

## Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 538.9

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11812>

## Электрофизические свойства композитных материалов на основе оксида графена и полианилина

Т. Н. Мясоедова, О. В. Недоедкова, Г. Э. Яловега 

Южный федеральный университет,

ул. Большая Садовая, 105/42, Ростов-на-Дону 344006, Российская Федерация

### Аннотация

Методом Холла изучены электрофизические характеристики композитных материалов на основе полианилина (ПАНИ), оксида графена (ОГ) с марганцем. Проведено сравнение этих характеристик композитных систем состава ОГ-ПАНИ и ОГ-ПАНИ-Mn с мономатериалами ОГ и ПАНИ.

Показано, что электрическая проводимость композитов значительно выше, чем мономатериалов и обусловлена подвижностью носителей заряда.

По данным УФ-видимой и ИК-спектроскопии определено, что ширина оптической запрещенной зоны ( $E_g$ ) композита ОГ-ПАНИ увеличивается при добавлении металла, но уменьшается по сравнению с ПАНИ, смещение характеристических колебаний в область более низких частот свидетельствует о ковалентном взаимодействии композита ОГ-ПАНИ с катионами марганца.

**Ключевые слова:** композитные материалы, полианилин, оксид графена, удельная проводимость, ширина запрещенной зоны

**Источник финансирования:** Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-22-00459 в Южном Федеральном Университете.

**Для цитирования:** Мясоедова Т. Н., Недоедкова О. В., Яловега Г. Э. Электрофизические свойства композитных материалов на основе оксида графена и полианилина. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2024;26(1): 104–110. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11812>

**For citation:** Myasoedova T. N., Nedoyedkova O. V., Yalovega G. E. Electrophysical properties of composite materials based on graphene oxide and polyaniline. *Condensed Matter and Interphases*. 2024;26(1): 104–110. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11812>

 Яловега Галина Эдуардовна, e-mail: [yalovega@sfedu.ru](mailto:yalovega@sfedu.ru)

© Т. Н. Мясоедова, О. В. Недоедкова, Г. Э. Яловега, 2024



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## 1. Введение

Объединение преимуществ разнородных материалов при образовании электроактивных композитов является технологическим прорывом при создании перспективных материалов с целью улучшения характеристик электронных устройств и суперконденсаторов. Это подтверждается рядом публикаций, которые показали, что высокой электронной проводимостью могут обладать нанокompозиты на основе полимеров, наноструктурированного углерода и оксидов переходных металлов [1–5]. При этом наблюдалось резкое увеличение переноса заряда в гибридных структурах в зависимости от вида химической связи между компонентами композитов. В процессе диагностики свойств таких нанокompозитов становится очевидным значение влияния межфазных взаимодействий и химических связей на их проводящие свойства.

Как проводящий полимер ПАНИ обладает электропроводностью, которая может контролироваться условиями синтеза [6]. Включение в структуру ПАНИ таких компонентов, как переходные металлы или их оксиды, часто используется для улучшения селективности и чувствительности химических взаимодействий [7]. При этом влияние допанта на характеристики ПАНИ не однозначно. Допирование ПАНИ двухвалентными ионами меди, цинка, никеля, кобальта, кадмия приводит к увеличению электропроводности композитов по сравнению с чистым полианилином, связанному с упорядочиванием полимерных цепей в результате взаимодействия с ионами металлов [7, 8]. В то же время модифицирование полианилина наностержнями ZnO приводит к уменьшению электропроводности композита в сравнении с чистым ПАНИ [9]. Модифицирование ПАНИ оксидом  $MnO_2$  показало, что этот материал обладает высокой собственной электропроводностью и хорошей кинетической обратимостью в результате взаимодействия между  $MnO_2$  и ПАНИ [10]. Предполагается, что введение неорганических допантов в проводящую полимерную матрицу полианилина является наиболее перспективным путем для создания нанокompозитов, где делокализованные  $\pi$ -электроны могут взаимодействовать с неорганическими наночастицами, приводя к улучшению его проводящих свойств [11].

Графен может образовывать многочисленные нанокompозиты с другими элементами или функциональными группами. Высокую проводимость графена и его оксида обеспечивает низ-

кое сопротивление диффузии ионов, что приводит к увеличению мощности и плотности энергии [12, 13]. Однако обработка графеновых материалов затруднена из-за агломерации и перепакровки графеновых листов в результате межплоскостного  $\pi$ - $\pi$  взаимодействия и сил Ван-дер-Ваальса, которые могут значительно ограничить диффузию ионов электролита между слоями графена [14]. Решением проблемы является разделение графена соответствующими прокладками, такими как углеродсодержащие материалы, металлы или оксиды металлов и другие псевдоемкостные материалы, например, проводящие полимеры [15]. Нанокompозиты графен-ПАНИ являются перспективными электродными материалами благодаря тому, что графен и наноструктуры, полученные на его основе, оказывают значительное влияние на улучшение свойств проводящих полимеров, таких как электрические свойства и структурная стабильность [16]. Путем распределения графена в матрице ПАНИ возможно избежать агрегации графена, что позволяет увеличить количество путей для переноса заряда и улучшить подвижность носителей заряда. Функциональные группы оксида графена обеспечивают высокое взаимодействие с полианилином за счет водородных и электростатических взаимодействий.

В данной работе исследовались электрофизические характеристики и структура синтезированных композитных систем состава ОГ-ПАНИ и ОГ-ПАНИ-Mn, в сравнении с мономатериалами.

## 2. Материалы и методы

Оксид графена получали модифицированным методом Хаммерса [17]. Для этого 10 г графита смешивали с 10 г нитрата натрия и 450 мл концентрированной  $H_2SO_4$  в течение 30 мин при 0 °С. Затем добавляли 60 г  $KMnO_4$ , поддерживая температуру 15–20 °С. Раствор перемешивали в течение 2 ч при температуре 40 °С. После добавления 800 мл деионизированной воды раствор перемешивали в течение 30 мин, повышая температуру до 85–90 °С. Затем добавляли, повышая температуру, 2000 мл воды и 60 мл 30%-ной  $H_2O_2$ . Полученную смесь промывали 30%-ным раствором HCl для удаления сульфатов из раствора оксида графита. Порошок ПАНИ синтезировали по бескислотной технологии, описанной ранее [18]. Для получения композита ОГ-ПАНИ на первом этапе ОГ функционализировали аминогруппами простым сольвотермическим методом [19]. Для этого 100 мг ОГ диспергировали в

35 мл этиленгликоля, затем дисперсную смесь перемешивали при температуре окружающей среды в течение 30 мин и помещали в автоклав. Автоклав располагали в предварительно нагретую конвективную печь с температурой 180 °C на 6 ч. Затем автоклав охлаждали до температуры окружающей среды, суспензию промывали деионизированной водой и сушили при 70 °C в течение 6 ч. Композиты ОГ-ПАНИ были получены путем смешивания порошка ОГ-NH<sub>2</sub> с раствором анилина/персульфата аммония. Соотношение анилин/ОГ составляло 2:1. В случае композита ОГ-ПАНИ-Mn в указанный раствор добавляли сульфат марганца так, чтобы содержание Mn в образце составила 3 масс. %.

ИК-спектры поглощения регистрировали на Фурье инфракрасном спектрофотометре (ФСМ-1202) в режиме «пропускание» в диапазоне волновых чисел 350–4250 см<sup>-1</sup> с шагом 2 см<sup>-1</sup>.

Спектры поглощения в УФ и видимой области регистрировались на двухлучевом спектрофотометре (Unico 2804, США) в диапазоне длин волн от 190 до 1100 нм. Ширина запрещенной оптической зоны ( $E_g$ ) исследуемых образцов определялась по методу Тауца:

$$(\alpha h\nu)^{1/N} = f(h\nu),$$

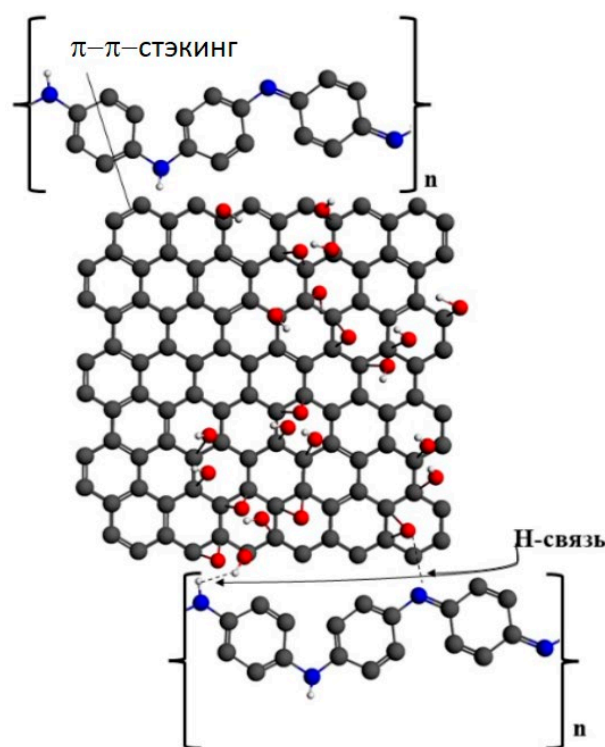
где  $\alpha$  – коэффициент поглощения,  $h$  – постоянная Планка,  $\nu$  – частота фотонов,  $n = 1/2$ .  $E_g$  определялась путем экстраполяции касательной к линейной части спектра до пересечения с осью ( $h\nu$ ).

Измерение удельной проводимости, концентрации и подвижности носителей заряда синтезированных материалов осуществлялось четырехзондовым холловским методом на приборе HMS-3000. Для этого образцы порошков спрессовали под давлением 30 ат в виде таблеток квадратной формы размером 7×7 мм и толщиной 1 мм. Измерения проводили при комнатной температуре.

### 3. Результаты и обсуждение

В результате холловских измерений было установлено (табл. 1), что электрическая про-

водимость мономатериалов значительно ниже, чем композитов. Так, удельная проводимость оксида графена и полианилина составила  $1.12 \cdot 10^{-4}$  и  $1.1 \cdot 10^{-7}$  Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup> соответственно. Для композитов наблюдается значительное увеличение удельной проводимости до 1.16 (ОГ-ПАНИ) Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup> и 0.78 Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup> (ОГ-ПАНИ-Mn) по сравнению с мономатериалами (ОГ, ПАНИ). Такое аномальное увеличение удельной проводимости может быть обусловлено  $\pi$ - $\pi$ -стэкингом (межплоскостными взаимодействиями) между полимерной основой и пластинами оксида графена рис. 1 [20]. На поверхности и в порах оксида графена находятся ОН-группы, способствующие образованию водородных свя-



**Рис. 1** Схематичное изображение взаимодействия оксида графена с полианилином (голубой – азот, красный – кислород, черный – углерод, белый – водород). Рисунок перерисован на основе рисунка из работы [19]

**Таблица 1** Сравнительные электрофизические характеристики ОГ, ПАНИ, ОГ-ПАНИ, ОГ-ПАНИ-Mn, полученные при измерении четырехзондовым холловским методом

Характеристики	ОГ	ПАНИ	ОГ-ПАНИ	ОГ-ПАНИ-Mn
Объемная концентрация носителей заряда $N$ , см <sup>-3</sup>	$2.74 \cdot 10^{12}$	$6.04 \cdot 10^{10}$	$5.8 \cdot 10^{18}$	$1.3 \cdot 10^{19}$
Подвижность носителей заряда $\mu$ , см <sup>2</sup> /В·с	$2.5 \cdot 10^2$	$1.15 \cdot 10$	1.2	$3.6 \cdot 10^{-1}$
Удельное сопротивление $R$ , Ом·см	$8.87 \cdot 10^3$	$8.9 \cdot 10^6$	$8.5 \cdot 10^{-1}$	1.27
Удельная проводимость $S$ , Ом <sup>-1</sup> ·см <sup>-1</sup>	$1.12 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-7}$	1.16	0.78
Тип проводимости	<i>p</i> -тип	<i>p</i> -тип	<i>n</i> -тип	<i>p</i> -тип

зей между оксидом графена и азотом в бензоидных и хиноидных фрагментах полимерной цепи. Наличие растянутой водородной связи между полианилином и оксидом графена влияет на растяжение  $\pi$ -сопряженной связи в полимере. Кроме того, полимеризация на поверхности и в порах листов оксида графена ограничивает скручивание полимерной цепи, что играет важную роль в увеличении электропроводности [21]. При сравнении электрофизических параметров композитных материалов было установлено, что введение марганца снижает удельную проводимость с  $1.16$  до  $0.78 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ , при том, что концентрация носителей заряда у образца ОГ-ПАНИ-Mn выше, чем у ОГ-ПАНИ. Из этого следует, что проводимость композитных материалов обусловлена подвижностью носителей заряда, которая для марганецсодержащего материала заметно ниже ( $3.6 \cdot 10^{-1} \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ) по сравнению с образцом ОГ-ПАНИ ( $1.2 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ).

В УФ-видимых спектрах ПАНИ, ОГ-ПАНИ и ОГ-ПАНИ-Mn наблюдаются три полосы поглощения, характерные для перехода  $\pi \rightarrow \pi^*$  (пик А, А\*), и плечо В, характерное для перехода  $n \rightarrow \pi^*$  (рис. 2, вставка). Пик А обусловлен  $\pi$ - $\pi^*$  электронным переходом в бензольных кольцах и характерен для всех форм ПАНИ. Пик А\* обусловлен поляронным/биполяронным переходом [22]. Длинноволновая особенность В связана с возбуждением электрона с высшей занятой молекулярной орбитали бензольных колец на низшую незанятую молекулярную орбиталь хиноидных колец [23], т. е. экситонным переходом от бензоидного фрагмента к хиноидному [24]. Пики А, А\* отражают внутрицепные взаимодействия, а плечо В указывает как на внутрицепные, так и на межцепные взаимодействия. Определение ширины запрещенной зоны показано на примере ОГ, ПАНИ, ОГ-ПАНИ и ОГ-ПАНИ-Mn (рис. 2). Значения ширины запрещенной зоны  $E_g$  составляют  $2.7 \text{ эВ}$  для ОГ,  $3.8 \text{ эВ}$  для ПАНИ,  $3.5 \text{ эВ}$  для ОГ-ПАНИ и  $3.6 \text{ эВ}$  для ОГ-ПАНИ-Mn. Можно заметить, что добавление ОГ в полимерный образец приводит к уменьшению величины ширины запрещенной зоны (ОГ-ПАНИ). Это согласуется с более ранними результатами [25], где было показано, что запрещенная зона в системах ОГ-ПАНИ уменьшается при увеличении доли графена в композите. Оптическое поглощение в сопряженных полимерах может быть обусловлено переходом носителей заряда через запрещенную энергетическую щель. Уменьшение  $E_g$  обусловлено появлением новых уровней энергии возбуждения вследст-

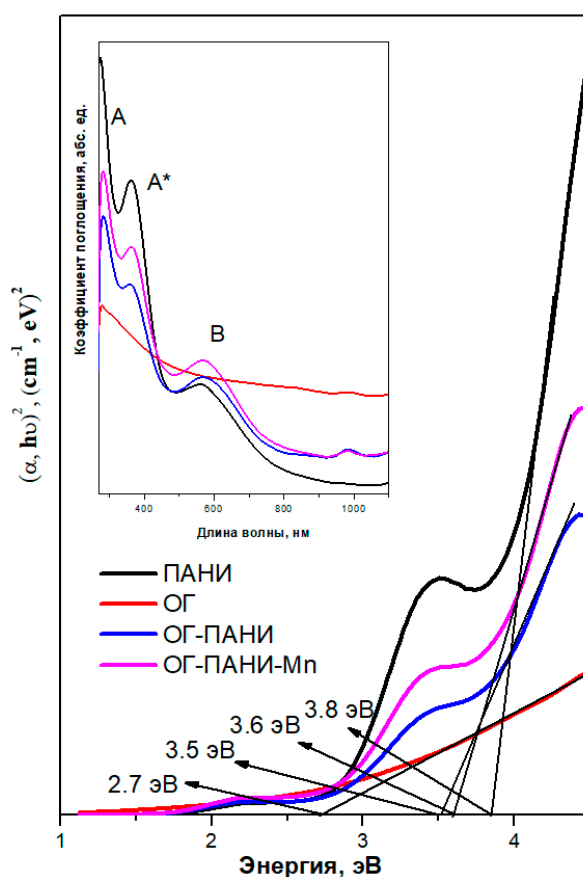


Рис. 2. УФ-видимые спектры (вставка) и оптическая ширина запрещенной зоны ( $E_g$ ) ОГ, ПАНИ, ОГ-ПАНИ и ОГ-ПАНИ-Mn

вие переноса заряда с ОГ на ПАНИ. Добавление марганца увеличивает запрещенную зону образца ОГ-ПАНИ-Mn, предположительно, вследствие упорядочения структуры. Это приводит к уменьшению количества локализованных состояний в запрещенной зоне, способствуя ее увеличению. Как следствие, наблюдается снижение удельной проводимости при одновременном уменьшении подвижности носителей заряда.

Для ИК спектров ПАНИ характерно наличие полос поглощения, соответствующих  $\text{C}=\text{N}$  и  $\text{C}=\text{C}$  колебаниям бензоидных и хиноидного колец, расположенных при  $1582$  и  $1505 \text{ см}^{-1}$ . Пики при  $1297$  и  $1306 \text{ см}^{-1}$  связаны с  $\text{C}=\text{N}$  колебаниями вторичных ароматических аминов [26]. А так же наблюдается наличие полосы валентных колебаний в группе  $\text{O}-\text{H}$ , примерно, от  $3650$  до  $3050 \text{ см}^{-1}$ . При функционализации оксида графена амином появляются полосы, перекрывающиеся с  $\text{O}-\text{H}$  группой при  $3433$ ,  $1726$  и  $1619 \text{ см}^{-1}$ . Полосы поглощения между  $3285$  и  $3527 \text{ см}^{-1}$  обусловлены растяжением связей  $\text{N}-\text{H}$  в аминных группах, а полоса при  $1580 \text{ см}^{-1}$  – растяжением связей  $\text{N}-\text{H}$

в той же плоскости. При образовании композита ОГ-ПАНИ проявляются три полосы при 1481, 1293  $\text{см}^{-1}$  и в диапазоне  $\sim 1235\text{--}1022 \text{ см}^{-1}$ , которые соответствуют колебанию C=C бензольного кольца, колебанию C-N бензольного кольца и валентному колебанию C-N ароматических аминов (рис. 3) [18, 27]. При добавлении ионов марганца в композит ОГ-ПАНИ наблюдалось смещение полос (рис. 3), соответствующих характеристическим колебаниям C=C, C-N, N=C и C-H в ОГ-ПАНИ-Mn в область более низких частот в сравнении с ОГ-ПАНИ, что свидетельствует о взаимодействии ОГ-ПАНИ с катионами металлов.

#### 4. Заключение

Сравнение электрофизических характеристик композитных систем состава ОГ-ПАНИ и ОГ-ПАНИ-Mn с мономатериалами ОГ и ПАНИ показало, что электрическая проводимость мономатериалов значительно меньше, чем композитов. При образовании композитов наблюдается аномальное увеличение электропроводности, что может быть обусловлено межфазными взаимодействиями между полимерной основой и пластинами оксида графена, который эффективен для улучшения проводящих свойств материалов. Было показано, что проводимость композитных материалов обусловлена подвижностью носителей заряда. Ширина оптической запрещенной зоны ( $E_g$ ) композита ОГ-ПАНИ уве-

личивается при добавлении металла, но уменьшается по сравнению с ПАНИ. Уменьшение  $E_g$  обусловлено появлением новых уровней энергии возбуждения, вследствие переноса заряда с ОГ на ПАНИ. Добавление марганца увеличивает запрещенную зону образца ОГ-ПАНИ-Mn, предположительно, вследствие упорядочения структуры. Это приводит к уменьшению количества локализованных состояний в запрещенной зоне, способствуя ее увеличению. Смещение характеристических полос колебаний C=C, C-N, N=C и C-H в ОГ-ПАНИ-Mn в область более низких частот свидетельствует о ковалентном взаимодействии композита ОГ-ПАНИ с катионами марганца.

#### Заявленный вклад авторов

Недоедкова О. В. – ИК и УФ измерения, анализ результатов, оформление текста и рисунков. Мясоедова Т. Н. – разработка технологии синтеза и синтез образцов, измерения методом Холла, написание текста статьи. Яловега Г. Э. – концепция статьи, руководство исследованием, написание текста статьи

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

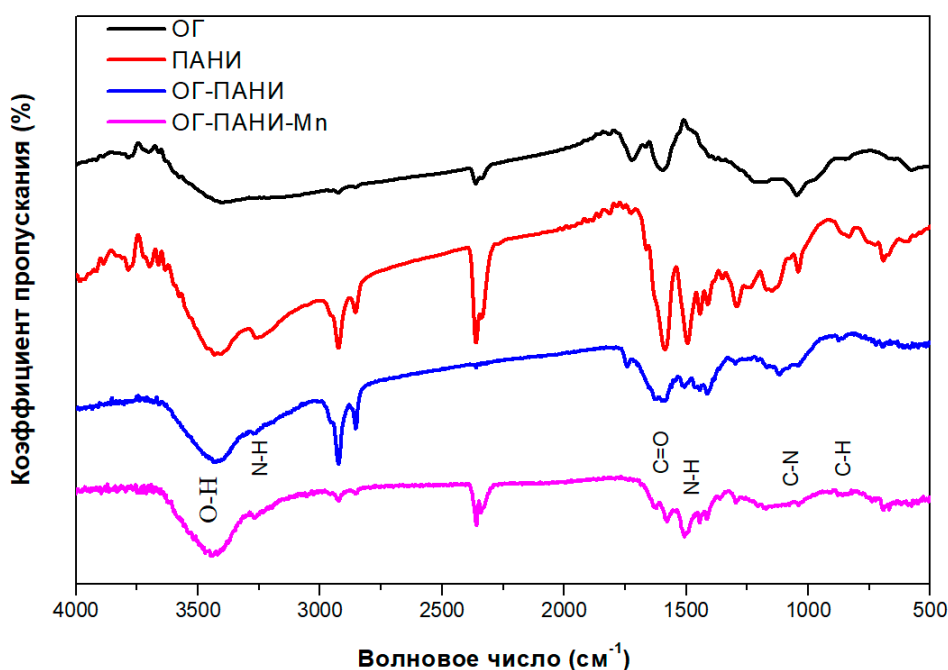


Рис. 3. ИК-спектры ОГ, ПАНИ, ОГ-ПАНИ и ОГ-ПАНИ-Mn

**Список литературы**

1. Баскаков С. А., Шульга Ю. М., Баскакова Ю. В., ... Гусев А. Л. Новые композитные материалы на основе восстановленного оксида графена и полианилина для электродов суперконденсаторов высокой емкости. *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология»*. 2012;12(116): 66–76.
2. Yang D. Application of nanocomposites for supercapacitors: Characteristics and properties. *Nanocomposites – New Trends and Developments*. 2012. <https://doi.org/10.5772/50409>
3. Salvatierra R. V., Zitzer G., Savu S.-A., ... Rosco M. L. M. Carbon nanotube/polyaniline nanocomposites: Electronic structure, doping level and morphology investigations. *Synthetic Metals*. 2015;203: 16–21 <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2015.01.034>
4. Singh G., Kumar Y., Husain S. Fabrication of symmetric polyaniline/nano-titanium dioxide/activated carbon supercapacitor device in different electrolytic mediums: Role of high surface area of carbon and facile interactions with nano-titanium dioxide for high-performance supercapacitor. *Energy Technology*. 2023;11(1): 2200931. <https://doi.org/10.1002/ente.202200931>
5. Savić M., Janošević Ležaić A., Gavrilov N., ... Ćirić-Marjanović G. Carbonization of MOF-5/polyaniline composites to N, O-doped carbon/ZnO/ZnS and N, O-doped carbon/ZnO composites with high specific capacitance, specific surface area and electrical conductivity. *Materials*. 2023;16(3): 1018. <https://doi.org/10.3390/ma16031018>
6. Lv P., Tang X., Zheng R., Ma X., Yu K., Wei W. Graphene/polyaniline aerogel with superelasticity and high capacitance as highly compression-tolerant supercapacitor electrode. *Nanoscale Research Letters*. 2017;12(1): 1–11. <https://doi.org/10.1186/s11671-017-2395-z>
7. Wang S., Tan Z., Li Y., Sun L., Zhang T. Synthesis, characterization and thermal analysis of polyaniline/ZrO<sub>2</sub> composites. *Thermochimica Acta*. 2006;441(2): 191–194. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2005.05.020>
8. Sawarkar M., Pande S. A., Agrawal P. S. Synthesis and characterization of polyaniline doped metal oxide nanocomposites. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2015;2(9): 2427–2432. Режим доступа: <https://www.irjet.net/archives/V2/i9/IRJET-V2I9295.pdf>
9. Mostafaei A., Zolriasatein A. Synthesis and characterization of conducting polyaniline nanocomposites containing ZnO nanorods. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2012;22(4): 273–280. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2012.07.002>
10. Chen L., Sun L., Luan F., ... Liu, X. X. Synthesis and pseudocapacitive studies of composite films of polyaniline and manganese oxide nanoparticles. *Journal of Power Sources*. 2010;195(11):3742–3747. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.12.036>
11. Lei X., Su Z. Conducting polyaniline coated nano silica by in situ chemical oxidative grafting polymerization. *Polymer Advanced Technology*. 2007;18(6): 472–476 <https://doi.org/10.1002/pat.905>
12. Горшков Н. В., Яковлева Е. В., Краснов В. В., ... Яковлева А. В. Электрод для суперконденсатора на основе электрохимически синтезированного многослойного оксида графена. *Журнал прикладной химии*. 2021;94(3): 388–396. <https://doi.org/10.31857/S0044461821030142>
13. Shao Y., El-Kady M. F., Wang L. J., ... Kaner R. B. Graphene-based materials for flexible supercapacitors. *Chemical Society Reviews*. 2015;44: 3639–3665. <https://doi.org/10.1039/c4cs00316k>
14. Cai Y., Ke Q., Zhang G., Feng Y. P., Vivek B. S., Zhang Y. W. Giant phononic anisotropy and unusual anharmonicity of phosphorene: interlayer coupling and strain engineering. *Advanced Functional Materials*. 2015;25: 2230e6. <https://doi.org/10.1002/adfm.201404294>
15. Wang G. K., Sun X., Lu F. Y., ... Lian J. Flexible pillared graphene-paper electrodes for high-performance electrochemical supercapacitors. *Small*. 2012;8: 452e9. <https://doi.org/10.1002/sml.201101719>
16. Moussa M., El-kady M. F., Zhao Z. Recent progress and performance evaluation for polyaniline/graphene nanocomposites as supercapacitor electrodes. *Nanotechnology* 2016;27(44): 42001–42021. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/44/442001>
17. Kumar R., Jahan K., Nagarale R. K., Sharma A., Long N. Lasting electro-osmotic pump with polyaniline-wrapped aminated graphene electrodes. *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2015;7(1): 593–601. <https://doi.org/10.1021/am506766e>
18. Шматко В. А., Мясоедова Т. Н., Михайлова Т. А., Яловега Г. Э. Особенности электронной структуры и химических связей в композитах на основе полианилина, полученных бескислотным синтезом. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2019;21(4): 569–578. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2019.21/2367>
19. Мясоедова Т. Н., Недоедкова О. В., Калусулингам Р., Михейкин А. С., Константинов А. С., Яловега Г. Э. Морфология, молекулярная и электронная структура композитного материала на основе оксида графена и полианилина. *Физика твердого тела*. 2023;65(12): 2064–2067. <https://doi.org/10.61011/FTT.2023.12.56723.4935k>
20. Konwer S., Guha A. K., Dolui S. K. Graphene oxide-filled conducting polyaniline composites as methanol-sensing materials. *Journal of Materials Science*. 2013;48: 1729–1739. <https://doi.org/10.1007/s10853-012-6931-z>

21. Konwer S. Graphene oxide-polyaniline nanocomposites for high performance supercapacitor and their optical, electrical and electrochemical properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2016;27(4): 4139–4146. <https://doi.org/10.1007/s10854-016-4273-3>
22. Mallick K., Witcomb M. J., Dinsmore A., Scurrall M. S. Polymerization of aniline by cupric sulfate: A facile synthetic route for producing polyaniline. *Journal of Polymer Research*. 2006;13: 397–401. <https://doi.org/10.1007/s10965-006-9057-7>
23. Hu F., Li W., Zhang J., Meng W. Effect of graphene oxide as a dopant on the electrochemical performance of graphene oxide/polyaniline composite. *Journal of Materials Science and Technology*. 2014;30(4): 321–327. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2013.10.009>
24. Lu X., Yu Y., Chen L., Mao H., Zhang W., Wei Y. Preparation and characterization of polyaniline microwires containing CdS nanoparticles. *Chemical Communications*. 2004;13: 1522–1523. <https://doi.org/10.1039/B403105A>
25. Harish C., Sai Sreeharsha V., Santhosh C., ... Nirmala Grace A. Synthesis of polyaniline/graphene nanocomposites and its optical, electrical and electrochemical properties advanced science. *Advanced Science, Engineering and Medicine*. 2013;5(2): 140–148. <https://doi.org/10.1166/ asem.2013.1237>
26. Myasoedova T. N., Moiseeva T. A., Kremennaya M. A., Tirkeshov A., Yalovega G. E. Structure and electrochemical properties of PANI/ZrO<sub>x</sub> and PANI/SiO<sub>x</sub> composites. *Journal of Electronic Materials*. 2020;49(8): 4707–4713. <https://doi.org/10.1007/s11664-020-08170-2>
27. Lai L., Chen L., Zhan D., ... Lin J. One-step synthesis of NH<sub>2</sub>-graphene from in situ graphene-oxide reduction and its improved electrochemical properties. *Carbon*. 2011;49: 3250–3257. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.03.051>

### Информация об авторах

Мясоедова Татьяна Николаевна, к. т. н., доцент, в. н. с. Института нанотехнологий, электроники и приборостроения, Южный федеральный университет (Таганрог, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-2891-7780>  
tnmyasoedova@sfedu.ru

Недоедкова Ольга Вадимовна, аспирант 2-го года обучения, ассистент преподавателя кафедры физики наносистем и спектроскопии физического факультета, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-1274-8449>  
olga.nedoedkova@mail.ru

Яловега Галина Эдуардовна, д. ф.-м. н., заведующая кафедрой физики наносистем и спектроскопии физического факультета, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-0157-6955>  
yalovega@sfedu.ru

Поступила в редакцию 18.11.2023, одобрена после рецензирования 29.11.2023; принята к публикации 01.12.2023; опубликована онлайн 25.03.2024.