

СПЕКТРАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОГЛОЩЕНИЯ И ОТРАЖЕНИЯ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИТОМ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОГО ПОЛИМЕРА С МНОГОСТЕННЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

Ф. Ф. Комаров¹, О. В. Мильчанин¹, И. Д. Парфимович^{2*}, М. В. Гринченко²,
И. Н. Пархоменко², А. Г. Ткачев³, Д. С. Быченко^{4,5}

УДК 535.343.9;535.375.54

¹ Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко, Минск, Беларусь

² Белорусский государственный университет,

220030, Минск, просп. Независимости, 4, Беларусь; e-mail: irongrivus71@gmail.com

³ Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

⁴ Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

⁵ Рязанский государственный радиотехнический университет, Рязань, Россия

(Поступила 24 января 2017)

Разработана методика диспергирования многостенных углеродных нанотрубок в двухкомпонентном полимере Specifix-20 (эпоксидная смола+отвердитель) с использованием совместного гидромеханического и ультразвукового перемешивания. Изготовлены новые композитные материалы с углеродными нанотрубками. Проведены исследования структуры, оптических и электрофизических характеристик, а также процессов прохождения электромагнитного излучения СВЧ диапазона (26—38 ГГц) в экспериментальных образцах композитных материалов. Показано, что сильные поглощающие свойства композитного материала проявляются только при существенных добавках многостенных углеродных нанотрубок, что вызвано появлением электрической проводимости композитов. Установлен “размерный эффект” влияния типа добавки на оптические характеристики получаемых композитных материалов. Для достижения сравнимых показателей коэффициентов поглощения СВЧ излучения требуется меньшее количество углеродных нанотрубок с меньшим диаметром и большей удельной площадью поверхности в составе композита.

Ключевые слова: многостенные углеродные нанотрубки, эпоксидный полимер, композитный материал, электромагнитное поглощение, комбинационное рассеяние света.

A method to disperse multi-walled carbon nanotubes in a two-component Specifix-20 polymer (epoxy resin + hardener) using joint hydromechanical and ultrasonic mixing was developed. New composite materials with carbon nanotubes in the epoxy polymer were produced. The structure, optical and electrical characteristics of these composites were studied. Propagation of electromagnetic radiation in the experimental samples of composite materials was investigated in the microwave range (26—38 GHz). It was shown that strong absorption of the composite material appeared only with significant additions of multiwalled carbon nanotubes and was caused by the appearance of electrical conductivity of the composites. A “size effect” was established for the influence of the addition type on the optical characteristics of the resulting composite materials. Being dependent on the carbon nanotubes specific surface, electromagnetic radiation absorption increases with the nanotube percentage and the decreasing of nanotube diameter.

SPECTRAL DEPENDENCE OF ABSORPTION AND REFLECTION OF MICROWAVE RADIATION BY COMPOSITE EPOXY POLYMER WITH MULTI-WALLED CARBON NANOTUBES

F. F. Komarov¹, O. V. Milchanin¹, I. D. Parfimovich^{2*}, M. V. Grinchenko², I. N. Parhomenko²,
A. G. Tkachev³, D. S. Bychanok^{4,5} (¹ A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University, Minsk, Belarus; ² Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Prosp., Minsk, 220030, Belarus; e-mail: irongrivus71@gmail.com; ³ Tambov State Technical University, Tambov, Russia; ⁴ Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University, Minsk, Belarus; ⁵ Ryazan State Radioengineering University, Ryazan, Russia)

Keywords: *multi-walled carbon nanotubes, epoxy polymer, composite material, electromagnetic radiation absorption, Raman scattering.*

Введение. Первое детальное описание структуры полых углеродных волокон было дано в работе [1], посвященной синтезу новой аллотропной модификации углерода электродуговым способом. Данное открытие привлекло внимание специалистов всего мира, а тема изучения уникальных физических свойств углеродных нанотрубок (УНТ) остается одной из популярных в научном мире. Открытие и синтез УНТ стимулировали интенсивные исследовательские работы по определению их потенциальных применений из-за уникальности их механических и электрических свойств [2, 3]. Известно, что УНТ обладают экстремально высокой механической прочностью (модуль Юнга ~ 2 ТПа) и эластичностью, теплопроводностью (2000 Вт/мК), электрической прочностью и способностью пропускать токи до 10^{10} А/см², высокой подвижностью электронов. УНТ могут быть полупроводниковыми или металлическими в зависимости от их диаметра и хиральности структуры. Указанные особенности, представляющие научный интерес, могут быть положены в основу эффективного практического использования УНТ в различных областях науки и технологии.

Однако работать с одиночными УНТ сложно из-за малых размеров, сильного взаимодействия с электрическими и магнитными полями. Обойти трудности такого рода можно, создавая на основе УНТ макроскопические материалы. Поэтому в последнее время интенсивно развивается направление по созданию новых композиционных материалов, содержащих в своей матрице углеродные наноматериалы. Широко ведутся работы по этой тематике на различных композиционных материалах, особенно на основе полимеров с добавлением 1—10 мас.% УНТ [4—13]. Даже небольшие добавки УНТ значительно изменяют свойства полимеров: увеличивается прочность, теплопроводность, появляется электропроводность. Придание электропроводящих свойств полимерам, которые почти всегда являются хорошими электроизоляторами, путем добавления УНТ весьма привлекательно. Примечательно, что перколяционный порог, при котором происходит рост электропроводности композита, при добавлении одностеночных УНТ (ОУНТ) весьма мал (~ 0.1 мас.%). При таких концентрациях УНТ все остальные свойства полимера остаются неизменными либо меняются весьма незначительно. Такие материалы интересны для применения в качестве защитного покрытия для экранирования уникальных электронных систем от электромагнитного излучения СВЧ диапазона [4], включая системы на космических аппаратах. Существует интерес к исследованиям процессов поглощения и отражения электромагнитного излучения в полимерах с УНТ в широком диапазоне длин волн [5, 14, 15]. Также открывается возможность создания прозрачных и проводящих покрытий, электростатической защиты, электростатических красок, покрытий для экранирования электрических помех и поглощения СВЧ мощности. В работах [16—19] сообщается о создании с использованием углеродных наноструктур новых многофункциональных композитов, в том числе композитных радиоматериалов, способных существенно ослаблять электромагнитное излучение. Возрастание уровня микроволнового излучения и так называемого “электромагнитного загрязнения окружающей среды” объясняет интерес к разработке таких материалов. Кроме того, использование полимеров в качестве матрицы для УНТ позволит значительно улучшить такие физико-механические свойства экранирующих материалов, как эластичность и устойчивость к внешним воздействиям, в достаточной мере сохранив экранирующие свойства по сравнению с материалом, состоящим непосредственно из УНТ [7, 13].

В настоящее время при создании новых композитных материалов с уникальными оптическими и физико-механическими характеристиками для использования в современных технологиях необходимо учитывать ряд требований: с одной стороны, обеспечить нужные свойства и характеристики композитных материалов, а с другой, технология изготовления данных композитов должна быть недорогой, легко воспроизводимая, а также гибкая с целью быстрой модификации свойств получаемых композитов под нужные технологические параметры изделий. Технологии получения ОУНТ в настоящее время достаточно дороги. При этом выход материала данных технологий невысокий, а стоимость 1 г ОУНТ составляет десятки-сотни долларов США. Поэтому для массового создания композитных материалов, содержащих наноразмерные углеродные образования, представляется целесообразным использовать недорогие материалы, доступные в больших количествах. К таким материалам можно отнести выпускаемые в промышленных масштабах многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ), а также полиграфеновые материалы.

Методика эксперимента. Для получения композитных образцов в качестве исходной полимерной матрицы выбран оптически прозрачный безусадочный двухкомпонентный полимер марки Specifix-20 (эпоксидная смола+отвердитель). В качестве наполнителя выступали МУНТ производителя ООО “Нанотехцентр” (г. Тамбов) с торговым названием “Таунит” и “Таунит-М”. Для сравнения в качестве добавок в полимерный материал выбраны два типа МУНТ, имеющих различные геометрические параметры (диаметр, количество слоев в стенках, объемную плотность и удельную площадь поверхности) (рис. 1), которые должны оказывать влияние на процессы диспергирования в полимерной матрице и характеристики получаемых композитов. В табл. 1 приведены размерные характеристики используемых МУНТ. Результаты структурных исследований, полученные методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), хорошо согласуются с данными, заявленными производителем, что свидетельствует о хорошей воспроизводимости при производстве МУНТ марки “Таунит”.

Т а б л и ц а 1. Размерные характеристики многостенных углеродных нанотрубок

Параметр	“Таунит”	“Таунит-М”
Внешний диаметр, нм	20—70	8—15
Внутренний диаметр, нм	5—10	4—8
Длина, мкм	>2	>2
Удельная площадь поверхности, м ² /г	>120—130	>300—320

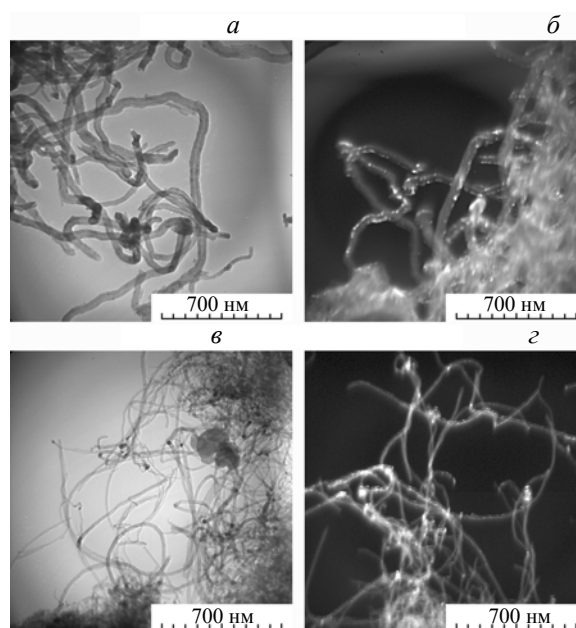


Рис. 1. Светлопольные (а, в) и темнопольные (б, г) ПЭМ-микрофотографии материалов “Таунит” (а, б) и “Таунит-М” (в, г)

Процесс диспергирования углеродных наноматериалов в эпоксидной смоле проводился при повышенной температуре (65 °С) в течение 2—4 ч. Процесс состоял из “быстрого” гидромеханического перемешивания (до 2000 об/мин) компонентов и одновременного ультразвукового воздействия с частотой 35 кГц на смесь. Композитные образцы изготовлены с различным содержанием МУНТ. Максимальное количество добавок УНТ в матрицу Specifix-20 для “Таунита” составило 16 мас.%, “Таунита-М” — 8 мас.%. Толщина сформированных образцов 15±1 мм. Структура МУНТ, используемых в качестве добавок в полимерный материал, исследована методом ПЭМ.

Для определения оптических характеристик композитных материалов в СВЧ диапазоне (эффектов пропускания, отражения и поглощения электромагнитного излучения) использован скалярный анализатор цепей R2-408R, построенный на основе генератора качающейся частоты, волноводного измерительного тракта, блока анализатора и системы обработки сигналов. Подробно установка описана в [20]. Измерения проведены в диапазоне частот 26—38 ГГц. Образцы композитов вырезались

в форме параллелепипеда размерами $7.2 \times 3.4 \times 1.5$ мм, соответствующими размерам волноводного тракта. В качестве выходных данных выступали S -параметры пропускания S_{21} и отражения S_{11} . Коэффициенты прохождения ($K_{\text{пр}}$), отражения ($K_{\text{отр}}$) и поглощения ($K_{\text{погл}}$) рассчитаны по формулам:

$$K_{\text{пр}} = S_{21}^2, \quad K_{\text{отр}} = S_{11}^2, \quad K_{\text{погл}} = 1 - S_{21}^2 - S_{11}^2.$$

Для оценки однородности структурного состояния композитных материалов использованы оптическая микроскопия в сочетании с методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР) с помощью микрорамановского спектрометра NanofinderHighEnd (LOTISTII). Исследования методом КР проведены при комнатной температуре в геометрии обратного рассеяния. Источник излучения — твердотельный лазер с $\lambda = 473$ нм. Излучение лазера фокусировалось в пятно диаметром ~ 1 мкм. При регистрации использованы дифракционные решетки 600 штр/мм (спектральное разрешение 0.01 нм), высокочувствительный CCD-детектор, охлаждаемый до -80 °С.

Результаты и их обсуждение. На рис. 2 представлены сравнительные параметры коэффициентов пропускания, отражения и поглощения от образцов композитов на основе полимера Specifix-20 с различным содержанием материалов “Таунит” (от 1 до 16 мас.%) и “Таунит-М” (от 1 до 8 мас.%).

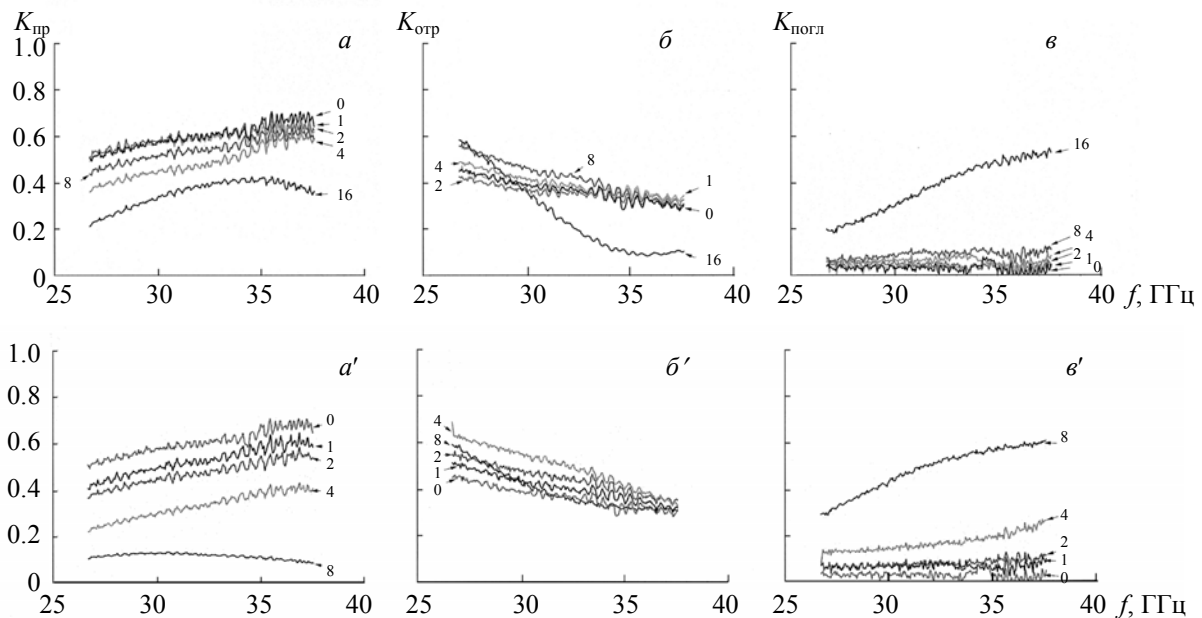


Рис. 2. Коэффициенты прохождения (a, a'), отражения (b, b') и поглощения (v, v') электромагнитного излучения композитными материалами на основе эпоксидного полимера с добавками МУНТ “Таунит” ($a—v$) и “Таунит-М” ($a'—v'$) (толщина образца 1.5 мм)

Для композитных образцов с концентрациями нанотрубок материала “Таунит” 1—8 мас.% характерны монотонное убывание функции отражения и возрастание функции пропускания. При максимальной концентрации “Таунита” (16 мас.%) в полимере функция пропускания возрастает в диапазоне частот ≤ 34 ГГц, а далее убывает. Для данного образца наблюдается более резкий спад функции отражения на частотах 33—38 ГГц — вплоть до <10 %. Вследствие этого коэффициент поглощения у композитного материала с 16 мас.% “Таунита” высокий. Следует отметить, что коэффициент поглощения в этом образце сильно изменяется в исследуемом диапазоне частот: монотонно увеличивается от 20 % на частоте 26.5 ГГц до 53 % на частоте 37.5 ГГц.

В композитных образцах с добавками материала “Таунит-М” наблюдается монотонное уменьшение коэффициента пропускания с увеличением концентрации добавок МУНТ. Поведение самих кривых коэффициентов пропускания и поглощения, как и в случае добавок “Таунита”, аналогично — пропускание с увеличением частоты монотонно возрастает, а отражение падает. У образца композита с долей добавок 8 мас.% “Таунит-М” наряду с убыванием функции отражения отмечаются сильное ослабление пропускания (~ 10 % по всему диапазону частот) и слабая зависимость от частоты. Коэф-

коэффициенты поглощения композитов заметно увеличиваются с ростом концентрации добавок “Таунита-М”, максимальный коэффициент поглощения регистрируется для композита с 8 мас.%. Как и для образца композита с 16 мас.% “Таунита”, в этом случае коэффициент поглощения изменяется от 30 % на частоте 26.5 ГГц до 60 % на частоте 37.5 ГГц.

Таким образом, существенное увеличение коэффициентов поглощения электромагнитного излучения СВЧ диапазона (вплоть до 50—60 %) регистрируется в композитных материалах при максимальных концентрациях добавок (рис. 2, в и в'). При меньших концентрациях добавок регистрируется слабое изменение функций пропускания, отражения и поглощения композитами по сравнению с исходным полимером. Из анализа результатов исследований оптических характеристик композитов с разными добавками УНТ с учетом их структурных характеристик можно заключить, что имеет место размерный эффект влияния типа добавки на характеристики композитов. Количество добавки МУНТ с меньшим диаметром и большей удельной площадью поверхности (“Таунит-М”) требуется меньше (почти в два раза) для достижения сравнимых показателей коэффициентов поглощения.

Для исследования морфологии и оценки качества диспергирования МУНТ в изготовленных композитных материалах спектры КР зарегистрированы в комбинации с оптической микроскопией различных участков срезов образцов. В КР-спектрах образцов исходного полимера SpecFix-20 (не представлены) присутствуют узкие полосы, характерные для колебательных мод атомов в эпоксидных кольцах. Так, выделяются отчетливые пики при 2930, 2880 (С–Н алифатические связи) и 3073 см^{-1} (С–Н ароматические связи) [21]. В области 600—1600 см^{-1} проявляются менее интенсивные линии, связанные с дыхательными модами эпоксидных колец и деформацией ковалентных связей атомов (валентные С=C-колебания ароматического кольца, деформационные колебания СН-групп) внутри колец [21, 22]. На рис. 3 представлены КР-спектры композитных материалов, содержащих большие добавки УНТ, для которых наблюдается заметное изменение характеристик поглощения электромагнитного излучения. Установлено, что на срезах образцов даже с максимальными (16 мас.%) концентрациями материала “Таунит” присутствуют области, свободные от МУНТ. На оптических фотографиях видны области светлого и темного контраста. Спектры, снятые со светлых областей, полностью идентичны спектрам чистого эпоксидного композита, описанным выше. Протяженность этих светлых областей на срезах образцов достигает 100 мкм. В КР-спектрах, снятых в темных областях, регистрируются полосы, характерные только для МУНТ [23—27]: интенсивные полосы при ~1350 и ~1580 см^{-1} . Полоса вблизи 1580 см^{-1} соответствует решеточным колебаниям симметрии E_{2g} в плоскостях графеновых слоев с sp^2 -гибридизованными валентными связями [27]. В зависимости от структурного совершенства материалов эта полоса может отличаться по частоте и форме. Полоса при 1350 см^{-1} соответствует D-полосе, которая обычно связывается с малыми размерами областей упорядочения и наличием выраженных границ углеродных кристаллитов, вызывающих нарушение правил отбора по волновому вектору при КР, к тому же она присутствует в спектрах всех углеродных материалов и служит характеристикой степени дефектности материала [28]. Менее интенсивная полоса в области ~2700 см^{-1} связана с процессами двухфононного рассеяния (рассеяния второго порядка) и обозначается как G'-полоса (или 2D-полоса) [29].

В композитах с добавками “Таунита-М” с концентрациями до 8 мас.% также зарегистрированы области светлого контраста на оптических фотографиях срезов (рис. 3, в), однако их размеры гораздо меньше — от сотен нанометров до нескольких микрометров. Для образца композита с 8 мас.% “Таунита-М” характерен однородный контраст на фотографиях сколов. В этом случае (рис. 3, г) во всех точках регистрации КР-спектров на срезах четко проявляются D- и G-полосы. Это свидетельствует о достаточно хорошем качестве диспергирования данного наноматериала в матрице.

Несмотря на наличие в образцах зон, свободных от заполнения МУНТ, можно утверждать, что композиты представляют собой объемную сетку областей с высокой концентрацией МУНТ. Как правило, материалы МУНТ после изготовления имеют смешанный тип проводимости — как металлический, так и полупроводниковый. При больших концентрациях МУНТ в композите даже с учетом того, что трубки залегают внутри матрицы в виде объемных сгустков и полностью не заполняют весь объем материала, можно говорить о формировании объемных проводящих каналов, взаимодействие между которыми через наноразмерные участки диэлектрической матрицы приводит к появлению существенной проводимости всего композита. Это подтверждается данными электрофизических исследований. Результаты измерения удельной электропроводности композитных материалов на установке для частотной диэлектрической спектроскопии [30] приведены в табл. 2.

Увеличение концентрации добавок МУНТ в составе композитных материалов приводит к монотонному росту их проводимости. Отметим, что при одинаковых концентрациях добавок композиты с “Таунитом-М” имеют более высокую (почти на порядок) проводимость, чем с “Таунитом”. При этом проводимость композитов с 16 мас.% “Таунита” выросла более чем на семь порядков по сравнению с чистым эпоксидным полимером. Для композита с 8 мас.% “Таунита-М” увеличение проводимости достигает почти шести порядков. Следует отметить, что появление эффекта сильного поглощения электромагнитного излучения композитами с большими концентрациями добавок МУНТ (8 мас.% “Таунит-М” и 16 мас.% “Таунит”) хорошо согласуется с резким увеличением их проводимости за счет формирования объемной сетки проводящих каналов.

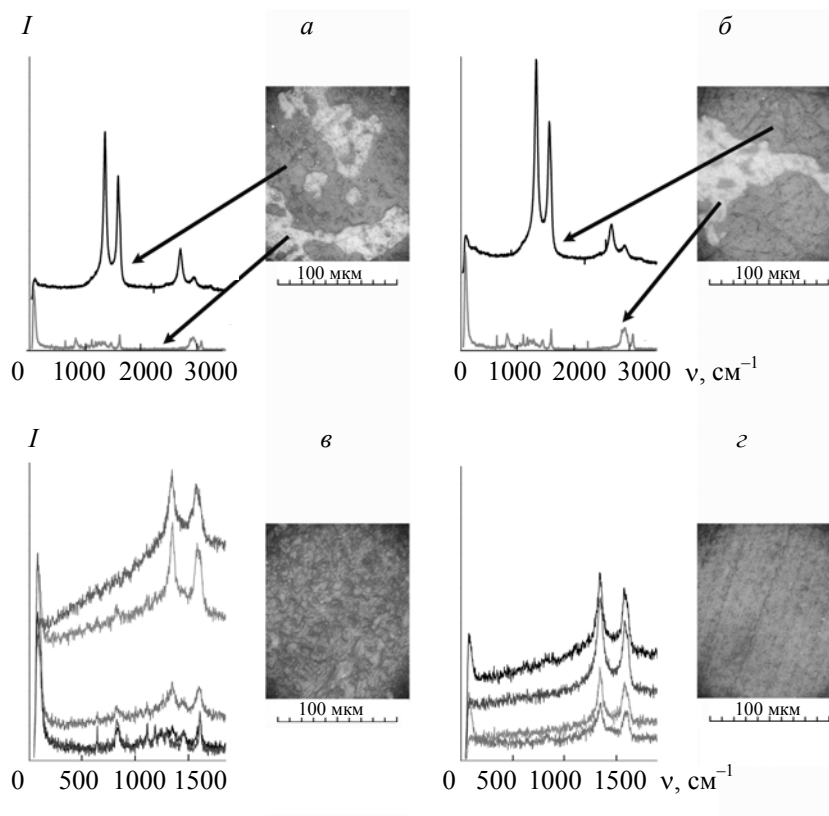


Рис. 3. КР-спектры композита Specifix-20 с добавками МУНТ “Таунит” 8 (а) и 16 мас.% (б), а также “Таунит-М” 4 (в) и 8 мас.% (г), полученные с различных точек срезов образцов; на вставках — оптические фотографии шлифованных срезов полимерных образцов

Т а б л и ц а 2. Удельная проводимость (См/см) композитных материалов при комнатной температуре, измеренная на переменном токе (частота измерений 50 Гц)

Добавка МУНТ, мас.%	“Таунит”	“Таунит-М”
0 (исходный полимер)	10^{-13}	10^{-13}
1	$4.83 \cdot 10^{-11}$	$2.1 \cdot 10^{-10}$
2	$3.19 \cdot 10^{-11}$	$1.6 \cdot 10^{-9}$
4	$2.77 \cdot 10^{-10}$	$1.1 \cdot 10^{-9}$
8	$1.71 \cdot 10^{-9}$	$1.17 \cdot 10^{-7}$
16	$3.7 \cdot 10^{-5}$	—

Закключение. Разработана эффективная методика диспергирования многостенных углеродных нанотрубок в матрице эпоксидного полимера, позволяющая изготовить композитный материал, способный существенно ослаблять электромагнитное излучение СВЧ диапазона. Проведены оптические

исследования изготовленных композитных материалов, определены коэффициенты пропускания, отражения и поглощения электромагнитного излучения в диапазоне частот 26—38 ГГц. Установлено, что при концентрации в композите добавки многостенных углеродных нанотрубок марки “Таунит” 16 мас.% коэффициент поглощения электромагнитного излучения в образцах достигает 55 % на частоте 38 ГГц. Аналогичная ситуация имеет место для образцов композитов с добавками многостенных углеродных нанотрубок марки “Таунит-М”. При этом эффект сильного поглощения регистрируется при концентрациях данной добавки 8 мас.% — коэффициент поглощения возрастает до 60 % на частоте 38 ГГц. Установлено, что геометрические размеры многостенных углеродных нанотрубок (меньший диаметр трубок и большая удельная площадь поверхности) оказывают существенное влияние на поглощающие характеристики изготовленных композитов — для достижения эффекта поглощения композитными образцами требуется меньшее количество многостенных углеродных нанотрубок. В образцах композитных материалов с максимальной добавкой материала “Таунит” рост коэффициента поглощения (до 55 %) происходит при резком снижении коэффициента отражения (<8 %), а в композитах с добавками материала “Таунит-М” при росте коэффициента поглощения до 60 % наблюдается сильное ослабление коэффициента прохождения электромагнитного излучения через образец (<10 %). Показано, что при больших концентрациях многостенных углеродных нанотрубок в композите на основе эпоксидного полимера даже с учетом того, что трубки залегают внутри матрицы в виде сгустков, происходит формирование объемных проводящих каналов, взаимодействие между которыми через наноразмерные участки диэлектрической матрицы приводит к появлению электрической проводимости всего композита. Этим объясняется появление сильного поглощения электромагнитного излучения в диапазоне частот 26—38 ГГц композитами с максимальными концентрациями добавок многостенных углеродных нанотрубок (8 мас.% материала “Таунит-М” и 16 мас.% “Таунит”).

- [1] S. Iijima. *Nature*, **354** (1991) 56—58
- [2] П. Н. Дьячков. Углеродные нанотрубки. Строение, свойства, применение, Москва, Бином (2006)
- [3] А. Г. Ткачев, И. В. Золотухин. Аппаратура и методы синтеза углеродных наноструктур, Москва, Машиностроение-1 (2007)
- [4] B. Hornbostel, U. Leute, P. Pötschke, J. Kotz, D. Kornfeld, P.-W. Chiu, S. Roth. *Physica E*, **40**, N 7 (2008) 2425—2429
- [5] R. Lv, F. Kang, J. Gu, X. Gui, J. Wei, K. Wang, D. Wu. *Appl. Phys. Lett.*, **93**, N 22 (2008) 223105 (1-3)
- [6] S. H. Park, P. Thielemann, P. Asbeck, P. R. Bandaru. *Appl. Phys. Lett.*, **94**, N 24 (2009) 243111 (1-3)
- [7] Ф. Ф. Комаров, А. Г. Ткачев, Э. Муноз, О. В. Мильчанин, Р. М. Кривошеев, И. Н. Пархоменко, П. Жуковский. Материалы 1-й междунар. науч.-практ. конф. “Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение”, 11—13 ноября 2015 г., Тамбов, ТГТУ (2015) 50—52
- [8] Ф. Ф. Комаров, А. Г. Ткачев, Р. М. Кривошеев, О. В. Мильчанин. Материалы 1-й междунар. науч.-практ. конф. “Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение”, 11—13 ноября 2015 г., Тамбов, ТГТУ (2015) 200—202
- [9] H. Zhang, G. Zeng, Y. Ge, T. Chen, L. Hu. *J. Appl. Phys.*, **105**, N 5 (2009) 054314 (1-4)
- [10] Ф. Ф. Комаров, Р. М. Кривошеев, М. А. Ксенофонтов, Т. Н. Колтунович, Х. А. Абдулин, Л. Е. Островская, А. К. Тогомбаева. *ИФЖ*, **88**, № 2 (2015) 344—349
- [11] Ф. Ф. Комаров, М. А. Ксенофонтов, А. Г. Ткачев, Р. М. Кривошеев, Л. Е. Островская, В. Н. Родионова, А. К. Тогомбаева. Докл. НАН Беларуси, **58**, № 4 (2014) 42—46
- [12] В. Е. Мурадян, Е. А. Соколов, С. Д. Бабенко, А. Г. Моравский. *ЖТФ*, **80** (2010) 83—87
- [13] F. F. Komarov, P. Zukowski, R. M. Kryvasheyev, E. Munoz, T. N. Koltunowicz, V. N. Rodionova, A. K. Togambaeva. *Phys. Status Solidi A*, **212**, N 2 (2014) 425—432; doi: 10.1002/pssa.201431493
- [14] О. С. Островский, Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько. *Физ. инженерия поверхности*, **1**, № 2 (2003) 161—173
- [15] D. Bychanok, P. Kuzhir, S. Maksimenko, S. Bellucci, C. Brosseau. *J. Appl. Phys.*, **113**, N 12 (2013) 124103(1—6)
- [16] Ф. Ф. Комаров, О. В. Мильчанин, Е. Муноз, В. Н. Родионова, В. Б. Карпович, Р. М. Кривошеев. *ЖТФ*, **81**, № 11 (2011) 140—145
- [17] K. L. Vinoy, R. M. Jha. *Radar Absorbing Materials from Theory to Design and Characterization*, Boston, Kluwar Acad (1996)

-
- [18] J. A. Roberts, T. Imholt, Z. Ye, C. A. Dyke, D. W. Price Jr., J. M. Tour. *J. Appl. Phys.*, **95**, N 8 (2004) 4352—4356
- [19] D. Bychanok, G. Gorokhov, D. Meisak, P. Kuzhir, S. A. Maksimenko, Y. Wang, Z. Han, X. Gao, H. Yue. *Progr. Electromagn. Res. M*, **53** (2017) 9—16
- [20] D. Bychanok, G. Gorokhov, D. Meisak, A. Plyushch, P. Kuzhir, A. Sokal, L. Lapko, A. Sanchez-Sanchez, V. Fierro, A. Celzard, C. Gallagher, A. P. Hibbins, F. Y. Ogrin, C. Brosseau. *Progr. Electromagn. Res. C*, **66** (2016) 77—85
- [21] T. Miyake, T. Yamakawa, N. Ohno. *J. Mater. Sci.*, **33**, N 21 (1998) 5177—5183
- [22] T. M. Brooks Brinton II. Condition Assessment of Kevlar Composite Materials Using Raman Spectroscopy, dis. candidate for the degree of Master of Science, Columbia, Missouri (2007) 78
- [23] R. J. Nemanich, S. A. Solin. *Phys. Rev. B*, **20**, N 2 (1979) 392—401
- [24] В. И. Иванов-Омский, Е. А. Сморгонская. *ФТП*, **39**, № 8 (2005) 970—975
- [25] H. Vašková, V. Křesálek. *Int. J. Mathem. Model. Method. Appl. Sci.*, **5**, N 7 (2011) 1197—1204
- [26] E. Vajaiac, S. Palade, A. Pantazi, A. Stefan, G. Pelin, D. Baran, C. Ban, M. Purica, V. Meltzer, E. Pincu, C. Berbecaru, D. Dragoman. *Digest J. Nanomater. Biostruct.*, **10**, N 2 (2015) 359—369
- [27] E. Ivanov, R. Kotsilkova, E. Krusteya. *J. Nanopart. Res.*, **13**, N 8 (2011) 3393—3403
- [28] W. Ma, L. Liu, Zh. Zhang, R. Yang, G. Liu, T. Zhang, X. An, X. Yi, Y. Ren, Zh. Niu, J. Li, H. Dong, W. Zhou, P. M. Ajayan, S. Xie. *NanoLett.*, **9**, N 8 (2009) 2855—2861
- [29] S. Osswald, E. Flahaut, H. Ye, Y. Gogotsi. *Chem. Phys. Lett.*, **402**, N 4—6 (2005) 422—427
- [30] Т. Н. Колтунович. *Журн. прикл. спектр.*, **82**, № 4 (2015) 616—621 [T. N. Koltynowicz. *J. Appl. Spectr.*, **82**, N 4 (2015) 623—628]