08,10

Влияние оксидов марганца и серебра на структурные и электрохимические свойства композитов с полианилином

© И.А. Лобов[1], С.Н. Несов[1,¶], Е.В. Князев[1], С.А. Матюшенко[1], К.Е. Ивлев[1], Е.С. Земсков[1], Е.А. Григорьев[2]

[1] Омский научный центр СО РАН,
Омск, Россия
[2] Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

¶ E-mail: nesov55@mail.ru

Поступила в Редакцию 5 ноября 2025 г.
В окончательной редакции 10 декабря 2025 г.
Принята к публикации 15 декабря 2025 г.

Представлен анализ структуры и электрохимических характеристик композитов, полученных путем химической полимеризации анилина в растворе $HReO_4$ в присутствии многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ), предварительно декорированных слоями кристаллического оксида K_xMnO_2 и наночастицами нестехиометрического оксида серебра ($Ag_{2-x}O$). Исследование проводилось с применением методов растровой и просвечивающей электронной микроскопии и циклической вольтамперометрии. Показано, что наличие на поверхности МУНТ оксида K_xMnO_2 обеспечивает формирование полианилина (ПАНИ), характеризующегося высокой скоростью протекания редокс-реакции лейкоэмералдин/эмералдин, а присутствие наночастиц $Ag_{2-x}O$ приводит к формированию полых микросфер ПАНИ с диаметром до ~ 500 nm и толщиной стенок ~ 10 nm. Это повышает скорость редокс-реакции n-бензохинон/гидрохинон, что отражается в увеличении удельной емкости материала до 417.1 F/g.

Ключевые слова: наноструктурированные композиты, электропроводные полимеры, окислительная полимеризация анилина, оксиды металлов, электронная микроскопия

DOI: 10.61011/FTT.2026.01.62589.312-25

1. Введение

Суперконденсаторы (СК) являются перспективными источниками электропитания устройств, потребляющих энергию в импульсном режиме (электронные замки, приводы, излучатели, реле, и т.д.). По сравнению с электролитическими конденсаторами СК характеризуются более высокой емкостью, а также обладают повышенными значениями удельной мощности в сравнении с литий-ионными аккумуляторами. Накопление заряда в традиционных СК реализуется за счет формирования двойного электрического слоя (ДЭС) на поверхности пористых углеродных электродов, помещенных в электролит, поэтому их часто называют двойнослойными СК (ДСК). Значительным недостатком ДСК является малая удельная плотность энергии, что ограничивает возможности применения ДСК в качестве источников постоянного питания [1–3].

Псевдоконденсаторы (ПК) являются особым видом СК, в которых один или оба электрода содержат активный компонент, на поверхности которого в процессе заряда/разряда протекают быстрые квазиобратимые окислительно-восстановительные реакции (или редокс-реакции). Емкость, связанную с протеканием таких реакций, принято называть псевдоемкостью [4]. С целью увеличения площади поверхности, на которой протекают редокс-реакции, в качестве электродных материалов ПК применяют пористые и наноструктурированные материалы. Таким образом, накопление заряда в ДЭС также вносит заметный вклад в общую емкость. ПК характеризуются более высокими значениями удельной энергии и емкости по сравнению с ДСК [1]. В качестве активного компонента в составе электродов ПК используют оксиды переходных металлов, а также электропроводящие полимеры [1,4].

Оксид марганца в различных формах является наиболее перспективным активным материалом для ПК благодаря высоким значениям теоретической емкости, относительной экологической безопасности и доступности. Кроме того, оксиды марганца, допированные щелочными металлами (K, Na и др.), обладают уникальной слоистой структурой, которая обеспечивает возможность быстрой интеркаляции ионов электролита в процессе заряда [5–7]. Существенным недостатком оксидных систем на основе марганца является сравнительно низкая электропроводность, что ограничивает скорость накопления и отдачи заряда. Решить данную проблему можно путем добавления в оксид марганца электропроводных металлов (Ag, Cu и др.) или их оксидов [8,9], а также путем формирования композитов с различными углеродными материалами, характеризующимися высокой удельной площадью поверхности (графен, углеродные нанотрубки (УНТ), углеродные нановолокна, технический углерод) [10,11]. В последнем случае кроме повышения

электропроводности, достигается также увеличение активной площади поверхности оксида металла вследствие его распределения по поверхности углеродной матрицы в виде слоев или наночастиц.

Среди электропроводящих полимеров в качестве электродного материала для ПК активно исследуется полианилин (ПАНИ). Данный полимер может существовать в виде форм с различной степенью окисления, переход между которыми обеспечивает накопление заряда. Несмотря на высокое значение теоретической удельной емкости ПАНИ (около 2000 F/g) [12], в „чистом“ виде он имеет низкую пластичность и механическую стабильность, что ограничивает возможности изготовления электродов СК на его основе. Комбинирование ПАНИ с различными видами высокодисперсного электропроводящего углерода позволяет получать материалы с необходимым набором технологических характеристик для производства электродов ПК, удельная емкость которых в водных неорганических электролитах находится в диапазоне 10^2-10^3 F/g [13–15].

Немалый интерес вызывает возможность создания высокоемкостных материалов для ПК на основе ПАНИ и оксида марганца [16–18]. В частности, в работе [18] сообщалось, что композит на основе ПАНИ, оксида марганца и наночастиц Ag обладает удельной емкостью свыше 500 F/g и высокой скоростной способностью. Авторы объяснили высокие характеристики композита синергетическим эффектом комбинированных редокспроцессов, протекающих с участием ПАНИ и оксида марганца, а также повышением электронной проводимости, обусловленной наличием наночастиц серебра.

В нашей предыдущей работе [19] были исследованы структура и электрохимические характеристики композита на основе многостенных УНТ (МУНТ) и слоистого оксида K_xMnO_2, допированного наночастицами $Ag_{2-x}O$, максимальная удельная емкость которого составила ~ 200 F/g в водном электролите. В настоящей работе исследуется возможность получения материала, обладающего более высокими электрохимическими характеристиками, путем осаждения на поверхность указанного композита наноразмерных слоев ПАНИ.

2. Эксперимент

2.1. Анализ структуры и состава композитов

Исследование морфологии композитов проводилось методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) с использованием микроскопа ZEISS MERLIN. Изображения исследуемых образцов были получены в режиме регистрации вторичных электронов с использованием детектора с энергетическим фильтром вторичных электронов для исследования наноструктурированных материалов (режим „InLens“), а также в режиме регистрации обратно рассеянных электронов (режим „AsB“) для визуализации композиционного контраста, основанного на различиях коэффициента отражения электронов для компонентов с разной плотностью. Элементный состав материалов исследовался методом энергодисперсионного рентгеновского анализа (ЭДА) с применением растрового электронного микроскопа Jeol JSM-6610 LV с энергодисперсионным анализатором IncaX−Act при значении ускоряющего напряжения 20 kV.

Анализ структуры и морфологии композитов методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) был проведен с использованием микроскопов Jeol JEM-2100 и Zeiss Libra200FE в режиме светлопольного изображения при ускоряющем напряжении 200 kV.

2.2. Синтез „первичных“ композитов

В настоящей работе в качестве углеродной основы композитов применялись МУНТ со средним диаметром $\sim 7-10$ nm, которые были синтезированы методом каталитического газофазного осаждения (МУНТ-1, ИК СО РАН, Новосибирск) [20]. Синтез „первичных“ композитов проводился путем обработки МУНТ в растворе $KMnO_4$ при температуре 60 °C и постоянном перемешивании. Для допирования композита оксидом серебра в реакционный раствор добавляли $AgNO_3$. Время синтеза композитов составляло 6 h. Детально условия синтеза были описаны в нашей предыдущей работе [19]. Для краткости изложения недопированный и допированный Ag композиты обозначим как K1 и K2 соответственно.

2.3. Синтез композитов с ПАНИ

„Первичные“ композиты K1 и K2 были использованы в качестве основы для формирования композитов с ПАНИ, синтез которых проводился методом химической окислительной полимеризации анилина в 1M $HReO_4$. Непосредственно перед синтезом „первичные“ композиты диспергировались ультразвуком в течение 30 min в растворе рениевой кислоты. Далее к этой суспензии добавлялся анилин в количестве 10 к 1 по отношению к „первичному“ композиту. Для инициации реакции полимеризации отдельно приготавливался водный раствор персульфата аммония (ПСА). Анилин и ПСА брались в эквимолярном соотношении. Оба раствора охлаждались на ледяной бане, после чего раствор, содержащий ПСА, по каплям добавлялся к раствору с анилином при постоянном перемешивании. Далее раствор перемешивался с постоянной скоростью при температуре 0 °C в течение 1 h. Продукты реакции отмывались водой, этиловым спиртом и ацетоном для удаления непрореагировавших компонентов с дальнейшей сушкой при 60 °C и 1 Pa до постоянной массы. Композиты с ПАНИ, полученные на основе недопированного (K1) и допированного Ag (K2) „первичных“ композитов, были обозначены как P@K1 и P@K2 соответственно. По описанной методике был синтезирован также композит на основе исходных МУНТ (P@CNT), который использовался в качестве образца сравнения при анализе электрохимических характеристик.

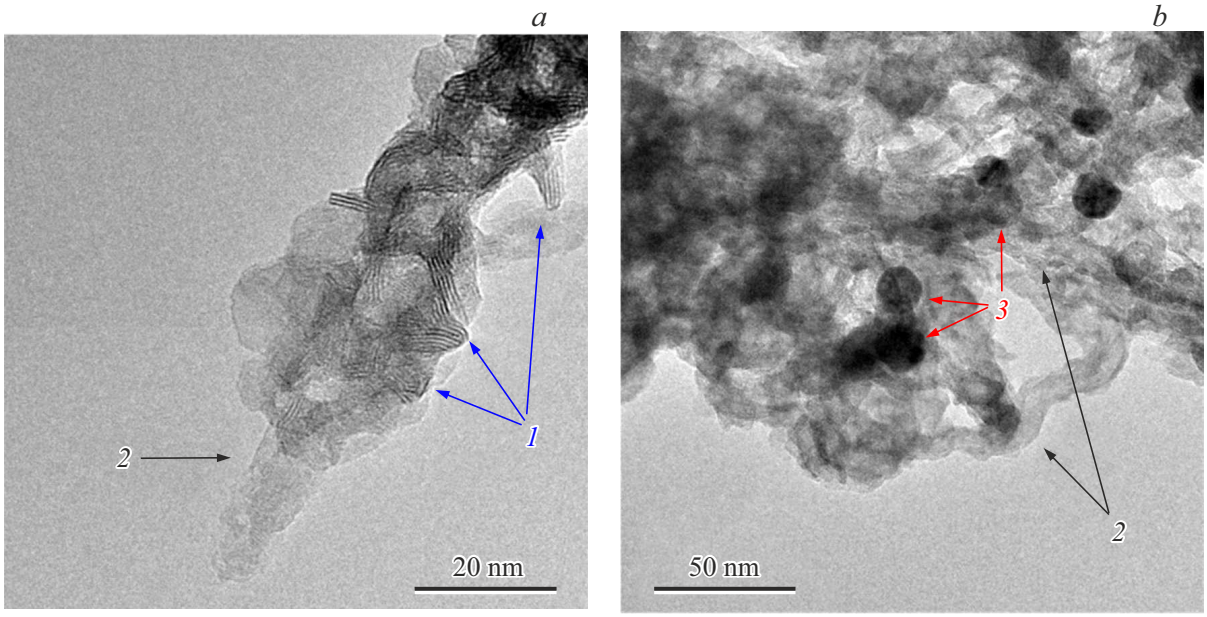


Рис. 1. ПЭМ-изображения композитов K1 (*a*) и K2 (*b*). Цифрами обозначены: *1* — кристаллиты K_xMnO_2; *2* — МУНТ, покрытые слоем K_xMnO_2; *3* — наночастицы $Ag_{2-x}O$.

Традиционно химическая полимеризация анилина проводится в присутствии HCl, которая является достаточно сильной кислотой и может привести к растворению оксидов марганца и серебра на поверхности МУНТ в „первичных“ композитах. В виду этого при синтезе композитов с ПАНИ вместо соляной кислоты использовалась менее сильная рениевая кислота. Значение показателя константы кислотности (pK_a) для HCl и $HReO_4$ составляют -5.9 и -1.25, соответственно. Кроме этого, соединения Re известны своей каталитической активностью [21], что может обеспечить более активное взаимодействие полимера с металлами и их оксидами в формируемых композитах.

2.4. Анализ электрохимических характеристик

Электроды формировались путем прессования полученных композитов с ПАНИ при давлении около 5 MPa без добавления связующего вещества. Измерения проводились методом циклической вольтамперометрии (ЦВА) по трехэлектродной схеме с платиновым противоэлектродом и хлоридсеребряным электродом сравнения в электролите 1M HCl. Для определения удельной емкости использовались данные ЦВА в диапазоне потенциала от 0 до 0.8 V при скорости развертки потенциала от 1 до 10 mV/s. При расчете электрохимических характеристик использовался метод преобразования энергии [22].

3. Результаты и обсуждение

3.1. Структура и состав композитов

В „первичном“ композите K1 (рис.1, *a*) поверхность МУНТ покрыта кристаллитами, которые ранее с применением комплекса методов были идентифицированы как кристаллиты K_xMnO_2 [19]. Композит K2 обладает схожей структурой, однако в нем дополнительно присутствуют наночастицы нестехиометрического оксида $Ag_{2-x}O$ с характерными размерами до ~ 15 nm (рис. 1, *b*). Содержание серебра в композите K2 по данным рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии составляет ~ 1 at.% [19].

Анализ серии РЭМ-изображений композита P@K1 показал, что он обладает однородной морфологией (см. рис. 2). Наблюдается наличие трубчатых структур с характерным диаметром до ~ 50 nm, которые, очевидно, являются МУНТ, поверхность которых покрыта слоем ПАНИ. По оценкам, толщина слоя ПАНИ достигает ~ 20 nm. Непокрытые полимером МУНТ в композите отсутствуют.

Анализ РЭМ-изображений композита P@K2 показал, что его морфология неоднородна (рис. 3). Наблюдается наличие двух типов структурных образований. Первый тип — это трубчатые структуры, подобные присутствующим в композите P@K1. Оценка характерных размеров трубчатых структур (до ~ 110 nm) позволяет говорить, что в композите P@K2 толщина слоев ПАНИ на поверхности МУНТ достигает ~ 50 nm. Второй тип структурных образований, присутствующих в композите P@K2 — сфероподобные структуры (микросферы),

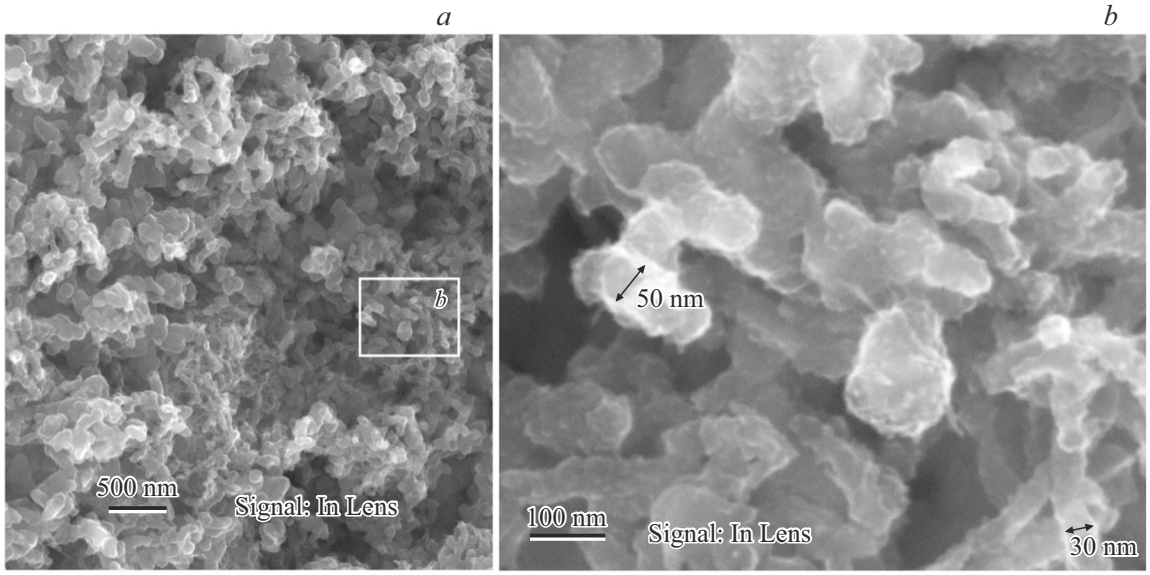


Рис. 2. РЭМ-изображения композита P@K1, полученные в режиме „InLens".

характерный диаметр которых находится в диапазоне $\sim 200-500$ nm (рис. 3). Некоторые из указанных микросфер имеют хорошо различимые отверстия с диаметрами от нескольких десятков до ~ 100 nm, через которые просматривается их полая структура (рис. 3, *a*). Более высокая яркость микросфер по сравнению с трубчатыми структурами на РЭМ-изображениях, полученных в режиме „AsB" (рис. 3, *d*), позволяет говорить о более высокой плотности полимера в составе микросфер. Это может быть обусловлено его допированием серебром или его соединениями. Формирование схожих сферических образований при синтезе ПАНИ в присутствии металлов (Ag, Au) описано в литературе [23,24]. Однако механизмы роста полых сферических структур ПАНИ остаются неисследованными.

Для сравнения количественного элементного состава композитов с использованием метода ЭДА проводилось усреднение результатов, полученных на пяти различных участках размером $200 \times 200\,\mu$m. Типичные спектры композитов P@K1 и P@K2 представлены на рис. 4, *a* и рис. 4, *b*, соответственно. Было обнаружено, что в обоих композитах с ПАНИ полностью отсутствуют марганец и калий (рис. 4, *a* и рис. 4, *b*, таблица). Это свидетельствует о растворении оксида K_xMnO_2, присутствующего на поверхности МУНТ в „первичных" композитах, в процессе полимеризации анилина. В спектрах ЭДА композита P@K2 присутствуют линии Ag (рис. 4, *b* и рис. 4, *c*), средняя концентрация которого составляет ~ 0.7 at.% (таблица). При этом на спектрах ЭДА для участков со скоплением микросфер интенсивность линий Ag значительно выше (рис. 4, *c*). На основе представленных результатов можно утверждать, что именно наночастицы нестехиометрического оксида $Ag_{2-x}O$, присутствующие в составе „первичного" композита K2, могут являться центрами формирования микросфер в композите P@K2.

Соотношение концентраций углерода и азота в композитах P@K1 и P@K2 характерно для ПАНИ. Присутствующий в составе обоих композитов Re указывает на допирование полимера рениевой кислотой. Наличие серы и кислорода связано с остатками продуктов реакции персульфата аммония, используемого при полимеризации анилина в качестве окислителя [15].

Анализ ПЭМ-изображений показал, что в составе композита P@K1 слой ПАНИ, сформированный на поверхности МУНТ, обладает однородной аморфной структурой и не содержит плотных наночастиц (рис. 5). Хорошо видно, что кристаллиты K_xMnO_2 отсутствуют и на поверхности МУНТ (рис. 5, *c*). Это подтверждает полное растворение кристаллитов K_xMnO_2 в процессе полимеризации анилина.

Анализ ПЭМ-изображений трубчатых структур в композите P@K2 (рис. 6) позволяет говорить, что в данном случае на поверхности МУНТ присутствуют слои ПАНИ с большей толщиной (по сравнению с композитом P@K1). Характерная толщина слоя ПАНИ составляет $\sim 20-30$ nm. В толще слоя полимера наблюдается наличие фрагментарно распределенных плотных наночастиц с размерами порядка нескольких nm (рис. 6, *c*), которые, в соответствии с данными ЭДА, наиболее вероятно, содержат атомы серебра.

Анализ ПЭМ-изображений микросфер, присутствующих в композите P@K2, подтверждает наличие в них внутренних полостей (рис. 7). По нашим оценкам, толщина стенок микросфер составляет ~ 10 nm. Наблюдаемые различия контраста на стенках сфер могут быть связаны как с флуктуациями толщины слоя полимера, так и с локальными различиями их структуры и состава.

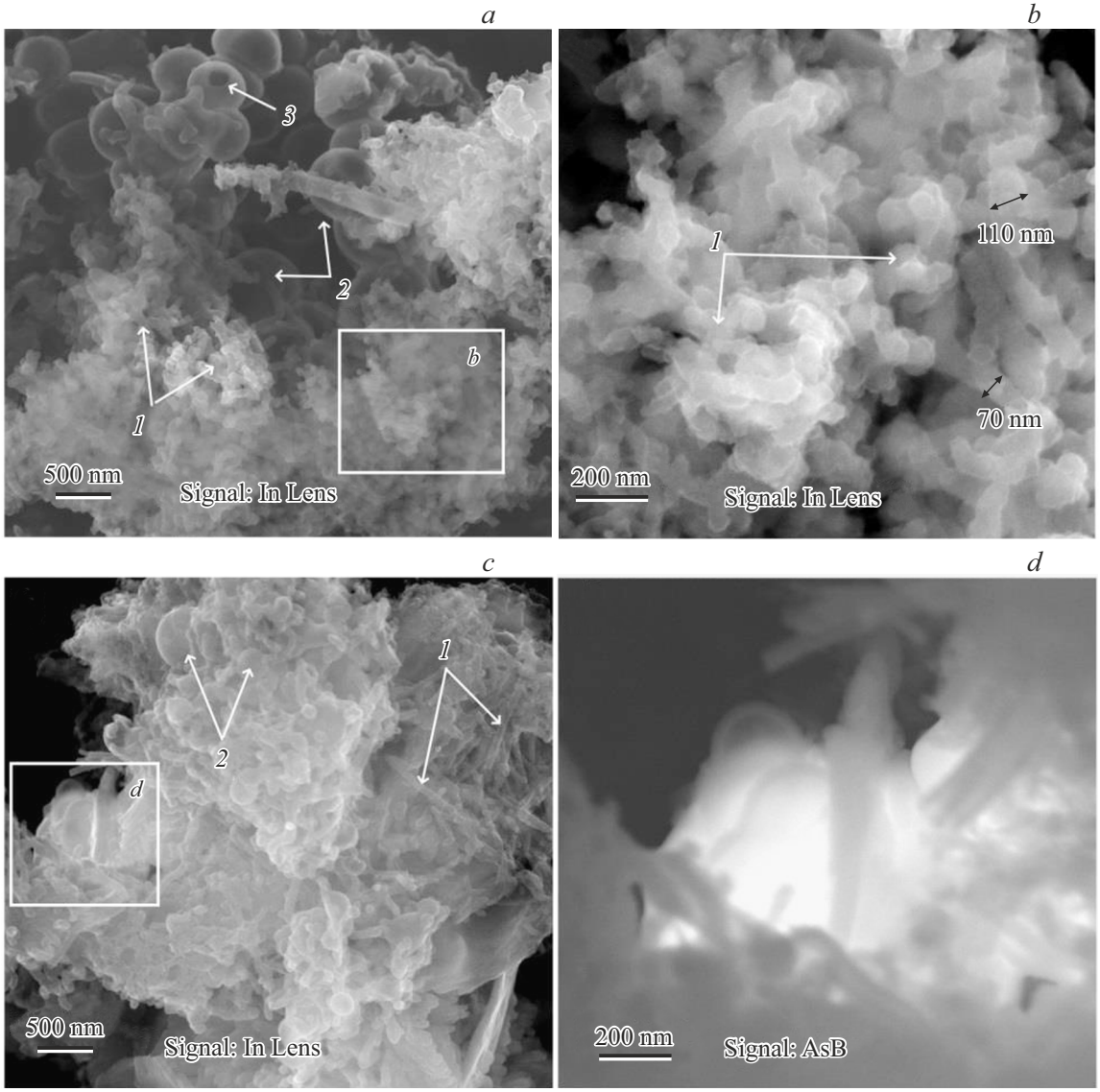


Рис. 3. РЭМ-изображения композита P@K2, полученные в режимах „InLens“ ($a-c$) и „AsB“ (d). Цифрами обозначены: *1* — трубчатые структуры (МУНТ, покрытые ПАНИ); *2* — микросферы; *3* — отверстие в стенке микросферы.

Состав композитов по данным ЭДА (среднее значение по 5 участкам)

Композит	Концентрация, at.%					
	C	N	O	S	Re	Ag
P@K1	75.9 ± 0.86	13.5 ± 0.62	8.4 ± 0.28	1.1 ± 0.05	1.1 ± 0.05	–
P@K2	75.8 ± 2.79	13.0 ± 1.48	8.4 ± 2.84	1.2 ± 0.41	0.9 ± 0.17	0.7 ± 0.22

На некоторых участках стенок микросфер присутствуют скопления плотных наночастиц (рис. 7, c), которые, предположительно, содержат атомы серебра. Отдельные микросферы на ПЭМ-изображениях не являются полностью замкнутыми (рис. 7, b).

Полученные данные о структуре и составе композитов с ПАНИ (P@K1 и P@K2) показали, что, вопреки нашим ожиданиям, оксид K_xMnO_2, присутствующий на поверхности МУНТ в „первичных“ композитах, оказался неустойчивым в условиях полимеризации анилина с применением рениевой кислоты. Метод ЭДА не зафиксировал присутствия атомов марганца и калия в композитах P@K1 и P@K2. Мы полагаем, что оксид K_xMnO_2 в кислой среде также может участвовать в

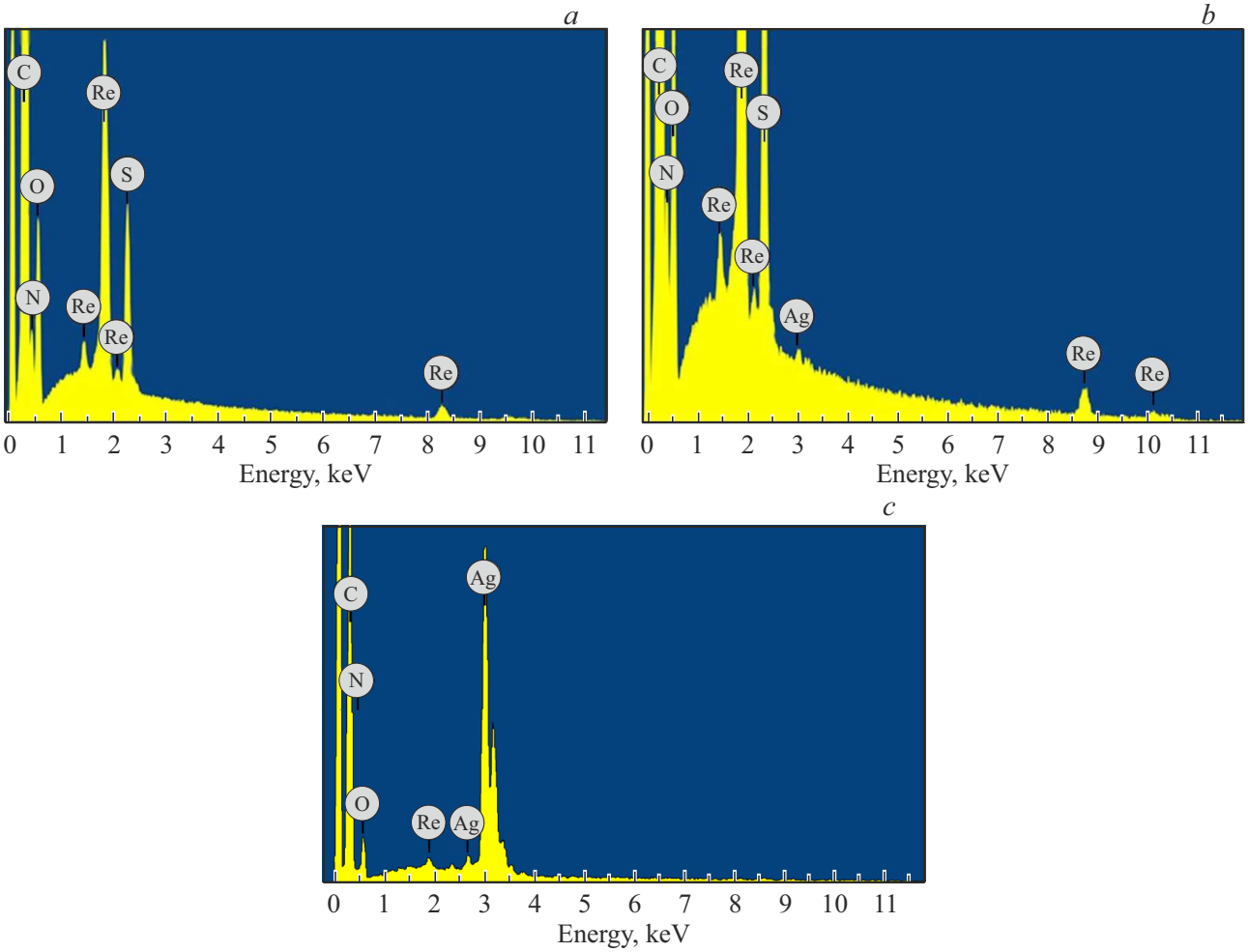


Рис. 4. ЭДА-спектры композитов P@K1 (a) и P@K2 (b), измеренные на участках размером $200 \times 200\,\mu$m и ЭДА-спектр композита P@K2 (c), измеренный в точке, содержащей скопление микросфер (область, представленная на рис. 3, d).

качестве окислителя анилина в процессе окислительной полимеризации, что, в свою очередь, может значительно повлиять на электрохимическую активность ПАНИ. Показано, что наличие наночастиц нестехиометрического оксида серебра в „первичном“ композите K2 приводит к формированию полых микросфер ПАНИ с диаметрами до ~ 500 nm и толщиной стенок ~ 10 nm.

3.2. Электрохимические характеристики композитов

Циклические вольтамперограммы всех композитов имеют типичные для ПАНИ окислительно-восстановительные пики A/A′ и B/B′, соответствующие превращениям лейкоэмералдин/эмералдин и образованию пары n-бензохинон/гидрохинон, соответственно [15,25,26] (рис. 8, a). Однако на циклических вольтамперограммах композитов P@K1 и P@K2 эти пики смещены в область высоких значений потенциала (сдвиг составляет ~ 100 и 50 mV для пиков A/A′ и B/B′, соответственно), что говорит об увеличении потенциала этих реакций по сравнению с композитом P@CNT. Это может быть связано с более окисленной формой ПАНИ, синтезированного в присутствии МУНТ, покрытых слоем K_xMnO_2.

При этом пиковые значения плотности тока для реакции окисления A практически вдвое выше для композитов P@K1 и P@K2 по сравнению с композитом P@CNT, что указывает на значительное увеличение скорости окисления лейкоэмералдина. Так как значения потенциала редокс-реакции A/A′, а также пиковые значения плотности тока этой реакции для композитов P@K1 и P@K2 практически совпадают, мы полагаем, что эти изменения электрохимического поведения могут быть обусловлены влиянием оксида K_xMnO_2, который присутствует на поверхности МУНТ в обоих „первичных“ композитах, на структуру ПАНИ. Данный оксид в кислой среде может участвовать в реакции окисления анилина с восстановлением до хорошо растворимого оксида Mn^{2+}. Данное предположение согласуется с отсутствием марганца в результатах элементного анализа композитов P@K1 и P@K2.

На ЦВА-кривой композита P@K2 пик A имеет заметное протяженное „плечо“ в области высоких значений потенциала, обозначенное как D (рис. 8, *a*). Мы полагаем, что данный пик может также отвечать реакции окисления лейкоэмералдина, которая протекает на поверхности полимерных микросфер, присутствующих в композите P@K2. Повышение потенциала реакции

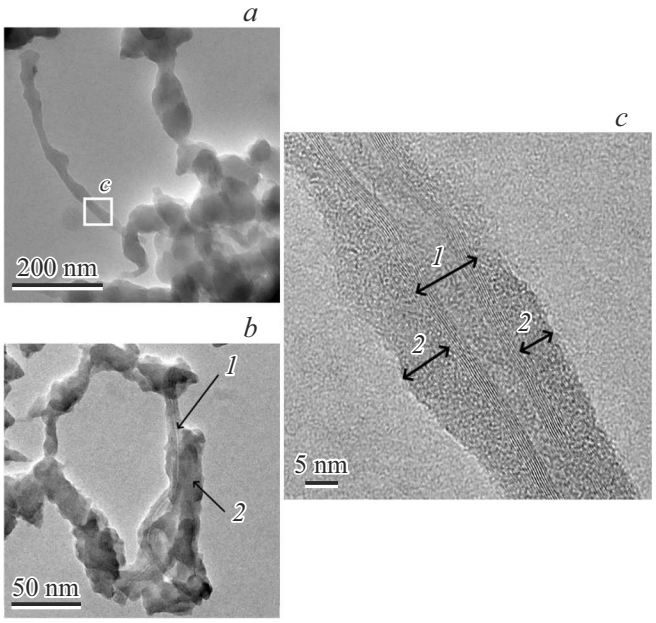


Рис. 5. ПЭМ-изображения композита P@K1 при различном увеличении. Цифрами обозначены: *1* — МУНТ; *2* — слой ПАНИ.

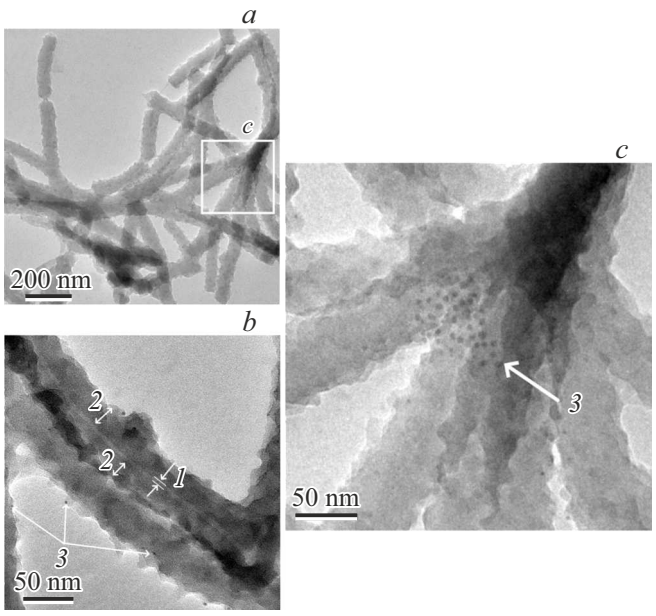


Рис. 6. ПЭМ-изображения трубчатых структур в составе композита P@K2. Цифрами обозначены: *1* — МУНТ; *2* — слой ПАНИ; *3* — плотные наночастицы

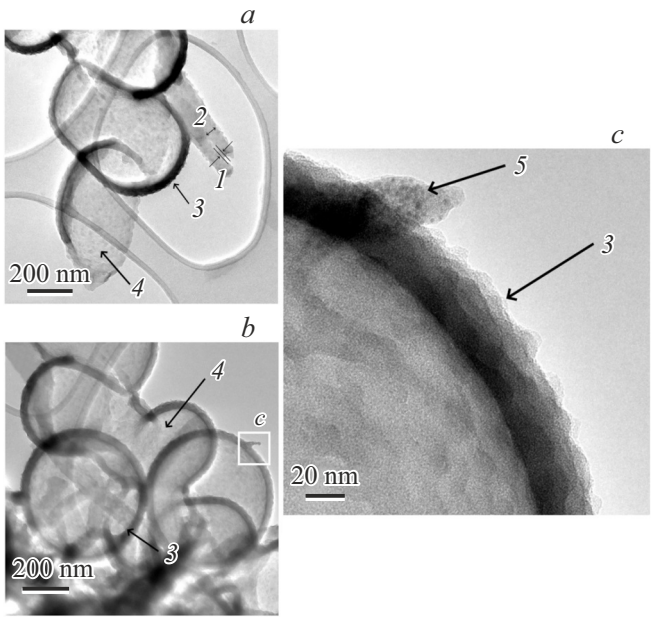


Рис. 7. ПЭМ-изображение микросфер в составе композита P@K2. Цифрами обозначены: *1* — МУНТ; *2* — слой ПАНИ на МУНТ; *3* — микросферы; *4* — микросферы с отверстиями в стенках; *5* — плотные наночастицы.

в данном случае может быть обусловлено более высоким контактным электросопротивлением на границе „сфера–сфера“ по сравнению с сопротивлением контакта „слой ПАНИ-поверхность МУНТ“. Окислительный пик B на вольтамперограмме композита P@K2 характеризуется более высоким пиковым значением плотности тока и расположен в более широком диапазоне потенциалов. Это также может быть обусловлено различием потенциала реакции окисления n-бензохинона на поверхности трубчатых и сферических структур, присутствующих в композите. При этом высокое пиковое значения плотности тока для пика B указывает на увеличение скорости окисления n-бензохинона в композите P@K2 по сравнению с композитом P@K1. Мы полагаем, что последнее может быть обусловлено эффектом размерности, а именно: наноразмерной толщиной ПАНИ в стенках микросфер. Ранее в работе [15] нами было показано, что формирование наноразмерных слоев ПАНИ приводит к значительному росту скорости редокс-реакции n-бензохинон/гидрохинон.

Зависимости удельной емкости (Cs) от скорости развертки потенциала для исследуемых электродов представлены на рис. 8, *b*. Видно, что значения Cs для электродов на основе P@K1 и P@K2 значительно выше по сравнению с электродом на основе P@CNT. Максимальным значением удельной емкости ($C_s = 417.1$ F/g при скорости развертки потенциала 1 mV/s) обладает электрод на основе P@K2. Быстрое снижение удельной емкости для всех электродов обусловлено высоким вкладом редокс-процессов в накопление заряда.

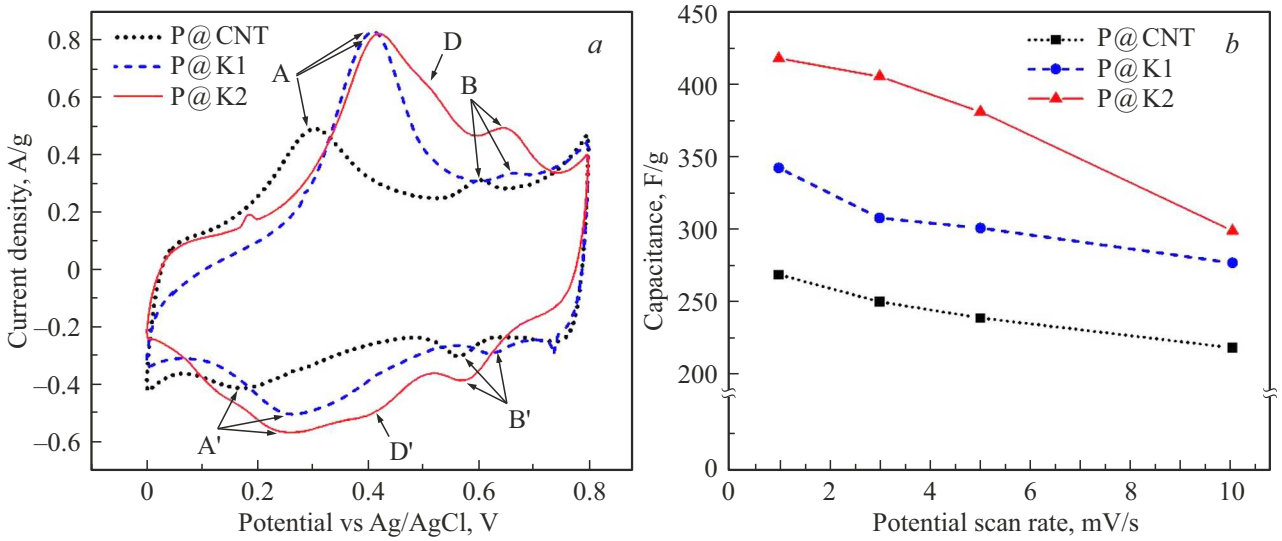


Рис. 8. *a* — циклические вольтамперограммы композитов, измеренные при скорости развертки потенциала 1 mV/s; *b* — зависимость удельной емкости композитов от скорости развертки потенциала.

4. Заключение

В настоящей работе изучена возможность синтеза наноструктурированных композитных материалов на основе ПАНИ и МУНТ, декорированных слоями кристаллического оксида K_xMnO_2 и наночастицами $Ag_{2-x}O$, проведен анализ структуры и электрохимических свойств полученных материалов. При синтезе композитов полимеризация анилина проводилась с использованием рениевой кислоты в качестве допанта. Анализ элементного состава полученных композитов методом ЭДА не обнаружил наличия марганца или калия в их составе. Однако анализ электрохимических характеристик показал увеличение скорости протекания редокс-реакции лейкоэмералдин/эмералдин в полимере, сформированном на поверхности МУНТ, предварительно декорированных оксидом K_xMnO_2. Предположительно, оксид K_xMnO_2 может выступать в качестве дополнительного окислителя анилина в процессе полимеризации. Наличие наночастиц $Ag_{2-x}O$ приводит к формированию в композите надмолекулярных структурных образований ПАНИ в виде полых микросфер с толщиной стенок ~ 10 nm. По данным РЭМ ПАНИ в составе стенок микросфер обладает высокой плотностью и содержит включения наночастиц, содержащих Ag. Анализ циклических вольтамперограмм показал, что наличие микросфер обеспечивает значительное повышение электрохимической активности материала за счет увеличения скорости редокс-реакции n-бензохинон/гидрохинон. Анализ электрохимических характеристик полученных композитов с ПАНИ показал, что предварительное декорирование поверхности МУНТ оксидом K_xMnO_2 обеспечивает рост максимальной удельной емкости композитов на 27 %. Дополнительное допирование „первичного“ композита наночастицами $Ag_{2-x}O$ обеспечивает рост максимальной удельной емкости на ~ 55 %.

Благодарности

Исследования методом РЭМ проведены на нефинансовой основе с использованием оборудования Ресурсного центра „Нанотехнологии“ Санкт Петербургского государственного университета (проект АААА-А19–119091190094). Исследования методом ПЭМ проводились с применением оборудования Омского регионального центра коллективного пользования СО РАН.

Финансирование работы

Исследование выполнено в рамках государственного задания Омского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук (номер гос. регистрации проекта 121021600004-7).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Ю.М. Вольфкович. Электрохимия **57**, *4*, 197 (2021). DOI: 10.31857/S0424857021040101

[2] M.E. Şahin, F. Blaabjerg, A. Sangwongwanich. Energies **15**, *3*, 674 (2022). https://doi.org/10.3390/en15030674

[3] M. Pershaanaa, Shahid Bashir, S. Ramesh, K. Ramesh. J. Energy Storage **50**, 104599 (2022). https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104599

[4] T. Prasankumar, J. Jose, S. Jose, S.P. Balakrishnan. In: Supercapacitors for the Next Generation. IntechOpen (2022). p. 154. DOI: 10.5772/intechopen.98600

[5] M. Moharramnejad, A. Ehsani, R.E. Malekshah, M. Shahi, R. Bavandpour, H. Rajabi, S.M. Mojab. J. Mater. Sci.: Mater. Electron. **33**, 19693 (2022). https://doi.org/10.1007/s10854-022-08828-z
[6] Е.А. Архипова, А.С. Иванов, С.К. Николенко, К.И. Маслаков, С.В. Савилов, С.М. Алдошин. Журнал прикладной химии **96**, *1*, 4 (2023). DOI: 10.31857/S0044461823010012
[7] S.N. Nesov, I.A. Lobov, S.A. Matyushenko, E.A. Grigoriev. ECS J. Solid State Sci. Technol. **13**, 101002 (2024). DOI: 10.1149/2162-8777/ad8517
[8] M.U. Khalid, S. Zulfiqar, M.N. Khan, I. Shakir, M.F. Warsi, E.W. Cochran. Mater. Adv. **5**, *15*, 6170 (2024). https://doi.org/10.1039/d4ma00118d
[9] R. Ai, X. Zhang, S. Li, Z. Wei, G. Chen, F. Du. Chem. Eur. J. **30**, e202400791 (2024). DOI: 10.1002/chem.202400791
[10] L. Chen, Y. Zhang, C. Hao, X. Zheng, Q. Sun, Y. Wei, B. Li, L. Ci, J. Wei. ChemElectroChem **9**, e202200059 (2022). DOI: 10.1002/celc.202200059
[11] Z. Pan, C. Yang, Y. Li, X. Hu, X. Ji. Chem. Eng. J. **428**, 131138 (2022). DOI: 10.1016/j.cej.2021.131138
[12] H. Li, J. Wang, Q. Chu, Z. Wang, F. Zhang, S. Wang. J. Power Sources **190**, *2*, 578 (2009). DOI: 10.1016/j.jpowsour.2009.01.052
[13] H. Yu, G. Xin, X. Ge, C. Bulin, R. Li, R. Xing, B. Zhang. Compos. Sci. Technol. **154**, 76 (2018). https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.11.010
[14] E.I. Yesilyurt, J. Pionteck, F. Simon, B. Voit. RSC Appl. Polym. **1**, 97 (2023). https://doi.org/10.1039/D3LP00061C
[15] И.А. Лобов, С.Н. Несов, Е.А. Дроздова. ФТТ **66**, *9*, 1591 (2024). DOI: 10.61011/FTT.2024.09.58785.188
[16] S. Xi, X. Qian, X. Cheng, H. Liu, H. Shabanzadeh, D. Dastan. iScience **28**, *2*, 111774 (2025). https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.111774
[17] S. Abbas, S. Manzoor, M. Abdullah, et al. J. Mater. Sci.: Mater. Electron. **33**, 25355 (2022). https://doi.org/10.1007/s10854-022-09242-1
[18] C. Pan, Y. Lv, H. Gong, Q. Jiang, S. Miao, J. Liu. RSC Adv. **6**, *21*, 17415 (2016). https://doi.org/10.1039/c5ra18403g
[19] С.Н. Несов, И.А. Лобов, С.А. Матюшенко, Е.В. Князев, В.В. Болотов, Е.С. Земсков, Е.В. Жижин, А.В. Королева, Е.А. Григорьев. ФТТ **67**, *6*, 1010 (2025). DOI: 10.61011/FTT.2025.06.60949.154-25
[20] V.L. Kuznetsov, D.V. Krasnikov, A.N. Schmakov, K.V. Elumeeva. Phys. Status Solidi B **249**, *12*, 2390 (2012). DOI: 10.1002/pssb.201200120
[21] A. Olding, M. Tang, C.C. Ho, R.O. Fuller, A.C. Bissember. Dalton Trans. **51**, *8*, 3004 (2022). https://doi.org/10.1039/d1dt04205j
[22] С.А. Матюшенко, С.Н. Несов. Динамика систем, механизмов и машин **12**, 78 (2024)
[23] N.M. Farrage, A.H. Oraby, E.M.M. Abdelrazek, D. Atta. Biointerface Res. Appl. Chem. **9**, *3*, 3934 (2019). https://doi.org/10.33263/BRIAC93.934941
[24] S. Abdulla, J. Dhakshanamoorthi, V.P. Dinesh, B. Pullithadathil. J. Biosens. Bioelectron **6**, 2 (2015). DOI: 10.4172/2155-6210.1000165
[25] I.V. Panasenko, M.O. Bulavskiy, A.A. Iurchenkova, Y. Aguilar-Martinez, F.S. Fedorov, E.O. Fedorovskaya, B. Mikladal, T. Kallio, A.G. Nasibulin. J. Power Sources **541**, 231691 (2022). DOI: 10.1016/j.jpowsour.2022.231691
[26] L. Sun, D. Miyagi, Y. Cai, A. Ullah, M.K. Haider, C. Zhu, M. Gopiraman, I.S. Kim. J. Energy Storage **61**, 106738 (2023). DOI: 10.1016/j.est.2023.106738

Редактор А.Н. Смирнов