

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИНАРНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ

© 2023 г. Г. В. Симбирцева^{1*}, С. Д. Бабенко¹, Д. П. Кирюхин², А. А. Арбузов²

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, Москва, Россия

²Институт проблем химической физики Российской академии наук, Черноголовка, Россия

*E-mail: sgvural@mail.ru

Поступила в редакцию 03.12.2021;

после доработки 09.03.2022;

принята в печать 21.03.2022

Исследованы электрофизические свойства порошков углеродных гибридных наноразмерных композитов в зависимости от содержания в них одностенных углеродных нанотрубок и термовосстановленного оксида графита. Изучено влияние бикомпонентного состава гибридного материала и приведены результаты измерений удельной низкочастотной электропроводимости на частоте 1 кГц, комплексной диэлектрической проницаемости и проводимости на частоте 9.8 ГГц для вышеуказанных порошков. Обнаружено влияние γ -облучения на измеренные характеристики порошков. Исследования направлены на поиск наполнителей для современных эффективных композиционных радиопоглощающих материалов.

Ключевые слова: гибридные углеродные наноразмерные композиты, оксид графита, термовосстановленный оксид графита, электрофизические свойства, комплексная диэлектрическая проницаемость.

DOI: 10.31857/S0207401X23010119, EDN: HQYMIW

ВВЕДЕНИЕ

Исследование физико-химических свойств гибридных наноразмерных структур необходимо для создания современных композиционных материалов, представляющих интерес для различных областей науки и техники [1–3]. Отмечается, например, что объединение графена и углеродных нанотрубок (УНТ) обладает большим потенциалом для создания указанных материалов [4]. Это обусловлено тем, что УНТ способны связывать между собой отдельные графеновые слои, и образующаяся 3D-сеть значительно улучшает механические, тепловые, электрофизические свойства и снижает порог перколяции материалов на их основе. Синергия компонентов бинарных углеродных гибридных материалов состава “углеродные нанотрубки–графеноподобный материал” (УНТ–ГПМ) позволяет создавать новые углеродные 3D-материалы [5–13].

Механические и электрофизические свойства композитов с углеродными наноразмерными наполнителями могут быть востребованы в эре 5G в качестве облегченных радиопоглощающих материалов (РПМ). Сообщалось о значительных изменениях в диэлектрических и радиопоглощающих свойствах различных композитных материа-

лов после введения в них углерод-графеновых гибридных наполнителей различного состава; помимо этого, повышалась термостабильность, устойчивость материалов к термоокислительному разложению и понижался порог перколяции [5, 14–16].

Взаимовыгодное влияние ГПМ, таких как оксид графита (ОГ), термовосстановленного оксида графита (ТВОГ) и УНТ было отмечено различными исследователями, а именно сочетание протяженных одномерных УНТ, действующих как разделители между двумерными листами ГПМ (2D-ГПМ), позволяет конструировать электропроводящие 3D-структуры, обладающие синергическим эффектом по сравнению с отдельно использованными УНТ и ГПМ/ОГ [4, 5, 7–10]. Такая гибридная структура предотвращает сжатие графеновых листов и агломерацию УНТ [8–10, 17]. Известно, что листы ОГ могут быть легко диспергированы в водном растворе и это позволяет ему быть популярным прекурсором для изготовления углеродных гибридных материалов на его основе [5, 8–11, 14, 16, 18]. Дополнительное окисление одностенных УНТ (ОУНТ) приводит к образованию кислородсодержащих функциональных групп, снижающих тенденцию к агрегации ОУНТ в воде, и

образующих водородные связи между УНТ и оксидом графита [3, 10, 19], что также может дать возможность УНТ адсорбироваться на базисных плоскостях листов ОГ при сушке [20]. Такой подход улучшает соединение между ОУНТ и оксидом графита перед совместным восстановлением, а устранение агрегации УНТ позволяет увеличить удельную поверхность получаемых гибридных бинарных систем ОУНТ/ГПМ.

Настоящая работа посвящена исследованию электрофизических свойств новых потенциальных наполнителей бинарного состава на основе термовосстановленного оксида графита, функционализированного с помощью одностенных УНТ (ОУНТ), для композиционных РПМ. Измеренные характеристики таких наполнителей могут определять электрофизические свойства полимерных композиционных материалов на их основе.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Оксид графита получали модифицированным методом Хаммерса и Оффемана путем окисления природного графита марки ГК-1 перманганатом калия в смеси концентрированных H_2SO_4 и HNO_3 [21]. Образцы ТВОГ и ТВОГ-900 (900 °С – температура отжига образца), являющиеся продуктами восстановления ОГ, представляют собой пластины, содержащие от 1 до 5 графеновых слоев площадью 100–200 мкм², были получены по методике, изложенной в работе [15]. Исходными компонентами для приготовления гибридных материалов бинарного состава были ОГ и ОУНТ марки Tuball™ (диаметр – 1.6 ± 0.4 нм, длина – более 5 мкм, удельная поверхность – более 300 м²/г) производства “OCSiAl” (Россия) [5, 22] и окисленные ОУНТ. Для получения окисленных ОУНТ (о-ОУНТ) 1 г исходных ОУНТ добавляли в смесь 210 мл дистиллированной воды и 140 мл HNO_3 и обрабатывали ультразвуком при температуре 343 К в течение 3 ч. Полученную смесь фильтровали с последующим многократным промыванием дистиллированной водой и сушили при температуре 368 К. Для получения исследуемых образцов гибридных углеродных композитов (I, II, III, IV) были созданы прекурсоры – водные смеси на основе ОГ бинарного состава двух типов – с окисленными ОУНТ и с исходными ОУНТ, которые имели следующий состав:

- I – о-ОУНТ 10 мас.% + ОГ,
- II – о-ОУНТ 20 мас.% + ОГ,
- III – ОУНТ 10 мас.% + ОГ,
- IV – ОУНТ 20 мас.% + ОГ.

Далее указанные прекурсоры сушили при 368 К и подвергали последующей термообработке при 1173 К в течение 3 ч. Полученные образцы бинарных гибридных материалов состава ТВОГ + ОУНТ являлись продуктами термического вос-

становления оксида графита в присутствии ОУНТ [5].

Для измерения электрофизических характеристик порошков углеродных наноразмерных материалов (УНМ) (бинарных гибридов, ТВОГ и ТВОГ-900) в низкочастотном и высокочастотном диапазонах были использованы апробированные нами ранее экспериментальные методы. Измерения низкочастотной удельной электропроводности $\sigma_{нч}$ порошков проводили с помощью прибора “Измеритель иммитанса Е7-20” на частоте 1 кГц, при значении которой влияние скин-эффекта можно было не учитывать (см. методику, описанную ранее в работе [15]). Образцы подвергались давлению вплоть до 5 МПа. Комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) порошков измерялась неинвазивным резонаторным методом на частоте 9.8 ГГц [23–28]. Образцы помещали в стеклянные ампулы с внутренним диаметром 2–2.5 мм. Для каждого образца проводилось несколько измерений (4–8 раз) при комнатной температуре и полученные значения диэлектрической проницаемости (ϵ'), диэлектрических потерь (ϵ'') и тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg} \delta = \epsilon''/\epsilon'$) усреднялись. Точность измерений составляла 10 и 20% для ϵ' и ϵ'' соответственно. Исследуемые порошки облучались на универсальной научной установке “Гамма-100” ИПХФ РАН в алюминиевых контейнерах при мощности дозы излучения 390 рад/с, доза γ -облучения всех образцов составляла 14 Мрад.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате водной обработки УНТ и оксида графита с последующей сушкой, и совместного термовосстановления бинарной смеси при температуре 1173 К, как отмечено выше, образуется трехмерная (3D) структура – порошок состава “термовосстановленный оксид графита ТВОГ + ОУНТ” [5, 10, 29] (рис. 1).

На всех полученных с использованием сканирующего электронного микроскопа изображениях гибридных образцов ТВОГ + ОУНТ с различным содержанием ОУНТ (рис. 1) отчетливо видна слоистая структура образцов со встроенными ОУНТ. Углеродные нанотрубки расположены на поверхности графеновых пластин, образуя структуру типа “сэндвич”. При этом предварительное окисление ОУНТ приводит к более равномерному их распределению по поверхности ТВОГ, тогда как исходные ОУНТ в основном собираются в пучки значительно большего диаметра (рис. 1). Рыхлая, не плотная гибридная структура образца ТВОГ + ОУНТ является следствием термообработки прекурсоров при температуре 1173 К и обеспечивает высокую удельную поверхность материала (для образцов I и II значения удельной

поверхности $S_{уд}$, измеренной по методу БЭТ, составили 570 и 1040 м²/г соответственно).

Электрическая проводимость самого наноразмерного наполнителя играет решающую роль для получения электропроводящих полимерных композитов. Измерение удельного электрического сопротивления является надежным методом получения электрофизических характеристик порошковых материалов. Расчет значений удельной низкочастотной электропроводности проводился по формуле $\sigma_{нч} = h/RS$, где R – электрическое сопротивление, Ом; S – площадь электрода, м²; h – высота образца, м. Малая масса облученных образцов не позволила провести аналогичные измерения.

На рис. 2 приведены результаты измерений низкочастотной электропроводности $\sigma_{нч}$ необлученных образцов при нагрузке $P = 4.5$ МПа для двух групп образцов: 1–3 – образцы, в прекурсорах которых были ОУНТ, 4–6 – образцы, в прекурсорах которых были о-ОУНТ. Видно, что значения $\sigma_{нч}$ сильно зависят от состава бинарных гибридных образцов. Введение ОУНТ в различной концентрации изменило все значения низкочастотной проводимости $\sigma_{нч}$, что продемонстрировало их способность связывать между собой графеновые слои. Независимо от типа ОУНТ в прекурсорах, проводимость образцов увеличивается при возрастании содержания ОУНТ. При этом проводимость гибридов с одним окисленным компонентом в прекурсор (ОГ) больше проводимости с двумя окисленными компонентами в прекурсор (ОГ и о-ОУНТ).

Превышение значений $\sigma_{нч}$ образцов, содержащих в прекурсор 20% неокисленных либо окисленных ОУНТ (IV и II) по сравнению с образцами, содержащими в прекурсор 10% ОУНТ (III и I), можно объяснить с тем, что увеличение содержания ОУНТ в прекурсор приводит к возрастанию удельной поверхности образцов. В частности, для образцов I и II двукратное превышение удельной поверхности образца II по сравнению с образцом I привело к росту значения $\sigma_{нч}$ (II) по сравнению с $\sigma_{нч}$ (I) в 4.5 раза (рис. 2). Мы полагаем, что с возрастанием концентрации ОУНТ и, как следствие, удельной поверхности образцов происходит рост числа контактов между частицами с образованием проводящих цепочек, что ведет к увеличению низкочастотной проводимости.

В результате термообработки образцов I–IV при температуре 1173 К происходит совместное восстановление оксида графита в присутствии неокисленных (образцы III и IV) либо предварительно окисленных ОУНТ (образцы II и I) [5, 10]. Образцы II и I, в отличие от III и IV, в составе прекурсоров имеют два окисленных компонента. Большие значения низкочастотной удельной

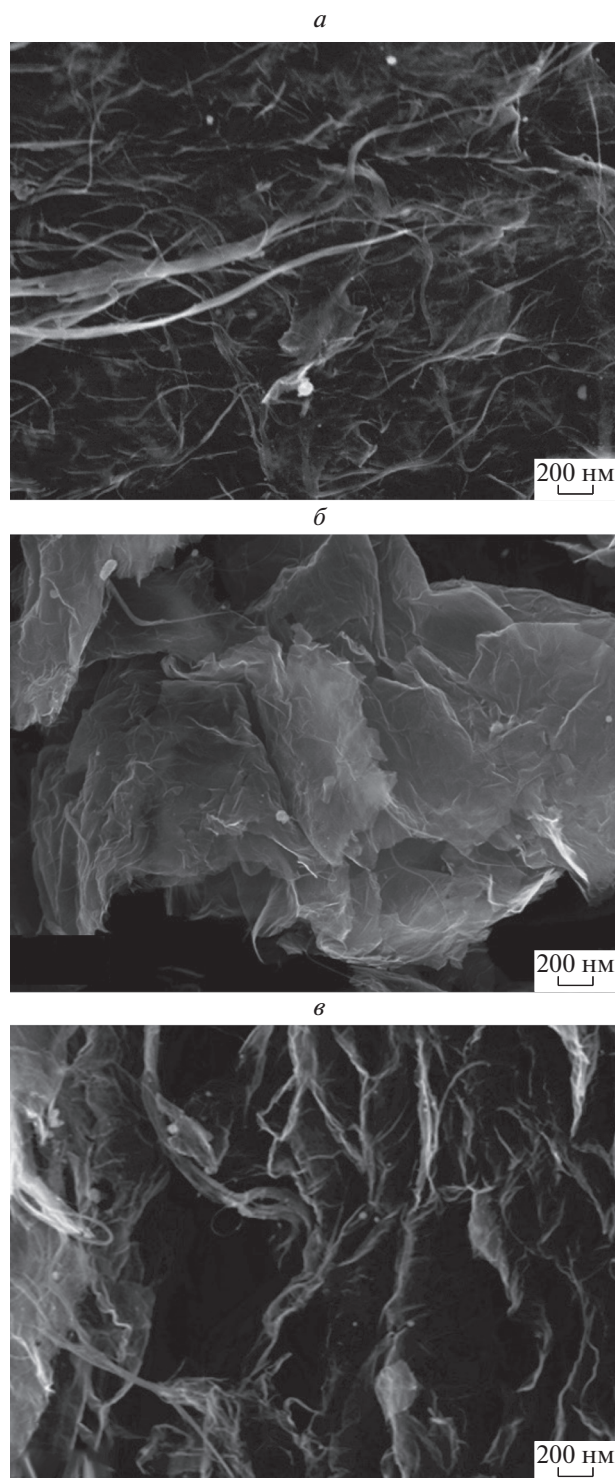


Рис. 1. Полученные с использованием сканирующего электронного микроскопа изображения образцов II (а), III (б) и IV (е) при разрешении 200 нм.

электропроводимости образцов IV и III, содержащих в прекурсор неокисленные ОУНТ, по сравнению с образцами II и I, содержащими в прекурсор о-ОУНТ, можно объяснить тем, что при тер-

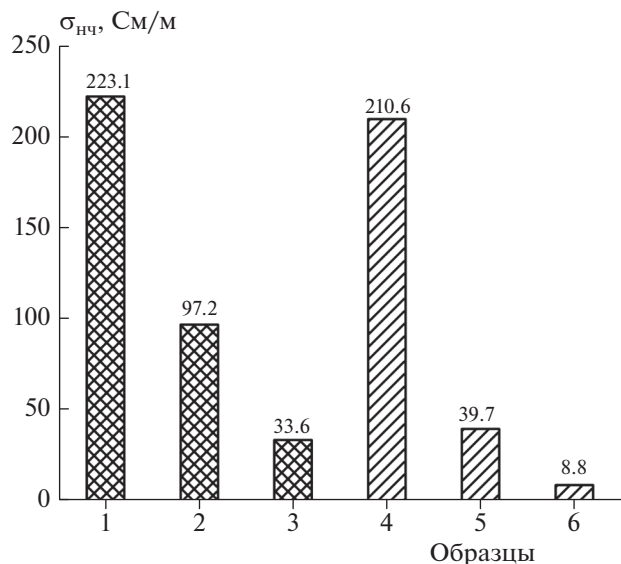


Рис. 2. Значения низкочастотной проводимости образцов углеродных наноразмерных материалов при давлении $P = 4.5$ МПа: 1 – ОУНТ, 2 – IV, 3 – III, 4 – о-ОУНТ, 5 – II, 6 – I.

мообработке происходит неполное восстановление окисленных компонентов гибридных образцов. В результате неполного восстановления ОГ и о-ОУНТ в образцах II и I может остаться больше кислородсодержащих групп, чем в образцах III и IV. Гибридные образцы III и IV, у которых в прекурсорке имеется одна окисленная компонента, в результате термовосстановления могут содержать меньше кислородсодержащих групп и это приводит к превышению значения их проводимости $\sigma_{нч}$ над соответствующими значениями $\sigma_{нч}$ для образцов I и II, содержащих в прекурсорке два окисленных компонента. Наибольшее значение низкочастотной электропроводности среди гибридных образцов зафиксировано у образца IV, морфологи-

чески отличающегося от остальных образцов (рис. 1б).

Полагаем, что более высокое содержание ОУНТ, наличие их пучков, связывающих графеновые листы в этом образце и увеличивающих площадь их контакта, позволяет проявиться собственной проводимости ОУНТ в этом образце в большей степени, чем в остальных образцах. Для более детального объяснения полученных результатов необходимо также учитывать разную степень окисления компонентов прекурсоров и их восстановления в результате термообработки, различие размеров частиц полученных образцов и их разное долевое распределение по размерам, степень их расслоения в результате температурной обработки, и, как следствие, разной удельной поверхности, что сказывается на проводимости.

Диэлектрические свойства потенциального наполнителя – комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) и тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) – в зависимости от его структуры фактически определяют перспективность его применения для радиопоглощающих и экранирующих материалов. Бесконтактный резонаторный метод определения электрофизических характеристик пористых материалов в СВЧ-диапазоне позволил проследить изменение значений КДП и $\text{tg}\delta$ в зависимости от состава бинарных гибридных композитов на частоте 9.8 ГГц. Величина высокочастотной проводимости порошков определялась по формуле $\sigma_{свч} = \epsilon_0 \omega \epsilon''$, где ω – частота (табл. 1).

Введение в прекурсоры о-ОУНТ и ОУНТ привело к росту значений ϵ' , ϵ'' , $\text{tg}\delta$ и σ у гибридных образцов по сравнению с аналогичными характеристиками ТВОГ и ТВОГ-900, что может свидетельствовать о сильном влиянии ОУНТ. Значения КДП и $\sigma_{свч}$ образцов I и II, в прекурсорке которых были о-ОУНТ, значительно превышают аналогичные значения для образца III, при этом наличие 10 мас.% о-ОУНТ в прекурсорке у образца

Таблица 1. Значения электрофизических характеристик изученных образцов УНМ

Образец	Необлученный образец				Облученный образец			
	ϵ'	ϵ''	$\text{tg}\delta$	$\sigma_{свч}$, См/м	ϵ'	ϵ''	$\text{tg}\delta$	$\sigma_{свч}$, См/м
ОГ	1.98	0.16	0.08	0.09	2.03	0.23	0.11	0.12
ТВОГ	1.29	0.03	0.03	0.02	–	–	–	–
ТВОГ-900	1.63	0.32	0.18	0.17	–	–	–	–
I	6.03	1.23	0.20	0.74	5.30	0.78	0.15	0.41
II	4.76	0.67	0.14	0.35	5.38	0.63	0.12	0.33
III	3.13	0.32	0.10	0.17	–	–	–	–
IV	4.93	0.84	0.17	0.44	–	–	–	–
ОУНТ	7.16	2.46	0.34	1.30	–	–	–	–
о-ОУНТ	9.14	2.03	0.22	1.07	7.36	0.75	0.10	0.39

И привело к максимальным значениям КДП и $\sigma_{\text{свч}}$ среди гибридных композитов. В данном случае резонаторный метод в отличие от низкочастотных измерений, по-видимому, более чувствителен к морфологии образца. Анализ литературных данных [3, 8, 10, 19, 20] позволяет предположить наличие более сильных связей между ОГ и о-ОУНТ по сравнению со связями между ОГ и ОУНТ в прекурсорах образцов, и, соответственно, в гибридных композитах, полученных на их основе после прогрева при температуре 1173 К.

Ранее нами было обнаружено, что после γ -облучения порошка термически восстановленного оксида графита, предварительно насыщенного уксусной кислотой, наблюдалось заметное увеличение интенсивности сигнала ЭПР [30]. В настоящей работе такой эффект не обнаружен, γ -облучение образцов практически не повлияло на значения электрофизических параметров для образцов ОГ и II, и привело к уменьшению значений всех параметров для образцов I и о-ОУНТ. Этот факт требует дополнительных исследований и осмысления.

Полученные экспериментальные данные позволили проследить за ходом зависимостей высокочастотной ($f = 9.8$ ГГц) и низкочастотной ($f = 1$ кГц) проводимости исследованных УНМ при изменении их состава (рис. 3). Соотношение значений $\sigma_{\text{нч}}$ и $\sigma_{\text{свч}}$ для образцов ТВОГ, III, ТВОГ-900, IV и ОУНТ (рис. 3) выявило их симбатный ход, и то, какой из двух компонентов гибридных образцов (графеновый материал или ОУНТ) играет доминирующую роль в проводящих свойствах. Для образца III, содержащего в прекурсор 10 мас.% ОУНТ, главную роль в проводящих свойствах играет графеновая компонента гибридных композитов, так как его значения $\sigma_{\text{нч}}$ и $\sigma_{\text{свч}}$ меньше аналогичных значений для ТВОГ-900. Для образца IV, содержащего в прекурсор 20 мас.% ОУНТ и морфологически отличающегося от остальных образцов (рис. 1б), превалирует влияние одностенных углеродных наноразмерных трубок. Его значения $\sigma_{\text{нч}}$ в 8.6 и 1.7 раза превышают аналогичные значения для ТВОГ и ТВОГ-900, а для $\sigma_{\text{свч}}$ в 22 и 2.6 раз соответственно.

Наличие в прекурсор 10% ОУНТ (III) и 20% о-ОУНТ (II) увеличило высокочастотную электропроводность после термообработки, а добавка 20% ОУНТ (IV) увеличивает значения обоих типов проводимости по сравнению с ТВОГ-900. Это можно объяснить тем, что введенные ОУНТ, участвуя в формировании проводящей сети, способны связывать между собой графеновые слои, что отразилось на увеличении измеренных параметров (табл. 1). Также можем отметить, что более доступные низкочастотные измерения с учетом соотношения значений $\sigma_{\text{нч}}$ и $\sigma_{\text{свч}}$ (рис. 3) позволяют упростить отбор потенциальных эффективных уг-

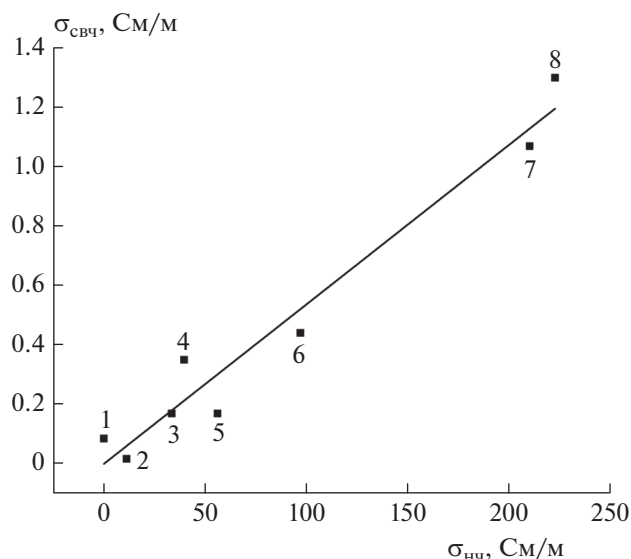


Рис. 3. Влияние состава исследуемых образцов на отношение низкочастотной ($\sigma_{\text{нч}}$) и высокочастотной ($\sigma_{\text{свч}}$) проводимостей: 1 – ОГ, 2 – ТВОГ, 3 – III, 4 – II, 5 – ТВОГ-900, 6 – IV, 7 – о-ОУНТ, 8 – ОУНТ.

леродных наноразмерных наполнителей для радиопоглощающих композиционных материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы электрофизические свойства (низкочастотные и высокочастотные измерения) порошков углеродных гибридных наноматериалов бикомпонентного состава ТВОГ + ОУНТ, рассматриваемых в качестве модельных наполнителей для радиопоглощающих материалов. Показано, что восстановление оксида графита при температуре 1173 К в присутствии одностенных углеродных нанотрубок изменяет значения электрофизических параметров в зависимости от состава углеродного композита. Введенные ОУНТ, участвуя в формировании проводящей сети, способны связывать между собой графеновые слои, что отражается на увеличении проводимости после термообработки. Увеличение содержания ОУНТ в прекурсор с 10 до 20 мас.% приводит к росту значений низкочастотной электропроводности $\sigma_{\text{нч}}$ в 2.9 и 4.5 раза для образцов с ОУНТ и о-ОУНТ соответственно. При этом значения $\sigma_{\text{нч}}$ для образцов III и IV, в прекурсорах которых были ОУНТ, в разы превосходят аналогичные значения для образцов I и II, в прекурсорах которых были о-ОУНТ. Восстановление оксида графита при температуре 1173 К в присутствии 20 мас.% ОУНТ увеличило значения $\sigma_{\text{нч}}$ почти в 1.7 раз по сравнению с оксидом графита, термовосстановленным и отожженным при 1173 К без участия

ОУНТ (ТВОГ-900), и в 8.6 раз по сравнению с термовосстановленным оксидом графита (ТВОГ).

Наибольшие значения комплексной диэлектрической проницаемости и высокочастотной проводимости $\sigma_{\text{свч}}$ среди бинарных композитов обнаружены у образца I (прекурсор которого включал 10 мас.% о-ОУНТ) и составляют: 6.03 для ϵ' , 1.23 для ϵ'' , 0.20 для $\text{tg}\delta$ соответственно и 0.74 См/м для $\sigma_{\text{свч}}$. Сравнение высокочастотных данных выявило максимальное увеличение всех электрофизических параметров для этого образца по сравнению с ТВОГ и ТВОГ-900. Увеличение значений ϵ' , ϵ'' , $\text{tg}\delta$ и $\sigma_{\text{свч}}$ составило 4.7, 41, 6.7 и 37 раз по сравнению с ТВОГ и в среднем в 4 раза по сравнению с ТВОГ-900. Для образцов III и IV выявлено симбатное увеличение обоих типов проводимости ($\sigma_{\text{нч}}$ и $\sigma_{\text{свч}}$) при увеличении содержания ОУНТ в прекурсор. Полученное соотношение между значениями высокочастотной и низкочастотной проводимости позволило определить доминирующую роль компонентов бинарных углеродных композитов в их проводящих свойствах.

Проведенное исследование показало, что функционализация оксида графита одностенными углеродными нанотрубками с последующей термообработкой улучшает электрофизические характеристики изученных материалов как потенциальных наполнителей для радиопоглощающих материалов. Считаем, что полученные данные об углеродных гибридных 3D-материалах полезны при подборе эффективных наноразмерных наполнителей для радиопоглощающих материалов.

Экспериментальные данные, используемые в работе, были получены в рамках программы фундаментальных научных исследований государственной академии наук (регистрационный номер № 122040500074-1). Работа выполнена с использованием УНУ "Гамма-100" при финансовой поддержке Министерством науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (регистрационный номер № АААА-А19-119041090087-4). Работа по получению и характеристики УНМ выполнена в рамках государственного задания (регистрационный номер № АААА-А19-119061890019-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клименко И.В., Лобанов А.В., Трусова Е.А. и др. // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 12. С. 74; <https://doi.org/10.1134/S0207401X19120094>
2. Шаулов А.Ю., Владимиров Л.В., Грачев А.В. и др. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 1. С. 75; <https://doi.org/10.31857/S0207401X2001015X>
3. Арбузов А.А., Володин А.А., Тарасов Б.П. // ЖФХ. 2020. Т. 94. № 5. С. 760; <https://doi.org/10.31857/S0044453720050039>
4. Zhu Y., Li L., Zhang C. et al. // Nat. Commun. 2012. V. 3. Article 1225; <https://doi.org/10.1038/ncomms2234>
5. Палазник О.М., Недорезова П.М., Польщиков С.В. и др. // Высокомолекуляр. соединения. 2019. Сер. Б. Т. 61. № 2. С. 144; <https://doi.org/10.1134/S2308113919020086>
6. Zhang X., Zhao Z., Xu J. et al. // Carbon. 2021. V. 177. P. 216; <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.02.085>
7. Chen J., Liu B., Yan L. // Results Phys. 2019. V. 14. 102363; <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102363>
8. Liu Z., Qian Z., Song J. et al. // Carbon. 2019. V. 149. P. 181; <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.04.037>
9. Feng J., Dong L., Li X. et al. // Electrochim. Acta. 2019. V. 302. P. 65; <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.02.008>
10. Li J., Tang J., Yuan J. et al. // Chem. Phys. Lett. 2018. V. 693. P. 60; <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2017.12.052>
11. Тарасов Б.П., Арбузов А., Можжухин С.А. и др. // Журн. структур. химии. 2018. Т. 59. № 4. С. 867; <https://doi.org/10.26902/JSC20180411>
12. Laurila T., Sainio S., Caro M.A. // Prog. Mater. Sci. 2017. V. 88. P. 499; <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.04.012>
13. Romano M.S., Li N., Antiohos D. et al. // Adv. Mater. 2013. V. 25. № 45. P. 6602; <https://doi.org/10.1002/adma.201301754>
14. Abdalla I., Elhassan A., Yu J. et al. // Carbon. 2020. V. 157. P. 703; <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.11.004>
15. Симбирцева Г.В., Пивень Н.П., Бабенко С.Д. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 12. С. 60; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20120146>
16. Zhou E., Xi J., Guo Y. et al. // Carbon. 2018. V. 133. P. 316; <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.03.023>
17. You B., Wang L., Yao L. et al. // Chem. Commun. 2013. V. 49. № 44. P. 5016; <https://doi.org/10.1039/c3cc41949e>
18. Yuan Z., Xiao X., Li J. et al. // Adv. Sci. 2018. V. 5. № 2. Article 1700626; <https://doi.org/10.1002/advs.201700626>
19. Mittal G., Dhand V., Rhee K.Y. et al. // J. Ind. Eng. Chem. 2015. V. 21. P. 11; <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.03.022>
20. Lin X., Liu X., Jia J. // Compos. Sci. Technol. 2014. V. 100. P. 166; <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.06.012>
21. Арбузов А.А., Мурадян В.Е., Тарасов Б.П. // Изв. АН. Сер. хим. 2013. № 9. С. 1962.
22. Pili E.S., Bezrodny A.E., Predtechenskiy M.R. // Tech-Connect Briefs 2016. V. 1. Ch. 2 (Adv. Mater.). P. 65.
23. Бранд А.А. Исследование диэлектриков на сверх-высоких частотах. М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1963.
24. Shepherd C., Hadzifefzovic E., Shkal F. et al. // Langmuir. 2016. V. 32. P. 7917; <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.6b02013>

25. *Cuenca J.A., Thomas E., Mandal S. et al.* // Carbon. 2015. V. 81. P. 174;
<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.09.046>
26. *Slocombe D., Porch A., Bustarret E. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 102. № 24. Article 244102;
<https://doi.org/10.1063/1.4809823>
27. *Hotta M., Hayashi M., Lanagan M.T. et al.* // ISIJ Intern. 2011. V. 51. № 11. P. 1766.
28. *Симбирцева Г.В., Бабенко С.Д., Кирюхин Д.П.* // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 4. С. 32.
29. *Song M., Xu P., Song Y. et al.* // AIP Adv. 2015. V. 5. № 9. Article 097130;
<https://doi.org/10.1063/1.4930966>
30. *Пивень Н.П., Симбирцева Г.В., Арбузов А.А. и др.* // Химия высоких энергий. 2019. Т. 53. № 6. С. 498;
<https://doi.org/10.1134/S0023119319060123>