

СТРУКТУРНЫЕ, ЕМКОСТНЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОДОВ НА ОСНОВЕ НАНОКОМПОЗИТОВ «ПОЛИАНИЛИН / МНОГОСТЕННЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ»

Методом *in-situ* химической окислительной полимеризации анилина получены наноконпозиты полианилина с азотлегированными многостенными углеродными нанотрубками, исходными и функционализированными ионами аргона. Микроскопическими методами изучена морфология полученных наноконпозитов. Методом циклической вольтамперометрии исследованы емкостные и энергетические характеристики электрохимических электродов, сформированных путем прессования наноконпозитов. Показано, что электрод на основе наноконпозита с функционализированными нанотрубками обладает наибольшими удельными емкостью и энергией благодаря высокой развитости поверхности. Однако низкая механическая прочность данного электрода приводит к снижению его циклической стабильности.

Ключевые слова: полианилин, углеродные нанотрубки, наноконпозиты, циклическая вольтамперометрия, удельная емкость, циклическая стабильность.

Введение. В настоящее время композиты на основе полианилина (ПАНИ) и углеродных наноматериалов вызывают особый интерес в качестве перспективных материалов для изготовления электрохимических накопителей электрической энергии. Основной задачей при разработке таких накопителей является повышение их производительности за счет создания новых материалов, которые позволят получить высокие показатели мощности, плотности энергии и циклической стабильности.

Суперконденсаторы считаются наиболее перспективными устройствами накопления энергии, благодаря способности обеспечивать более высокую удельную мощность и хранить гораздо больше энергии, что отличает их от аккумуляторных батарей и коммерческих конденсаторов. К их преимуществам также относятся: быстрая скорость зарядки/разрядки, длительный срок службы, низкий расход на техническое обслуживание и безопасность для окружающей среды [1].

Принципиальным отличием суперконденсаторов от обычных конденсаторов является способ накопления электрической энергии на электродах посредством двух механизмов: двойного электрического слоя и быстрых фарадеевских процессов. Поскольку к важным факторам, определяющим характеристики электрода, относятся площадь по-

верхности, доступная для электролита, и скорость массопереноса ионов, то наилучшие характеристики электродов на основе углеродного материала и ПАНИ возможны за счет применения углеродных нанотрубок или графена [2]. Широкое применение в качестве материала для электродов суперконденсаторов получили многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ). Однако их удельная емкость не может достичь оптимального значения [3].

Введение проводящих полимеров в материал электрода суперконденсатора способствует достижению требуемой плотности энергии и плотности мощности. ПАНИ, как наиболее распространенный проводящий полимер, широко применяется благодаря низкой стоимости, высокой электропроводности, легкости синтеза и устойчивости в окружающей среде [1].

При создании электродов суперконденсаторов используют преимущественно композиты, полученные методами химического или электрохимического синтеза ПАНИ на поверхности углеродного материала.

В работе [4] ПАНИ наносили на поверхность сульфированных МУНТ методом окислительной полимеризации. Максимальное значение удельной ёмкости композита составило 515 Ф/г при массовой доле полианилина 76,4 %. Данный композит имел хорошую стабильность в процессе циклов заряда/

разряда, имея не превышающую 10 % потерю ёмкости после 1000 циклов.

В работе [5] сообщают о композитах на основе ПАНИ и МУНТ, полученных путём химической окислительной полимеризации анилина методом *in situ* с использованием практически бездефектных МУНТ. Максимальная удельная ёмкость такого композита, массовая доля полианилина в котором составила 66 %, — 560 Ф/г. Удельная ёмкость электрода на его основе при циклировании уменьшилась на 29,1 % после 700 циклов.

Еще одним примером композита, тестированного в качестве электрода для суперконденсатора, является композит на основе ПАНИ и МУНТ, полученный путем окислительной полимеризации в присутствии персульфата аммония, массовая доля полианилина в котором составила 25 %. Полученное значение удельной ёмкости такого композита — 22 Ф/г, но за счет высокой стабильности композит считается авторами весьма перспективным для использования в суперконденсаторах [6].

Известно [7] об использовании смесей углеродных материалов при создании композита на основе графена и МУНТ, обработанных кислотой, и ПАНИ методом химической окислительной полимеризации анилина. Такой композит давал улучшенные ёмкостные характеристики. Максимальное значение удельной ёмкости такого композита — 1118 Ф/г.

Примером эффективного использования в качестве электродов для суперконденсатора является электрохимически синтезированный композит на основе МУНТ и ПАНИ [8]. Массовая доля МУНТ в таких электродах составила 27 %. Удельная ёмкость такого композита составила 463 Ф/г.

В некоторых работах описываются электроды для суперконденсаторов на основе композитов ПАНИ/МУНТ, полученных химическим и электрохимическим методами, удельные ёмкости которых составляли от 124 до 576 Ф/г [4; 9–12].

Функционализация УНТ, например, при обработке кислотами для введения карбоксильных групп, позволяет увеличить удельную ёмкость МУНТ в 3,2 раза за счет повышения гидрофильности электродов в водных электролитах и введения псевдоёмкости. Так, обработка МУНТ раствором NaOH при 80 °С с последующим ультразвуковым воздействием в растворе H_2SO_4 / HNO_3 может улучшить удельную ёмкость МУНТ с 28 Ф/г до 85 Ф/г. Однако окислительная обработка неизбежно вызывала дефекты, которые ухудшали структуру МУНТ и снижали электропроводность.

Для композита на основе ПАНИ и МУНТ, подверженных функционализации азотной кислотой, наибольшая максимальная удельная ёмкость при скорости развертки потенциала 5 мВ/с составляла 427 Ф/г.

Рассчитанное процентное содержание полимера в композите ПАНИ/МУНТ (4:1) — 78 % [13].

Таким образом, при формировании композитов ПАНИ/МУНТ для электродов суперконденсаторов используют различные методы синтеза ПАНИ в присутствии МУНТ, а также различные способы функционализации МУНТ.

Целью данной работы является выявление особенностей структурных, ёмкостных и энергетических характеристик электрохимических электродов, сформированных из нанокompозитов на основе полианилина и легированных азотом многостенных углеродных нанотрубок: исходных (ПАНИ/Н-

МУНТ) и функционализированных ионами аргона (ПАНИ/Ar⁺_N-МУНТ).

Материалы и методы. N-МУНТ получены CVD методом в результате пиролиза паров ацетонитрила при 800 °С на подложках SiO₂/Si. Согласно оптимальным условиям синтеза, концентрация атомов азота в стенках МУНТ составила 3 ат.%. Для удаления примесей аморфного углерода и металлического катализатора материал после синтеза был подвержен термической ($T=390$ °С, воздух, 2 ч) и химической обработкам ($T=25$ °С, 40 % HCl, 24 ч). Очищенные N-МУНТ промывались и высушивались. Далее МУНТ снимались с подложки и диспергировались ультразвуком в этиловом спирте.

Для облучения N-МУНТ материал наносили на подложки монокристаллического кремния спрей-методом до получения тонкого полупрозрачного слоя. Полученный слой МУНТ облучали ионами аргона с энергией 5 кэВ и дозой 10^{16} см⁻².

Композиты ПАНИ/N-МУНТ и ПАНИ/Ar⁺_N-МУНТ получали методом химической окислительной полимеризации [14]. Для этого нанотрубки диспергировали ультразвуком в изопропиловом спирте в течение 30 минут. После этого 2,5 мл анилина и 25 мл 3М HCl добавляли в полученную дисперсию и снова обрабатывали ультразвуком в течение 30 минут. Полученный раствор охлаждали до 0 °С на ледяной бане, а затем при постоянном перемешивании по каплям добавляли раствор, содержащий 6 г персульфата аммония и 15 мл 3М HCl. Через 30 минут продукт реакции отделяли от реакционной смеси, промывали водой, изопропиловым спиртом и ацетоном, после чего сушили на воздухе в течение 24 часов при 60 °С.

Для формирования электродов навеска 10 мг полученного композита была помещена в круглую пресс-форму диаметром 5 мм, где была подвергнута прессованию с давлением 10 МПа. Под заданным давлением композит прессовался 30 сек.

Морфология композитов ПАНИ/N-МУНТ и ПАНИ/Ar⁺_N-МУНТ исследовалась на просвечивающем электронном микроскопе JEM-2100 «JEOL» в ОмЦКП СО РАН. Морфология поверхности сформированных электродов изучалась на сканирующем электронном микроскопе JSM-6610LV «JEOL» в ОмЦКП СО РАН.

Удельная проводимость электродов на основе ПАНИ/N-МУНТ и ПАНИ/Ar⁺_N-МУНТ определялась стандартным четырехзондовым методом измерения поверхностного электрического сопротивления. Измерение производилось на измерителе удельного сопротивления 13 МП-0,5-001 с использованием измерительной головки с четырьмя линейно расположенными вольфрамовыми зондами с золотым покрытием.

Исследование электрохимических свойств полученных электродов проводили методом циклической вольтамперометрии (ЦВА) в трехэлектродной ячейке с хлорсеребряным электродом сравнения в режиме линейной развертки потенциала. Циклические вольтамперограммы регистрировали с помощью потенциостата-гальваностата Р-20Х в диапазоне потенциалов [0;1] В при скоростях сканирования 5, 10, 20, 40, 80 и 120 мВ/с. В качестве электролита использовался 3М раствор серной кислоты. Для записи вольтамперных кривых использовалось программное обеспечение ES8.

На основе полученных данных строили ЦВА, по которым была определена ёмкость электродов

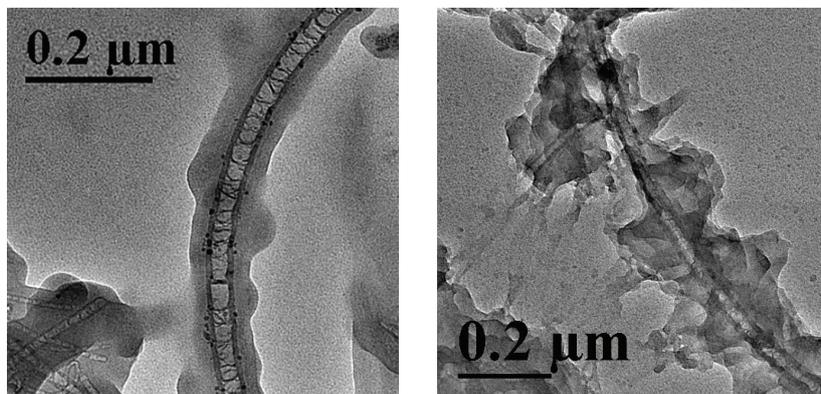


Рис. 1. ПЭМ изображения индивидуальных волокон ПАНИ/N-МУНТ (слева) и ПАНИ/Ag⁺_N-МУНТ (справа)

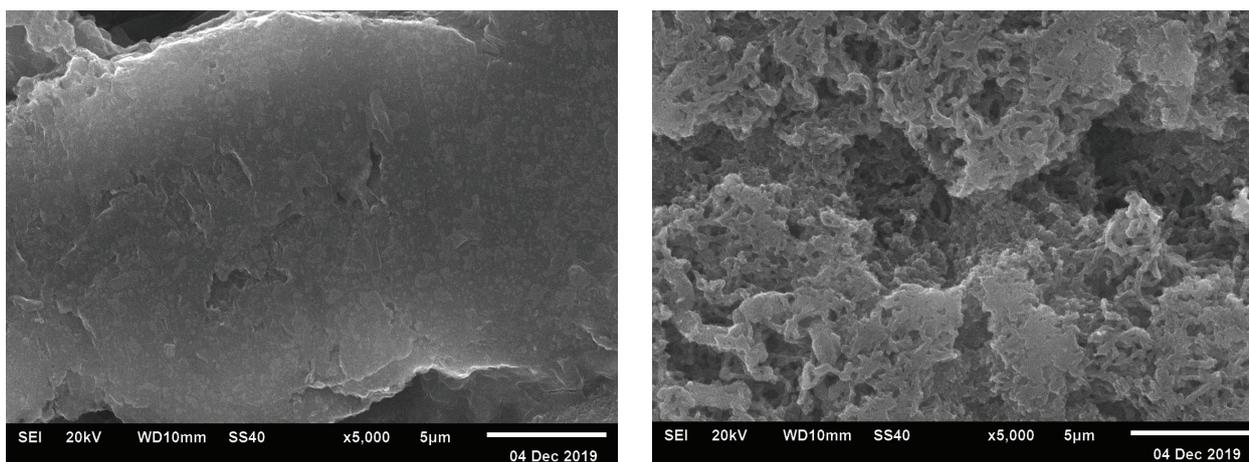


Рис. 2. СЭМ изображения поверхности электрода на основе композитов ПАНИ/N-МУНТ (слева) и ПАНИ/Ag⁺_N-МУНТ (справа)

с использованием программного обеспечения ADVC v.1.010.

Результаты и обсуждения. На рис. 1 представлены результаты исследования морфологии индивидуальных волокон композитов ПАНИ/N-МУНТ и ПАНИ/Ag⁺_N-МУНТ на просвечивающем электронном микроскопе. Видно, что слой ПАНИ полностью покрывает внешнюю стенку нанотрубки. Для ПАНИ/N-МУНТ слой полимера имеет гладкую морфологию. Это говорит о том, что полимерные цепи в процессе синтеза равномерно укладываются на внешнюю стенку нанотрубок. Толщина слоя полимера в среднем составляет 60–70 нм.

Слой ПАНИ на Ag⁺_N-МУНТ неравномерно распределен по внешней стенке нанотрубок и имеет развитую структуру (рис. 1). По всей видимости это связано с формированием протяженных дефектов на внешних стенках нанотрубок в результате их функционализации ионами аргона. Нанотрубки являются темплатом для полимера при синтезе композита, и морфология внешней стенки нанотрубки оказывает исключительное влияние на морфологию композита. Толщина слоя ПАНИ на функционализированных углеродных нанотрубках варьируется 80 до 200 нм.

На рис. 2 представлены результаты исследования морфологии поверхности электродов, сформированных из композитов ПАНИ/N-МУНТ и ПАНИ/Ag⁺_N-МУНТ на сканирующем электронном микроскопе. Особенности морфологии, выявленные на индивидуальных волокнах композитов, отража-

ются и на морфологии электродов. Поверхность электрода на основе композита ПАНИ/N-МУНТ имеет гладкую морфологию с небольшим количеством макропор. Электрод на основе композита ПАНИ/Ag⁺_N-МУНТ обладает развитой поверхностью, которая вся испещрена порами.

Удельная проводимость электрода на основе ПАНИ/N-МУНТ ($1,39 \pm 0,13$ См/см) почти вдвое превышает проводимость электрода на ПАНИ/Ag⁺_N-МУНТ ($0,75 \pm 0,10$ См/см). Это может быть связано как со снижением проводимости N-МУНТ, подвергнутых облучению ионами аргона, так и с уменьшением площади контактов между волокнами за счет развитости слоя ПАНИ в композите ПАНИ/Ag⁺_N-МУНТ.

На рис. 3 показано изменение формы ЦВА в зависимости от увеличения скорости развертки потенциала. На полученных ЦВА кривых пики окислительно-восстановительных процессов хорошо видны при малых скоростях сканирования 5–10 мВ/с. С увеличением скорости развертки потенциала пики становятся менее выраженными, поскольку на больших скоростях ионы не успевают перемещаться к поверхностному слою электрода и работает только двойной электрический слой.

Электрод на основе композита ПАНИ/Ag⁺_N-МУНТ имеет большую величину тока на ЦВА кривых, что свидетельствует о большей величине емкости электрода.

Окислительно-восстановительные пики на ЦВА кривых композита ПАНИ/Ag⁺_N-МУНТ при скоро-

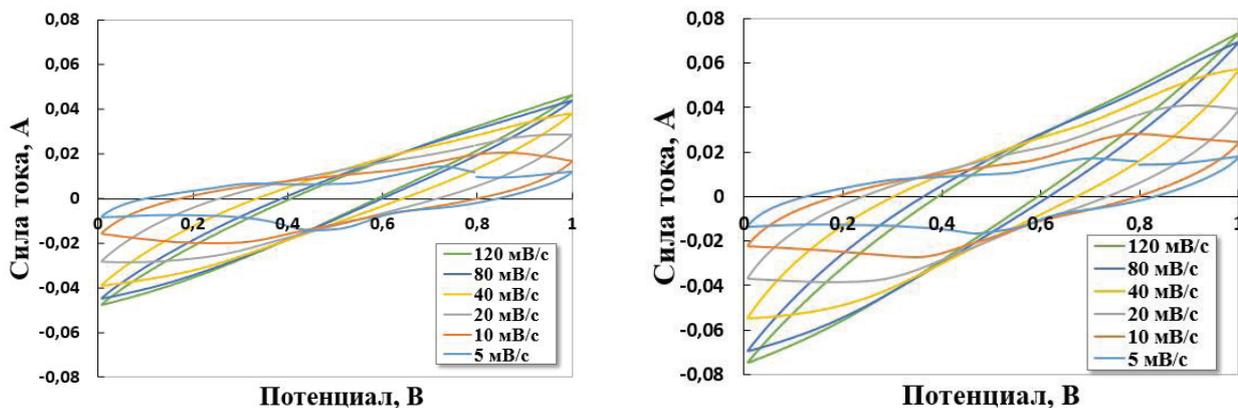


Рис. 3. Циклические вольтамперограммы электрода на основе композитов ПАНИ/N-МУНТ (слева) и ПАНИ/Ag⁺ N-МУНТ (справа) при различных скоростях развертки потенциала

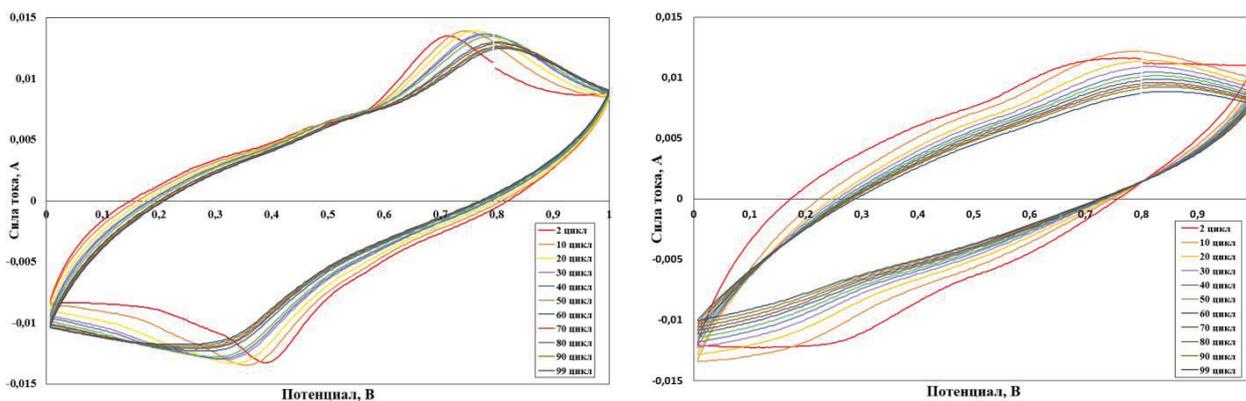


Рис. 4. Циклические вольтамперограммы электрода на основе композитов ПАНИ/N-МУНТ (слева) и ПАНИ/Ag⁺ N-МУНТ (справа) при различном числе циклов заряда-разряда

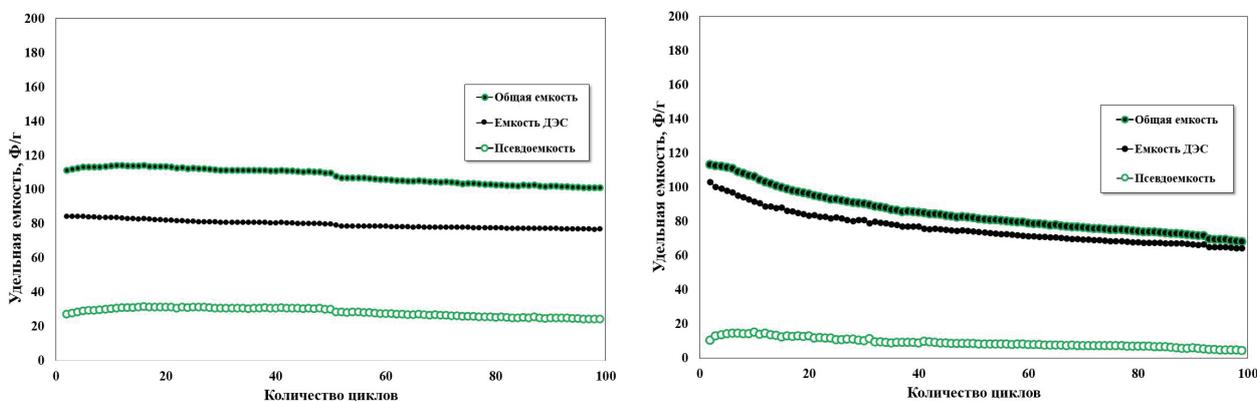


Рис. 5. Зависимость удельной емкости от количества циклов заряда-разряда для электрода на основе композитов ПАНИ/N-МУНТ (слева) и ПАНИ/Ag⁺ N-МУНТ (справа)

сти развертки потенциала 5 мВ/с менее выражены и уменьшаются с увеличением количества циклов заряда-разряда (рис. 4). С увеличением количества циклов наблюдается уменьшение площади кривых.

Композит ПАНИ/N-МУНТ показывает лучшую циклическую стабильность (рис. 5). При 100 циклах заряда-разряда плавное снижение общей удельной емкости не превышает 10 %. Небольшой скачок удельной емкости на пятидесятом цикле, вероятнее всего, связан с потерей (откалыванием) небольшого фрагмента электрода. Конфигурация измерительной ячейки такова, что ушедшая в электролит часть материала электрода перестает давать вклад в емкость.

Уменьшение удельной емкости электрода для композита ПАНИ/Ag⁺ N-МУНТ имеет монотонный вид. После проведения 100 циклов заряда-разряда удельная емкость электрода упала на 40 %. Это свидетельствует о значительной циклической нестабильности электрода. Одной из наиболее вероятных причин может быть уменьшение массы электрода за счёт потери части полимера. Слой ПАНИ на Ag⁺ N-МУНТ распределён крайне неравномерно (рис. 1). При цикле заряда-разряда в ПАНИ протекают окислительно-восстановительные реакции, сопровождаемые изменением внутри- и межмолекулярных сил. Эти повторяющиеся при циклировании изменения могут провоцировать отделение

Емкостные и энергетические параметры электродов на основе композитов ПАНИ/N-МУНТ и ПАНИ/Ag⁺_N-МУНТ

	ПАНИ/N-МУНТ	ПАНИ/Ag ⁺ _N-МУНТ	Литературные данные [16]
Удельная емкость, Ф/г	133,2	179,3	124 – 1000
Удельная энергия, Вт·ч/кг	18,5	24,9	0,5 – 114
Удельная мощность, Вт/кг	333,0	448,3	300 – 2189

слабосвязанных фрагментов ПАНИ в электролит. С увеличением количества циклов подобная деградация полимерного слоя электрода замедляется.

Энергетические характеристики электродов были рассчитаны с помощью выражений, применяемых для циклической вольтамперометрии. Формула для расчета удельной энергии (Вт·ч/кг):

$$E_s^{CV} = \frac{1}{2} C_s (\Delta V)^2,$$

где C_s — удельная емкость (Ф/г); ΔV — разность потенциалов для анодного или катодного сканирования (В).

Формула для расчета удельной мощности (Вт/кг):

$$P_s = \frac{1}{2} C_s (\Delta V) r,$$

где C_s — удельная емкость (Ф/г); ΔV — разность потенциалов для анодного или катодного сканирования (В), r — скорость развертки потенциала (мВ/с) [15].

В табл. 1 представлены значения удельной емкости, удельной энергии и мощности, рассчитанные для трехэлектродной ячейки при скорости развертки потенциала 5 мВ/с, а также значения этих характеристик для композитов ПАНИ/УНТ, взятые из литературных источников.

Для электрода на основе ПАНИ/Ag⁺_N-МУНТ удельные емкость, энергия и мощность имеют более высокие значения, чем для электрода на основе композита ПАНИ/N-МУНТ. Такое увеличение характеристик электрода связано с более развитой поверхностью волокон композита ПАНИ/Ag⁺_N-МУНТ.

Более высокая пористость электрода обеспечивает большую удельную площадь поверхности, с которой может взаимодействовать электролит. В то же время развитость поверхности волокон композита ПАНИ/Ag⁺_N-МУНТ приводит к низкой механической прочности изготовленного из них электрода, следствием чего является его низкая циклическая стабильность.

Заключение. Методом окислительной полимеризации анилина в присутствии нефункционализированных и функционализированных ионами аргона углеродных нанотрубок синтезированы композиты ПАНИ/N-МУНТ и ПАНИ/Ag⁺_N-МУНТ.

Исследование морфологии полученных композитов показало, что волокна композита ПАНИ/Ag⁺_N-МУНТ имеют развитую поверхность за счет нерегулярности толщины слоя ПАНИ на N-МУНТ.

Наилучшими емкостными и энергетическими характеристиками обладает электрод на основе композита

ПАНИ/Ag⁺_N-МУНТ. Его удельная емкость достигает 190 Ф/г, в то время как электрод на основе ПАНИ/N-МУНТ демонстрирует максимальную емкость около 130 Ф/г. Значения удельных энергий и мощности электрода ПАНИ/Ag⁺_N-МУНТ так же выше, чем для электрода ПАНИ/N-МУНТ. Однако исследование циклической стабильности электродов при 100 циклах зарядки-разрядки показало стабильность электродов из ПАНИ/N-МУНТ (до 10 % потери емкости) и низкую стабильность электродов на основе ПАНИ/Ag⁺_N-МУНТ (до 40 % потери емкости).

Увеличение емкостных и энергетических характеристик электрода на основе композита ПАНИ/Ag⁺_N-МУНТ обусловлено высокой развитостью поверхности его волокон. Более высокая пористость изготовленного из него электрода обеспечивает большую удельную площадь поверхности, с которой может взаимодействовать электролит. В то же время развитость поверхности волокон композита ПАНИ/Ag⁺_N-МУНТ приводит к низкой механической прочности электрода, следствием чего является его низкая циклическая стабильность.

Благодарности

Работа выполнена по государственному заданию ОНЦ СО РАН в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013 – 2020 годы по направлению II.9, проект № II.9.2.1 (номер госрегистрации в системе ЕГИСУ НИОКТР АААА-А17-117041210227-8).

Авторы статьи выражают благодарность научному сотруднику Несову С. Н. и младшему научному сотруднику Князеву Е. В. за помощь в измерениях методами ЦВА, СЭМ и ПЭМ.

Библиографический список

1. Moussa M., El-Kady M. F., Zhao Z. [et al.]. Recent progress and performance evaluation for polyaniline/graphene nanocomposites as supercapacitor electrodes // *Nanotechnology*. 2016. Vol. 27. P. 442001. DOI: 10.1088/0957-4484/27/44/442001.
2. Федоровская Е.О. Электродные материалы на основе углеродных наноструктур и полианилина для суперконденсаторов: дис. ... канд. хим. наук. Новосибирск 2014. 155 с.
3. Razak R. A. A., Eleas N. H., Mohammad N. N. [et al.]. Effect of Polyaniline on MWCNTs Supercapacitor Properties Prepared By Electrophoretic Deposition // *AIP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 1875. 020010. 7 p. DOI: 10.1063/1.4998364.
4. Zhu Z.-Z., Wang G.-C., Sun M.-Q. [et al.]. Fabrication and electrochemical characterization of polyaniline nanorods modified with sulfonated carbon nanotubes for supercapacitor applications // *Electrochimica Acta*. 2011. Vol. 56, Issue 3. P. 1366 – 1372. DOI: 10.1016/j.electacta.2010.10.070.

5. Zhou Y., Qin Z.-Y., Li L. [et al.]. Polyaniline/multi-walled carbon nanotube composites with core-shell structures as supercapacitor electrode materials // *Electrochimica Acta*. 2010. Vol. 55, Issue 12. P. 3904–3908. DOI: 10.1016/j.electacta.2010.02.022.
6. Zawadzka E., Kuliński R., Szubzda B. [et al.]. Polyaniline – multi-walled carbon nanotube shell-core composite as an electrode material in supercapacitors // *Materials Science-Poland*. 2009. Vol. 27, no 4/2. P. 1271–1278.
7. Kim K.-S., Park S.-J. Influence of multi-walled carbon nanotubes on the electrochemical performance of graphene nanocomposites for supercapacitor electrodes // *Electrochimica Acta*. 2011. Vol. 56, Issue 3. P. 1629–1635. DOI: 10.1016/j.electacta.2010.10.043.
8. Gupta V., Miura N. Polyaniline/single-wall carbon nanotube (PANI/SWCNT) composites for high performance supercapacitors // *Electrochimica Acta*. 2006. Vol. 52, Issue 4. P. 1721–1726. DOI: 10.1016/j.electacta.2006.01.074.
9. Khomenko V., Frackowiak E., Вйгуин F. Determination of the specific capacitance of conducting polymer/nanotubes composite electrodes using different cell configurations // *Electrochimica Acta*. 2005. Vol. 50, Issue 12. P. 2499–2506. DOI: 10.1016/j.electacta.2004.10.078.
10. Yoon S.-B., Yoon E.-H., Kim K.-B. Electrochemical properties of leucoemeraldine, emeraldine, and pernigraniline forms of polyaniline/multiwall carbon nanotube nanocomposites for supercapacitor applications // *Journal of Power Sources*. 2011. Vol. 196, Issue 24. P. 10791–10797. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.08.107.
11. Fedorovskaya E. O., Okotrub A. V., Bulusheva L. G. Supercapacitor performance of aligned carbon nanotube/polyaniline composite depending on the duration of aniline polycondensation // *Fullerenes, Nanotubes, and Carbon Nanostructures*. 2012. Vol. 20, Issue 4-7. P. 519–522. DOI: 10.1080/1536383X.2012.655961.
12. Yang M., Cheng B., Song H. [et al.]. Preparation and electrochemical performance of polyaniline-based carbon nanotubes as electrode material for supercapacitor // *Electrochimica Acta*. 2010. Vol. 55, Issue 23. P. 7021–7027. DOI: 10.1016/j.electacta.2010.06.077.
13. Meng C., Liu C., Chen L., Hu C., Fan S. Highly flexible and all-solid-state paperlike polymer supercapacitors // *Nano Letters*. 2010. Vol. 10, Issue 10. P. 4025–4031. DOI: 10.1021/nl1019672.
14. Лобов И. А., Шулуc И. К. Влияние времени синтеза на морфологию и электронную структуру полианилина // *Омский научный вестник*. 2018. № 3 (159). С. 98–101. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-159-98-101.
15. Scibioh M. A., Viswanathan B. *Materials for supercapacitor application*. Elsevier, 2020. 400 p. ISBN 9780128198582; 9780128198599.
16. Dawoud H., Al tahtamouni T., Zagho M. [et al.]. A brief overview of flexible CNT/PANI super capacitors // *Materials Science and Nanotechnology*. 2017. Vol. 1. P. 23–36. DOI: 10.35841/nanotechnology.1.2.23-36.

ДАВЛЕТКИЛЬДЕЕВ Надим Анварович, кандидат физико-математических наук, доцент (Россия), старший научный сотрудник лаборатории физики наноматериалов и гетероструктур.

SPIN-код: 6152-0060

ORCID: 0000-0002-5591-6118

AuthorID (SCOPUS): 6507151568

ResearcherID: J-4322-2013

ЛОБОВ Иван Андреевич, младший научный сотрудник лаборатории физики наноматериалов и гетероструктур.

SPIN-код: 4327-6797

ORCID: 0000-0003-2527-1715

НИКИФОРОВА Алена Олеговна, инженер Института радиофизики и физической электроники.

СОКОЛОВ Денис Витальевич, младший научный сотрудник лаборатории физики наноматериалов и гетероструктур.

SPIN-код: 7611-7730

AuthorID (SCOPUS): 57193716614

ORCID: 0000-0002-8120-6638

ResearcherID: AAE-3053-2019

Адрес для переписки: classicsub-zero@mail.ru

Для цитирования

Давлеткильдеев Н. А., Лобов И. А., Никифорова А. О., Соколов Д. В. Структурные, емкостные и энергетические характеристики электрохимических электродов на основе наноконструкций «полианилин/многостенные углеродные нанотрубки» // *Омский научный вестник*. 2020. № 6 (174). С. 81–86. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-174-81-86.

Статья поступила в редакцию 30.10.2020 г.

© Н. А. Давлеткильдеев, И. А. Лобов, А. О. Никифорова, Д. В. Соколов