

05;07;12

Ослабление электромагнитного излучения СВЧ-диапазона бумагой из углеродных нанотрубок

© Ф.Ф. Комаров,¹ О.В. Мильчанин,¹ Е. Мупоз,² В.Н. Родионова,³ В.Б. Карпович,¹ Р.М. Кривошеев¹

¹ Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета, 220108 Минск, Белоруссия

² Instituto de Carboquímica (CSIC), 50018 Zaragoza, Spain

³ Институт прикладных ядерных проблем Белорусского государственного университета, 220030 Минск, Беларусь
e-mail: KomarovF@bsu.by

(Поступило в Редакцию 1 декабря 2010 г. В окончательной редакции 5 апреля 2011 г.)

Сформирован материал на основе углеродных нанотрубок, исследованы размерные и структурные характеристики исходных нанотрубок и изготовленной бумаги. Получены характеристики взаимодействия электромагнитного излучения с бумагой из углеродных нанотрубок в диапазоне от 25.5 до 73.3 GHz. Обнаружены сильные отражения и ослабление излучения в исследуемой области.

Введение

Углеродные нанотрубки (УНТ) обладают рядом замечательных качеств, являясь при этом объектами нанометрового масштаба. Они хорошо проводят электрический ток и тепло, прочны, устойчивы к механическим и температурным воздействиям [1,2]. Однако работать с одиночными углеродными трубками сложно из-за малых размеров, сильного взаимодействия с электрическими и магнитными полями. Обойти трудности такого рода можно, создавая на основе УНТ макроскопические материалы. Так, из УНТ можно изготовить материал, фактически представляющий собой бумагу, в которой вместо волокон целлюлозы использованы углеродные нанотрубки. В англоязычной литературе такой материал называют „buckypaper“ [3–5]. При этом УНТ объединены между собой в связки силами межмолекулярного притяжения Ван-дер-Ваальса и формируют устойчивый самоподдерживающийся материал за счет переплетения связок УНТ и отдельных УНТ, который сохраняет ряд характеристик УНТ. Он достаточно прочен, проводит электрический ток с высокой плотностью и в то же время с ним можно работать как с обычной пленкой.

Переплетенные ансамбли УНТ располагаются в пленке чаще всего хаотически, однако применением специфических приемов формирования пленки, таких как, например, осаждения слоя УНТ в сильном магнитном поле [4,6], удается создать слои с ярко выраженной текстурой укладки компонентов. Недавно бумага из высоко ориентированных УНТ была изготовлена из массива ориентированных УНТ, выращенных на шаблоне, и затем уложенных с помощью простого и эффективного метода „домино“ („domino pushing“) [7]. Свойства бумаги из УНТ зависят от ряда факторов, включая метод и условия выращивания УНТ, тип среды, в которой растворяются трубки, способ и длительность диспер-

гирования трубок в этой среде, концентрацию трубок в растворителе, давление, создаваемое при осаждении пленки с применением вакуумного насоса, топологию и тип поверхности, на которую осаждается пленка [5].

Финальные функциональные характеристики бумаги из УНТ (механические, электрические, оптические) определяются всеми указанными выше факторами, а также применением последующих внешних воздействий, включая термообработки в различных средах, облучение пленок высокоэнергетичными фотонами [8], электронами [9,10] или ионами [11–14].

Проводимость пленок из УНТ лимитируется слабо-связанными контактами между УНТ и перескоками носителей между индивидуальными трубками. Облучение их высокоэнергетичными квантами или частицами вызывает формирование переходов с ковалентными связями между УНТ, что приводит к значительному улучшению электрической и тепловой проводимости пленок [5]. Следует отметить, однако, что как механические, так и электрические параметры созданных слоев пока существенно отличаются от уникальных параметров, характерных для индивидуальных УНТ или связок УНТ. Модуль Юнга пленок из УНТ и прочность на разрыв не превышают 1–8 GPa и 6–33 MPa соответственно [5]. Обсуждавшееся выше магнитное упорядочение трубок и применение композитов на основе полимеров с УНТ позволяют увеличить модуль Юнга материала до 24–60 GPa [3]. Тем не менее даже эти улучшенные величины модуля Юнга пока составляют менее 10% от величины, характерной для нанотрубок.

Специфические и уникальные свойства УНТ и пленок из УНТ делают их перспективными для применений в качестве материалов для силовой электроники [15], материалов с высокой теплопроводностью, катодов с холодной эмиссией электронов, эффективных электродов для электрических батарей и емкостей, радиочастотных

фильтров [5], экологических сенсоров [16], сенсоров механических напряжений [17] и актюаторов [18].

Особый интерес представляют пленки из УНТ и композиты, содержащие УНТ, для создания высокоэффективных и недорогих систем защиты от электромагнитных излучений (ЭМИ) микроволновых частот. В первую очередь это относится к фону электромагнитных помех, обусловленному широким использованием мобильных телефонов, микроволновых печей, компьютеров и т.д. Для защиты электронного оборудования в коммерческих применениях требуются материалы с эффективностью экранирования (за счет отражения, поглощения, интерференционного гашения) более 30 dB. Для применений в военной отрасли необходимы материалы со значительно более высокой эффективностью экранировки ЭМИ — от 80 до 100 dB [19].

В последние годы широко ведутся работы по этой тематике на различных композиционных материалах и особенно на основе полимеров с добавлением 1–10 wt.% УНТ [2,20–30]. Учитывая то, что в бумаге из УНТ содержится определенное количество молекул растворителя и материала катализатора роста УНТ, ее также можно отнести к классу композиционных материалов на основе УНТ. Такой материал интересен для применения в качестве защитного покрытия для экранирования уникальных электронных систем [20], включая системы на космических аппаратах. Интересно исследовать процессы поглощения и отражения ЭМИ бумагой из УНТ в широком диапазоне длин волн [21,31]. Кроме того, такая информация будет полезной и для интерпретации данных по поглощению и отражению ЭМИ, полученных на сложных композиционных материалах, содержащих УНТ. Исходя из этого целью настоящей работы являлось создание бумаги из УНТ и проведение исследований поглощения и отражения ЭМИ СВЧ-диапазона на образцах бумаги из одностеночных углеродных нанотрубок.

Методики формирования бумаги из УНТ и ее характеристики

Для выращивания углеродных нанотрубок использовался метод HiPCO, описанный в работах [32,33] и представляющий собой разновидность CVD-метода синтеза УНТ. Блок-схема установки синтеза приведена на рис. 1. Катализатором служили наночастицы железа, образующиеся при термическом разложении карбонила железа ($\text{Fe}(\text{CO})_5$). При использовании этого метода нанотрубки формируются при прохождении потока CO с небольшой добавкой карбонила ($\text{Fe}(\text{CO})_5$) через нагретый реактор. При термической декомпозиции $\text{Fe}(\text{CO})_5$ формируются кластеры железа, действующие как катализатор при протекании реакции Боударда, которая приводит к формированию УНТ

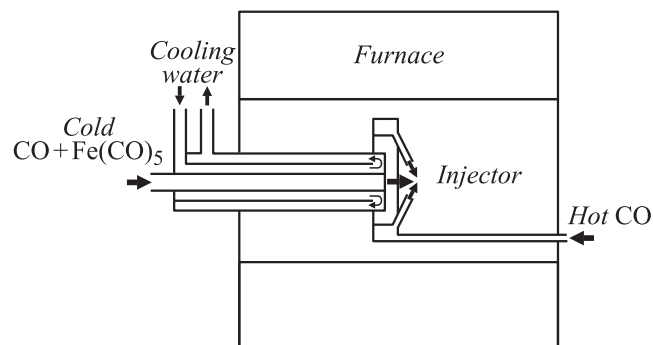
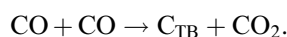


Рис. 1. Блок-схема установки синтеза одностеночных углеродных нанотрубок по методу HiPCO.

Оборудование для выращивания ОУНТ рассматриваемым методом представляло собой толстостенную кварцевую трубку диаметром 2.54 см, помещенную в печь (рис. 1). Часть трубки внутри печи имела температуру 1100°C, в то время как входная и выходная части поддерживались при комнатной температуре. Смесь газов $\text{CO}/\text{Fe}(\text{CO})_5$ подавалась в трубку по охлаждаемому инжектору, что позволяло сохранить низкую температуру газов и обеспечить их быстрый нагрев при инжектировании в печь. Вокруг выхода инжектора располагалось кольцо из узких игл, через которые с высокой скоростью подавался горячий CO-газ, что еще более увеличивало скорость нагрева газовой смеси. С этой целью поток CO предварительно пропускался по спиральному теплообменнику в печи. Давление CO составляло 0.2 МПа при скорости потока 1–21/min. Давление $\text{Fe}(\text{CO})_5$ было равным 2.5 Па. Определенная часть потока CO пропускалась через барбортер, наполненный $\text{Fe}(\text{CO})_5$ и поддерживаемый при температуре около 0°C. Таким образом, создавалось парциальное давление $\text{Fe}(\text{CO})_5$, равное давлению его паров $\sim 7 \cdot 10^2$ Па, и затем оно уменьшалось до необходимой величины при смешивании с основным потоком CO перед введением в инжектор. Продукты реакции в виде черного дисперсного материала осаждались на стенках трубки за пределами печи. Они представляли собой смесь УНТ и частиц железа, покрытых оболочками из углерода.

Полученные УНТ исследовались с помощью метода просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) для определения размерных и структурных характеристик. Исследования выполнялись на электронном просвечивающем микроскопе Hitachi-N800 (Япония) с действующим ускоряющим напряжением до 200 kV. При исследованиях использовались как режим светлого поля, так и многопучковый режим формирования изображения (ПЭМ высокого разрешения). Для проведения исследований УНТ методом ПЭМ небольшие порции материала углеродных нанотрубок наносились на медные сеточки с помощью клеявого состава, а затем высушивались и помещались в колонну микроскопа.

Одним из эффективных и информативных методов исследования структурных особенностей и типа проводимости (металлической или полупроводниковой) УНТ является спектроскопия комбинационного рассеяния света.

Методика приготовления образцов, пригодных для получения спектров комбинационного рассеяния, заключалась в следующем: образцы, представляющие собой таблетки, были спрессованы из смеси нанотрубок и KBr в соотношении 1:20 (10 mg нанотрубок и 200 mg KBr). Предварительно смесь перемешивалась в агатовой ступке, затем прессовалась в течение 10 min. Давление, создаваемое прессом при изготовлении образцов, составляло 25 МПа. Полученные образцы представляли собой таблетки диаметром 12 mm и толщиной 2 mm.

Для проведения измерений использовался автоматизированный спектрометрический комплекс [32], предназначенный для регистрации спектров комбинационного рассеяния, созданный в НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко на базе серийного прибора RAMALOG4 фирмы SPEX. Измерения проводились в спектральном диапазоне $40\text{--}1800\text{ cm}^{-1}$, для возбуждения использовалось излучение аргонового лазера с длиной волны 514.5 nm.

Бумага из углеродных нанотрубок формировалась путем диспергирования ОУНТ в водном растворе поверхностно-активного вещества Triton X-100 с помощью ультразвуковой обработки и последующей вакуумной фильтрации [33,34]. Под действием вакуума дисперсия УНТ пропусклась через политетрафторэтиленовый мембранный фильтр (Millipore LS, диаметр пор $5\text{ }\mu\text{m}$). В результате на поверхности фильтра из нанотрубок были сформированы тонкие листы бумаги из УНТ толщиной $25\text{--}30\text{ }\mu\text{m}$. Далее высушенные листы бумаги снимались с фильтра и тщательно промывались в больших количествах воды и метанола для удаления поверхностно-активных веществ, после чего снова высушивались. По завершению процесса сушки бумага отжигалась при температуре до 1000°C в течение 9 h в потоке Ar для удаления остатков растворителя и поверхностных веществ.

Исследования структурного состояния и топология поверхностей бумаги из УНТ выполнялись на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-806.

Для исследования взаимодействия электромагнитного излучения (ЭМИ) с бумагой из углеродных нанотрубок бумага помещалась между фланцами волновода, внутри которого возбуждалась стоячая волна. Выполнялось два измерения: сначала без бумаги, а после помещения бумаги в волновод измерялось рассогласование электромагнитного излучения с волноводом. Блок-схема измерений приведена на рис. 2. В качестве параметров, характеризующих взаимодействие излучения с веществом, измерялись величина ослабления электромагнитного излучения и коэффициент стоячей волны (КСВ).

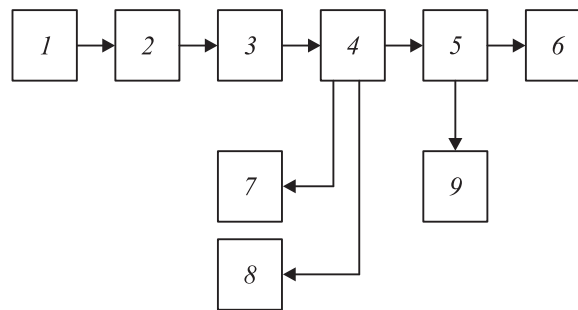


Рис. 2. Блок-схема измерений параметров наноматериалов в СВЧ-диапазоне. 1 — генератор, 2 — вентиль, 3 — поляризационный аттенюатор, 4 — направленный ответвитель, 5 — измерительная линия, 6 — резонатор, 7 — электронно-счетный частотомер, 8 — измеритель мощности, 9 — детекторная секция.

Измерения проводились в диапазонах частот СВЧ-излучения: 25.5–37.8, 36.3–55.7 и 53.7–73.7 GHz. Из соотношения $R = (\text{SWR} - 1) / (\text{SWR} + 1)$ была вычислена величина коэффициента отражения ЭМИ, R.

Экспериментальные данные и их обсуждение

Полученные по методу ПЭМ микрофотографии углеродных нанотрубок, синтезированных методом NiPCO, приведены на рис. 3. На изображениях видно, что отдельные УНТ объединяются в связки, в результате чего материал представлен жгутами, которые насчитывают до нескольких десятков единичных нанотрубок. Точно измерить длину этих связок из-за характерных особенностей материала (объединение и скрученность УНТ) не представлялось возможным. По приблизительным оценкам она находится в диапазоне от нескольких сотен нанометров до нескольких микрометров. Также видно, что материал содержит включения — углеродные нанокластеры и фуллерены, находящиеся на поверхности нанотрубок, хотя отдельные включения наблюдаются также внутри УНТ. Провести точный статистический анализ диаметра индивидуальных нанотрубок практически невозможно из-за формирования параллельных связок.

Одним из информативных методов исследования УНТ является спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) света. В работах [35–38] установлено, что волновые числа радиальных дышащих мод (РДМ), соответствующих интенсивным линиям в диапазоне низких волновых чисел ($100\text{--}300\text{ cm}^{-1}$), весьма чувствительны к диаметру одностеночных трубок. Следовательно, изучение этих мод — удобный путь для определения распределения диаметров трубок в рассматриваемом массиве УНТ. Известны различные модели (см. анализ их в [32]), которые позволяют получить аналитический вид зависимости волновых чисел РДМ от диаметра

УНТ. Используем соотношение, полученное с учетом взаимодействия Ван-дер-Ваальса между трубками в связках [37]: $\nu_{\text{RBM}}(\text{cm}^{-1}) = 6.5 + 232/d(\text{nm})$.

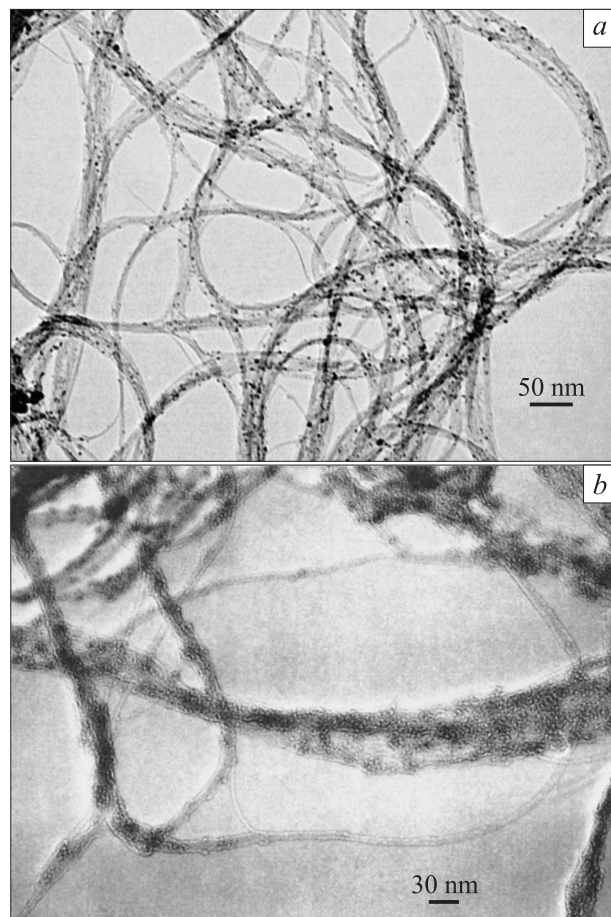


Рис. 3. ПЭМ-микрофотографии углеродных нанотрубок, полученных методом HiPCO: *a* — светопольное изображение, *b* — изображение в двухпучковом режиме.

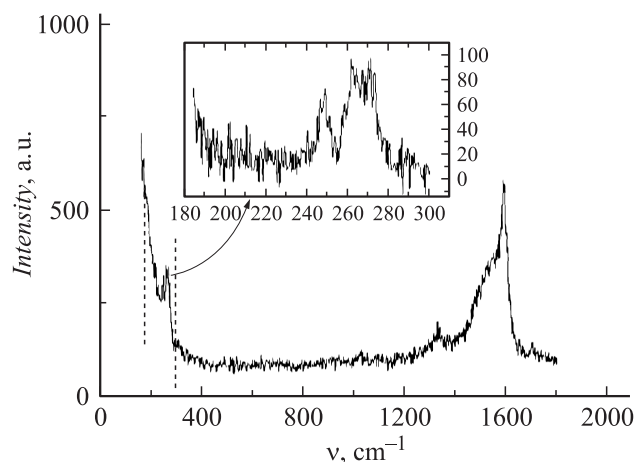


Рис. 4. Спектр комбинационного рассеяния света на углеродных нанотрубках, полученных с помощью метода газо-фазного разложения СО.

Величина ослабления электромагнитного излучения бумагой из углеродных нанотрубок в различных диапазонах

Диапазон, GHz	Средняя величина ослабления электромагнитного излучения, dB
25.5–36.8	20
36.3–53.42	37
53.41–74.3	41

Для исследуемых образцов (рис. 4) получены следующие значения диаметров УНТ: для линии, определяемой волновым числом 249 cm^{-1} — 0.9 nm и для линии 267 cm^{-1} — 0.84 nm . Таким образом, мы имеем дело с одностеночными УНТ с диаметрами от 0.8 до 0.9 nm . Полосы КР, которые присутствуют в диапазоне высоких значений волновых чисел ($1500\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$), относятся к тангенциальным С–С-модам (ТМ). Полуширина линий КР в этой области характеризует тип проводимости УНТ [37,38]. Узкие линии соответствуют резонансу на полупроводниковых трубках, тогда как широкие и асимметричные профили отображают резонанс в металлических трубках [35,39]. Для исследуемых образцов зарегистрирован широкий профиль ТМ с максимумом при 1538 cm^{-1} . Эта полоса согласуется с расположенными в диапазоне $240\text{--}280\text{ cm}^{-1}$ линиями, значит, они обусловлены наличием металлических трубок малого диаметра ($\sim 0.9\text{ nm}$). Дополнительный узкий пик при 1593 cm^{-1} на фоне широкой полосы связан с присутствием полупроводниковых трубок. Таким образом, образцы данного типа содержат в основном металлические одностеночные трубки, но имеется и часть УНТ с полупроводниковым типом проводимости.

Структура бумаги, изготовленной из УНТ, исследовалась по методу растровой электронной микроскопии (РЭМ). РЭМ-изображения поверхности бумаги из УНТ представлены на рис. 5. Отличия двух поверхностей бумаги обусловлено методом ее изготовления. В процессе осаждения материала УНТ на фильтры нижняя сторона бумаги имела более гладкую однородную поверхность. На поверхности наблюдаются включения сферической формы с диаметром несколько десятков нанометров, по-видимому, представляющие собой углеродные кластеры, а также нанокластеры железа. Также видно, что связки углеродных нанотрубок переплетаются между собой, за счет чего обеспечивается механическая прочность бумаги.

Графики зависимостей коэффициента стоячей волны и отражения от частоты, иллюстрирующие взаимодействие бумаги из углеродных нанотрубок с ЭМИ в различных диапазонах длин волн, приведены на рис. 6, 7. Величина ослабления электромагнитного излучения бумагой из нанотрубок приведена в таблице. Согласно результатам работы [30], эффективность экранировки бумагой из УНТ на частоте 10 GHz составила ~ 28

и ~ 16 dB — композитом, состоящим из полиуретана с УНТ на этой же частоте [31].

Измеренная эффективность экранировки ЭМИ с частотой в диапазоне 50 MHz–13.5 GHz композитом многостеночные УНТ-полиметилметакрилат [26] возрастала с увеличением массовой фракции МУНТ от 0.1 до 40 wt.%. Толщина пленок находилась в пределах от ~ 60 до ~ 165 μm . Наивысшая эффективность экранировки толстой пленкой композита достигала ~ 27 dB. Авторы в работе [26] отмечают коммерческую полезность созданного материала для экранировки ЭМИ.

Представленные результаты с учетом толщины сформированных образцов бумаги из УНТ (~ 30 μm) свидетельствуют о сильном взаимодействии этого материала с ЭМИ. Это можно объяснить на основе естественных характеристик углеродных нанотрубок, которые обладают высокой электропроводностью. Таким образом, бумага из нанотрубок также является электропроводящим

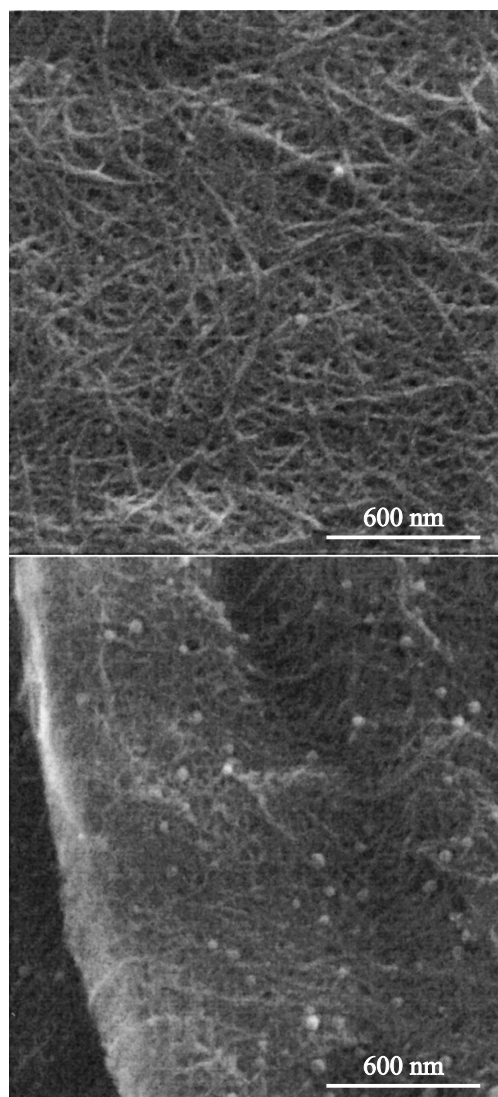


Рис. 5. РЭМ-изображения поверхности бумаги из углеродных нанотрубок.

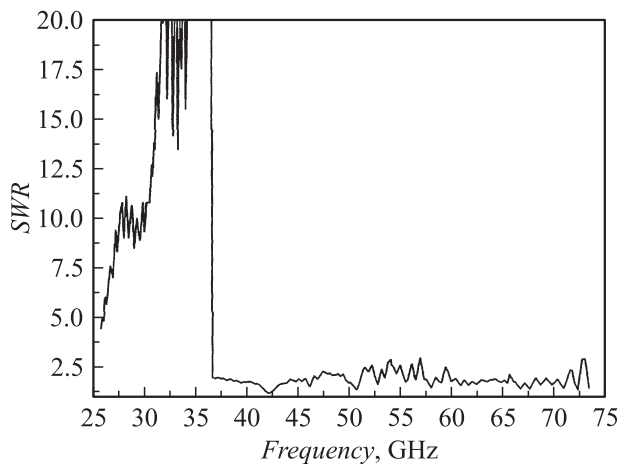


Рис. 6. Коэффициент стоячей волны для бумаги из углеродных нанотрубок в диапазоне частот ЭМИ 25.5–73.3 GHz.

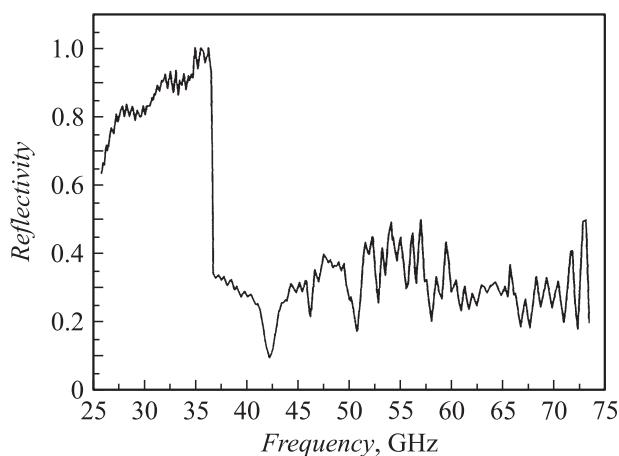


Рис. 7. Величина коэффициента отражения электромагнитного излучения для бумаги из углеродных нанотрубок в диапазоне частот 25.5–73.3 GHz.

материалом и взаимодействует с излучением как система из очень тонких переплетенных проводников (нанопроволочек). Как обсуждалось выше, в массиве УНТ, использованных для изготовления бумаги, преобладают трубки с металлическим типом проводимости. Для рассматриваемого диапазона длин волн ЭМИ характер взаимодействия также похож на ослабление излучения металлическими тонкими слоями, при этом основная часть излучения отражается поверхностью материала. Особенно это характерно для ЭМИ с частотами в диапазоне 25.5–36.8 GHz.

Заключение

С использованием метода изготовления УНТ за счет декомпозиции СО с применением карбонила железа в качестве катализатора создан массив одностеночных

УНТ с преобладанием трубок металлического типа с диаметром от 0.8 до 0.9 nm.

Материал, полученный при осаждении углеродных нанотрубок из раствора на фильтр, по своей структуре очень похож на обыкновенную бумагу черного цвета. При осаждении связки из УНТ переплетаются между собой, образуя плотную и устойчивую сетку. При комнатной температуре наблюдается эффект сильного взаимодействия бумаги с электромагнитным излучением в диапазоне частот 25.5–73.3 GHz. Ослабление интенсивности достигает 40 dB, что позволяет рассматривать данный материал как перспективное защитное покрытие от ЭМИ для чувствительных приборов и систем, особенно работающих в условиях повышенных механических и тепловых нагрузок.

Список литературы

- [1] Дьячков П.Н. Углеродные нанотрубки. Строение, свойства, применение. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 293 с.
- [2] Ткачев А.Г., Золотухин И.В. Аппаратура и методы синтеза углеродных наноструктур. М.: Машиностроение-1, 2007. 316 с.
- [3] Berhan L., Yi Y.B., Sastry A.M., Munoz E., Selvidge M., Baughman R. // J. Appl. Phys. 2004. Vol. 95. P. 4335–4345.
- [4] Park J.G., Smithyman J., Lin Ch.-Y., Cooke A., Kismarahardja A.W., Li Sh., Liang R., Brooks J.S., Zhang Ch., Wang B. // Appl. Phys. 2009. Vol. 106. P. 104 310 (1–6).
- [5] Spitalisky Z., Aggelopoulos Ch., Tsoukleri G., Tsakiroglou Ch., Parthenious J., Georga S., Krontiras C.H., Tasis D., Papagelis K., Galiotis C. // Materials Sci. Engineering. 2009. Vol. B165. P. 135–138.
- [6] Connet P., Liang Z., Choi E.-S., Kadambala R.S., Zhang C., Brooks J.S., Wang B., Kramer L. // Curr. Appl. Phys. 2005. Vol. 6. P. 1–4.
- [7] Wang D. // Nanotechnology. 2008. Vol. 19. P. 075 608 (1–4).
- [8] Tang X.W., Yang Y., Kim W., Wang Q., Qi P., Dai H. // Phys. Med. Biol. 2005. Vol. 50. N 23.
- [9] Smith B.W., Luzzi D.E. // J. Appl. Phys. 2001. Vol. 90. P. 3509–3514.
- [10] Aström J.A., Krasheninnikov A.V., Nordlund K. // Phys. Rev. Lett. 2004. Vol. 93. P. 215 503 (1–3).
- [11] Krasheninnikov A.V., Nordlund K. // Nucl. Instr. Meth. 2004. Vol. B216. P. 355–361.
- [12] Ni Z., Li Q., Yan L., Gong J., Zhu D. // Carbon. 2008. Vol. 46. P. 365–368.
- [13] Ishag A., Yan L., Zhu D. // Nucl. Instr. Meth. 2009. Vol. B267. P. 1779–1782.
- [14] Cress C.D., Schauerman Ch.M., Landi B.J., Messenger S.R., Raffaele R.P., Walters R.J. // J. Appl. Phys. 2010. Vol. 107. P. 014 316 (1–5).
- [15] Park J.G., Li S., Fan X., Zhang C., Wang B. // Nanotechnology. 2008. Vol. 19. P. 185 710 (1–4).
- [16] Wang L., Chen W., Xu D., Shim B.S., Zhu Y., Sun F., Liu L., Peng Ch., Jin Zh., Xu Ch., Kotov N.A. // Nano Letters. 2009. Vol. 9. P. 4147–4152.
- [17] Dharap P., Li Zh., Nagarajaiah S., Barrero E.V. // Nanotechnology. 2004. Vol. 15. P. 379–382.
- [18] Baughman R.H., Cui C., Zakhidov A.A., Igbal Z., Barisci J.N., Spinks G.M., Wallace G.G., De Rossi D., Rinzler A.G., Jaschinski O., Roth S., Kertesz M. // Science. 1999. Vol. 284. P. 1340–1344.
- [19] Ohlan A., Singh k., Chandra A., Singh V.N., Dhawan S.K. // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 106. P. 044 305 (1–6).
- [20] Hornbostel B., Leute U., Potdchke P., Kotz J., Kornfeld D., Chiu P., Poth S. // Physica E. 2008. Vol. 40. P. 2425–2429.
- [21] Ruitao L.V., Kang F., Gu J., Gui X., Wei J., Wang K., Wu D. // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 93. P. 223 105 (1–3).
- [22] Zhang L., Zhu H., Song Y., Zhang Y., Huang Y. // MSEB. 2008. Vol. 152. P. 78–82.
- [23] Roberts J.A., Imholt T., Ye Z., Dyke C.B., Price D.W., Tour J.M. // J. Appl. Phys. 2004. Vol. 95. P. 4352–4356.
- [24] Li N., Huang Y., Du F., He Y., Lin X., Gao H., Ma Y., Li F., Chen Y. // Nano Letters. 2006. Vol. 6. P. 1141–1145.
- [25] Kuzhir P., Maksimenko S., Bychanok D., Kuznetsov V., Moseenkov S., Mazov I., Shenderova O., Lambin Ph. // Metamaterials. 2009. Vol. 3. P. 148–156.
- [26] Kim H.M., Kim K., Lee C.Y., Joo J., Cho S.J., Yoon H.S., Pejakovic D.A., Yoo J.W., Epstein A.J. // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 84. P. 589–591.
- [27] Park S.H., Thielemann P., Asbeck P., Bandaru P.R. // Appl. Phys. Lett. 2009. Vol. 94. P. 243 111 (1–3).
- [28] Zhang H., Zeng G., Ge Y., Chen T., Hu L. // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 105. P. 054 314 (1–4).
- [29] Мурадян В.Е., Соколов Е.А., Бабенко С.Д., Моравский А.П. // ЖТФ. 2010. Вып. 2. Т. 80. С. 83–87.
- [30] Xu H., Anlage S.M., Hu L., Gruner G. // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 90. P. 183 119 (1–3).
- [31] Liu Z., Bai G., Huang Y., Ma Y., Du F., Li F., Guo T., Chen Y. // Carbon. 2007. Vol. 45. P. 821–824.
- [32] Комаров Ф.Ф., Самцов М.П., Карпович В.Б., Леценко Е.Ю., Курина И.К. // Вестник БГУ. Сер. 1. 2005. № 3. С. 18–22.
- [33] Комаров Ф.Ф., Мильчанин О.В., Муноз Э., Ювченко В.Н., Гречный С.С. // Док. НАН Беларуси. 2004. Т. 48. № 6. С. 39–42.
- [34] Rinzler A.G., Liu J., Dai H., Nikolaev P., Huffman C.B., Rodriguez-Macias F.J., Boul P.J., Lu A.H., Heymann D., Colbert D.T., Lee R.S., Fischer J.E., Rao A.M., Eklund P.C., Smalley R.E. // Appl. Phys. A. 1998. Vol. 67. P. 29–37.
- [35] Kataura H., Kumazawa Y., Maniwa Y. et al. // Synth. Met. 1999. Vol. 103. P. 2555–2558.
- [36] Rao A.M., Richter E., Bandow Sh. et al. // Science. 1997. Vol. 275. N 6. P. 187–191.
- [37] Bandow Sh., Asaka S., Saito Y. et al. // Phys. Rev. Lett. 1998. Vol. 80. N 18. P. 3779–3782.
- [38] Chiang I.W., Brinson B.E., Huang A.Y. et al. // J. Phys. Chem. 2001. Vol. B105. P. 8297–8301.
- [39] Wildoer J.W.G., Venema L.C., Rinzler A.G. et al. // Nature. 1998. Vol. 391. P. 59–61.