышает возможность внедрения в структуру молекул воды, а за этим следует увеличение концентрации протонов.

В ходе работы проведен синтез слоистых перовскитов путем гетеровалентного допирования Ва-подрешетки BaLaInO_4 ионами La^{3+} , изучены их физико-химические свойства в разных атмосферах.

Использование Ni-Mo покрытий в качестве катодных катализаторов для щелочного электролиза воды

А. С. Калашникова¹, А. А. Чернышев^{1,2}, А. Б. Даринцева¹

¹Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

²Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН

Никелевые покрытия с развитой поверхностью показали свою перспективность использования в качестве катодных материалов для щелочного электролиза воды. Введение неорганических добавок в покрытие облегчает реакцию выделения водорода.

В работе проводится исследование каталитической активности никелевых покрытий с добавлением молибдена, полученных из элек-

тролитов следующего состава: 0,2 М NiSO_4 + 0,3 М NaMoO_4 , содержащих разное количество $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ —0,02 М (раствор 1 и 2) и 0,03 М (раствор 3 и 4), при разной величине рН 7,5 (раствор 1 и 3) и рН 8,5 (раствор 2 и 4). Получение покрытий проводили в двухэлектродной ячейке на стальную пластину AISI304 площадью 1 см² с нерастворимыми анодами ОРТА при плотностях тока 80 и 150 мА/см². Продолжительность электролиза при разной плотности тока рассчитывали исходя из количества пропущенного электричества 300 Кл/см².

Тестирование полученных покрытий проводили в трехэлектродной электрохимической ячейке: рабочий электрод — пластина AISI с покрытием, электрод сравнения — хлорид серебрянный, вспомогательный электрод — графитовый стержень, электролит — 1 М NaOH. Полученные осадки подвергали вольтамперометрическому циклированию вблизи равновесного потенциала для установления электрохимически активной площади поверхности (ECSA), затем снимали поляризационную кривую восстановления водорода в потенциодинамическом режиме при скорости развертки потенциала 1 мВ/с. Далее проводили гальваностатическое тестирование током 50 мА в течение 1 часа, по окончании теста снова снимали поляризационную кривую восстановления водорода.

Поляризационные кривые переставляли в координаты уравнения Тафеля, образец, обладающий меньшим значением постоянной a , рекомендовали в качестве электродного материала.

Электрохимически активную площадь поверхности (ECSA) определяли, перестраивая данные в координаты $I = f(v)$, где v — скорость развертки потенциала. Тангенс угла наклона в этих координатах равен емкости двойного электрического слоя C_{dl} , разделив его на удельную емкость двойного слоя 40 мкФ/см², можно вычислить значение ECSA. Чем больше величина ECSA, тем выше каталитические свойства материала.

.....
**Электрические свойства соединений на основе
оксидов бария, алюминия,
диспрозия и лютеция**

**Р. Р. Каримов, М. А. Николашин,
Е. С. Матвеев, А. Р. Шарафутдинов**

*Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина*
.....

Развитие возобновляемых технологий получения энергии, в частности водородной энергетики, определяет круг задач перед материаловедением. Помимо разработки систем генерации и хранения водорода, который применяется в качестве топлива, необходимо создание материалов для источников энергии — топливных элементов. В его конструкции необходимо наличие кислородно-ионной или протон-проводящей мембраны. Перспективными материалами являются перовскитоподобные соединения, такие как сложные оксиды Ba_2MAlO_5 , обладающие высоким дефицитом в кислородно-ионной подрешетке.

Образцы состава Ba_2MAlO_5 ($M = Dy, Lu$) синтезировали твердофазным методом из исходных $BaCO_3$, Al_2O_3 , Dy_2O_3 , Lu_2O_3 , соответственно, в стехиометрическом соотношении. Шихту гомогенизировали в этиловом спирте и отжигали при 1200° ($M = Dy$) и при $1000^\circ C$ 10 часов ($M = Lu$). Повторно перетирали и компактировали методом изостатического прессования ПЛИГ-12 (LabTools, Россия), далее отжигали при $1500^\circ C$ в течение 8 часов ($M = Dy$) и при $1600^\circ C$ в течение 16 часов ($M = Lu$). Аттестацию образцов осуществляли методом РФА (EQUINOX 3000, Thermo Scientific, Франция). Исследование электропроводности образца проводили двухконтактным методом импедансометрии Elins Z-1000P (ООО «Элинс», Россия) с Pt- и Pd/Ag- электродами в частотном диапазоне $1-10^6$ Гц, в температурном интервале $300-900^\circ C$, в атмосфере сухого ($3 \cdot 10^{-5}$ атм.) и влажного ($2 \cdot 10^{-2}$ атм.) воздуха.

Порошки Ba_2MAlO_5 являются однофазными, ($M = Dy$) характеризуется моноклинной сингонией с пр. гр. $P2_1/m$, ($M = Lu$) и гекса-

гональной сингонией с пр. гр. $R\bar{6}_3/mmc$. Параметры элементарных ячеек удовлетворяют литературным данным.

Вид годографов представляет собой 2 незавершенных полуокружности (отражающие зернограничное и электродное сопротивление): в температурном интервале 400–700 °С возможна экстраполяция зернограничной полуокружности на ось абсцисс, что дает возможность разделения объемного и зернограничного сопротивления. По результатам исследований зависимость $\lg \sigma - (1000/T)$ линейна. Во влажном воздухе наблюдается рост электропроводности на ~1 порядок величины, что обусловлено внедрением H_2O в структуру сложного оксида Ba_2MeAlO_5 из газовой фазы и возникновением протонных дефектов. В итоге вклад объемного сопротивления составляет ~33 % для Ba_2DyAlO_5 и ~60 % — для Ba_2LuAlO_5 .

Таким образом, проведенные исследования позволили установить вклад объемной в общую электропроводность для изоформульных соединений Ba_2LuAlO_5 и Ba_2DyAlO_5 .

Гидратация и электрические свойства сложных оксидов $BaLa_{1,9}M_{0,1}In_2O_7$ ($M = Nd^{+3}, Sm^{+3}, Eu^{+3}, Gd^{+3}, Tb^{+3}, Dy^{+3}, Ho^{+3}, Er^{+3}, Yb^{+3}, Lu^{+3}$) со структурой Раддлесдена — Поппера

Кремеш Хала, И. Е. Анимица
*Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина*

Удачное сочетание фотокаталитических, сверхпроводящих, электрических и ионообменных свойств позволяет отнести большинство представителей семейства слоистых соединений Раддлесдена — Поппера к числу перспективных материалов современной техники [1]. В частности, представители этого семейства соединений могут найти применение в качестве материалов датчиков влажности с высокой чувствительностью и малым временем отклика, в качестве датчиков кислорода и твердых электролитов в твердотельных

топливных элементах, демонстрирующих высокую степень гибкости в управлении электрическими и транспортными свойствами [2, 3]. Из литературы известны очень ограниченные данные о существовании индийсодержащих представителей этого семейства общего состава $A^{II}Ln_nIn_nO_{3n+1}$ (A^{II} — щелочноземельный металл, n — число слоев октаэдров InO_6 в перовскитоподобном блоке).

В данной работе фазы $BaLa_{1,9}M_{0,1}In_2O_7$ были синтезированы твердофазным методом в температурном интервале 1000–1250 °С в несколько стадий. Спекание керамических образцов для измерения электропроводности проводили при 1250 °С. Рентгенографические установлено, что фазы с Nd^{+3} -, Sm^{+3} -, Eu^{+3} - и Gd^{+3} -допантами получены однофазными, а фазы с допантами меньших размеров Sr^{+3} до Lu^{+3} однофазными не получены. Показано, что при введении допантов Nd^{+3} , Sm^{+3} , Eu^{+3} и Gd^{+3} с меньшим по сравнению лантаном радиусом происходит перераспределение Ba^{+2} - и La^{+3} -полиэдров между перовскитными блоками и слоями каменной соли. Это приводит к немонотонному изменению параметров a и c . Изучены процессы гидратации методом термогравиметрии, установлено, что степень гидратации увеличивается при увеличении размера блока каменной соли. Электропроводность образцов исследована методом импедансной спектроскопии в атмосферах сухого и влажного воздуха и азота. Проведены измерения электропроводности при варьировании pO_2 .

Литература

1. Arciniegas M. P., Manna L. Designing Ruddlesden–Popper Layered Perovskites through Their Organic Cations // ACS Energy Letters. 2022. Vol. 9, № 7. P. 2944–2953.
2. Synthesis and oxide ion conductivity of new layered perovskite $La_{1-x}Sr_{1+x}InO_{4-d}$ / S. Kato et al. // Solid State Ionics. 2002. Vol. 149 (1–2). P. 53–57.
3. Navas C., Løye H.-C. Zur Conductivity studies on oxygen-deficient Ruddlesden–Popper phases // Solid State Ionics. 1996. Vol. 93 (1–2). P. 171–176.

Взаимосвязь структуры и транспортных свойств слоистого перовскита $BaLa_2In_2O_7$

Т. А. Кузнецова¹, Е. В. Абакумова^{1,2}, Н. А. Тарасова^{1,2}

¹Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН

²Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

В настоящее время важной проблемой является большое количество выбросов CO_2 при производстве энергии из ископаемого топлива, что способствует ухудшению экологического состояния планеты. Глобальное потепление является следствием повышения уровня токсичных отходов в атмосфере, в то время как большой объем добычи топлива может грозить истощением природных ресурсов. Действующим способом решения этой проблемы является развитие водородной энергетики, одним из преимуществ которой является использование топливных элементов, не выделяющих загрязняющих веществ в окружающую среду. Для совершенствования получения энергии с использованием водорода необходим поиск новых перспективных материалов с высокой проводимостью и химической активностью, которые можно эффективно использовать в топливных элементах. В качестве таких материалов выступают соединения со структурой перовскита или производной от нее. Активный интерес уделяется перовскитам с блочно-слоевой структурой, представляющей собой последовательно чередующиеся перовскитные блоки. Эта структура позволяет достигать больших значений концентрации протонов в сравнении с классическими перовскитами. Одним из таких перовскитов является слоистый перовскит с двумя слоями в структуре $n = 2$, характеризующиеся общей формулой $AA'B_2O_7$.

В настоящей работе был синтезирован слоистый перовскит $BaLa_2In_2O_7$, аттестация образца была проведена рентгенофазовым методом. Методом Ритвельда была исследована структура и подсчитаны координаты атомов. Исследованы кислородно-ионная и протонная проводимости.

Дизайн новых электродных материалов на основе ферритов для электрохимических приложений

П. С. Кузнецова¹, Л. Р. Тарутина^{1,2}, И. А. Старостина^{1,2},

Г. Н. Старостин^{1,2}, Д. А. Медведев^{1,2}

¹Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

²Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН

Протонно-керамические топливные элементы (ПКТЭ) являются перспективными устройствами для эффективного преобразования химической энергии топлива в электроэнергию. Основное отличие этих устройств от традиционных твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) на кислород-ионных электролитах заключается в относительно низких рабочих температурах (400–800 °С). Это позволяет избежать многих недостатков, характерных для ТОТЭ: деградация функциональных материалов, спекание пористых электродов, химическое взаимодействие с газовыми компонентами и т. д. На сегодняшний день одна из проблем создания ПКТЭ состоит в разработке подходящих материалов для воздушных электродов; одним из подходов для ее решения является создание смешанных ионно-электронных проводников на основе Се-допированного $\text{BaFeO}_{3-\delta}$. В данной работе был получен сложный оксид состава $\text{BaCe}_{0,5}\text{Fe}_{0,5}\text{O}_{3-\delta}$, а также исследовано влияние различных температур спекания на процессы фазообразования и спекаемости этих материалов.

Сложный оксид $\text{BaCe}_{0,5}\text{Fe}_{0,5}\text{O}_{3-\delta}$ был синтезирован с использованием цитратного-нитратного метода. Полученные порошки подвергали предварительному отжигу при 1100 °С (3 ч) с последующей гомогенизацией в среде ацетона. После чего порошок прессовали в керамические таблетки и спекали при 1100, 1200, 1300 и 1350 °С (5 ч). Партию таблеток, полученных при этих температурах, повторно измельчали, затем снова прессовали и спекали при 1100 °С (5 ч). Согласно результатам рентгенофазового анализа на дифрактограммах керамики состава $\text{BaCe}_{0,5}\text{Fe}_{0,5}\text{O}_{3-\delta}$ были идентифицированы две фазы BaCeO_3 и BaFeO_3 во всем температурном диапазоне спекания.

Полученные данные были уточнены методом Ритвельда, в соответствии с которыми параметры элементарной ячейки этих фаз для образцов после первичного и вторичного спекания имеют близкие значения. По результатам исследования морфологии поверхности полученных керамических образцов можно заключить, что с ростом температуры спекания происходит ожидаемое увеличение их плотности.

Изучение структуры композита на основе гидрида магния и наноразмерного никеля, полученного методом электрического взрыва проводников*

Е. С. Леонова, В. Н. Кудияров

Национальный исследовательский

Томский политехнический университет

В связи с истощением нефтяных ресурсов и ухудшением экологической обстановки возникла проблема глобального потепления. При сжигании ископаемого топлива в атмосферу выбрасывается углекислый газ CO_2 , он приводит к возникновению парникового эффекта и перегреву планеты. Серьезную актуальность приобрела разработка альтернативных источников энергии, которые способствуют решению данной проблемы [1]. Гидрид магния MgH_2 является перспективным методом хранения водорода. Его характеристики: доступность и высокая емкость (7,6 масс. %) [2]. Одним из направлений исследования является синтез композитов на основе гидрида магния и каталитических добавок, в качестве которых могут выступать металлы и их оксиды.

Композиционные материалы на основе гидрида магния и наноразмерного никеля были получены методом электрического взрыва проводников в диапазоне (1–15 масс.%) и параметров синтеза:

* Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания «Наука» в рамках научного проекта № FSWW-2023-0005.

частоте вращения барабанов 900 об/мин и продолжительностью синтеза 180 мин.

Для полученных композитов были установлены закономерности влияния параметров синтеза и состава композитов на морфологию, структурно-фазовое состояние.

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о том, что распределение наноразмерного никеля на более крупных частицах гидрида магния представляет из себя структуру типа «ядро — оболочка». Если сопоставить между собой результаты ЭДС, можно заметить, что структура «ядро — оболочка» достигается при 1 масс.%, а при 10 и 15 масс.% увеличивается лишь число образовавшихся агломератов, что не имеет смысла, так как агломераты не влияют на каталитический эффект.

Литература

1. Kudiiarov V., Elman R., Kurdyumov N., Laptev R. The phase transitions behavior and defect structure evolution in magnesium hydride/single-walled carbon nanotubes composite at hydrogen sorption-desorption processes // Journal of Alloys and Compounds. 2023. 953. 170138.
2. Jinzhe L., Elman R., Svyatkin L., Kudiiarov V. Theoretical and experimental research of hydrogen storage properties of Mg and Mg-Al hydrides // Journal of Alloys and Compounds. 2023. 938. 168618.

Исследование влияния условий синтеза графитоподобного нитрида углерода на фотоэлектрохимические свойства композиционных материалов на его основе

В. А. Ломакина^{1,2}, А. В. Журенок², Д. В. Марковская^{1,2}

¹Новосибирский национальный исследовательский
государственный университет,

²Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН

Для преобразования солнечной энергии в электрическую используются специальные устройства — фотоэлектрохимические (ФЭХ) ячейки. Перспективными материалами для разработки электродов, применяющихся в ФЭХ ячейках, являются композиты на основе графитоподобного нитрида углерода ($g-C_3N_4$). При этом эффективность полученного материала может отличаться в зависимости от условий его приготовления и наличия модификаторов. Целью данной работы является исследование ФЭХ свойств композиционных материалов на основе $g-C_3N_4$ в зависимости от условий их приготовления.

Графитоподобный нитрид углерода синтезировали путем термической поликонденсации предшественника (меламин (серия $g-C_3N_4$ -M) или дициандиамида (серия $g-C_3N_4$ -D)). В ходе работы варьировали температуру (550 °С, 600 °С) и время прокаливания (2, 4 ч). Платину наносили на поверхность нитрида углерода методом химического восстановления [1].

Особенности структуры каждого из исследуемых образцов оказывают влияние на их фотоэлектрохимические свойства. Так, в результате проведенных исследований было показано, что ФЭХ свойства $g-C_3N_4$, полученного прокаливанием меламин, выше, чем у $g-C_3N_4$, полученного разложением дициандиамида. Это, в свою очередь, коррелирует со значениями площади удельной поверхности материалов и размерами области когерентного рассеяния: чем выше степень полимеризации $g-C_3N_4$ и площадь удельной поверхности, тем выше токи короткого замыкания. Нанесение платины на поверхность нитрида углерода повышает значения либо токов

короткого замыкания в случае образцов g-C₃N₄-М, либо напряжения холостого хода в случае g-C₃N₄-D. Наибольшие значения ФЭХ свойств (ток короткого замыкания 0,059 мА/см², напряжение холостого хода 555 мВ и КПД ячейки 0,13 %) были получены для образца, синтезированного термической поликонденсацией меламина при температуре 600 °С в течение 4 часов.

Литература

1. Synthesis of Graphitic Carbon Nitride-Based Photocatalysts for Hydrogen Evolution Under Visible Light / A. V. Zhurenok, T. V. Larina, D. V. Markovskaya, S. V. Cherepanova et al. // *Mendeleev Communications*. 2021. Vol. 31, № 2. P. 157–159.

Перспективное направление водородной энергетики

Д. С. Луканин¹, В. А. Никонорова^{1,2}, М. В. Ерпалов^{1,2}

¹*Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН*

²*Уральский федеральный университет*

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

В настоящее время актуальной является задача развития водородной энергетики, прежде всего для решения вопросов освоения Крайнего Севера и снабжения потребителей, территориально удаленных от централизованных источников электрической и тепловой энергии.

Существуют различные решения вопроса автономного энергоснабжения потребителей: использование дизель-генераторов, применение возобновляемых источников энергии, таких как солнечная и ветровая энергии, и др. Однако наиболее эффективным техническим решением является применение топливных элементов, представляющих собой устройства прямого преобразования химической энергии топлива в электрическую и тепловую энергию. Благодаря исключению стадии сжигания топлива, коэффициент

полезного действия таких устройств достигает 60 %. Выделяемое тепло может использоваться для отопления, что повышает общую эффективность преобразования энергии до 90 %.

Наиболее эффективными являются установки на базе ТОТЭ, работающих при температурах от 600 до 1000 °С. Дополнительным их преимуществом является возможность использования широкого спектра видов топлива: водород, углеводороды, спирты, аммиак и др. Водород в данном случае рассматривается в качестве перспективного энергоносителя и инструмента для решения задач по развитию низкоуглеродной экономики и снижению антропогенного влияния на климат. В настоящее время более целесообразно использование углеводородного топлива, в частности природного газа, из-за его широкого применения [1].

При этом использование ТОТЭ позволит снизить выбросы парниковых газов ввиду повышенного КПД, а также развить технологии топливных элементов, не дожидаясь создания развитой инфраструктуры для водородной энергетики.

В данной работе рассматривается стабильность вольтамперных и мощностных характеристик стеков ТОТЭ, работающих на природном газе в условиях эксплуатации нефтегазовых скважин.

Литература

1. *Rokni M. Thermodynamic analysis of SOFC (solid oxide fuel cell) — Stirling hybrid plants using alternative fuels // Energy. 2013. Vol. 61. P. 87–97.*

Влияние железа на электрохимическую активность сложных оксидов никеля в реакции выделения кислорода в щелочной среде

В. В. Маев, С. В. Порохин, В. А. Никитина

Сколковский институт науки и технологий

Поскольку основные энергетические потери при электролизе воды обусловлены медленной кинетикой реакции выделения кислорода (РВК), крайне важна разработка высокоэффективных и стабильных электрокатализаторов [1]. Сложные оксидные соединения на основе никеля и железа обладают высокой активностью, однако механизм РВК на поверхности подобных материалов остается малоизученным [2]. Целью данной работы является исследование влияния железа, находящегося как в электролите, так и в структуре сложного Ni-Fe оксида, на активность и стабильность материалов в РВК.

Обнаружено, что добавление 1 мг/кг ионов Fe^{3+} в электролит значительно увеличивает активность исходных и допированных железом материалов. Установлено, что замещение никеля на железо не приводит к увеличению электрокаталитической активности, однако наблюдается рост тока, обусловленный большей удельной поверхностью замещенного образца ($35 \text{ м}^2/\text{г}$) по сравнению с исходным ($20 \text{ м}^2/\text{г}$) (рис. 1).

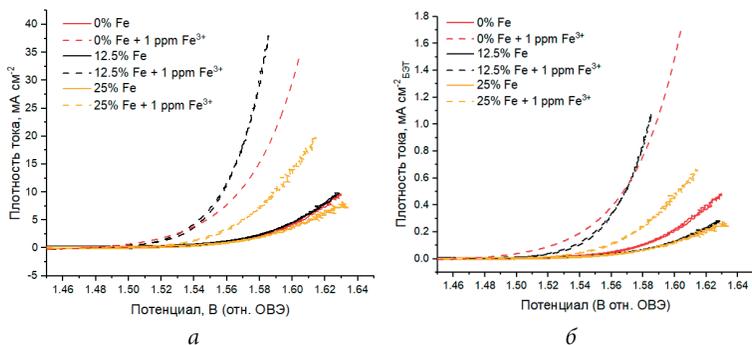


Рис. 1. Вольтамперограммы электродов на основе оксидов NiFe, нормированные на геометрическую (а) и удельную (б) поверхность электрокатализатора

Литература

1. *Fabbri E., Schmidt T.J.* Oxygen Evolution Reaction — The Enigma in Water Electrolysis // *ACS Catalysis*. 2018. V. 8. № 10. P. 9765–9774.
2. Research Progress of Oxygen Evolution Reaction Catalysts for Electrochemical Water Splitting / Y. Liu, D. Zhou, T. Deng, G. He et al. // *ChemSusChem*. 2021. Vol. 14, № 24. P. 5359–5383.

Изучение новых фотокатализаторов и фотоэлектродов на основе графитоподобного нитрида углерода, одновременно модифицированного бромом и йодом

**Д. В. Марковская, А. В. Журенок,
К. О. Потапенко, В. А. Ломакина**

Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН

Одним из наиболее перспективных материалов для создания фотокатализаторов и фотоэлектродов, функционирующих при освещении видимым светом, является графитоподобный нитрид углерода. Этот материал удовлетворяет большинству требований, предъявляемых к фотокатализаторам и фотоэлектродам, тем не менее его активность низка для практического применения. Модификация $g\text{-C}_3\text{N}_4$ галогенами позволила существенно улучшить целевые характеристики материалов [1], однако одновременная модификация нитрида углерода двумя галогенами различной природы ранее не была изучена. Поэтому целью нашей работы является синтез графитоподобного нитрида углерода, одновременно модифицированного бромом и йодом, и исследование полученных материалов в процессах преобразования энергии света в другие виды энергии.

Графитоподобный нитрид углерода получали по методу термической поликонденсации солей аммония и смеси меламина и глюкозы, предварительно подвергшихся автоклавированию [1]. Синтезированные материалы были изучены комплексом физико-химических методов. Каталитическую активность приготовленных образцов

изучали в реакции фотокаталитического выделения водорода из щелочных растворов триэаноламина при освещении суспензии светом с длиной волны 428 нм. При увеличении содержания бромид аммония в реакционной смеси с 10 до 25 % каталитическая активность образцов возрастает в 1,8 раз. Наибольшее значение каталитической активности, полученное в ходе экспериментов, составило 2400 ± 240 мкмоль \cdot ч⁻¹ \cdot г⁻¹. Дополнительно были изучены фотоэлектрохимические свойства образцов. Зависимость плотности тока короткого замыкания от доли бромид аммония в реакционной смеси носит куполообразный характер. Максимальное значение плотности тока короткого замыкания составило 0,39 мА/см² (образец 0,25Br-0,25I). Одновременная модификация нитрида углерода двумя различными галогенами позволяет существенно улучшить его целевые характеристики.

Литература

1. Br- and I-Modified g-C₃N₄ Photocatalysts Prepared via Novel Two-Stage Technique for Hydrogen Evolution and Photocurrent Generation / A. V. Zhurenok, K. O. Potapenko, D. V. Markovskaya, N. D. Sidorenko et al. // Int. J. Hydrogen Energy. 2024. Vol. 51 (B). P. 1367–1379.

Экологичный метод получения электрической энергии на основе процесса обратного электролиза

**В. В. Маслова, М. Р. Эгембердиев, С. И. Ильина,
Л. В. Равичев**

*Российский химико-технологический университет
им. Д. И. Менделеева*

Нерациональное использование ископаемых источников энергии привело к значительному уменьшению их запасов и, как следствие, проявлению повышенного внимания к возобновляемым источникам энергии. Одним из методов чистой энергетики может стать техно-

логия обратного электродиализа, которая заключается в прокачивании потоков разной солености через камеры, образованные попеременно расположенными катионообменными и анионообменными мембранами. На основании полученных нами экспериментальных зависимостей для хлорида натрия было установлено, что максимальная мощность, а следовательно, и наибольшая эффективность работы установки, наблюдается при отношении солесодержаний в 15–25 раз [1].

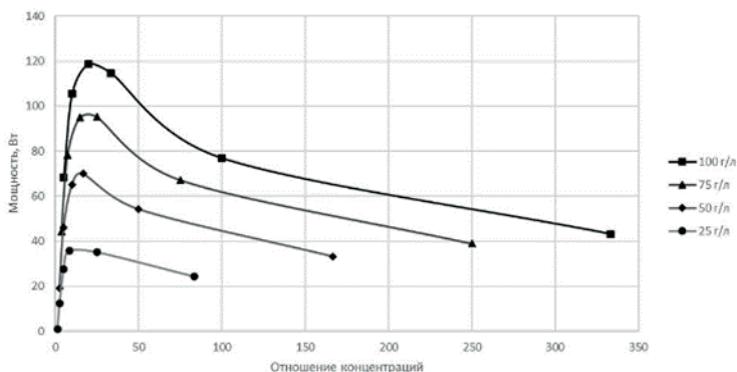


Рис. 1. Зависимость получаемой мощности от отношения солесодержаний раствора при различных солесодержаниях более концентрированного раствора [2]

Благодаря устойчивости мембран в большом диапазоне рН становится возможным использование потоков кислоты и щелочи, тем самым допуская применение технологии на различных химических производствах, в том числе на металлургических комбинатах, предприятиях пищевой и косметической промышленности, нефтеперерабатывающих заводах, что может уменьшить слив вредных отходов. Здесь следует отметить возможность применения и в сельском хозяйстве, где также образуется большое количество стоков, подходящих для использования в данном процессе.

Литература

1. Nazemi A. Energy Efficiency in Iran Provinces: DEA Approach // Quarterly Journal of Energy Policy and Planning Research. 2019. Vol. 5. P. 227.

2. Мембранные методы получения электрической энергии / В. И. Быков, С. И. Ильина, В. Я. Логинов, Л. В. Равичев и др. // Успехи в химии и химической технологии. 2022. Т. 36, № 10. С. 11–13.

Композитные электроды на основе $\text{PrBaFe}_2\text{O}_{6-\delta}$ для твердооксидных электрохимических устройств

Д. Е. Маткин, А. П. Тарутин, Д. А. Медведев

¹Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

²Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН

Одним из направлений развития водородной энергетики является разработка новых электродных материалов твердооксидных топливных элементов. $\text{PrBaFe}_2\text{O}_{6-\delta}$ (PBF) является перспективным материалом как в качестве топливного, так и воздушного электрода, что позволяет использовать его в симметричных топливных ячейках. Дальнейшая модификация данного соединения может проходить как путем внедрения допанта в перовскитную структуру феррита, так и путем введения композитной добавки. В настоящей работе было исследовано совместное влияние таких допантов, как Co, Ni, Cu, введенных в позицию железа в количестве 5 мол.%, так и добавление 30 масс.% $\text{BaCe}_{0,8}\text{Sm}_{0,2}\text{O}_{3-\delta}$ (BCS) на электрохимические и термомеханические свойства полученных однофазных и композитных электродов на основе PBF.

Сложные оксиды состава $\text{PrBaFe}_{1,9}\text{Me}_{0,1}\text{O}_{6-\delta}$ (Me = Fe, Co, Ni, Cu) (PBFMe) были получены с использованием модифицированного метода Печини и затем спечены в плотную керамику при 1300 °С. Их кристаллическая структура исследована методом рентгеноструктурного анализа на воздухе. Композиты из $\text{PrBaFe}_{1,9}\text{Me}_{0,1}\text{O}_{6-\delta}$ и $\text{BaCe}_{0,8}\text{Sm}_{0,2}\text{O}_{3-\delta}$ (PBFMe-BCS) были получены путем смешивания однофазных порошков PBFMe и BCS в весовом соотношении 7 : 3 в агатовой ступке в среде этанола в течение 1 ч. Электрохимические ячейки были изготовлены путем нанесения электродных чернил

композитного состава на поверхность электролита ВСS. Поверхность таблеток и сломы электрохимических ячеек исследованы с помощью сканирующей электронной микроскопии в режиме съемки обратнорассеянных электронов. Термическое расширение было изучено с помощью дилатометрии. Измерение удельной электропроводности проведено по четырехзондовой методике. Поляризационные сопротивления симметричных электрохимических ячеек измеряли методом электрохимической импедансной спектроскопии в потенциостатическом режиме, в диапазоне температур от 400 до 700 °С.

При допировании Со, Ni и Сu электропроводность достигла максимальных значений 33, 56 и 82 См · см⁻¹ при температурах 450, 430 и 500 °С соответственно (рис. 1а). Кроме того, допирование Ni и Сu привело к снижению значений температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) на 2–5 % в высокотемпературном диапазоне относительно недопированного состава. По сравнению с однофазными ферритами, введение композитной добавки ВаСe_{0,8}Sm_{0,2}О_{3-δ} в количестве 30 масс.% привело к снижению ТКЛР и улучшению адгезии к твердому электролиту. ТКЛР для композита PBF-BCS составляет 17,8 · 10⁻⁶ К⁻¹, что ниже значения 23,4 · 10⁻⁶ К⁻¹ для однофазного феррита. Однако значения электропроводности образца композита PBF-BCS были крайне низкими и достигали всего 0,17 См · см⁻¹. PBF, допированный 5 мол.% Со и Ni, может быть использован для достижения приемлемых значений электропроводности композитного электродного материала при сохранении низкого ТКЛР, высокой пористости и хорошей адгезии к поверхности электролита. В частности, PBFСо-BCS, PBFNi-BCS и PBFСu-BCS достигли удельной проводимости 2,6; 4,3 и 8,5 См · см⁻¹ (рис. 1б), соответственно, при нагревании до 700 °С. Электроды, полученные при сочетании допирования и добавления композитной добавки, такие как PBFСо-BCS, PBFNi-BCS и PBFСu-BCS, при температуре 700 °С демонстрируют поляризационное сопротивление 3,5; 10,9 и 1,7 Ω · см², соответственно. Кроме того, энергии активации их поляризационного сопротивления составляют 1,34; 0,96 и 1,26 эВ, соответственно.

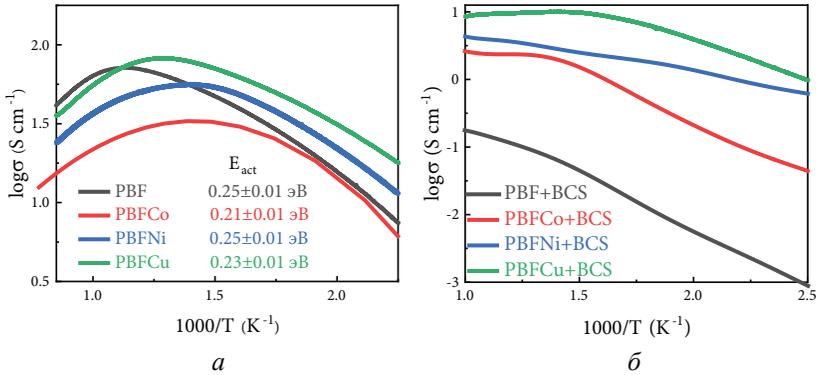


Рис. 1. Температурная зависимость электропроводности в воздушной атмосфере:

a — однофазные образцы PBFMe; *б* — композиты PBFMe-BCS

В заключение следует отметить, что сочетание двух методов модификации PBF позволяет достичь приемлемых электрохимических и термомеханических свойств. Это указывает на перспективность использования PBFMe-BCS (Me = Co, Ni, Cu) в качестве электродных материалов в твердооксидных топливных элементах.

Синтез и исследование свойств цератов и титанатов висмута в качестве материалов мембран*

**С. Е. Миронов¹, Н. Ф. Еремеев¹, Е. М. Садовская¹,
О. А. Булавченко¹, М. В. Коробейников²,
М. А. Михайленко³, В. А. Садыков¹, Ю. Н. Беспалко¹**

¹*Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН*

²*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН*

³*Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН*

Ввиду увеличения потребления человечеством энергии и сокращения природных ресурсов, актуальной задачей на сегодняшний день является поиск альтернативных источников энергии. В качестве перспективного варианта такого источника энергии является водород, получаемый паровой конверсией метана, природного газа, биоэтанола и т. д. Для эффективного разделения получаемого синтез-газа привлекательной технологией является использование мембранных каталитических реакторов. В качестве материалов функциональной керамики для мембран были предложены сложные оксиды со структурой пирохлора ввиду их высокой ионной и электронной проводимости. Для получения газоплотной керамики на их основе было использовано спекание электронным пучком, что является более выгодной альтернативой обычному спеканию в муфеле, поскольку оно протекает при меньшей температуре и позволяет снизить время обработки.

В данной работе были синтезированы и изучены свойства цератов и титанатов висмута, допированных иттрием. Сложные оксиды были получены методом Пекини, далее были спрессованы в таблетки и подверглись термической обработке. В муфеле прокаливание проводилось при 700–1300 °С в течение 10 ч. При радиационно-термическом прокаливании использовались электронные импульсы с энергией 2,4 МэВ, силой тока 380 мА и частотой до 25 Гц при 1100 °С в течение 30 мин.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 23-73-00045).

По данным РФА, при традиционном прокаливании при высокой температуре сложные оксиды $\text{Bi}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$ и $\text{Bi}_{1,6}\text{Y}_{0,4}\text{Ce}_2\text{O}_7$ имеют фазу флюорита с примесью оксида висмута, формирующегося при низких температурах. После РТС обработки помимо флюоритной фазы образуется $\text{Bi}_{7,5}\text{Y}_{0,5}\text{O}_{12}$. При традиционном прокаливании $\text{Bi}_{1,6}\text{Y}_{0,4}\text{Ti}_2\text{O}_7$ фаза пирохлора образуется только при 1300 °С, при 900 °С образуется фаза $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$. При радиационно-термическом прокаливании при высокой температуре формируется фаза пирохлора, содержащая небольшую примесь фазы $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$. При спекании электронным пучком титанатов и цератов висмута были получены образцы, обладающие низкой пористостью, подходящей для изготовления функциональной керамики мембран. Транспортные характеристики цератов висмута были рассмотрены методом изотопного обмена C^{18}O_2 : было выяснено, что они имеют высокую подвижность кислорода. Исследования гетерообмена изотопов кислорода пирохлоров показали, что скорость поверхностного кислородного обмена с CO_2 и подвижность O_2 в пирохлорных образцах очень высоки и максимальны для цератов висмута.

**Электрохимический синтез пены никеля
со слоем катализатора Со-Мо-Р-О для снижения
перенапряжения реакции выделения водорода при
электролизе воды***

Ю. А. Моисеев, В. С. Никитин

Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

Одним из способов получения водорода является электролиз воды в растворе щелочи, протекающий при очень высоких перенапряжениях. Для снижения энергозатрат широко используют пори-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы раз-

стые никелевые электроды (пены), которые также могут служить основой для катализаторов реакций при электролизе воды.

Цель работы заключалась в синтезе и оценке электрокаталитических свойств пен никеля с катализатором Co-Mo-P-O по отношению к реакции выделения водорода (РВВ).

Пены никеля осаждали из раствора 0,2 М NiCl₂, 2 М NH₄Cl (рН = 3,2) при плотности тока 0,6 А/см² в течение 5 минут на электроды из медных пластин исходной площадью 0,84 см², предварительно покрытые слоем электролитического гладкого никеля толщиной 9 мкм. На пену никеля осаждали катализатор Co-Mo-P-O из раствора 0,15 М CoSO₄, 0,05 М Na₂MoO₄, 0,15 М Na₃C₆H₅O₇, 0,5 М NaN₂PO₂ (рН = 4) [1] при потенциале -1,96 В относительно насыщенного хлоридсеребряного электрода в течение 5 мин. Ток и потенциал задавали при помощи электрохимической станции Solartron 1280С.

Для оценки электрокаталитических свойств пен снимали катодные поляризационные кривые в растворе 1 М NaOH со скоростью развертки 3 мВ/с. Результаты поляризационных исследований показали, что пена никеля с катализатором Co-Mo-P-O позволяет в большей степени снизить перенапряжение РВВ при электролизе воды, чем использование гладкого никелевого электрода или пены никеля без катализатора.

Литература

1. Xiaoxia Wang, Guangwei She, Lixuan Mu, Wensheng Shi. Amorphous Co-Mo-P-O Bifunctional Electrocatalyst via Facile Electrodeposition for Overall Water Splitting // ACS Sustainable Chem. Eng. 2020. Vol. 8. P. 2835–2842.

вития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Способы нанесения стеклокерамического герметика для сборки стеков ТОТЭ

В. А. Никонорова^{1,2}, М. В. Ерпалов.^{1,2}

¹*Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН*

²*Уральский федеральный университет*

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

В данной работе рассматриваются два подхода к соединению компонентов ТОТЭ с помощью стеклокерамических герметиков: нанесение с помощью трафаретной печати и использование пленок, получаемых методом литья [1]. Конкретный состав стекла или стеклокерамики для отработки способов нанесения герметика не имеет принципиального значения. В данной работе использовалась алюмоборосиликатная стеклокерамика, включающая в качестве дополнительных компонентов оксиды щелочноземельных металлов.

Чернила для трафаретной печати были подготовлены на основе классических связующего и растворителя. В качестве связующего использовалась этилцеллюлоза, а в качестве растворителя — терпинеол. Для достижения оптимальной вязкости чернил варьировалось содержание органической связки от 40 до 60 масс.%. Установлено, что метод трафаретной печати позволяет получать слой герметика до спекания толщиной до 0,25 мм, что недостаточно для получения плотного соединения между компонентами ТОТЭ ввиду того, что на единичном элементе имеется дополнительный слой катодного материала, а при сборке стеков используются токопроводящие пасты для обеспечения электрического контакта между соседними ячейками топливных элементов. Нанесение стеклокерамического герметика в несколько слоев не обеспечивает равномерный слой, что может привести к потере газоплотности топливного элемента.

Ввиду недостатков метода трафаретной печати дополнительно был рассмотрен метод литья для получения герметика заданной толщины в виде пластичной пленки. В качестве органических компонентов в состав шликера входили поливинилбутираль, дибутилфталат и спирт. Для достижения оптимальной вязкости шликера

также варьировалось содержание органических компонентов в диапазоне от 40 до 60 масс.%. Сушка пленок осуществлялась на воздухе.

Выявлено, что применение пленок, полученных методом литья в форму, является эффективным методом для сборки стеков ТОТЭ планарной конструкции. Стеклокерамические пленки просты в получении, не требуют длительной подготовки органических связующих и использования дополнительного оборудования.

Литература

1. Singh K., Walia T. Review on silicate and borosilicate-based glass sealants and their interaction with components of solid oxide fuel cell // Int. J. Energy Res. 2021. Vol. 45. P. 20559–20582.

Совместное спекание структуры градиентный анод — электролит для микротрубчатого ТОТЭ

А. В. Никонов, Н. Б. Павздерин, В. Р. Хрустов

Институт электрофизики УрО РАН

Твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ) являются перспективными, экологически чистыми источниками энергии. Одним из подходов к формированию ТОТЭ является совместное спекание всех компонентов или полуэлемента (несущий анод-электролит) с последующим формированием катода. Успешное применение этого метода позволит снизить временные и энергетические затраты на изготовление элемента. Однако реализация совместного спекания — непростая задача, требующая подбора разнородных материалов с одинаковой усадкой во время спекания. В работе отработан метод создания микротрубчатых ТОТЭ (МТ-ТОТЭ), с использованием полимер-керамических пленок путем их совместного спекания.

В качестве исходных материалов были использованы нанопорошки $Zr_{0,84}Y_{0,16}O_{2-\delta}$ (YSZ), $Ce_{0,73}Gd_{0,27}O_{2-\delta}$ (GDC), полученные лазерным испарением, и NiO, полученный электровзрывом проволоки. Кроме того, для формирования несущего анодного слоя использо-

вался микронный коммерческий порошок NiO и рисовый крахмал в качестве порообразователя.

Изучена кинетика спекания образцов электролитных материалов YSZ, GDC и композитов на основе Ni O. Гранулометрический состав электролитных материалов варьировали путем отжига при различных температурах (900–1200 °С).

Показано, что увеличение размера частиц YSZ и GDC сдвигает начало их спекания в высокотемпературную область, но не сильно влияет на скорость усадки. Основное влияние на кинетику спекания анодных композитов оказывает гранулометрический состав порошка электролита. Исследовано влияние порообразователя на микроструктуру несущего анодного слоя. По результатам экспериментов были найдены наиболее подходящие по усадке материалы электролита и анодных слоев. Получены бездефектные полуэлементы градиентный анод-электролит YSZ совместным спеканием при 1200 °С. На основе полученных полуэлементов были сформированы МТ-ТОТЭ путем последовательно нанесения и припекания при 1450 и 1200 °С слоев GDC и $\text{La}_{0,6}\text{Sr}_{0,4}\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{0,8}\text{O}_{3-\delta}$ (LSCF), соответственно.

Максимальная удельная мощность полученных МТ-ТОТЭ составляла 184 мВт/см² при 850 °С. Выяснено, что основной вклад во внутреннее сопротивление МТ-ТОТЭ оказывают диффузионные потери в градиентном аноде.

Кислородно-ионный и протонный транспорт твёрдого раствора $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{ScZnO}_{5,5-0,5x}$

С. П. Пачина¹, К. Г. Белова^{1,2},
Д. В. Корона^{1,2}, И. Е. Анимица^{1,2}

¹Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

²Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН

Материалы, обладающие одновременно высокой ионной проводимостью и химической стабильностью, могут быть использованы в качестве твёрдых электролитов для ТОТЭ, в которых водород используется для получения электрической энергии. Известно, что термическая стабильность и высокая протонная проводимость взаимоисключают друг друга в традиционных перовскитах, допированных акцепторной примесью [1]. С данной точки зрения перспективными для изучения считаются материалы на основе перовскитов с общей формулой $\text{A}_2^{3+}\text{BB}'\text{O}_{5,5}$, которые содержат в В-подрешетке два сорта катионов.

Ранее нами был синтезирован новый перовскит $\text{La}_2\text{ScZnO}_{5,5}$, на основе которого получен твёрдый раствор с общей формулой $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{ScZnO}_{5,5-0,5x}$. Твердофазный синтез образцов проводили на воздухе в температурном интервале 700–1300 °С. С помощью РФА установлено, что область гомогенности ограничена составом 15 мол.%. Полученные образцы кристаллизуются в ромбической симметрии с пр. гр. *Pbnt*.

Для разделения общей проводимости на парциальные вклады (ионный и электронный) электропроводность исследовали при варьировании парциального давления кислорода. Кислород-ионная проводимость образца $\text{La}_{1,9}\text{Sr}_{0,1}\text{ScZnO}_{5,45}$ преобладает над дырочной во всем исследуемом интервале температур как в сухой, так и во влажной атмосфере. Кислородно-ионная проводимость образца $\text{La}_{1,85}\text{Sr}_{0,15}\text{ScZnO}_{5,425}$ в сухой атмосфере преобладает при температурах ниже 850 °С, а во влажной атмосфере кислород-ионная проводимость преобладает над дырочной во всем исследуемом интервале температур.

Для изучения процессов гидратации и определения степени гидратации, были использованы методы термогравиметрии, дифференциальной сканирующей калориметрии и масс-спектрометрии. Для исследованных твердых растворов подтверждена способность к гидратации и образования протонных носителей тока.

Литература

1. *Tauer T. A. A First Principles Investigation of Proton Chemistry in Perovskite-Type Oxides* : diss. University of Colorado at Boulder, 2013. 204 p.

Оценка сорбционных характеристик оксидов сурьмы (+5) и молибдена (+6)

Е. А. Пашенцева, Л. Ю. Коваленко

Челябинский государственный университет

Оксиды сурьмы (+5) и молибдена (+6) имеют перспективы применения как компоненты водород-воздушных топливных элементов. Актуальная задача — исследование поверхностного слоя данных оксидов.

В связи с этим целью работы являлось определение адсорбционных характеристик оксидов сурьмы (+5) и молибдена (+6).

Адсорбцию анионного красителя конго красного изучали по известной методике. К навескам оксидов добавляли раствор NaOH (0,5н) для установления $\text{pH} = 5$, затем приливали раствор красителя с заданными концентрациями. После центрифугирования отделяли раствор над осадком и измеряли оптическую плотность на спектрофотометре ПЭ-5400УФ. Предварительно был построен градуировочный график при максимуме светопоглощения — 500 нм; оптическую плотность исследуемых растворов определяли при такой же длине волны.

Вид изотерм адсорбции красителя конго красного для образцов отличается (рис. 1).

Кривая адсорбции на Sb_2O_5 вышла на постоянные значения. Такой вид адсорбции свидетельствует о сорбенте с малой долей внешней поверхности. Получение экспериментальных значений при больших концентрациях раствора конго красного при сорбции на MoO_3 затруднено из-за ограничений по значениям оптической плотности прибора. В изученном концентрационном диапазоне вид кривой сорбции MoO_3 свидетельствует о полимолекулярной адсорбции на макропористом сорбенте. В докладе будут показаны возможные механизмы сорбции конго красного на данных оксидах.

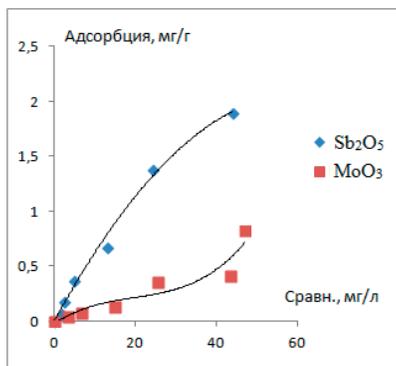


Рис. 1. Изотермы адсорбции конго красного на оксидах сурьмы (+5) и молибдена (+6)

Синтез компонентов твердооксидных топливных элементов в реакциях горения с генерированием зарядов и возможности технологического использования процессов

А. Е. Пермякова, Т. Ю. Жуланова,

О. В. Русских, А. А. Остроушко

Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

К числу ключевых операций изготовления рабочих сборок твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) относятся процессы спекания керамических компонентов, образующих проводящую мембрану, анод и катод. В технологическом цикле планарных и аксиальных ТОТЭ возможно использование последовательного формирования мембраны с дальнейшим припеканием электродных

материалов или композиций. Вместе с тем имеется принципиальная возможность сократить время и затраты энергии на реализацию указанных операций путем совмещения процесса спекания двух или даже всех трех компонентов рабочей сборки ТОТЭ, предварительно сформованных, например, шликерным методом. Для достижения этой цели необходимо максимально сблизить температурный ход дилатометрических кривых спекания разных по составу и структуре компонентов ТОТЭ.

Физико-химическое явление, которое может быть использовано для упомянутого выше упрощения технологии ТОТЭ, — это обнаруженное нами генерирование электрических зарядов [1] при синтезе сложнооксидных материалов в ходе горения нитрат-органических прекурсоров (Solution Combustion Synthesis — SCS). Установлено, что при проведении SCS в прекурсорах генерируются заряды, создающие разность потенциалов «земля — прекурсор» до сотен вольт. Заряды возникают при удалении в окружающую среду ионизированных молекулярных группировок. Процесс генерирования зарядов является управляемым за счет целенаправленного выбора условий синтеза: состава органических компонентов прекурсоров и их относительного количества. В условиях высокой интенсивности генерирования зарядов за счет электростатического отталкивания сложнооксидных частиц возникает большой запас избыточной поверхностной энергии, расходуемой при спекании материала. Такие порошки [1] имеют температуру интенсивного спекания T_s , существенно более низкую по сравнению с порошками, полученными при синтезе, не сопровождающемся генерированием зарядов или с их низкими значениями. Снижение или повышение T_s достигает 300 градусов, это позволяет «подогнать» друг к другу T_s разных компонентов ТОТЭ.

Литература

1. *Ostroushko A. A., Maksimchuk T. Y., Permyakova A. E., Russkikh O. V.* Determinative Factors for the Thermochemical Generation of Electric Charges upon Combustion of Nitrate–Organic Precursors for Materials Based on Lanthanum Manganite and Cerium Dioxide // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2022. № 67 (6). P. 799–809.

Исследование влияния температуры обжига гидратированного диоксида циркония на спекание керамических заготовок

Д. О. Поливода^{1,2}, Р. М. Бастриков^{1,2}, М. А. Машковцев^{1,2}

¹Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН

²Уральский Федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

В настоящее время множество исследований посвящено области твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) [1, 2]. Диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия, широко используют в качестве электролита ТОТЭ [1]. Одной из проблем, решаемых научным сообществом, является снижение температуры спекания электролита [2].

В данной работе гидратированный диоксид циркония был синтезирован методом КДО с помощью аммиака при поддержании постоянного значения $pH = 8$ из азотнокислого циркония с предварительной полимеризацией и сульфатизацией раствора. После осаждения осадок фильтровали, промывали и сушили. Сушеный порошок обжигали при температурах 900, 1000, 1100 и 1200 °С, затем прессовали и спекали на приборе DIL 402 (Netzsch) со скоростью 5 °С/мин. Результаты усадки образцов приведены на рис. 1.

Обнаружено, что при уменьшении температуры обжига порошка температура спекания керамических заготовок снижается, однако уровень усадки увеличивается. Таким образом, уменьшая температуру обжига порошка, можно снизить температуру спекания керамики.

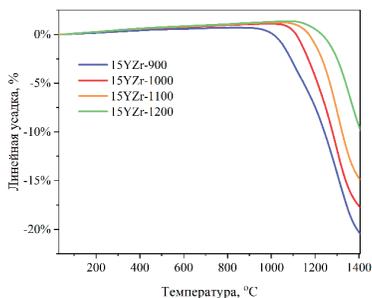


Рис. 1. Спекание керамических заготовок

Литература

1. Screen-printing inks for the fabrication of solid oxide fuel cell films: A review / M. R. Somalu et al. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 75. P. 426–439.
2. Panthi D., Hedayat N., Du Y. Densification behavior of yttria-stabilized zirconia powders for solid oxide fuel cell electrolytes // Journal of Advanced Ceramics. 2018. Vol. 7. P. 325–335.

Синтез и физико-химические свойства слоистых перовскитов $BaLaInO_4$, полученных методом изовалентного допирования

**Д. Н. Пьянков¹, Е. В. Абакумова^{1,2}, А. О. Бедарькова^{1,2},
Н. А. Тарасова^{1,2}, И. Е. Анимица^{1,2}**

¹Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

²Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН

Электрохимические устройства играют ключевую роль в современных технологиях, однако разработчики сталкиваются с некоторыми трудностями, такими как сложность производства и необходимость повышения эффективности. Исследования в области материалов для электролитов и электродов, а также разработка новых технологий производства имеют стратегическое значение для улучшения доступности и эффективности электрохимических устройств. Перспективы использования этих устройств в автомобильной промышленности, аэрокосмической отрасли и других областях подчеркивают их значимость для будущих технологий.

В качестве материала электролита твердооксидных топливных элементов могут быть использованы сложные оксиды со структурой Раддлесдена — Поппера, обладающие высокими значениями ионной (O^{2-} , H^+) проводимости. Преимуществом использования таких протонопроводящих сложных оксидов является понижение рабочих температур до 300–500 °С.

Слоистые перовскиты, обладающие общей формулой $AA'_nB_nO_{3n+1}$, представляют собой уникальные материалы, где А — щелочноземельный металл, такой как барий или стронций, А' — редкоземельный металл, например лантан или неодим, а В — трехвалентный металл, вроде индия или скандия. Исследования протонных проводников с монослойной перовскитной структурой $AA'BO_4$ ($n = 1$), основанных на соединениях типа $BaNdInO_4$ и $SrLaInO_4$, показали их уникальную способность к протонному переносу. Особое внимание заслуживает $BaLaInO_4$, кристаллизующийся в орторомбическую сингонию. Проведенные исследования показали, что допирование катионных подрешеток этого материала донорными и акцепторными элементами приводит к значительному увеличению протонной и кислородно-ионной проводимости на порядки. Это свидетельствует о высоком потенциале развития сложнооксидных систем с перовскитной структурой для создания новых протонпроводящих материалов. В настоящей работе было проведено изовалентное допирование Ва-подрешетки $BaLaInO_4$ ионами Ca^{2+} , пройдена рентгенофазовая аттестация материалов, а также исследованы физико-химические свойства допированных слоистых перовскитов.

Исследование свойств медно-никелевых покрытий

Д. Д. Рыжикова¹, А. А. Чернышев^{1,2}, А. Б. Даринцева¹

¹Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

²Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН

В настоящее время все больше возрастает потребность в чистом водороде. Электролитический способ получения газообразного водорода щелочным электролизом водных растворов позволяет получать чистый газ. Для снижения себестоимости производства необходимо расширять исследование новых электродных материалов — возможных кандидатов катализаторов реакции разложения воды. В данном исследовании необходимо получить покрытие,

которое обладает низким значением перенапряжения выделения водорода, высокой пористостью и механической устойчивостью. Металлы платиновой группы обладают низким значением перенапряжения выделения водорода, но высокая стоимость сдерживает их применение. Вторая группа металлов — это металлы железной группы, они имеют невысокое перенапряжение выделения водорода.

Медно-никелевые покрытия получали из электролитов, содержащих 0,5 М NiSO₄ + 0,001 М CuSO₄ + 1,5 М H₂SO₄ + 1 М HCl в гальваностатическом режиме электролиза с использованием анодов ОРТА, композит осаждали на стальную пластину AISI304 площадью 1 см². Электроды подключали к источнику тока RIGOL DP 832. Был проведен планированный эксперимент 2² по установлению влияния продолжительности синтеза осадка (x_1) и плотности тока осаждения (x_2) на микропористость осадка $\beta_{\text{микро}}$ (y). Составляли матрицу планирования эксперимента (табл. 1). Опыт 5 — средние значения выбранных переменных, исследования в данных условиях проводили три раза.

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента

№ опыта	x_0	x_1	x_2	$x_1 \cdot x_2$	y	$t, \text{с}$	$i, \text{А/см}^2$	$\beta_{\text{микро}}$
1	+	+	-	-	y_1	0	0,9	40,5
2	+	-	+	-	y_2	0	2,1	58,6
3	+	+	+	+	y_3	0	2,1	11,1
4	+	-	-	+	y_4	0	0,9	40,1
5						300	1,5	24,6

В результате получено регрессионное уравнение, описывающее влияние времени и плотности тока на микропористость покрытий: $y = 37,6 - 11,8x_1 - 12,0 x_1x_2$. Согласно полученному уравнению для получения покрытий, обладающих высокой микропористостью, необходимо уменьшать время получения покрытий Ni-Cu.

.....
**Синтез и исследование транспортных свойств
сложных оксидов со структурой перовскита
на основе алюмината и галлата церия CeMO_3
($M = \text{Al, Ga}$)**

А. О. Смелов¹, Д. В. Корона^{1,2}, И. Е. Анимица^{1,2}

¹*Уральский федеральный университет*

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

²*Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН*
.....

Сложные оксиды со структурой перовскита на основе алюмината и галлата церия могут оказаться перспективными материалами для водородной энергетики. Они могут выступать в качестве анодных материалов, применяемых в восстановительной атмосфере в твердооксидном топливном элементе.

В настоящей работе синтез сложных оксидов проводился глицин-нитратным методом сжигания раствора в инертной атмосфере, аттестация полученных веществ проводилась рентгенофазовым анализом, проводимость исследовалась методом электрохимического импеданса.

Важной задачей при синтезе сложных оксидов на основе CeMO_3 ($M = \text{Al, Ga}$) является сохранением у церия степени окисления (III), для этого этап сжигания в глицин-нитратном методе синтеза производится в инертной атмосфере, чтобы предотвратить окисление церия. Для этого смесь, получаемая после упаривания раствора исходных веществ, переносилась в тигель. В дальнейшем тигель помещался в кварцевую трубку, продуваемую азотом, в которой происходило сжигание. Также последующие отжиги, сложных оксидов проводились в инертной атмосфере.

В дальнейшем проводимость полученных сложных оксидов исследовалась методом электрохимического импеданса при различных температурах, в инертной атмосфере и на воздухе.

Компьютерное моделирование теплогидравлических процессов при плавлении свинца в тигле

А. А. Соболева, Е. С. Постановова, В. А. Климова

Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

В настоящее время одним из перспективных направлений атомной энергетики является разработка и создание быстрых реакторов со свинцовым теплоносителем [1]. Для изучения особенностей свинцового теплоносителя на кафедре «Атомные станции и ВИЭ» УрФУ разрабатывается установка по плавлению свинца, которая представляет собой стальной цилиндрический тигель с крышкой-фланцем, с электронагревателем из нихромовой проволоки. Тигель помещен в кирпичную конструкцию для безопасности и теплоизоляции.

При проектировании установки мы столкнулись с проблемой расчета параметров электронагревателя и выбора толщины и размеров тепловой изоляции. Поэтому было решено провести компьютерное моделирование процесса разогрева тигля со свинцом в приложении SolidWorks Flow Simulation. Компьютерная модель (в разрезе) показана на рис. 1.

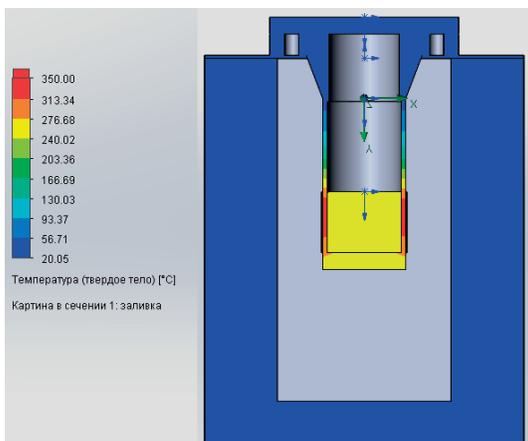


Рис. 1. Поле температур в модели установки

В ходе вычислительного эксперимента рассмотрены варианты электронагреватель мощности нагревателя, определена доля свинца в общем количестве энергии, вычислены температуры на поверхности изоляции и фланца, а также потери тепла в окружающую среду. Результаты моделирования будут использованы при создании экспериментальной установки.

Литература

1. *Габараев Б. А., Орлов А. И.* Быстрые реакторы с тяжелым жидкотеплоносителем: особенности и состояние разработки // Изв. Рос. академии наук. Энергетика. 2022. № 3. С. 29–48.

Исследование влияния стадии промывки при масштабировании процесса синтеза термостабильного оксида алюминия

П. А. Солодовникова, М. В. Угрюмова, Т. Е. Телегин

*Уральский федеральный университет
им. первого Президента Б. Н. Ельцина*

Оксидные материалы, такие как термостабильный оксид алюминия, используются в качестве носителей катализатора в широком ряду промышленных способов. Носитель автомобильного катализатора обеспечивает поверхность, на которой диспергируется каталитически активный материал, и может также придавать катализатору другие свойства, такие как физическая и химическая стойкость.

При синтезе термостабильного оксида алюминия из алюмината натрия важным является устранение ионов натрия для предотвращения их негативного влияния на удельную поверхность материала, а именно — катастрофического ее снижения ввиду образования сопутствующих соединений натрия. При масштабировании технологии и синтезе полупромышленной партии в укрупненном размере важно соблюдать условия промывки, действующие для лабораторного образца, т. е. обеспечить удаление ионов натрия в та-

кой же степени путем добавления оптимального с экономической точки зрения количества промывного раствора, при этом важно определить на практике возможную толщину слоя эффективно промываемого осадка.

Лабораторный образец в количестве 150 г и укрупненный образец в количестве 1 кг были синтезированы путем контролируемого двухструйного осаждения гидроксида алюминия из раствора алюмината натрия раствором азотной кислоты. Полученный осадок фильтровали и промывали на фильтре расчетным количеством воды с последующими сушкой при 120 °С и обжигом при 900 °С с получением оксида алюминия. Содержание натрия определяли в высушенных образцах путем добавления раствора сульфата магния к навеске и выделении ионов натрия в раствор с последующим измерением потенциала раствора ионоселективным электродом, а также путем рентгенофлуоресцентного анализа образцов после обжига.

**Влияние концентрации спекающей добавки
на микроструктуру и транспортные свойства
перовскита $\text{BaSn}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{O}_{3-\delta}$**

**Г. Н. Старостин^{1,2}, И. А. Старостина^{1,2},
М. Т. Акопян^{1,2}, Д. А. Медведев^{1,2}**

¹Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

²Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН

Барий-содержащие перовскиты (BaCeO_3 , BaZrO_3 , BaHfO_3 , BaSnO_3) в настоящее время являются наиболее изучаемыми электролитами для протонпроводящих твердооксидных электрохимических устройств. Для достижения высокой производительности твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) при пониженных температурах такие электролиты должны использоваться в виде тонких газоплотных пленок. Чтобы исключить возможные взаимо-

действия (взаимная диффузия, механические напряжения) между функциональными слоями ТОТЭ, температура совместного спекания электролита с другими функциональными материалами ячейки должна быть как можно ниже. Использование спекающих добавок (СД), которые образуют жидкую фазу при спекании и значительно улучшают диффузионные процессы, позволяет достичь необходимой плотности таких материалов при минимально возможной температуре спекания. При этом важно исследовать влияние различных спекающих добавок на транспортные и микроструктурные свойства керамики, поскольку СД как примесные фазы могут негативно влиять на функциональные свойства протонпроводящих электролитов.

В данной работе керамические материалы $\text{BaSn}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{O}_{3-\delta} + x$ масс.% CuO (где $x = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 2$) были получены методом твердофазного синтеза с использованием спекающей добавки CuO при $1500\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 5 ч. Для аттестации керамических образцов использовали методы рентгенофазового анализа и сканирующей электронной микроскопии. Транспортные свойства полученных материалов исследованы методом электрохимической импедансной спектроскопии (ЭИС).

На рис. 1 представлены микрофотографии шлифов керамики $\text{BaSn}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{O}_{3-\delta} + x$ масс.% CuO . Согласно данным электронной микроскопии, материал с 0,5 масс.% CuO имеет микроструктуру

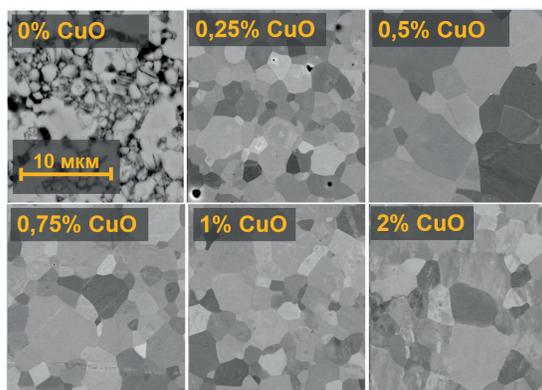


Рис. 1. Микрофотографии шлифов керамики $\text{BaSn}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{O}_{3-\delta} + x$ масс.% CuO (где $x = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 2$)

с наибольшим размером зерна. В то же время этот образец обладает наивысшими значениями объемной, зернограничной и общей электропроводности среди всего концентрационного ряда СД (рис. 2), что позволяет провести корреляции между составом получаемой керамики и ее транспортными свойствами.

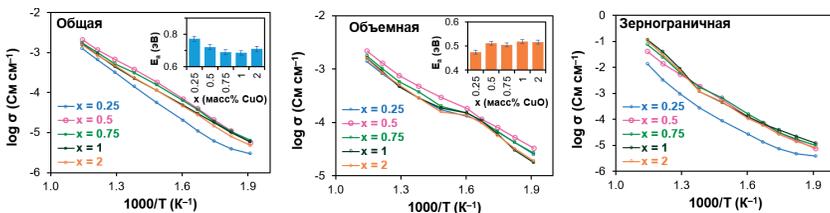


Рис. 2. Общая, объемная и зернограничные проводимости для керамических образцов $\text{BaSn}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{O}_{3-\delta} + x$ масс.% CuO (где $x = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 2$), определенные методом ЭИС

Таким образом, микроструктура является основным фактором, регулирующим электропроводность плотной керамики, и образец с 0,5 масс.% CuO обладает наибольшим размером зерен наряду с наивысшей проводимостью.

Транспортные свойства In -допированных станнатов бария при высоких температурах

И. А. Старостина^{1,2}, Г. Н. Старостин^{1,2},

М. Т. Акоюн^{1,2}, Д. А. Медведев^{1,2}

¹Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

²Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН

Акцепторно-допированные станнаты бария представляют собой сложные оксиды со структурой перовскита ABO_3 и являются протонными проводниками во влажных атмосферах, что позволяет рассматривать их в качестве функциональных материалов для протонно-керамических топливных элементов (ПКТЭ). В настоя-

щей работе твердофазным методом синтеза получены однофазные плотные керамические образцы составов $\text{BaSn}_{1-x}\text{In}_x\text{O}_{3-\delta}$ ($0 \leq x \leq 0,4$) с использованием 0,5 масс.% CuO в качестве спекающей добавки. Транспортные свойства исследованы четырехзондовым методом измерения проводимости на постоянном токе: а) в широком диапазоне изменения парциального давления кислорода ($10^{-19} \leq p\text{O}_2 \leq 0,21$ атм) при 700, 800 и 900 °С; б) в атмосферах сухого и влажного воздуха ($p\text{H}_2\text{O} = 0,001$ атм и 0,03 атм, соответственно), влажного азота и влажного водорода ($p\text{H}_2\text{O} = 0,03$ атм) в диапазоне температур от 500 до 900 °С.

Согласно полученным данным, In-допированные станнаты бария являются смешанными ионно-электронными проводниками. В окислительной области значительный вклад в общую проводимость вносят электронные дырки, в восстановительной области — электроны. Стоит отметить, что электронная проводимость n -типа выявлена даже для сильнодопированных образцов ($x \geq 0,2$). Такое поведение нетипично для станнатов бария, допированных другими акцепторными катионами, например иттрием или скандием, для которых характерно отсутствие электронной проводимости в восстановительных условиях при концентрации допанта более 20 мол.% [1]. В области средних значений $p\text{O}_2$ ($-12 \leq \log p\text{O}_2 \leq -5$) формируется «ионное плато». Ионная проводимость увеличивается с ростом концентрации допанта, достигая 9,5; 3,6 и 1,4 мСм · см⁻¹ при 900, 800 и 700 °С соответственно. При высоких температурах значения кажущейся энергии активации (E_a) составляют ~0,8 эВ, что указывает на реализацию преимущественно кислород-ионного транспорта. При понижении температуры значения E_a снижаются до ~0,5 эВ, характерных для переноса протонов.

Литература

1. Ionic and electronic transport of dense Y-doped barium stannate ceramics for high-temperature applications / I. A. Zvonareva et al. // Journal of Power Sources. 2023. Vol. 565. P. 232883.

.....
**Лантан-барий содопирование как способ
оптимизации свойств никелитов празеодима
в качестве воздушных электродов твердооксидных
топливных элементов***

Тарутин А.П.^{1,2}, Д. А. Медведев^{1,2}

¹Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

²Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН

.....

Топливные элементы на протонпроводящих электролитах (ТОТЭ-Н⁺) на текущий момент являются одними из наиболее перспективных устройств для водородной энергетики. Особенностью ТОТЭ-Н⁺, по сравнению с их кислородпроводящими аналогами, является их относительно невысокая рабочая температура (500–700 °С), что благоприятно отражается на сроке их службы. Однако снижение температуры приводит к замедлению кинетики электрохимических процессов и осложнению ионной диффузии через объем электродных слоев. Поэтому внимание исследователей направлено на получение высокоактивных электродных материалов, сохраняющих приемлемую электрохимическую активность при пониженных температурах. Примером таких материалов является семейство сложных оксидов на основе Pr₂NiO_{4+δ}. Их привлекательные функциональные свойства делают их перспективными электродными материалами. Однако при совместном использовании катодных материалов на основе Pr₂NiO_{4+δ} с электролитами на основе Ba(Сe, Zr)O_{3-δ} протекает диффузия катионов Ba²⁺, что приводит к появлению таких низкопроводящих фаз, как NiO, Pr₂BaNiO₅, и ZrO₂, что негативно отражается на долговечности этих устройств. Предварительное внедрение бария в структуру Pr₂NiO_{4+δ} позволяет существенно замедлить данный процесс, а также увеличить общую проводимость за счет увеличения концентрации электронных дырок [1]. Дальнейшая оптимизация функциональных свойств никелитов празеодима возможна благодаря изовалентному допированию

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 21–73–10004).

лантаном. Это может обеспечить улучшение термомеханических и электрохимических свойств без значительного влияния на другие характеристики.

Целью настоящей работы является оптимизация функциональных свойств $\text{Pr}_{1,8}\text{Ba}_{0,2}\text{NiO}_{4+\delta}$ в качестве воздушных электродов ТОТЭ за счет внедрения лантана в подрешетку празеодима. Однофазные образцы $\text{Pr}_{1,8-x}\text{La}_x\text{Ba}_{0,2}\text{NiO}_{4+\delta}$ (где $x = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$) были получены цитрат-нитратным методом синтеза с последующим двухстадийным отжигом при температуре 1050 °С. Для всех полученных образцов изучали их кристаллическую структуру (РФА), общую проводимость в воздушной среде (четырёхзондовый метод), термомеханическое поведение (дилатометрия), электрохимическую активность по отношению к кислороду (электрохимическая импедансная спектроскопия на симметричных ячейках).

Все полученные образцы являются однофазными и обладают слоистой структурой Раддлсдена — Поппера 1-го порядка. Все керамические образцы обладают также приемлемыми коэффициентами термического расширения ($\sim 13 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), слабо зависящими от концентрации лантана. Путем замещения празеодима лантаном удалось увеличить общую проводимость материалов от $\sim 100 \text{ См} \cdot \text{см}^{-1}$ для $x = 0$ до $\sim 140 \text{ См} \cdot \text{см}^{-1}$ для образца $x = 0,6$. Кроме того, наблюдалось снижение поляризационных сопротивлений электродов на основе $\text{Pr}_{1,8-x}\text{Ba}_{0,2}\text{La}_x\text{NiO}_{4+\delta}$. Так, для образца $x = 0$ поляризационное сопротивление при 600 °С составляет $\sim 1,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$, а для образца $x = 0,6$ в аналогичных условиях снижено на $\sim 15\%$ (рис. 1). Таким образом было установлено, что со-допирование лантаном и барием является перспективным методом оптимизации функциональных свойств никелитов празеодима для их дальнейшего применения в качестве воздушных электродов ТОТЭ-Н⁺.

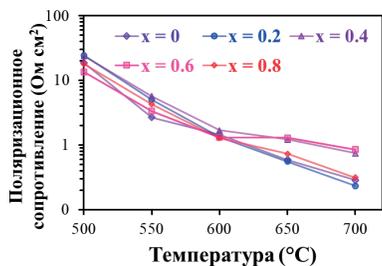
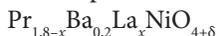


Рис. 1. Температурные зависимости поляризационного сопротивления симметричных ячеек с электродами составов



Литература

1. Ba-doped $\text{Pr}_2\text{NiO}_{4+\delta}$ electrodes for proton-conducting electrochemical cells. Part 1: Structure, mechanical, and chemical properties / A. P. Tarutin, N. A. Danilov, A. A. Kalinin, A. A. Murashkina et al. // International Journal of Hydrogen Energy. 2023. № 48. 22531–22544.

Перспективные электроды для ТОТЭ на основе модифицированного феррита бария: аспекты химической устойчивости*

Л. Р. Тарутина^{1,2}, А. П. Тарутин^{1,2}, И. А. Старостина^{1,2},
Г. Н. Старостин^{1,2}, Д. А. Медведев^{1,2}

¹Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН
²Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

Твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ) привлекают большое внимание по причине возрастающего спроса на чистую и возобновляемую энергию. Коммерческое использование популярных кислород-ионных ТОТЭ ограничено из-за дороговизны функциональных составляющих и высоких рабочих температур. Актуальным становится использование среднетемпературных протонпроводящих ТОТЭ–H⁺. Остается актуальной проблемой поиск катодных материалов для ТОТЭ–H⁺, сочетающих приемлемые значения термического коэффициента линейного расширения, химическую стабильность и низкие поляризационные сопротивления. В представленной работе всесторонне исследуется химическая стабильность перспективных электродных материалов состава $\text{BaCe}_{0,7-x}\text{Fe}_x\text{Zr}_{0,2}\text{Y}_{0,1}\text{O}_{3-\delta}$ ($x = 0,5; 0,6; 0,7$; BCZYFx) в агрессивных средах, приближенных к рабочим условиям. Кроме того, исследовано хими-

* Работа выполнена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов № СП-210.2022.1.

ческое взаимодействие этих воздушных электродов с современным протонпроводящим электролитом $\text{BaCe}_{0,5}\text{Zr}_{0,3}\text{Y}_{0,1}\text{Yb}_{0,1}\text{O}_{3-\delta}$ (BCZYYb).

Методом цитрат-нитратного сжигания были получены как порошки электродных, так и электролитного материалов. Согласно результатам рентгенофазового анализа (РФА), полученные порошки являются однофазными. Исследование химической совместимости проводили путем смешивания порошков электролита и электрода в массовом соотношении 50 : 50 с дальнейшим отжигом при 1200, 1250 и 1350 °С в течение 10 ч. Аттестация методом РФА отожженных при 1200 °С смесей указывает на то, что химического взаимодействия между фазами BCZYYb и BCZYFх не происходит. Однако после отжига при повышенных температурах (1250 и 1350 °С) на дифрактограммах смесей наблюдается наличие рефлексов примесных фаз. Несмотря на это, представленные температуры всё еще в значительной степени превышают температуры припекания и эксплуатации исследуемых электродов. Химическую устойчивость воздушных электродов изучали путем их длительной выдержки при 1100 °С в агрессивных средах, а именно: высокой (70 %) влажности, углекислого газа и водорода. Последующие исследования методами РФА, сканирующей электронной, ИК- и Рамановской спектроскопий указывают на приемлемую химическую устойчивость электродов BCZYFх к вышеперечисленным атмосферам.

Влияние способа синтеза оксида алюминия на его удельную поверхность

Т. Е. Телегин, П. А. Солодовникова, М. В. Угрюмова

*Уральский федеральный университет
им. первого Президента Б. Н. Ельцина*

Основным материалом, получившим применение и широкое использование в качестве носителя драгоценных металлов в составе трехмаршрутного катализатора, является оксид алюминия. Искусственно синтезированный оксид алюминия γ -модификации обладает

развитой поверхностью и пористостью: в зависимости от способа получения оксида значения параметров удельной поверхности и объема пор достигают свыше $300 \text{ м}^2/\text{г}$ и $10,0 \text{ см}^3/\text{г}$ соответственно. Термостабильность оксида алюминия обеспечивается добавкой оксида лантана в количестве от 1 до 6 %.

В ходе работ были синтезированы образцы оксида алюминия с добавкой 3 %-го оксида лантана различными способами: путем механического смешения и оксидов алюминия, синтезированного по методу Байера, с оксидом лантана; путем прямого и обратного осаждения раствором аммиака гидроксидов алюминия с добавлением нитрата лантана в исходный раствор нитрата алюминия; путем пропитки по влагоемкости гидроксида алюминия, осажденного по методу Байера и высушенного при температуре $120 \text{ }^\circ\text{C}$; путем добавления избытка растворителя к раствору гидроксида алюминия, полученного по методу Байера; методом контролируемого двухструйного осаждения. Удельную поверхность и пористость образцов исследовали методом адсорбции/десорбции низкотемпературного азота. Полученные значения представлены на рис. 1.

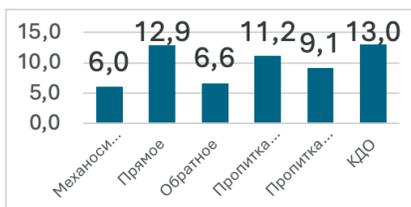


Рис. 1. Значения удельной поверхности образцов, синтезированных различными способами

Электропроводность вольфраматов $\text{Ln}_{10}\text{W}_{22}\text{O}_{81}$ (Ln-La, Nd, Ce)*

А. А. Тушкова, А. Ф. Гусева, Н. Н. Пестерева

Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

В настоящее время остается актуальной задача получения и применения высокотемпературных кислород-ионных проводников на основе простых и сложных оксидов.

Проведенные ранее исследования показали, что вольфраматы редкоземельных металлов состава $\text{Me}_2(\text{WO}_4)_3$ являются низкопроводящими кислород-ионными проводниками. Транспортные свойства поливольфраматов $\text{Me}_{10}\text{W}_{22}\text{O}_{81}$ до сих пор не исследованы. Поэтому в настоящей работе предпринята попытка синтезировать вольфраматы данного состава и исследовать величину и характер их проводимости.

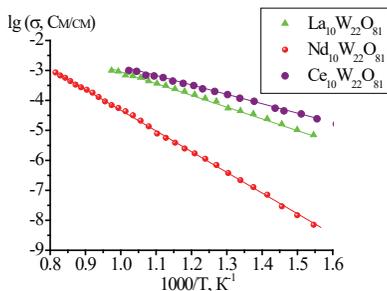


Рис. 1. Температурная зависимость электропроводности вольфраматов $\text{La}_{10}\text{W}_{22}\text{O}_{81}$, $\text{Nd}_{10}\text{W}_{22}\text{O}_{81}$ и $\text{Ce}_{10}\text{W}_{22}\text{O}_{81}$

Вольфраматы $\text{La}_{10}\text{W}_{22}\text{O}_{81}$, $\text{Nd}_{10}\text{W}_{22}\text{O}_{81}$ и $\text{Ce}_{10}\text{W}_{22}\text{O}_{81}$ синтезированы по керамической технологии, аттестованы методом рентгенофазового анализа, а их электропроводность измерена методом электрохимического импеданса. Политермы проводимости представлены на рис. 1. Для всех вольфраматов наблюдали линейную зависимость логарифма электропроводности от обратной температуры. Энергия активации электропроводности

* Результаты исследований получены в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (номер проекта 123031300049–8) с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ (рег. № 2968), поддержанным Министерством науки и высшего образования РФ (проект № 075-15-2021-677).

$\text{La}_{10}\text{W}_{22}\text{O}_{81}$ составляет 0,9 эВ, $\text{Nd}_{10}\text{W}_{22}\text{O}_{81}$ – 1,4 эВ, а $\text{Ce}_{10}\text{W}_{22}\text{O}_{81}$ – 0,7 эВ. Электропроводность поливольфрамов $\text{La}_{10}\text{W}_{22}\text{O}_{81}$ и $\text{Nd}_{10}\text{W}_{22}\text{O}_{81}$ оказалась более чем на порядок выше проводимости $\text{La}_2(\text{WO}_4)_3$ и $\text{Nd}_2(\text{WO}_4)_3$, что делает перспективным дальнейшее исследования их транспортных свойств.

Влияния помола порошка стабилизированного диоксида циркония на распределение пор по размерам

М. И. Тюшняков^{1,2}, Р. М. Бастриков^{1,2}, Д. О. Поливода^{1,2},

М. А. Машковцев^{1,2}, Н. А. Тарасова^{1,2}

¹Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

²Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН

Одним из перспективных направлений решения проблем обеспечения электрической энергией потребителей в различных, в том числе и сложных условиях, являются топливные элементы (ТЭ), в качестве электролита в ТЭ может применяться керамика на основе диоксида циркония.

Целью данной работы является исследование влияния помола порошка стабилизированного диоксида циркония на распределение пор по размерам.

Образцы получали методом контролируемого двухструйного осаждения оксинитрата циркония с введением 5,15 массовых процентов иттрия в пересчете на оксид при постоянном значении рН = 8, обжигали при температурах 1100 и 1200 °С с дальнейшим помолом в одинаковых условиях в течение 120 минут.

Как видно на графиках, представленных на рис. 1, помол порошка 1100 °С прошел более эффективно нежели порошка 1200 °С. Образец 1200 °С после помола обладает как крупными порами, так и значительно большей общей объемной долей пор, чем у образца при

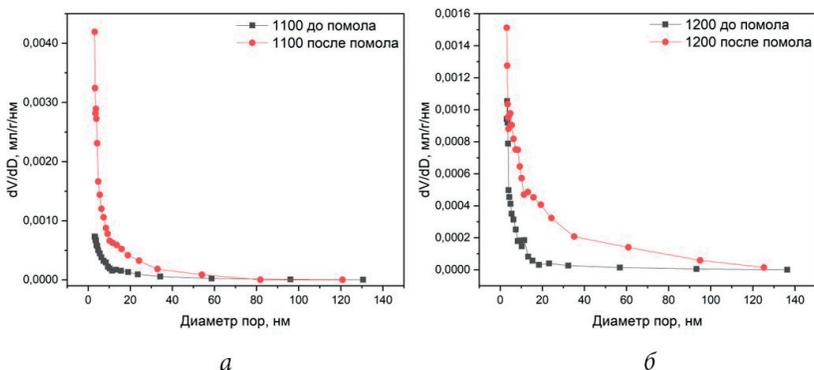


Рис. 1. Распределение пор по размерам порошков ZrO_2 обожженных при температуре 1100 °С (а) и 1200 °С (б) с последующим помолом и без

1100 °С, что оказывает негативное влияние на прочность готовой керамики из стабилизированного диоксида циркония.

.....

Влияние состава прекурсора на свойства оксида алюминия

М. В. Угрюмова, П. А. Солодовникова, Т. Е. Телегин
*Уральский федеральный университет
им. первого Президента Б. Н. Ельцина*

.....

Мировое производство оксида алюминия превышает сотни миллионов тонн в год, в России его ежегодное суммарное производство оценивается в 11 млн тонн. Особую роль оксид алюминия играет в составе трехмаршрутных катализаторов, выступая в роли носителя на своей поверхности драгоценных металлов. Параметры поверхности и пористости оксида алюминия напрямую зависят от способа синтеза материала, и в связи с этим поднимается вопрос о целенаправленном синтезе оксида алюминия с заранее заданными свойствами. Свойства получаемого конечного оксида алюминия

напрямую зависят от свойств его осаждаемого гидроксида, и возможность управления такими важнейшими характеристиками, как текстура поверхности, фазовый и химический состав, является одной из основных задач при разработке методов синтеза оксида алюминия, поэтому контроль параметров синтеза гидроксида алюминия — основная задача производства стабилизированного оксида алюминия.

Образцы оксида алюминия синтезировали методом контролируемого двухструйного осаждения гидроксида алюминия из растворов нитрата алюминия, алюмината натрия и сульфата алюминия с последующими сушкой при 120 °С и обжигом при 900 °С. На рис. 1 приведена зависимость распределения размеров частиц гидроксидов алюминия, синтезированных из трех разных прекурсоров, в конце осаждения. Размер частиц лежит в диапазоне 10 мкм.

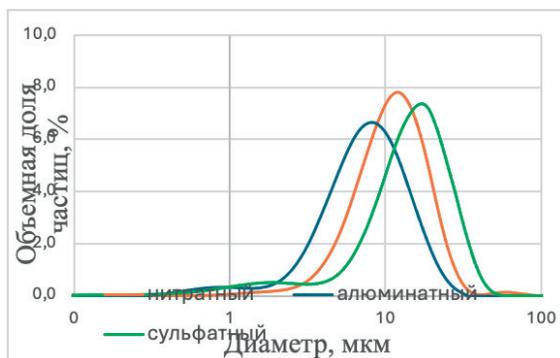


Рис. 1. Распределение размеров частиц гидроксидов в конце осаждения

Гидратация и транспортные свойства гексагонального перовскита $Ba_7Sc_6Al_2O_{19}$ *

К. А. Усачев, Р. Д. Андреев, И. Е. Анимица

Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

Современный мир сосредоточен на изучении и внедрении альтернативных, эффективных и экологических чистых источников энергии, среди которых водород занимает одну из лидирующих позиций. В рамках реализации концепции «Водородной энергетики» получение энергии при использовании водорода как топлива в твердооксидных топливных элементах (ТОТЭ) является наиболее перспективным направлением. В таких электрохимических устройствах материалом электролита может выступать соединение с высокой протонной проводимостью.

Целью этой работы — синтез и физико-химическое исследование фазы состава $Ba_7Sc_6Al_2O_{19}$, которая относится к гексагональным перовскитам и способна проявлять высокие значения протонной проводимости, за счет когерентного срастания кислород-дефицитных блоков Ba_2ScAlO_5 и катион-дефицитных блоков $Ba_3Sc_4O_9$.

Синтез фазы осуществлен твердофазным методом из исходных $BaCO_3$, Sc_2O_3 и Al_2O_3 . Исходная смесь веществ была подвергнута ступенчатому отжигу в температурном интервале от 800 до 1450 °С с шагом 100 °С и промежуточными перетираниями в агатовой ступке в среде этилового спирта. Методом энергодисперсионного рентгеновского микроанализа был подтвержден катионный состав фазы.

Таблетки, приготовленные на ручном прессе с последующим спеканием при температуре 1450 °С, были использованы для электрических изменений. Установлены $T-p(O_2)$ области доминирования ионного транспорта, определены парциальные электропроводности, энергии их активации, а также рассчитаны ионные числа переноса. Методом электрохимического импеданса определены значения

* Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда и правительства Свердловской области № 24-13-20026.

объемного и зернограничного сопротивления исследуемого образца. Термогравиметрическим методом исследования установлена способность фазы обратимо инкорпорировать 1 моль H_2O на формульную единицу.

Протонная проводимость полисурьмяной кислоты, модифицированной ионами ванадия

Л. С. Утяшева, Л. Ю. Коваленко, В. А. Бурмистров

Челябинский государственный университет

Полисурьмяная кислота (ПСК) состава $\text{H}_2\text{Sb}_2\text{O}_6 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ($2 \leq n \leq 4$), кристаллизующаяся в структурном типе пирохлора (пр.гр.симв. $\text{Fd}3\text{m}$), обладает протонной проводимостью в широком диапазоне температур, поэтому имеет перспективы применения как компонент протонпроводящих мембран. Один из способов изменения протонной проводимости твердых кислот — модификация изо- или гетеровалентными ионами. В связи с этим целью работы являлось определение протонной проводимости ПСК, модифицированной ионами V^{+5} .

В качестве объектов исследования выбраны образцы, в которых ионы V^{+5} (прекурсор — насыщенный раствор NaVO_3): 1) добавлены во время синтеза ПСК методом соосаждения (прекурсор — окисленный HNO_3 раствор SbCl_3); 2) добавлены к свежесинтезированному порошку ПСК; 3) добавлены к Sb_2O_5 (хч). Согласно РФА, образцы однофазны, на рентгенограммах присутствуют набор рефлексов, которые удовлетворяют структуре типа пирохлора. В образцах содержится 5 ± 2 ат.% ванадия (СЭМ JEOL-JSM 6510A, EDS-микроспектроанализатор). Для определения сопротивления образцы помещали в ячейку с двумя графитовыми электродами, измерения проводили при комнатной температуре на импедансметре Elins-Z1000J, диапазон частот 100 Гц — 2 МГц.

По высокочастотной отсечке на ось активных сопротивлений (рис. 1), с учетом геометрии ячейки нашли удельную проводимость образцов.

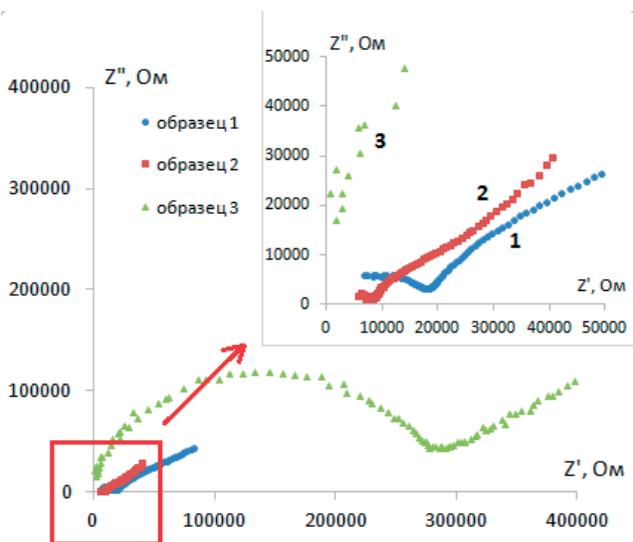


Рис. 1. Нодографы импеданса образцов

Образцы 1 и 2 имеют близкие значения проводимости — $1,2 \cdot 10^{-3}$ См/м и $0,5 \cdot 10^{-3}$ См/м, соответственно, проводимость образца 3 на два порядка ниже — $3,5 \cdot 10^{-5}$ См/м. В докладе будут обсуждаться возможные механизмы транспорта протонов.

.....
**Электрохимическая активность композитных
электродов на основе $Ba_{0,5}Sr_{0,5}Co_{0,8}Fe_{0,2}O_{3-\delta}$
и $Ce_{0,8}Sm_{0,2}O_{2-\delta}$ в контакте с протонпроводящим
электролитом $BaCe_{0,7}Zr_{0,1}Y_{0,1}Yb_{0,1}O_{3-\delta}$ ***
.....

**К. А. Федорова^{1,2}, О. Е. Селиверстова²,
Е. В. Гордеев^{1,2}, Е. П. Антонова^{1,2}**

¹*Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН*

²*Уральский федеральный университет*

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина
.....

Церато-цирконат бария, легированный ионами иттрия и иттербия, является многообещающим протонпроводящим электролитом для среднетемпературных твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) из-за его высокой протонной проводимости. Кобальтит бария-стронция, легированный железом, является перспективным электродным материалом для ТОТЭ благодаря своей высокой электрокаталитической активности в реакции восстановления кислорода. Композитные электроды на основе данного материала с добавлением электролитной составляющей обладают повышенной эффективностью за счет увеличения длины трехфазной границы. В данной работе изучалась электрохимическая активность композитных электродов на основе $Ba_{0,5}Sr_{0,5}Co_{0,8}Fe_{0,2}O_{3-\delta}$ (BSCF) и $Ce_{0,8}Sm_{0,2}O_{2-\delta}$ (SDC) в контакте с протонпроводящим электролитом $BaCe_{0,7}Zr_{0,1}Y_{0,1}Yb_{0,1}O_{3-\delta}$ (BCZY_{Yb}).

Порошковые материалы, из которых затем изготавливали электродные пасты и таблетки несущих электролитов, синтезировали твердофазным методом. Изготавливали три электродные пасты: чистый BSCF; 90 масс.% BSCF и 10 масс.% (BSCF/SDC_90/10) SDC; 80 масс.% BSCF и 20 масс.% SDC (BSCF/SDC_80/20). На основаниях таблетки формировали электродные слои методом трафаретной печати с последующим обжигом при температуре 1150 °С в течение 2 ч. Измерения электрохимического импеданса проводили на приборе

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-23-00238, <https://rscf.ru/project/24-23-00238>.

потенциостате-гальваностате Elins P-40X в температурном интервале 500–700 °С в увлажненной воздушной атмосфере (3 масс.% H₂O).

Установлено, что поляризационное сопротивление полученных электрохимических ячеек увеличивается с увеличением содержания электролитной компоненты в электродах. Значения поляризационного сопротивления электрохимических ячеек при температуре 650 °С составляли 0,93 Ом · см²; 1,13 Ом · см²; 1,28 Ом · см² для электродов BSCF, BSCF/SDC_90/10 и BSCF/SDC_80/20, соответственно. В докладе обсуждаются полученные закономерности.

Разработка графитонаполненных биполярных пластин с высокими эксплуатационными свойствами

Хачатурян А.А.^{1,2}, А. Б. Шахназарова¹, Е. А. Данилов¹

¹АО «Научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита НИИГрафит»

²Российский химико-технологический университет
им. Д. И. Менделеева

Твердополимерные топливные элементы (ТПТЭ), напрямую преобразующие химическую энергию в электрическую с высоким КПД, получили наибольшее распространение среди большого количества известных типов топливных элементов, благодаря высокой энергоэффективности, возможности многократной реализации циклов быстрого старта, а также высокой экологичности [1].

Ключевым компонентом низко- и высокотемпературных ТПТЭ являются биполярные пластины (БП) в особенности графитонаполненные, обеспечивающие равномерное распределение газовых потоков по поверхности газодиффузионных слоев (ГДС), отвод воды и тепла, электрический контакт между компонентами в сборке, а также служащие несущими элементами конструкции.

Графитонаполненные БП изготавливали прессованием предварительно диспергированного и измельченного природного графита

(75–95 масс.%) в изопропанольном (50 масс.%) растворе фенол-формальдегидной смолы (ФФС) при давлении около 40 МПа, температуре 180 °С и времени выдержки 60 минут.

Основные свойства БП с оптимальным содержанием наполнителя (90 масс.%) и их сравнение с требованиями, предъявляемыми к данному типу материалов, приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Эксплуатационные свойства разрабатываемых
графитонаполненных БП**

Сод. графита	Теплопроводность Вт/м · К	Электропроводность, См/см	Прочность при изгибе, МПа	Газопроницаемость, см ³ /см ² · с
Результат	213,6	582,1	41,9	$1,91 \cdot 10^{-15}$
Требования [2]	не менее 8	не менее 100	не менее 25	не более $1,3 \cdot 10^{-14}$

Литература

1. *Gautam R. K., Kar K. K.* Synthesis and properties of highly conducting natural flake graphite/phenolic resin composite bipolar plates for PEM fuel cells // *Advanced Composites Letters*. 2016. Vol. 25, № 4. P. 096369351602500402.

2. *Husby H.* Carbon based coatings for metallic bipolar plates in PEM fuel cells : diss. Norwegian University of Science and Technology, 2013. 127 p.

Исследование влияния полимеризации растворов оксинитрата циркония на процесс агрегации частиц гидроксида циркония в ходе осаждения при постоянном значении рН

Д. В. Хионин^{1,2}, М. А. Домашенков^{1,2},
В. А. Корнеев^{1,2}, М. А. Машковцев^{1,2}

¹Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

²Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН

Целью данной работы было исследование влияния степени полимеризации растворов оксинитрата циркония на процесс агрегации частиц гидроксида циркония методом контролируемого двуструйного осаждения (КДО) при постоянном значении рН = 4. В ходе исследования рассмотрены гранулометрические характеристики частиц гидроксида циркония полученные в процессе осаждения растворов оксинитрата циркония с помощью раствора аммиака методом КДО при рН = 4. Растворы оксинитрата циркония приготовлены с различным мольным соотношением $ZrOCO_3 : HNO_3$: 1 : 2; 1 : 1,8; 1 : 1,6; 1 : 1,4. На рис. 1 представлено изменение среднего массового диаметра частиц в процессе осаждения.

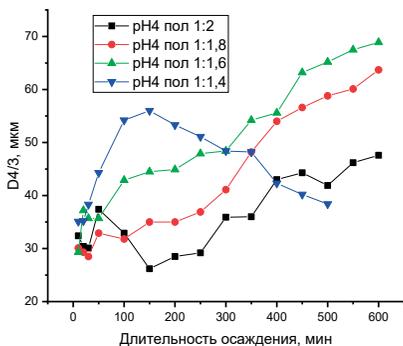


Рис. 1. Изменение среднего массового диаметра частиц в процессе осаждения

У образца 1,4 до 150 минут наблюдается рост среднего диаметра частиц, в дальнейшем идет спад, это связано с тем, что у образца 1,4 значительно увеличилась вязкость суспензии. При мольном соотношении 1,8 привело к существенному росту частиц в процессе осаждения. Максимальное значение среднего диаметра наблюдалось у образца 1,6, равное 68,9 мкм.

Определение кинетических параметров в сложных оксидах в неравновесных условиях методом релаксации давления кислорода*

А. В. Ходимчук^{1,2}, Д. А. Осинкин^{1,2}

¹Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН

²Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

Сложные твердые оксиды, благодаря своим разнообразным физико-химическим свойствам, находят широкое применение в различных областях науки и технологий. Сложные оксиды с высокой ионной и смешанной проводимостями нашли применение в высокотемпературных электрохимических устройствах для генерации электроэнергии и преобразования газов. С точки зрения эффективного использования сложных оксидов важно знать их кинетические параметры, в том числе коэффициенты диффузии и обмена кислородом. Одним из способов определения таких параметров является метод релаксации давления, разработке и тестированию которого посвящен данный доклад.

Исследование кинетики обмена кислорода в неравновесных условиях было проведено методом релаксации давления кислорода на керамических образцах в диапазоне температур 600–850 °С и в интервале давлений кислорода 1–40 мбар. Перед экспериментом по релаксации давления кислорода плотный керамический образец подвергают предварительному обжигу при температуре 850 °С в атмосфере чистого кислорода в течение 24–48 часов для очистки его поверхности от органических загрязнителей. Затем температуру снижают до температуры проведения эксперимента, создают необходимое давление кислорода и ожидают равновесия между газовой фазой и образцом. Критерием наступления равновесия считают постоянство во времени общего давления кислорода в газовом контуре и кварцевом реакторе с исследуемым

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00040, <https://rscf.ru/project/24-19-00040>.

образцом. Далее в газовом контуре, изолированном от кварцевого реактора с образцом, скачкообразно изменяют давление кислорода. Началом эксперимента по релаксации давления кислорода считают момент открытия соединения между газовым контуром и кварцевым реактором с образцом. Изменение общего давления кислорода во времени контролируют с помощью датчика общего давления. Эксперимент заканчивают по достижении образцом равновесия, которое контролируют по стабильно неизменному во времени общему давлению кислорода. В ходе эксперимента получают кинетические зависимости релаксации давления кислорода от времени, при математической обработке которых вычисляется скорость химического коэффициента обмена и диффузии кислорода.

Кинетика взаимодействия кислорода из газовой фазы со сложным оксидом $\text{BaFeO}_{3-\delta}$ *

А. В. Ходимчук^{1,2}, Д. М. Захаров¹, Е. В. Гордеев^{1,2}

¹Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН

²Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

Одним из современных направлений в области чистой и ресурсосберегающей энергетики является разработка и усовершенствование электрохимических устройств, таких как твердооксидные топливные элементы на протонпроводящих твердых электролитах (H-SOFC). Перспективным базовым материалом для катодов H-SOFC является феррит бария, проявляющий смешанную кислород-ионную и электронную проводимость. Среди основных характеристик таких материалов, определяющих эффективность их работы в H-SOFC, является скорость межфазного обмена с газовой

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-23-00086, <https://rscf.ru/project/24-23-00086/> и с использованием оборудования ЦКП «Состав вещества» ИВТЭ УрО РАН.

фазой. В настоящей работе проведено исследование кинетики взаимодействия кислорода газовой фазы с оксидом $\text{BaFeO}_{3-\delta}$.

Исследование проводили методом изотопного обмена кислорода с импульсной подачей изотопно-обогащенной смеси на порошкообразном образце оксида $\text{BaFeO}_{3-\delta}$ ($S_{\text{уд.}} = 0,7 \pm 0,06 \text{ м}^2/\text{г}$) в диапазоне температур 300–600 °С при $p_{\text{O}_2} = 21,3 \text{ кПа}$. Рассчитаны значения скоростей межфазного обмена кислорода (r_H) и индивидуальных стадий: диссоциативной адсорбции (r_a) и инкорпорирования кислорода (r_i), исследовано влияние температуры на них и определены эффективные энергии активации этих процессов.

Обработка экспериментальных данных показала, что механизм обмена кислорода между газовой фазой и оксидом $\text{BaFeO}_{3-\delta}$ хорошо описывается в рамках двухступенчатой модели. Двухступенчатый механизм состоит из двух последовательных элементарных стадий: на первой стадии обмена происходит диссоциативная адсорбция кислорода с образованием хемосорбированных адатомов на поверхности оксида; на второй стадии обмена происходит инкорпорирование адатомов кислорода в решетку оксида из адсорбционного слоя. Установлено, что во всем исследованном температурном интервале скоростьюопределяющей стадией процесса обмена кислорода является диссоциативная адсорбция кислорода. В настоящей работе обсуждаются соответствующие модели, описывающие кинетику обмена кислорода и возможные механизмы, протекающие в оксиде $\text{BaFeO}_{3-\delta}$.

Оценка электрокаталитических свойств пены Ni-Mo по отношению к реакции выделения водорода при электролизе воды*

Д. А. Цыгвинцев, Д. Д. Рыжикова,

А. Б. Даринцева, В. С. Никитин

Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

Одним из способов получения водорода является электролиз воды в растворе щелочи, протекающий при очень высоких перенапряжениях. Для снижения энергозатрат широко используют пористые никелевые электроды (пены), которые также могут служить основой для катализаторов реакций при электролизе воды.

Цель работы заключалась в синтезе и оценке электрокаталитических свойств пены Ni-Mo по отношению к реакции выделения водорода (РВВ) в растворе щелочи.

Пену Ni-Mo осаждали из раствора 0,1 М NiSO₄, 0,01 М Na₂MoO₄, 0,25 М Na₃C₆H₅O₇, 0,05 М Н₃ВО₃ при температуре 25 °С и плотности тока 1,5 А/см² в течение 5 минут. В качестве рабочего катода использовали пластину из стали AISI 304, аноды — ОРТА.

Катодные поляризационные кривые снимали на пене и гладком никеле в растворе 1 моль/л NaOH со скоростью развертки 1 мВ/с с помощью электрохимической станции Autolab PGSTAT 302N. Рабочим электродом была никелевая пена, вспомогательным — графитовый стержень, электродом сравнения — хлоридсеребряный электрод в растворе насыщенного KCl. Поляризационные кривые перестраивали в полулогарифмические координаты для определения постоянной уравнения Тафеля. Методом циклической вольтамперометрии оценивали площадь реагирующей поверхности электрода

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

по емкости двойного слоя. Скорость сканирования варьировали от 40 до 100 мВ/с.

По результатам обработки поляризационных кривых постоянная уравнения Тафеля существенно ниже на пене Ni-Mo (610 мВ), по сравнению с гладким никелем (810 мВ). По результатам циклической вольтамперометрии пена Ni-Mo обладает высокоразвитой поверхностью (223 см² на 1 см² гладкого никеля). Все это свидетельствует о высокой электрокаталитической активности Ni-Mo в щелочи по отношению к РВВ.

Таким образом, пену Ni-Mo можно рекомендовать в качестве электродного материала для снижения перенапряжения РВВ при щелочном электролизе воды.

Установка и способ исследования взаимодействия водорода с металлами и сплавами калориметрическим методом

М. С. Черников, В. З. Пойлов, Н. П. Углев

*¹Пермский национальный исследовательский
политехнический университет*

В настоящее время наблюдается тенденция перехода авиационной промышленности на использование водородсодержащих топлив, вызывающих водородную коррозию и охрупчивание авиационных сплавов. В связи с этим является актуальной разработка установки и способа исследования взаимодействия водорода с металлами и сплавами. Решение этой проблемы позволит ускорить выбор конструкционных материалов и покрытий, стойких к водородсодержащим средам.

Объектом исследования работы является водородная коррозия металлов и сплавов. Предметом исследования работы является метод исследования взаимодействия водорода с металлами путем измерения теплового эффекта с помощью специальной установки.

Известно, что взаимодействие водорода с металлами и сплавами создает определенный тепловой эффект, который можно зафиксировать и измерить. На основе полученных данных можно вычислить энтальпию взаимодействия водорода с образцом, кинетику этого процесса и степень насыщения материала водородом.

Целью исследования является разработка установки и высокочувствительного способа регистрации начала и развития процесса взаимодействия водорода со сплавами и металлами при температурах до 1000 °С. Задачами исследования являются:

1. Создание установки по исследованию взаимодействия водорода с металлами и сплавами калориметрическим методом.

2. Построение на основе полученных на установке данных термодинамической и кинетической моделей взаимодействия материалов с водородом.

К настоящему времени создана рабочая модель экспериментальной установки по высокоточному исследованию взаимодействия водорода с металлами и сплавами методом измерения теплового эффекта, проведены эксперименты с рядом металлов и сплавов, начато создание термодинамической и кинетической моделей.

Результаты работы будут полезными в авиации для создания нового поколения авиадвигателей, работающих с водородсодержащими топливными смесями.

Изготовление линейки нержавеющей сплавов ферритного класса для производства стэков ТОТЭ и ТОЭ

П. А. Чугунов¹, М. В. Ерпалов^{1,2}, М. Ю. Горшков,^{1,2}
А. А. Солодянкин¹, М. Д. Ивченко²

¹Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН

²Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

В последние годы большое внимание уделяется разработке суперсталей с повышенным содержанием Cr (22–28 %), Ni (24–28 %), Mo (4–8 %) и др. В особую группу следует выделить коррозионностойкие стали, в состав которых обязательно входит хром в количестве 12 и более (до 30) масс.%. Стали указанной группы разработаны специально для эксплуатации в особо агрессивных условиях, что характерно для электрохимических устройств, в частности твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) и электролизеров (ТОЭ). В основном для производства интерконнекторов для ТОТЭ и ТОЭ используются стали марок Crofer 22 APU и Crofer H (с добавлением Mo) которые содержат 22–24 % хрома и очищены от большинства нежелательных примесей ($C < 0,03 \%$). В качестве активных добавок они содержат титан, марганец и лантан. В стали Crofer H для улучшения свойств добавлены ниобий и вольфрам. Наличие титана в составе Crofer 22 APU (H) приводит к связыванию остаточного углерода с образованием TiC, который является зародышеобразователем и позволяет измельчать структуру зерен. Марганец в составе приводит к образованию на поверхности сплава шпинели $MnCr_2O_4$, которая представляет собой дополнительный барьерный слой, препятствующий диффузии хрома с поверхности и отравлению электродов топливного элемента.

Целью представленной работы является разработка альтернативных нержавеющей сплавов, подходящих для использования в стэках ТОТЭ и ТОЭ. Основными задачами в ходе работы являлись определение угара легирующих компонентов в процессе нагрева и охлаждения сплава, температурного режима нагрева-охлаждения

сплава, оптимального давления инертной среды, а также последовательности добавления, набора и соотношения компонентов в сплаве.

Работа выполняется на установке индукционно-вакуумного переплава ЭлтерМ-С, исследования полученных образцов на микроструктуру проводятся на сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA III, TESCAN. Химический состав определен на эмиссионном спектрометре iCAP 6300 Duo с использованием индуктивно-связанной плазмы.

По результатам работы установлено: скорость нагрева не оказывает влияния на получившийся химический состав, скорость охлаждения влияет на размер зерен в полученной стали. Установлены опытным путем последовательности введения компонентов сплава для получения заданных составов, эксплуатационные свойства полученных сплавов, а также проведено исследование коррозионной стойкости в среде влажного воздуха и измерение электропроводности образовавшихся оксидных пленок.

Разработка градиентных композиционных материалов на основе углеродного войлока для твердополимерных топливных элементов

А. Б. Шахназарова¹, А. А. Хачатурян^{1,2}, Е. А. Данилов¹

¹АО «Научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита НИИГрафит»

²Российский химико-технологический университет
им. Д. И. Менделеева

В настоящее время твердополимерные топливные элементы (ТПТЭ) становятся реальной альтернативой традиционным источникам энергии, благодаря высокой эффективности преобразования химической энергии в электрическую, высокой удельной мощности, а также отсутствию загрязняющих выбросов в атмосферу [1].

В ТПТЭ градиентные композиционные материалы (КМ) на основе углеродных войлоков (УВ) обеспечивают токоъем, равномерный

подвод топлива (водорода) и окислителя (кислорода) к поверхности катализатора со стороны катода и анода, и стабильный отвод парожидкостных продуктов из зоны электрохимической реакции [2].

Предварительно измельченный на ножевой мельнице УВ диспергировался в водной суспензии Ф4-Д с соотношением УВ к ПТФЭ 85:15 (масс.). Затем диспергированная суспензия отливалась в форме размером 100 × 100 мм и высушилась в сушильном шкафу в течение 1 часа при температуре 180 °С. Для равномерного распределения ПТФЭ градиентный КМ помещался в муфельную печь при температуре 350 °С и времени выдержки 30 минут.

Основные свойства градиентных КМ с содержанием наполнителя 85 масс.% приведены в таблице 1.

Таблица 1
Эксплуатационные свойства разрабатываемых градиентных КМ

Характеристика	Продольная электрическое сопротивление, Ом · мм	Контактный угол смачивания, град.	Толщина, мм
Значение	2,5	178	0,47

Разработанные материалы отвечают современным требованиям, предъявляемым к газодиффузионным слоям ТПТЭ.

Литература

1. Effect of polyvinylidene difluoride in the catalyst layer on high-temperature PEMFCs / H. L. Lin et al. // International Journal of Hydrogen Energy. 2015. Vol. 40, № 30. P. 9400–9409.
2. Williams M. V. et al. Characterization of gas diffusion layers for PEMFC // Journal of the Electrochemical Society. 2004. Vol. 151, № 8. P. A1173.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Абакумова Е. В., Бедарькова А. О., Тарасова Н. А., Анимица И. Е.</i> Ионный перенос в Sm-замещенном слоистом перовските на основе BaLaInO ₄	3
<i>Абдурахимова Р. К., Туленин С. С., Леонова Н. М., Суздальцев А. В.</i> Морфология и структура пленок PbS, допированных NH ₄ Cl и NH ₄ I.....	4
<i>Андреев Г. А., Пушанкина П. Д., Симонов А. И., Прохоров Н. А., Иванин С. Н., Папезжук М. В., Петриев И. С.</i> Разработка и исследование высокопроизводительных наноструктурированных мембранных материалов в водородных процессах.....	6
<i>Арасланов Р. Д., Долгих А. В., Вялых И. А.</i> Генератор выработки электроэнергии на твердооксидном топливном элементе и паровом риформинге.....	8
<i>Бастриков Р. М., Поливода Д. О., Тюшняков М. И., Машковцев М. А., Тарасова Н. А.</i> Влияние длительности помола на свойства порошков стабилизированного диоксида циркония для формирования функциональной керамики.....	9
<i>Безруких В. В.</i> Использование прямой газификации для получения водорода из рисовой шелухи.....	11
<i>Хименко Л. Л., Котельников С. А., Бердников Р. А., Калугина Д. М.</i> Разработка компонентной базы полимерных графитсодержащих покрытий.....	12
<i>Богунова П. Д., Чернышев А. А., Даринцева А. Б.</i> Получение двумерных дендритных электролитических осадков.....	14
<i>Бузаева Е. М., Рябочкина П. А., Ломонова Е. Е., Чернов Е. И., Курицына И. Е.</i> Структура и спектрально-люминесцентные свойства керамик, изготовленных методом одноосного прессования порошков из плавящихся твердых растворов ZrO ₂ -Sc ₂ O ₃ -Eu ₂ O ₃	15

<i>Бушуева А. В., Корона Д. В., Анимица И. Е.</i>	
Влияние цинка как допанта на парциальные проводимости гексагонального перовскита $Ba_7In_6Al_2O_{19}$	17
<i>Васин Д. А., Анимица И. Е., Корона Д. В., Шарафутдинов А. Р.</i>	
Исследование ионной проводимости слоистого перовскита $SrLaAlO_4$ в контексте высокотемпературных твердооксидных топливных элементов.....	18
<i>Галиаскарова М. Р.</i>	
Исследование влияния условий синтеза на фазовый состав диоксида циркония.....	19
<i>Гилязова С. Ф., Самородов А. В., Гураков Н. И.</i>	
Исследование влияния критериев подобия на результаты моделирования процессов горения водорода в модельной камере сгорания.....	21
<i>Гнатюк В. Д., Абакумова Е. В., Бедарькова А. О., Тарасова Н. А., Анимица И. Е.</i>	
Протонный перенос в Sr-замещенных слоистых перовскитах на основе $BaLaInO_4$	22
<i>Голоднова А. И., Ерпалов М. В.</i>	
Показатель эффективности работы твердооксидного электролизера.....	23
<i>Гордеев Е. В., Кузнецова Т. А., Осинкин Д. А.</i>	
Обратимые электродные материалы на основе $(La, Sr)FeO_{3-\delta}$: совместимость с электролитным материалом на основе $(La, Sr)(Ga, Mg)O_{3-\delta}$	25
<i>Гордеева М. А., Медведев Д. А.</i>	
Электротранспортные свойства материалов состава $Nd_{1-x}Ba_xFeO_{3-\delta}$	26
<i>Давлетбаев К., Абакумова Е. В., Бедарькова А. О., Тарасова Н. А., Анимица И. Е. .</i>	
Синтез и физико-химические свойства Fe-замещенного слоистого перовскита на основе $BaLaInO_4$	28
<i>Двигининов А. А., Чеботарева Г. С.</i>	
Эколого-экономические перспективы H_2 в качестве энергоносителя.....	29

Димитренко А. В., Ярошенко Ф. А.

Синтез и свойства поверхностно-модифицированных частиц
полисурьмяной кислоты оксидом ванадия.....31

Домашенков М. А., Буйначев С. В., Бородин Н. Д.,

Корнеев В. А., Машковцев М. А.

Влияние гранулометрического состава порошков
стабилизированного диоксида циркония на процесс
формования слитков для вакуумно-лучевого испарения.....32

Завиралова В. Д., Абакумова Е. В.,

Бедарькова А. О., Тарасова Н. А., Анимица И. Е.

Протонный перенос в La-допированных слоистых перовскитах
на основе $BaLaInO_4$34

Калашиникова А. С., Чернышев А. А., Даринцева А. Б.

Использование Ni-Mo покрытий в качестве катодных
катализаторов для щелочного электролиза воды.....35

Каримов Р. Р., Николашин М. А.,

Матвеев Е. С., Шарафутдинов А. Р.

Электрические свойства соединений на основе оксидов бария,
алюминия, диспрозия и лютеция.....37

Кремеш Хала, Анимица И. Е.

Гидратация и электрические свойства сложных оксидов
 $BaLa_{1,9}M_{0,1}In_2O_7$ ($M = Nd^{+3}, Sm^{+3}, Eu^{+3}, Gd^{+3}, Tb^{+3}, Dy^{+3}, Ho^{+3}, Er^{+3},$
 Yb^{+3}, Lu^{+3}) со структурой Раддлесдена — Поппера.....38

Кузнецова Т. А., Абакумова Е. В., Тарасова Н. А.

Взаимосвязь структуры и транспортных свойств слоистого
перовскита $BaLa_2In_2O_7$40

Кузнецова П. С., Тарутина Л. Р., Старостина И. А.,

Старостин Г. Н., Медведев Д. А.

Дизайн новых электродных материалов на основе ферритов для
электрохимических приложений.....41

Леонова Е. С., Кудияров В. Н.

Изучение структуры композита на основе гидрида
магния и наноразмерного никеля, полученного методом
электрического взрыва проводников.....42

<i>Ломакина В. А., Журенок А. В., Марковская Д. В.</i> Исследование влияния условий синтеза графитоподобного нитрида углерода на фотоэлектрохимические свойства композиционных материалов на его основе.....	44
<i>Луканин Д. С., Никонорова В. А., Ерпалов М. В.</i> Перспективное направление водородной энергетики.....	45
<i>Маев В. В., Порохин С. В., Никитина В. А.</i> Влияние железа на электрохимическую активность сложных оксидов никеля в реакции выделения кислорода в щелочной среде....	47
<i>Марковская Д. В., Журенок А. В., Потапенко К. О., Ломакина В. А.</i> Изучение новых фотокатализаторов и фотоэлектродов на основе графитоподобного нитрида углерода, одновременно модифицированного бромом и йодом.....	48
<i>Маслова В. В., Эгембердиев М. Р., Ильина С. И., Равичев Л. В.</i> Экологичный метод получения электрической энергии на основе процесса обратного электролиза.....	49
<i>Маткин Д. Е., Тарутин А. П., Медведев Д. А.</i> Композитные электроды на основе PrBaFe ₂ O _{6-δ} для твердооксидных электрохимических устройств.....	51
<i>Миронов С. Е., Еремеев Н. Ф., Садовская Е. М., Булавченко О. А., Коробейников М. В., Михайленко М. А., Садыков В. А., Беспалко Ю. Н.</i> Синтез и исследование свойств цератов и титанатов висмута в качестве материалов мембран.....	54
<i>Моисеев Ю. А., Никитин В. С.</i> Электрохимический синтез пены никеля со слоем катализатора Со-Мо-Р-О для снижения перенапряжения реакции выделения водорода при электролизе воды.....	55
<i>Никонорова В. А., Ерпалов М. В.</i> Способы нанесения стеклокерамического герметика для сборки стеков ТОТЭ.....	57
<i>Никонов А. В., Павздерин Н. Б., Хрустов В. Р.</i> Совместное спекание структуры градиентный анод — электролит для микротрубчатого ТОТЭ.....	58

<i>Пачина С. П., Белова К. Г., Корона Д. В., Анимица И. Е.</i>	
Кислородно-ионный и протонный транспорт твердого раствора $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{ScZnO}_{5,5-0,5x}$	60
<i>Пашенцева Е. А., Коваленко Л. Ю.</i>	
Оценка сорбционных характеристик оксидов сурьмы (+5) и молибдена (+6).....	61
<i>Пермякова А. Е., Жуланова Т. Ю., Русских О. В., Остроушко А. А.</i>	
Синтез компонентов твердооксидных топливных элементов в реакциях горения с генерированием зарядов и возможности технологического использования процессов.....	62
<i>Поливода Д. О., Бастриков Р. М., Машковцев М. А.</i>	
Исследование влияния температуры обжига гидратированного диоксида циркония на спекание керамических заготовок.....	64
<i>Пьянков Д. Н., Абакумова Е. В., Бедарькова А. О., Тарасова Н. А., Анимица И. Е.</i>	
Синтез и физико-химические свойства слоистых перовскитов BaLaInO_4 , полученных методом изовалентного допирования.....	65
<i>Рыжикова Д. Д., Чернышев А. А., Даринцева А. Б.</i>	
Исследование свойств медно-никелевых покрытий.....	66
<i>Смелов А. О., Корона Д. В., Анимица И. Е.</i>	
Синтез и исследование транспортных свойств сложных оксидов со структурой перовскита на основе алюмината и галлата церия CeMO_3 ($M = \text{Al}, \text{Ga}$).....	68
<i>Соболева А. А., Постаногова Е. С., Климова В. А.</i>	
Компьютерное моделирование теплогидравлических процессов при плавлении свинца в тигле.....	69
<i>Солодовникова П. А., Угрюмова М. В., Телегин Т. Е.</i>	
Исследование влияния стадии промывки при масштабировании процесса синтеза термостабильного оксида алюминия.....	70
<i>Старостин Г. Н., Старостина И. А., Акопян М. Т., Медведев Д. А.</i>	
Влияние концентрации спекающей добавки на микроструктуру и транспортные свойства перовскита $\text{BaSn}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{O}_{3-\delta}$	71
<i>Старостина И. А., Старостин Г. Н., Акопян М. Т., Медведев Д. А.</i>	
Транспортные свойства In-допированных станнатов бария при высоких температурах.....	73

<i>Тарутин А. П., Медведев Д. А.</i>	
Лантан-барий содопирование как способ оптимизации свойств никелитов празеодима в качестве воздушных электродов твердооксидных топливных элементов.....	75
<i>Тарутина Л. Р., Тарутин А. П., Старостина И. А., Старостин Г. Н., Медведев Д. А.</i>	
Перспективные электроды для ТОТЭ на основе модифицированного феррита бария: аспекты химической устойчивости.....	77
<i>Телегин Т. Е., Солодовникова П. А., Угрюмова М. В.</i>	
Влияние способа синтеза оксида алюминия на его удельную поверхность.....	78
<i>Тушкова А. А., Гусева А. Ф., Пестерева Н. Н.</i>	
Электропроводность вольфраматов $\text{Ln}_{10}\text{W}_{22}\text{O}_{81}$ (Ln-La, Nd, Ce).....	80
<i>Тюшняков М. И., Бастриков Р. М., Поливода Д. О., Машковцев М. А., Тарасова Н. А.</i>	
Влияния помола порошка стабилизированного диоксида циркония на распределение пор по размерам.....	81
<i>Угрюмова М. В., Солодовникова П. А., Телегин Т. Е.</i>	
Влияние состава прекурсора на свойства оксида алюминия.....	82
<i>Усачев К. А., Андреев Р. Д., Анимица И. Е.</i>	
Гидратация и транспортные свойства гексагонального перовскита $\text{Ba}_7\text{Sc}_6\text{Al}_2\text{O}_{19}$	84
<i>Утяшева Л. С., Коваленко Л. Ю., Бурмистров В. А.</i>	
Протонная проводимость полисурьмяной кислоты, модифицированной ионами ванадия.....	85
<i>Федорова К. А., Селиверстова О. Е., Гордеев Е. В., Антонова Е. П.,</i>	
Электрохимическая активность композитных электродов на основе $\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5}\text{Co}_{0,8}\text{Fe}_{0,2}\text{O}_{3-\delta}$ и $\text{Ce}_{0,8}\text{Sm}_{0,2}\text{O}_{2-\delta}$ в контакте с протонпроводящим электролитом $\text{BaCe}_{0,7}\text{Zr}_{0,1}\text{Y}_{0,1}\text{Yb}_{0,1}\text{O}_{3-\delta}$	87
<i>Хачатурян А. А., Шахназарова А. Б., Данилов Е. А.</i>	
Разработка графитонаполненных биполярных пластин с высокими эксплуатационными свойствами.....	88

<i>Хионин Д. В., Домашенков М. А., Корнеев В. А., Машиковцев М. А.</i>	
Исследование влияния полимеризации растворов оксинитрата циркония на процесс агрегации частиц гидроксида циркония в ходе осаждения при постоянном значении рН.....	90
<i>Ходимчук А. В., Осинкин Д. А.</i>	
Определение кинетических параметров в сложных оксидах в неравновесных условиях методом релаксации давления кислорода.....	91
<i>Ходимчук А. В., Захаров Д. М., Гордеев Е. В.</i>	
Кинетика взаимодействия кислорода из газовой фазы со сложным оксидом $\text{BaFeO}_{3-\delta}$	92
<i>Цыгвинцев Д. А., Рыжикова Д. Д., Даринцева А. Б., Никитин В. С.</i>	
Оценка электрокаталитических свойств пены Ni-Mo по отношению к реакции выделения водорода при электролизе воды.....	94
<i>Черников М. С., Пойлов В. З., Углев Н. П.</i>	
Установка и способ исследования взаимодействия водорода с металлами и сплавами калориметрическим методом.....	95
<i>Чугунов П. А., Ерпалов М. В., Горшков М. Ю., Солодянкин А. А., Ивченко М. Д.</i>	
Изготовление линейки нержавеющей сплавов ферритного класса для производства стэков ТОТЭ и ТОЭ.....	97
<i>Шахназарова А. Б., Хачатурян А. А., Данилов Е. А.</i>	
Разработка градиентных композиционных материалов на основе углеродного войлока для твердополимерных топливных элементов.....	98

Научное издание

ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА СЕГОДНЯ

Тезисы докладов второй всероссийской
молодежной научной конференции

Екатеринбург, 17 мая 2024 года

Тезисы не редактировались
Ответственный за выпуск *П. С. Першин*
Корректор *Е. Е. Крамаревская*
Компьютерная верстка *В. К. Матвеев*

*Электронное сетевое издание
размещено в архиве УрФУ
<http://elar.urfu.ru>*

Подписано 19.07.2024. Формат 60 × 84 1/16.
Уч.-изд. л. 5,14. Объем данных 4,5 МБ.

Издательство Уральского университета
620000, Екатеринбург-83, ул. Тургенева, 4
Тел.: +7 (343) 358-93-06, 350-90-13, 358-93-22, 350-58-20
E-mail: press-urfu@mail.ru
<http://print.urfu.ru>

