

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЭРОГЕЛЕЙ, СОДЕРЖАЩИХ УГЛЕРОДНЫЕ НАНОРАЗМЕРНЫЕ СТРУКТУРЫ

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

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

*E-mail: sgvural@mail.ru

Поступила в редакцию 03.04.2023;
после доработки 17.04.2023;
принята в печать 20.04.2023

Изучались диэлектрические свойства аэрогелей на основе композитных систем с политетрафтор-этиленом, оксидом графита или восстановленным оксидом графита с целью изучения их диэлектрических свойств. Приведены высокочастотные характеристики (9.8 ГГц) комплексных диэлектрических проницаемостей исследованных полимерных композитных систем. Проведен анализ полученных результатов.

Ключевые слова: аэрогель, композитные системы, оксид графита, восстановленный оксид графита, комплексная диэлектрическая проницаемость.

DOI: 10.31857/S0207401X23120117, **EDN:** QODYEP

Уменьшение и устранение загрязнения окружающей среды электромагнитным излучением и новые стандарты беспроводной электросвязи требуют создания разнообразных доступных облегченных экранирующих электромагнитное излучение и радиопоглощающих композиционных материалов. Для решения этой задачи рассматриваются разные типы композитных систем с различными наполнителями. Преимущества структурированных на наноуровне углеродных наполнителей в полимерных композиционных радиопоглощающих материалах перед традиционными графитовыми и металлосодержащими порошками связаны с их развитой поверхностью, приводящей к значительному снижению веса этих материалов [1]. В качестве перспективных радиопоглощающих материалов рассматриваются аэрогели с углеродными наноразмерными наполнителями. Их 3D-структура позволяет получать поглотитель с малым весом. В литературе приводятся данные по электрофизическим исследованиям аэрогелей, содержащих восстановленный оксид графита (ВОГ) [2–6].

В настоящей работе использовали образцы аэрогелей на основе политетрафторэлена (ПТЭФ), полученные по методу, описанному в [7], содержащие ОГ и ВОГ в качестве наполнителей с плотностью 35 и 29 мг/см³ соответственно. Высокочастотные измерения комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) аэрогелей на частоте

9.8 ГГц проводили по методике, описанной в работах [8, 9].

Аэрогель, содержащий оксид графита (ОГ/ПТФЭ), является прекурсором для аэрогеля с восстановленным оксидом графита (ВОГ/ПТФЭ). Достоинством такого подхода является восстановление оксида графита непосредственно в аэрогеле, его содержащем. Спектроскопическая и рентгеновская характеристика, результаты сканирующей электронной микроскопии и сорбционной способности исследованных аэрогелей приведены в работе [7].

Результаты высокочастотных измерений образцов представлены в табл. 1. В работе [7] было приведено содержание полимера в аэрогеле ВОГ/ПТФЭ, составляющее 68 мас.%. Для сравнения в табл. 1 приведены также результаты наших измерений КДП композитов на основе эпоксидной смолы с наполнителями графитом и термовосстановленным оксидом графита (ТВОГ) [1].

Комбинированное восстановление аэрогеля ОГ/ПТФЭ парами гидразина с последующей двухстадийной термообработкой при 120 и 370 °C привело к увеличению значений КДП аэрогелей (рост ϵ' в 2.76, ϵ'' — в 8.74, $\tan \delta$ — в 3.22). Это можно связать с превращением ОГ в ВОГ и, соответственно, с изменением проводящих свойств наполнителя. Электрическая проводимость самого наноразмерного наполнителя играет решающую роль в получении электропроводящих полимерных композитов. В частности, термовосстановле-

Таблица 1. Диэлектрические характеристики исследованных композитных систем на частоте 9.8 ГГц

Полимер	Наполнитель	Содержание наполнителя, масс. %	ϵ'	ϵ''	$\operatorname{tg} \delta$	Ссылка
ПТФЭ	ОГ	30	1.06	0.19	0.18	эта работа
ПТФЭ	ВОГ	32	2.93	1.66	0.58	эта работа
Эпоксидная смола	графит	1.5	3.30	0.16	0.05	[1]
Эпоксидная смола	ТВОГ	1.5	4.70	1.54	0.33	[1]
Эпоксидная смола	ТВОГ-900	1.5	7.90	1.80	0.23	[1]

Примечание: ТВОГ-900 получен из ТВОГ путем отжига при 900°C; ϵ' и ϵ'' — действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости, характеризующие диэлектрические поляризацию и потери в композите, с соответствующим тангенсом угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta = \epsilon''/\epsilon'$.

ние ОГ приводит к увеличению низкочастотной проводимости ОГ с $1.26 \cdot 10^{-3}$ до $11.18 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ для ТВОГ. Ранее нами было обнаружено влияние температуры термоотжига на электрофизические свойства углеродных наноразмерных материалов [9].

Сравнение значений КДП для образцов с разными полимерными матрицами показывает, что значения $\epsilon'' = 1.66$ и $\operatorname{tg} \delta = 0.58$ для аэрогеля ВОГ/ПТФЭ превышает аналогичные значения для графита почти в 10.38 и 11.60 раз, а $\operatorname{tg} \delta$ для аэрогеля ВОГ/ПТФЭ превышает аналогичное значение для композитов ТВОГ/эпоксидная смола и ТВОГ-900/эпоксидная смола почти в 2 раза. Таким образом, получен легкий материал со значениями КДП, превышающими аналогичные значения для эпоксидного композита [1]. Различия в диэлектрических свойствах полимерных композитных систем с восстановленным ОГ, по-видимому, связано с пористой структурой аэрогеля. Она может вызвать многократное рассеяние электромагнитной волны [2–6], что приводит к ослаблению ЭМ энергии. Углеродные наноразмерные структуры ВОГ образуют в аэрогеле пересекающуюся проводящую трехмерную конфигурацию, которая может значительно увеличить электрические потери. В литературе рассматривается возможное дополнительное влияние поляризационных потерь в аэрогелях на измеряемые параметры [2–6, 10].

Изучены диэлектрические свойства композитных систем (аэрогелей) на основе политетрафторэтилена с оксидом графита и восстановленным оксидом графита в качестве наполнителей с плотностями 35 и 29 мг/см³ соответственно. С помощью высокочастотного метода продемонстрировано изменение значений комплексной диэлектрической проницаемости в зависимости от состава полимерной матрицы и способа формирования композитной системы. К основному результату работы следует отнести полученное значение $\operatorname{tg} \delta = 0.58$ для аэрогеля ВОГ/ПТФЭ, которое превышает аналогичные значения для ком-

позита графит/эпоксидная смола почти в 12 раз, а для композитов ТВОГ/эпоксидная смола и ТВОГ-900/эпоксидная смола — почти в 2 раза. Можно полагать, что сочетание пористого каркаса аэрогеля с проводящим восстановленным оксидом графита будет способствовать созданию новых легких эффективных радиопоглощающих композиционных материалов с улучшенными электрофизическими свойствами.

Авторы выражают благодарность В.Н. Васильцу за предоставление образцов аэрогелей.

Работа выполнена в рамках госзадания (тема № 122040500074-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Симбирцева Г.В., Пивень Н.П., Бабенко С.Д. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 12. С. 60; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20120146>
2. Zhao B., Li Y., Ji H. et al. // Carbon. 2021. V. 176. P. 411; <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.01.136>
3. Li Q., Li Sh., Liu Q. et al. // Ibid. 2021. V. 183. P. 100; <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.07.015>
4. Liu H., Xu Y., Zhao X. et al. // Ibid. 2022. V. 191. P. 183; <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.01.051>
5. Zhang Q., Du Z., Hou M. et al. // Ibid. 2022. V. 188. P. 442; <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.11.047>
6. Lai D., Chen X., Wang G. et al. // Ibid. 2022. V. 188. P. 513; <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.12.047>
7. Baskakov S.A., Baskakova Yu.V., Kabachkov E.N. et al. // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2019. V. 11. P. 32517; <https://doi.org/10.1021/acsami.9b10455>
8. Симбирцева Г.В., Бабенко С.Д., Кирюхин Д.П., Арбузов А.А. // Хим. физика. 2023. Т. 42. № 1. С. 15; <https://doi.org/10.31857/S0207401X23010119>
9. Симбирцева Г.В., Пивень Н.П., Бабенко С.Д. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 4. С. 32; <https://doi.org/10.31857/S0207401X22040094>
10. Tang R., Xu P., Dong J. et al. // Carbon. 2022. V. 188. P. 492; <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.12.026>