

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

УДК 542.86:537.8.029

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА ОБРАЗЦОВ ТЕРМОВОССТАНОВЛЕННОГО ОКСИДА ГРАФИТА НА ИХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

© 2022 г. Г. В. Симбирцева^{1*}, Н. П. Пивень¹, С. Д. Бабенко¹

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

*E-mail: sgvural@mail.ru

Поступила в редакцию 20.04.2021;
после доработки 08.07.2021;
принята в печать 20.07.2021

Проведено комплексное исследование, направленное на поиск наполнителей для современных композиционных радиопоглощающих материалов. Приводятся результаты измерений электрофизических характеристик порошков термически восстановленного оксида графита, в том числе предварительно насыщенных уксусной кислотой. Рассмотрено влияние отжига исследованных порошков в интервале температур от 473 до 1173 К на низкочастотную и сверхвысокочастотную (СВЧ) проводимость, плотность при давлении вплоть до 5 МПа и величину сигнала ЭПР. Представлены результаты измерений комплексной диэлектрической проницаемости всех порошков на частоте 9.8 ГГц. Обнаружено, что с увеличением температуры отжига порошков растет их низкочастотная и СВЧ-проводимость, а сигнал ЭПР при этом уменьшается.

Ключевые слова: термовосстановленный оксид графита, температура отжига, электропроводность, комплексная диэлектрическая проницаемость, электронный парамагнитный резонанс.

DOI: 10.31857/S0207401X22040094

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальное открытие графена [1] по времени совпало с появлением и развитием новых стандартов беспроводной электросвязи [2], что потребовало создания разнообразных доступных облегченных и экранирующих электромагнитное излучение материалов (ЭМ) и радиопоглощающих композиционных материалов (РПМ). Для решения этой задачи в качестве наполнителей полимерных композиционных ЭМ и РПМ рассматриваются различные структурированные на наноуровне углеродные системы. Отмечались преимущества этих материалов перед традиционными графитовыми и металлосодержащими порошками, имеющими развитую поверхность, что приводит к значительному снижению порога протекания в полимерной матрице [3]. По своим уникальным электрофизическим, тепловым и механическим свойствам графен имеет несомненные преимущества перед другими углеродными наноразмерными системами, предлагаемыми в качестве наполнителей композиционных РПМ и ЭМ. В настоящее время широкомасштабное применение чистого графена в композиционных РПМ и ЭМ остается проблематичным. Альтернативой может служить продукт восстановления оксида графита (ОГ) — самого распространенного угле-

родного материала, получаемого путем окисления графита [4–8]. При последующем восстановлении ОГ образуется структура, состоящая из нескольких графеновых слоев [9].

Экранирующие и радиопоглощающие свойства композиционных материалов определяются свойствами как полимерных матриц, так и используемых наполнителей, однако определяющим фактором являются электрофизические характеристики углеродных наполнителей. В работе [6] было показано, что величина тангенса угла диэлектрических потерь эпоксидной матрицы с наполнителем из термовосстановленного оксида графита в несколько раз превосходит соответствующую величину эпоксидного композита с традиционным графитовым наполнителем. В настоящем сообщении приводятся результаты исследования влияния отжига образцов термовосстановленного оксида графита, рассматриваемых как потенциальные наполнители для композиционных РПМ, на их электрофизические характеристики.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Оксид графита получали путем окисления природного графита марки ГК-1 (размер частиц ~30 мкм, содержание углерода — не менее 99 мас.%, содержание золы — не более 1 мас.%, ГОСТ 4404-78)

Таблица 1. Влияние температуры отжига на параметры термовосстановленного оксида графита

Образец	C/O	S , м ² /г	$\sigma_{\text{нч}}$, См/м	Образец	C/O	S , м ² /г	$\sigma_{\text{нч}}$, См/м
ТВОГ	4.3	460	11.18	ТВОГ-У	3.5	520	17.82
ТВОГ-200	27.5	—	12.65	ТВОГ-У200	—	—	16.72
ТВОГ-400	31.2	—	9.74	ТВОГ-У400	—	—	14.67
ТВОГ-600	35.4	—	21.64	ТВОГ-У600	—	—	27.84
ТВОГ-800	39.8	—	31.09	ТВОГ-У800	—	—	36.28
ТВОГ-900	42.6	620	51.45	ТВОГ-У900	21.2	650	54.05

Примечание: C/O – атомное соотношение [11], S – удельная поверхность [6], $\sigma_{\text{нч}}$ – удельная низкочастотная электропроводность при давлении 3 МПа.

перманганатом калия в смеси концентрированной H_2SO_4 с NaNO_3 [10]. По результатам элементного анализа полученный ОГ содержал 45.9 мас.% кислорода при расчетном атомном соотношении C/O, равном 1.5 [6]. Термическое восстановление (термоудар) ОГ с образованием термовосстановленного оксида графита (ТВОГ) проводили в трубчатой печи, разогретой до 1173 К, в атмосфере аргона по методу, подробно описанному в [8]. При такой термической обработке атомное соотношение C/O для полученного ТВОГ составляло 4.3 [6]. Для дополнительного расщепления слоев в процессе термического восстановления часть ОГ в течение 2 ч выдерживали в парах уксусной кислоты в эксикаторе. Обработанный таким образом ОГ подвергали термоудару при температуре 1173 К (ТВОГ-У) аналогично получению ТВОГ, что приводило к дополнительному расщеплению слоев ОГ и, соответственно, изменению их удельной поверхности. Затем образцы ТВОГ и ТВОГ-У отжигали в атмосфере аргона при температурах 473, 673, 873, 1073 и 1173 К в течение 3 ч (ТВОГ-200, ТВОГ-400, ТВОГ-600, ТВОГ-800 и ТВОГ-900 и, соответственно, ТВОГ-У200, ТВОГ-У400, ТВОГ-У600, ТВОГ-У800 и ТВОГ-У900). Так, для образцов ТВОГ в результате отжига при температурах 473, 673, 873, 1073 и 1173 К атомное соотношение C/O возрастает до 27.5, 31.2, 35.4, 39.8 и 42.6 [11], а для образцов ТВОГ-У и ТВОГ-У900 – до 3.5 и 21.2 соответственно [6].

Контроль за термовосстановлением ОГ, содержащего большое количество парамагнитных дефектов, концентрация которых в процессе восстановления может существенно уменьшаться, осуществлялся методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) [12, 13]. Для проведения измерения порошки образцов помещали в стеклянную ампулу диаметром 4 мм, спектры ЭПР регистрировали на спектрометре Radioran SE/X-2544 (Польша) трехсантиметрового диапазона.

Измерения низкочастотной удельной электропроводности, $\sigma_{\text{нч}}$, порошков проводили в пресс-форме, состоящей из тефлоновой матрицы

с диаметром отверстия 6 мм с подвижным латунным электродом по методике, описанной в работе [6, 14, 15]. Образцы подвергали воздействию давлением вплоть до 5 МПа. Проводимость регистрировали с помощью прибора “Измеритель иммитанса Е7-20” на частоте 1 кГц, при которой влияние скин-эффекта можно было не учитывать.

Комплексную диэлектрическую проницаемость (КДП) порошков измеряли резонаторным методом на частоте 9.8 ГГц [16–20]. Образцы помещали в стеклянные ампулы с внутренним диаметром 2–2.5 мм. Для каждого образца проводили несколько измерений (до 4–8) при разных его объемах и полученные значения КДП (ϵ' и ϵ'') и тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) усредняли. Все измерения проводили со свежеприготовленными образцами при комнатной температуре, а их точность составляла 10 и 20% для ϵ' и ϵ'' соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изображения, полученные с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), демонстрируют явное воздействие отжига при температуре 1173 К на морфологию образцов ТВОГ-У и ТВОГ-У900 (рис. 1). Оба образца обладают слоистой структурой с большими пустотами между листами, причем после термообработки средний размер частиц значительно уменьшился. При этом увеличивается удельная поверхность S частиц ТВОГ-У900 по сравнению с ТВОГ-У, что согласуется с ее численными данными, измеренными по методу Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ), см. табл. 1. Величина удельной поверхности образцов играет важную роль в выборе наполнителей для композиционных материалов.

По результатам элементного анализа полученный ОГ содержит 45.9 мас.% кислорода при расчетном атомном соотношении C/O, равном 1.5 [6]. Быстрый нагрев образца ОГ до температуры 1173 К сопровождается потерей ~30% его массы и взрывообразным выделением оксидов углерода и паров воды. В результате термического восстанов-

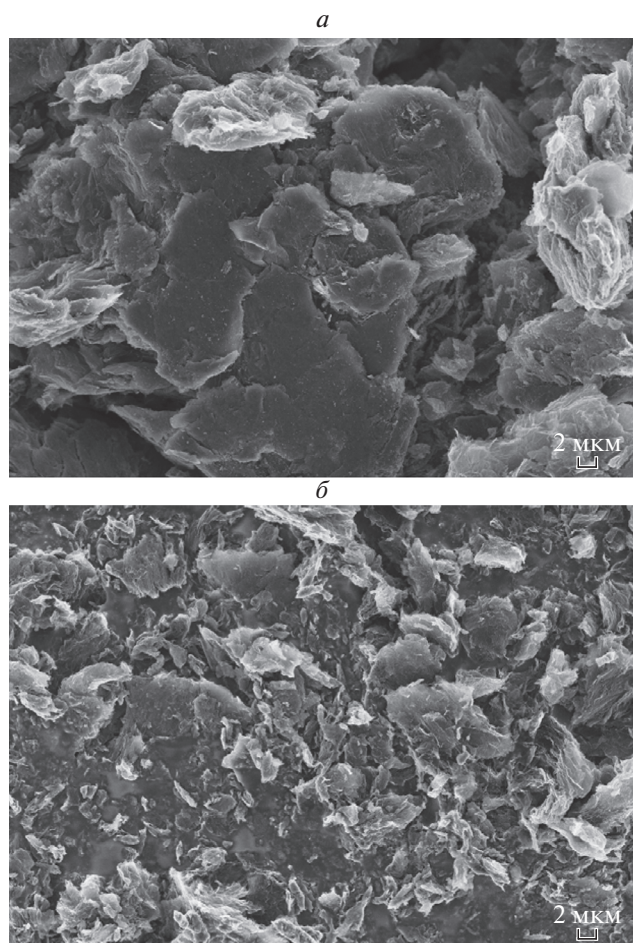


Рис. 1. Изображения, полученные с помощью СЭМ, образцов ТВОГ-У (а) и ТВОГ-У900 (б).

ления рассчитанное атомное соотношение С/О, характеризующее степень восстановления ОГ (табл. 1), возрастает для образцов ТВОГ и ТВОГ-У до 4.3 и 3.5 соответственно [6, 11]. Последующий отжиг образцов в потоке аргона позволяет дополнительно удалить остающиеся после термического восстановления кислородсодержащие группы [21–25], при этом соотношения С/О для образцов ТВОГ и ТВОГ-У возрастают (табл. 1). Меньшие значения С/О для ТВОГ-У по сравнению с ТВОГ и для ТВОГ-У900 по сравнению с ТВОГ-900 можно объяснить тем, что после термоудара уксусная кислота из образцов ТВОГ-У удалялась не полностью [6]. Измерения удельной поверхности, проведенные по методу БЭТ (табл. 1), показали, что значения S для образцов ТВОГ и ТВОГ-У возрастают после отжига при 1173 К. Ранее для этих образцов было показано, что “стопки” из большого числа графеновых слоев отсутствуют при термическом восстановлении [6].

Измерение удельного электрического сопротивления на низкой частоте является одним из доступ-

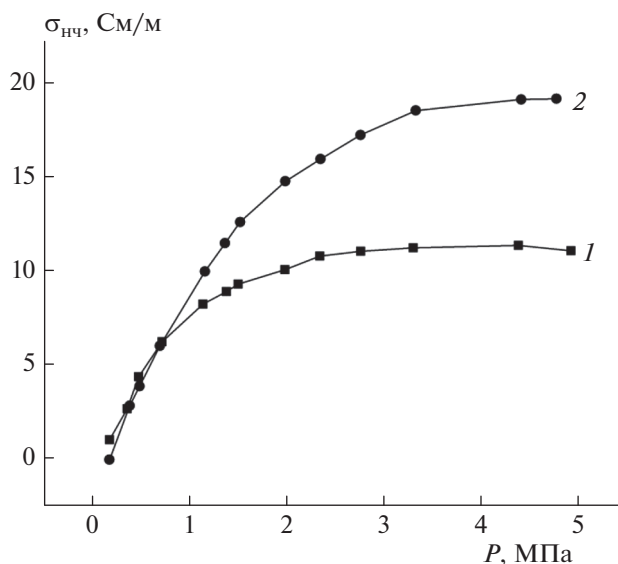


Рис. 2. Зависимость удельной низкочастотной электропроводности $\sigma_{\text{нч}}$ порошков ТВОГ (1) и ТВОГ-У (2) от давления.

ных и надежных методов получения электрофизических характеристик порошковых материалов. Значения удельной низкочастотной электропроводности $\sigma_{\text{нч}}$ определяли из соотношения $\sigma_{\text{нч}} = h/RS_3$, где R – измеренное электрическое сопротивление, Ом; S_3 – площадь электрода, м²; h – высота образца, м. Результаты измерений представлены на рис. 2 и рис. 3. Давление, отжиг и предварительная обработка ОГ парами уксусной кислоты оказали сильное влияние на значения $\sigma_{\text{нч}}$ и плотность ρ образцов. Типичная зависимость электропроводности от давления для порошков ТВОГ и ТВОГ-У приведена на рис. 2. Все они имеют одинаковый вид, различаясь только абсолютными значениями $\sigma_{\text{нч}}$ и ρ . С увеличением давления вплоть до 5 МПа электропроводность и плотность всех образцов возрастают. Характерно, что в области давлений до 0.5 МПа наблюдается резкий рост $\sigma_{\text{нч}}$, причем полученные значения совпадают для всех образцов. С последующим ростом давления зависимости $\sigma_{\text{нч}}$ от давления P выходят на плато при различных значениях проводимости (табл. 1 и рис. 2). Такое поведение этих зависимостей можно объяснить тем, что при заполнении пространства между электродами в насыпанном порошке образуются пустоты, которые устраняются при увеличении давления и в результате чего ρ и $\sigma_{\text{нч}}$ быстро растут. Дальнейшее увеличение давления может приводить к уплотнению уже самих частиц, и рост проводимости замедляется, как отмечено в работе [14].

При увеличении температуры отжига выше 873 К наблюдается рост значений $\sigma_{\text{нч}}$, а затем – их

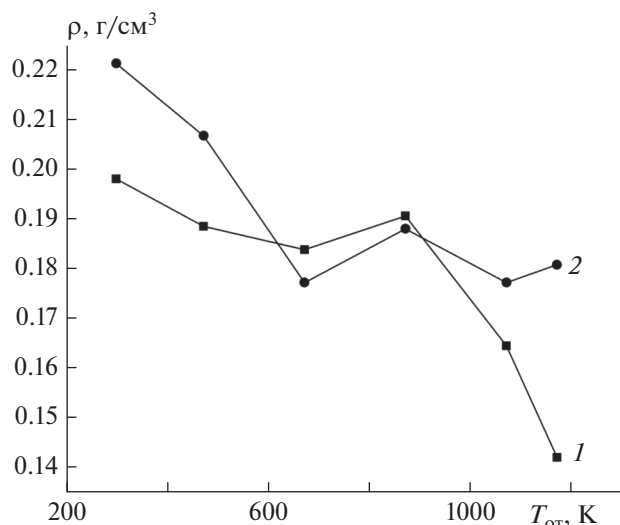


Рис. 3. Зависимость плотности порошков ТВОГ (1) и ТВОГ-У (2) от температуры отжига $T_{от}$ при давлении 3 МПа.

резкое возрастание при 1173 К, причем проводимость образцов ТВОГ-У превышает соответствующую величину для образцов ТВОГ (табл. 1). Это может быть вызвано удалением кислородсодержащих групп с повышением температуры отжига, что хорошо согласуется с данными элементного анализа (табл. 1), а также с литературными данными [21, 22, 25]. По-видимому, отжиг порошков при температурах, больших 873 К, приводит к восстановлению sp^2 -графеновой структуры и “залечиванию” дефектов, что способствует значительному росту $\sigma_{нч}$. Превышение значений $\sigma_{нч}$ образцов ТВОГ-У по сравнению с образцами ТВОГ можно объяснить тем, что предварительная обработка ОГ парами уксусной кислоты увеличивает удельную поверхность образцов (табл. 1). Мы считаем, что наблюдаемые тенденции объясняются тем, что с увеличением удельной поверхности порошков вследствие отжига и предварительной обработки ОГ парами уксусной кислоты

происходит рост числа контактов между частицами с образованием проводящих цепочек, что ведет к росту низкочастотной проводимости.

Следует отметить интересный факт. С ростом температуры отжига плотность всех исследованных образцов падала; при этом оказалось, что менее плотные образцы обладают более высокой проводимостью. Подобный эффект, который наблюдался в работах [15, 26], авторы объяснили морфологическим различием в расположении слоев в углеродных материалах. Мы полагаем, что образцы с большей удельной поверхностью и меньшей плотностью обладают большим количеством полезных проводящих контактов, и поэтому их проводимость может быть выше, чем у образцов с большей плотностью (рис. 1 и табл. 1).

Радиопоглощающие материалы, способные поглощать, пропускать и отражать электромагнитное излучение, характеризуются частотной зависимостью комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon(\omega) = \epsilon'(\omega) - j\epsilon''(\omega)$, где j – мнимая единица, а $\epsilon'(\omega)$ и $\epsilon''(\omega)$ – действительная и мнимая части, характеризующие диэлектрические поляризацию и потери в РПМ, и соответствующим тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon'$ [16]. В табл. 2 суммируются результаты измерений по всем изученным образцам, предлагаемым в качестве потенциальных наполнителей для РПМ. Приводимые значения СВЧ-проводимости ($\sigma_{СВЧ}$) и ϵ'' порошков связаны соотношением $\sigma_{СВЧ} = \epsilon_0\omega\epsilon''$.

С ростом температуры отжига выше 873 К наблюдается рост реальной и мнимой частей КДП для всех образцов. Значительная разница между группой образцов ТВОГ и ТВОГ-У демонстрируется различием в значениях $\text{tg}\delta$ и σ . При температуре отжига 1173 К значения $\text{tg}\delta$ и σ для образца ТВОГ-У900 превышают аналогичные значения для образца ТВОГ-900 в 3 и 5 раз соответственно.

В ЭПР-спектре ОГ, который являлся прекурсором термовосстановленных образцов, наблюдался узкий сигнал с g -фактором, равным ~ 2 , шириной линии 0.2 мТл [6], что согласуется с литературными

Таблица 2. Влияние температуры отжига на комплексную диэлектрическую проницаемость и СВЧ-проводимость образцов ТВОГ и ТВОГ-У

Температура отжига, К	ϵ'	ϵ''	$\text{tg}\delta$	$\sigma_{СВЧ}$, См/м	ϵ'	ϵ''	$\text{tg}\delta$	$\sigma_{СВЧ}$, См/м
	ТВОГ				ТВОГ-У			
293	1.29	0.03	0.03	0.02	1.14	0.05	0.04	0.03
473	1.12	0.04	0.03	0.02	1.30	0.17	0.13	0.09
673	1.17	0.04	0.04	0.02	1.22	0.09	0.07	0.05
873	1.31	0.16	0.12	0.09	1.40	0.26	0.19	0.14
1073	1.57	0.25	0.16	0.13	1.66	0.59	0.34	0.31
1173	1.63	0.32	0.18	0.17	2.81	1.61	0.55	0.85

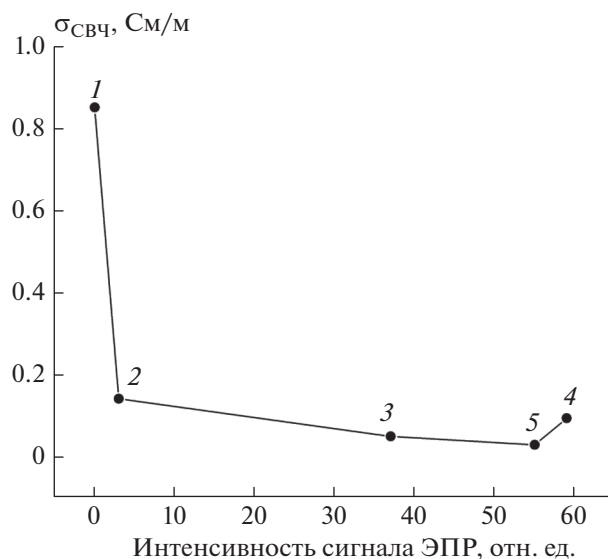


Рис. 4. Влияние температуры отжига на СВЧ-проводимость и интенсивность сигнала ЭПР для образцов ТВОГ-У900 (точка 1), ТВОГ-У600 (2), ТВОГ-У400 (3), ТВОГ-У200 (4), ТВОГУ (5).

данными [12]. Для всех термовосстановленных образцов этот сигнал ЭПР исчезает, что свидетельствует об эффективности процесса термического восстановления. Спектр ЭПР термовосстановленного в парах уксусной кислоты ОГ (ТВОГ-У) состоит из одиночной (широкой) линии с шириной 35 мТл при g-факторе, близком к двум [7]. Величина широкого сигнала зависит от температуры отжига. Отжиг при температурах 473, 673 и 873 К приводит к его последовательному уменьшению, а при 1173 К (ТВОГ-У900) – к полному исчезновению сигнала ЭПР. Аналогичное изменение интенсивности сигнала ЭПР с ростом температуры отжига наблюдалось для образцов ТВОГ и в работе [21]. Полученные результаты позволили проследить изменение величины сигналов ЭПР и СВЧ-проводимости при изменении температуры отжига (рис. 4).

Для объяснения полученного результата мы полагаем, что величина проводимости связана с числом центров захвата (рекомбинации) подвижных носителей заряда. Величина сигнала ЭПР может служить качественной характеристикой числа этих центров. Отжиг приводит к уменьшению их числа и соответствующему увеличению СВЧ-проводимости. В заключение отметим согласованный ход СВЧ- и низкочастотной проводимости исследованных порошков при изменении температуры отжига (рис. 5).

Две различные методики выявили одну и ту же тенденцию увеличения проводимости с ростом температуры отжига с существенным различием в

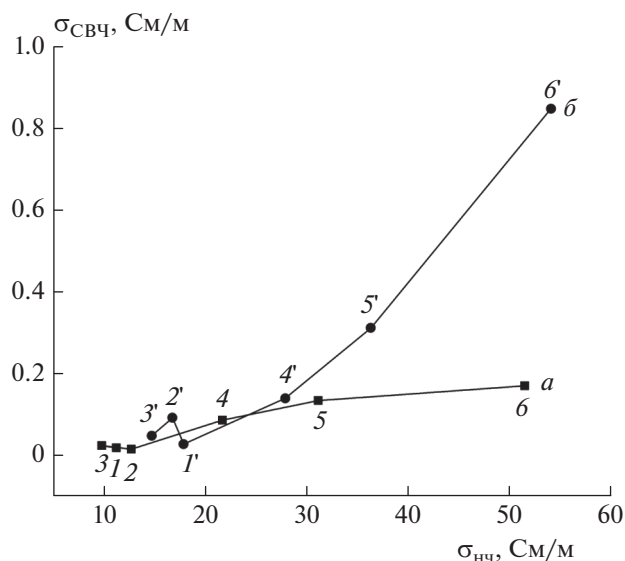


Рис. 5. Изменение низкочастотной и СВЧ-проводимостей для образцов ТВОГ (а) и ТВОГ-У (б) при температурах отжига 293 (точки 1, 1'), 473 (2, 2'), 673 (3, 3') и 873 К (4, 4'); 5 – 1073 К для $\sigma_{\text{нч}}$ и 1023 К для $\sigma_{\text{СВЧ}}$; 5' – 1073 К; 6, 6' – 1173 К.

наблюдаемом ходе СВЧ- и низкочастотной проводимости двух сравниваемых опытных серий образцов ТВОГ и ТВОГ-У. Предварительная обработка оксида графита парами уксусной кислоты привела к большим значениям удельной поверхности для образцов ТВОГ-У по сравнению с ТВОГ и, как следствие, к заметному количественному различию в значениях проводимости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При рассмотрении термовосстановленных образцов оксида графита в качестве наполнителей для композиционных радиопоглощающих материалов в настоящей работе установлено, что их функционализация (обработка парами уксусной кислоты и отжиг) обеспечивает рост как низкочастотной, так и СВЧ-проводимости. Показано, что предварительная обработка оксида графита парами уксусной кислоты приводит к изменению электрофизических параметров термовосстановленного оксида графита, что особенно видно по значениям КДП при самой высокой температуре отжига, составляющей 1173 К: ϵ' возрастает почти в 2 раза, ϵ'' – в 5 раз, $\text{tg}\delta$ – в 3 раза. Высокое значение тангенса угла диэлектрических потерь на частоте 9.8 ГГц, составляющее 0.55 для наполнителя ТВОГ-У900, указывает на перспективность его использования для композиционных РПМ. Соответствующая магнитная восприимчивость для всех образцов настолько слаба, что она не влияет на общее поглощение электромагнитного излучения. Особенно следует отметить, что эти методики

(низкочастотная и СВЧ) выявили общую тенденцию влияния температуры отжига термовосстановленного оксида графита на его транспортные свойства.

Авторы выражают благодарность А.А. Арбузову за изготовление и анализ образцов.

Экспериментальные данные, используемые в работе, были получены в рамках программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг. (регистрационный номер АААА-А18-118112290069-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V. et al. // Science. 2004. V. 306. P. 666; <https://doi.org/10.1126/science.1102896>*
2. *Pa K., Leng T., Song J. et al. // Carbon. 2020. V. 160. P. 307; <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.12.062>*
3. *Палазник О.М., Недорезова П.М., Польщиков С.В. и др. // Высокомолекуляр. соединения. Б. 2019. Т. 61. № 2. С. 144; <https://doi.org/10.1134/S2308113919020086>*
4. *Smith A.T., LaChance A.M., Zeng S. et al. // Nano Mater. Sci. 2019. V. 1. P. 31; <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2019.02.004>*
5. *Чернозатонский Л.А., Сорокин П.Б., Артюх А.А. // Успехи химии. 2014. Т. 83. № 3. С. 251; <https://doi.org/10.1070/RC2014v083n03ABEN004367?locatt=label:RUS>*
6. *Симбирцева Г.В., Пивень Н.П., Бабенко С.Д. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 12. С. 60; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20120146>*
7. *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>*
8. *Арбузов А.А., Мурадян В.Е., Тарасов Б.П. и др. // ЖФХ. 2016. Т. 90. № 5. С. 663; <https://doi.org/10.7868/S004445371605007>*
9. *Мурадян В.Е., Соколов Е.А., Пивень Н.П. и др. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. № 23. С. 106.*
10. *Арбузов А.А., Мурадян В.Е., Тарасов Б.П. // Изв. АН. Сер. хим. 2013. № 9. С. 1962.*
11. *Арбузов А.А., Бабенко С.Д., Пивень Н.П. и др. // Тр. Десятой Всерос. конф. “Необратимые процессы в природе и технике”. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. Ч. I. С. 118; <http://nppt.bmstu.ru/index.php/2019/chast1>*
12. *Ciric L., Sienkiewicz A., Gaal R. et al. // Phys. Rev. B. 2012. V. 86. P. 195139; <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.86195139>*
13. *Gudkov M.V., Melnikov V.P. // Nanosystems: Phys. Chem. Math. 2016. V. 7. № 1. P. 244; <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2016-7-1-244-252>*
14. *Marinho B., Ghislandi M., Tkalya E. et al. // Powder Technol. 2012. V. 221. P. 351; <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.01.024>*
15. *Нищенко М.М., Михайлова Г.Ю., Архипов Е.И. и др. // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. 2009. Т. 7. № 3. С. 717.*
16. *Бранд А.А. Исследование диэлектриков на сверх-высоких частотах. М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1963.*
17. *Shepherd C., Hadzifejzovic E., Shkal F. et al. // Langmuir. 2016. V. 32. P. 7917; <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.6b02013>*
18. *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>*
19. *Slocombe D., Porch A., Bustarret E., Williams O.A. // App. Phys. Lett. 2013. V. 102, 244102; <https://doi.org/10.1063/1.4809823>*
20. *Hotta M., Hayashi M., Lanagan M.T. et al. // ISIJ Intern. 2011. V. 51. № 11. P. 1766.*
21. *Зиатдинов А.М., Саенко Н.С., Скрыльник П.Г. // ЖНХ. 2020. Т. 65. № 1. С. 131; <https://doi.org/10.31857/S0044457X20010213>*
22. *Корнилов Д.Ю. // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22. № 3. С. 88; <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-3-88-96>*
23. *Гудков М.В., Баженов С.Л., Бехли Л.С., Мельников В.П. // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 9. С. 33; <https://doi.org/10.1134/S0207401X18090078>*
24. *Гриднев А.А., Гудков М.В., Бехли Л.С., Мельников В.П. // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 12. С. 33; <https://doi.org/10.1134/S0207401X18120051>*
25. *Tu N.D.K., Choi J., Park C.R., Kim H. // Chem. Mater. 2015. V. 27. P. 7362; <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.5b02999>*
26. *Rani A., Nam S., Ah Oh K., Park M. // Carbon Lett. 2010. V. 11. № 2. P. 90.*