

УДК 538.9

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА ЭКРАНИРОВАНИЯ НА ЧАСТОТНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

М. В. ШУБА¹⁾, Д. И. ЮКО¹⁾, Д. Н. МЕЙСАК¹⁾,
О. В. СЕДЕЛЬНИКОВА^{2), 3)}, М. А. КАНЫГИН²⁾, А. В. ОКОТРУБ^{2), 3)}

¹⁾НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ, ул. Бобруйская, 11, 220030, г. Минск, Беларусь

²⁾Институт неорганической химии им. А. В. Николаева Сибирского отделения РАН,
пр. Академика Лаврентьева, 3, 630090, г. Новосибирск, Россия

³⁾Томский государственный университет, ул. Ленина, 36, 634050, г. Томск, Россия

В терагерцовом и микроволновом диапазонах проводились измерения удельной электропроводности тонкой пленки и полимерных композитных материалов на основе одностенных углеродных нанотрубок. Показано, что частотная зависимость электропроводности тонкой пленки гораздо слабее таковой для композитного материала в диапазоне 30,0 ГГц – 1,5 ТГц. Электропроводность полимерного материала возрастает примерно в 2 раза при увеличении в нем весовой доли трубок в 10 раз (от 0,1 до 1,0 %). Проведено моделирование эффективной удельной электропроводности композитного материала, состоящего из углеродных нанотрубок, которые не взаимодействуют друг с другом. Для описания электромагнитного отклика агломератов углеродных нанотрубок последние моделировались сферическими частицами с такой же диэлектрической проницаемостью, как и у пленок из углеродных нанотрубок. Обосновано, что основным эффектом, определяющим частотную зависимость реальных композитов, является экранирование полей как в отдельных нанотрубках, так и в их агломератах. Эффект агломерации значительно уменьшает электропроводность композитного материала и объясняет ее слабое изменение при многократном увеличении весовой доли включений.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки; композитные материалы; микроволновая и терагерцовая электропроводность.

Благодарность. Работа выполнена частично при финансовой поддержке совместных проектов Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (гранты № Ф15СО-016 и № Ф17РМ-068) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-52-04077).

Образец цитирования:

Шуба М. В., Юко Д. И., Мейсак Д. Н., Седельникова О. В., Каныгин М. А., Окотруб А. В. Влияние эффекта экранирования на частотную зависимость электропроводности композитного материала на основе углеродных нанотрубок // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2018. № 1. С. 80–87.

For citation:

Shuba M. V., Yuko D. I., Meisak D. N., Sedelnikova O. V., Kanygin M. A., Okotrub A. V. Influence of the screening effect on the frequency dependence of the electrical conductivity of a composite material based on carbon nanotubes. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2018. No. 1. P. 80–87 (in Russ.).

Авторы:

Михаил Владимирович Шуба – кандидат физико-математических наук; научный сотрудник лаборатории наноэлектромагнетизма.

Дмитрий Иванович Юко – ведущий инженер-программист лаборатории наноэлектромагнетизма.

Дарья Николаевна Мейсак – стажер младшего научного сотрудника лаборатории наноэлектромагнетизма.

Ольга Викторовна Седельникова – кандидат физико-математических наук; старший научный сотрудник лаборатории физикохимии наноматериалов²⁾; старший научный сотрудник лаборатории терагерцовых исследований³⁾.

Михаил Андреевич Каныгин – кандидат физико-математических наук; научный сотрудник лаборатории физикохимии наноматериалов.

Александр Владимирович Окотруб – доктор физико-математических наук; заведующий лабораторией физикохимии наноматериалов²⁾; старший научный сотрудник лаборатории терагерцовых исследований³⁾.

Authors:

Mikhail V. Shuba, PhD (physics and mathematics); researcher at the laboratory of nanoelectromagnetism.

mikhail.shuba@gmail.com

Dmitry I. Yuko, leading software engineer at the laboratory of nanoelectromagnetism.

d.yuko@ymail.com

Darya N. Meisak, junior research assistant at the laboratory of nanoelectromagnetism.

dariameysak@gmail.com

Olga V. Sedelnikova, PhD (physics and mathematics); senior researcher at the laboratory of physicochemistry of nanomaterials^{b)}; senior researcher at the laboratory of terahertz research^{c)}.

o.sedelnikova@gmail.com

Mikhail A. Kanygin, PhD (physics and mathematics); researcher at the laboratory of physicochemistry of nanomaterials.

mkanygin@gmail.com

Aleksandr V. Okotrub, doctor of science (physics and mathematics); head of the laboratory of physicochemistry of nanomaterials^{b)}; senior researcher at the laboratory of terahertz research^{c)}.

spectrum@niic.nsc.ru

INFLUENCE OF THE SCREENING EFFECT ON THE FREQUENCY DEPENDENCE OF THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF A COMPOSITE MATERIAL BASED ON CARBON NANOTUBES

M. V. SHUBA^a, D. I. YUKO^a, D. N. MEISAK^a,
O. V. SEDELNIKOVA^{b,c}, M. A. KANYGIN^b, A. V. OKOTRUB^{b,c}

^aResearch Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University,
11 Babrujskaja Street, Minsk 220030, Belarus

^bNikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
3 Laïrenc'jeva Avenue, Novosibirsk 630090, Russia

^cTomsk State University, 36 Lenin Street, Tomsk 634050, Russia

Corresponding author: D. I. Yuko (d.yuko@ymail.com)

In the terahertz and microwave ranges, the frequency dependence of the electrical conductivity of a thin film and polymer composite materials comprising single-walled carbon nanotubes (CNT) is measured. It is shown that frequency dependence of the conductivity is weaker for the CNT film than for composite materials in the range 30.0 GHz – 1.5 THz. The conductivity of polymer composite material increases by two times as the weight fraction of CNTs increases by 10 times (from 0.1 to 1.0 %). We calculated the effective conductivity of the composite materials comprising CNTs non-interacting with each other. To describe the electromagnetic response of CNT agglomerates, we model them as spherical nanoparticles having the same permittivity as the CNT film. It is substantiated that the main effect determining the frequency dependence of real composites is a field screening in both individual nanotubes and their agglomerates. The aggregation effect diminishes strongly the conductivity of composite materials resulting in its slight variation at a manifold increase of the weight fraction of the inclusions.

Key words: carbon nanotubes; composite materials; microwave and terahertz conductivity.

Acknowledgements. The work was partially financially supported by Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grants No. F15CO-016 and No. F17RM-068) and the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 17-52-04077).

Введение

С момента открытия углеродных нанотрубок (УНТ) большое внимание уделялось исследованию их взаимодействия с электромагнитным (ЭМ) излучением [1–6]. Углеродная нанотрубка представляет собой лист графена, свернутый в бесшовный цилиндр [7]. В зависимости от ориентации кристаллографических осей графена по отношению к оси нанотрубки последняя может иметь металлический или полупроводниковый тип проводимости. В настоящей работе рассмотрены хорошо проводящие металлические нанотрубки в терагерцовом и микроволновом диапазонах, где их электропроводность обусловлена внутризонными переходами электронов и описывается законом Друде [1].

К настоящему времени в теории описаны и экспериментально продемонстрированы электромагнитные эффекты в УНТ, такие как наличие сильно замедленных поверхностных волн [1], локализованный поверхностный (антенный) резонанс в терагерцовой области [3; 4; 8], усиление ближнего поля в квазистатическом режиме взаимодействия [9] и эффект сильной экранировки аксиальных полей [5; 6]. Последний определяет величину эффективного поля в углеродных нанотрубках и тем самым влияет на характер взаимодействия электромагнитного излучения с УНТ.

Электромагнитный отклик от одиночной нанотрубки достаточно мал, чтобы быть измеренным при настоящем уровне развития техники. Однако доступными для экспериментальных исследований являются измерения диэлектрической проницаемости и электропроводности тонких пленок и композитных материалов, содержащих УНТ. Несмотря на детальное рассмотрение взаимодействия УНТ с ЭМ-излучением, до настоящего времени не разработано подхода к описанию частотной дисперсии эффективных параметров композитных материалов на основе УНТ. Причина заключается в сложной структуре композитных материалов, в которых содержатся не только отдельные трубки, но и их агломераты. Рассмотрение взаимодействия последних с электромагнитным излучением является комплексной проблемой, так как предполагает учет межтрубчатого туннелирования и решение электромагнитной задачи рассеяния многих тел.

Кроме того, существует определенное непонимание механизмов, ответственных за частотную зависимость электропроводности в субтерагерцовом диапазоне. В экспериментальных работах [10] ограничиваются замечанием о том, что такая зависимость может быть описана степенным полуэмпирическим

законом [11] подобно тому, как это имеет место в модели произвольно распределенных в трехмерном пространстве комплексных сопротивлений [12]. Стоит отметить, что впервые влияние эффектов экранировки в многостенных УНТ на электропроводность композитов на их основе было теоретически описано в [5].

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований эффективных параметров пленки и полимерных композитных материалов на основе одностенных УНТ в микроволновом и терагерцовом диапазонах. Полученные данные хорошо согласуются с теоретическим предсказанием влияния экранирования на частотную зависимость эффективной электропроводности композитного материала.

Теоретическая часть

Рассмотрим модель композитной среды, в которой углеродные нанотрубки однородно распределены, разориентированы в пространстве и не взаимодействуют друг с другом. Поверхностная аксиальная электропроводность каждой трубки на частотах, лежащих намного ниже области межзонных переходов с частотой f меньше 50 ТГц, описывается законом Друде [1]

$$\sigma_{zz} = \frac{3i\gamma_0 b e^2}{\pi^2 \hbar^2 R(\omega + i\nu)}, \quad (1)$$

где (формула (1)) $\gamma_0 = 2,7$ эВ – интеграл перекрытия; $b = 0,142$ нм; e – заряд электрона; $\hbar$ – постоянная Планка; $\nu = \frac{1}{\tau}$ – частота релаксации; τ – время электронной релаксации; R – радиус нанотрубки; ω – угловая частота внешнего поля. Поляризуемость $\alpha(L)$ одиночной изолированной УНТ длиной L в длинноволновом приближении ($L \ll \lambda$) находится методом интегральных уравнений при решении задачи рассеяния света тонкостенным проводящим цилиндром конечной длины [4]. Тогда эффективная диэлектрическая проницаемость композита может быть представлена в виде [13]

$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_h + \frac{1}{3\epsilon_0} \sum_j \int \alpha_j(L) n_j(L) dL, \quad (2)$$

где $n_j(L)$ – концентрация УНТ типа j длиной L ; индекс j соответствует типу УНТ с определенными индексами киральности; коэффициент $\frac{1}{3}$ учитывает то, что трубки разупорядоченно ориентированы в среде; ϵ_h – относительная диэлектрическая проницаемость матрицы, в которую погружены нанотрубки; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м. Эффективная удельная электропроводность композитного материала определяется соотношением $\sigma_{\text{eff}} = \epsilon_0 \omega \text{Im}(\epsilon_{\text{eff}})$. Для демонстрации того, как эффективная электропроводность зависит от длины нанотрубок, нами рассчитана частотная зависимость σ_{eff} для композитного материала, состоящего из УНТ одинаковой длины типа зигзага с киральными индексами (12,0) и радиусом 0,47 нм при времени электронной релаксации $\tau = 50$ фс и $\epsilon_h = 1$. На рис. 1 продемонстрированы частотные зависимости величины σ_{eff} при длинах трубок 0,5; 2,0 и 10,0 мкм и одинаковом коэффициенте объемного заполнения композита УНТ $F = \pi R^2 L$. Представленные на рис. 1 спектры электропроводности имеют пики в терагерцовой области частот, связанные с антенным (плазменным) резонансом в УНТ [4].

Положение пиков зависит от длины трубок. Ниже резонансных частот лежит область режима квазистатического взаимодействия трубок с падающим излучением. В этом режиме сильный эффект экранирования аксиального тока приводит к малой величине эффективной электропроводности композитного материала в микроволновом диапазоне (10–30 ТГц) по сравнению с терагерцовым диапазоном (0,5–2,0 ТГц), где эффект экранирования более слабый. Поскольку эффект экранирования сильнее для более коротких трубок, то и величина σ_{eff} много меньше для композита коротких УНТ, нежели длинных. Причем частотное поведение величины σ_{eff} на низких частотах вдали от резонанса не зависит от длины трубок. Кроме того, согласно формуле (2) в микроволновом диапазоне величина σ_{eff} прямо пропорциональна объемной доле нанотрубок, если пренебрегать мнимой частью ϵ_h .

В реальном композитном материале присутствует эффект перколяции, когда трубки, касаясь друг друга, образуют проводящие пути. При этом увеличивается эффективная длина трубок и ослабевает эффект экранировки. Однако зачастую трубки сбиваются в комки (агломераты) размерами в несколько микрометров. Самой простой моделью почти сферического агломерата в дипольном приближении может быть однородная сферическая частица таких же размеров с эффективной относительной диэлектрической

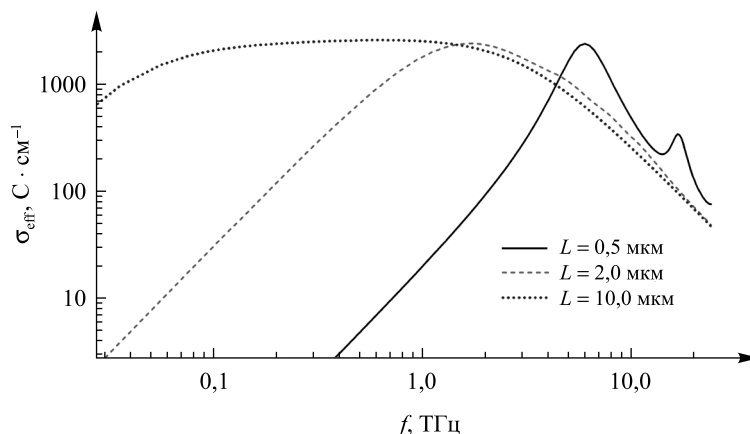


Рис. 1. Результаты теоретических расчетов частотной зависимости f удельной электропроводности композита с включениями из УНТ типа зигзага (12,0) для УНТ длиной 0,5; 2,0 и 10,0 мкм. $F = 0,05$

Fig. 1. Theoretical frequency dependence of the electrical conductivity of a composite material comprising metallic (12,0) zigzag CNTs with a length of 0.5; 2.0 and 10.0 μm . $F = 0.05$

проницаемостью ϵ_a . Тогда эффективная относительная диэлектрическая проницаемость композитного материала из таких не взаимодействующих друг с другом частиц, распределенных однородно в среде с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_h , описывается моделью Максвелла – Гарнетта:

$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_h + 3F\epsilon_h \frac{\epsilon_a - \epsilon_h}{2\epsilon_h + 3\epsilon_a}, \quad (3)$$

где F – коэффициент объемного заполнения композита сферическими включениями.

Диэлектрическая проницаемость ϵ_a может быть приближенно взята такой же, как и у пленки из одностенных нанотрубок. Ее действительная и мнимая части составляют тысячи единиц в микроволновом и терагерцовом диапазонах [14]. Таким образом, выполняется соотношение $|\epsilon_a| \gg |\epsilon_h|$, что позволяет приближенно записать (3) в виде

$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_h (1 + F). \quad (4)$$

Эффективная диэлектрическая проницаемость композитного материала, состоящего только из агломератов нанотрубок, как видно из (4), в дипольном приближении не зависит от диэлектрической проницаемости самих агломератов и их размеров. Поведение агломератов в электромагнитном поле близко к поведению идеально проводящих сферических частиц.

Поскольку разные научные группы получают композитные материалы неодинаковыми методами – с использованием различных материалов УНТ, то и полученные частотные зависимости электропроводности, описания которых встречаются в литературе, оказываются различными [15]. Например, в работе [16] показано, что с возрастанием весовой доли многостенных УНТ в полиметилметакрилате

с 0,25 до 4,0 % величина $(\sigma_{\text{eff}})^{-1} \frac{\partial \sigma_{\text{eff}}}{\partial \omega}$ уменьшается в 50 раз в субтерагерцовом диапазоне. Кроме того,

концентрационные зависимости электропроводности зачастую нелинейные. Это объясняется тем, что размеры агломератов и их доля могут варьироваться при изменении количества материала УНТ в композите. В работе [5] систематизированы экспериментальные данные диэлектрической проницаемости композитных материалов на основе УНТ и показано, что все микроволновые спектры могут быть разделены на четыре группы в зависимости от режима взаимодействия УНТ с электромагнитным полем. В настоящей работе обсуждается режим преимущественно квазистатического взаимодействия между полем и наночастицами, для которого характерен эффект электромагнитного экранирования.

Материалы и методы эксперимента

Нами исследовалась эффективная электропроводность тонкой пленки и полимерных композитных материалов на основе УНТ в микроволновом (30 ТГц) и терагерцовом (0,2–1,5 ТГц) диапазонах частот. В обоих типах образцов использовались очищенные (>95 %) одностенные УНТ TUBALL (OCSiAL, Россия), произведенные методом каталитического осаждения из газовой фазы; средний диаметр трубок составлял 1,8 нм, длина – более 5 мкм.

Полимерные композиты с различной концентрацией УНТ были приготовлены методом вальцевания [17], при этом в качестве полимерной матрицы использовался полистирол. Так, на первом этапе порошок исходных УНТ растворялся в толуоле путем перемешивания в течение 1 ч. Полистирол добавлялся к суспензии УНТ в толуоле и перемешивался до полного его растворения. Затем полученная суспензия подвергалась ультразвуковой обработке в течение 5 мин и после этого перемешивалась на протяжении 2 ч. Полученная композитная смесь выливалась на алюминиевую фольгу и просушивалась в течение 3 ч до вязкого состояния. Созданный таким образом композитный материал обрабатывался путем 20 прокатов вальцами, что позволяло частично разбить (раздавить) агрегаты внутри полимерной матрицы. Данным методом были приготовлены композиционные материалы толщиной 0,2 мм с весовым содержанием УНТ, равным 0,1 и 1,0 %.

Свободностоящая пленка на основе УНТ была получена методом фильтрования, который основан на фильтрации суспензии УНТ через мембранную фильтровальную бумагу из ацетата целлюлозы с размером пор 20–200 нм [14]. Для получения суспензии порошок исходных УНТ подвергался ультразвуковой обработке в течение 1 ч в 1 % растворе додецилсульфата натрия; полученная суспензия затем центрифугировалась 15 мин при ускорении 5000 g. Концентрация УНТ в суспензии определялась методами оптической спектроскопии. После фильтрации полученная на фильтровальной бумаге пленка дополнительно промывалась 200 мл горячей воды для удаления поверхностно-активного вещества. Затем бумагу растворяли в ацетоне, а пленку переносили на металлическую рамку с отверстием диаметром 8 мм. Толщина пленки определялась профилометром и составила 500 нм. С учетом массы трубок, использованных для приготовления пленки, а также ее геометрических размеров была рассчитана плотность пленки ρ , которая составила приблизительно 0,4 г/см³. Объемную долю трубок в полученной пленке можно грубо оценить как отношение ρ/ρ_0 , где $\rho_0 = 2,2$ г/см³ – плотность графита. В нашем эксперименте она составила около 18 %.

Измерение электромагнитных свойств исследуемых образцов на частоте 30 ГГц проводилось волновым методом с использованием панорамного измерителя коэффициента стоячей волны и скалярного анализатора цепей R2-408R («Элмика», Литва). Образец в виде плоскопараллельной пластины помещался в сечение волновода перпендикулярно направлению распространения волны. Электромагнитный отклик образца измерялся как отношение прошедшего сигнала к падающему (S_{21}) и отраженного сигнала к падающему (S_{11}) [18; 19]. Измеренные коэффициенты S_{11} и S_{21} использовались для расчета диэлектрической проницаемости исследуемых образцов.

В терагерцовом диапазоне частот измерения комплексного коэффициента прохождения при нормальном падении проводились на спектрометре T-SPEC (EKSPLA, Литва) с разрешением по времени. Это позволило рассчитывать диэлектрическую проницаемость образцов в диапазоне частот 0,2–1,5 ТГц.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Частотные зависимости удельной электропроводности пленки из УНТ и полимерных композитных материалов при весовой доле УНТ 0,1 и 1,0 % представлены на рис. 2. Из-за интерференции излучения в тонком плоскопараллельном слое композитного материала возникает небольшое волнообразное поведение спектра (см. рис. 2, а), которое не может быть полностью исключено при определении эффективных параметров образцов. Сильную частотную зависимость электропроводности $\sigma_{\text{eff}} \sim f^{0,52}$ демонстрирует рис. 2, а. Эту зависимость можно связать с сильным экранирующим эффектом аксиального поля в УНТ, который представлен на рис. 1. Для пленки из УНТ характерна более слабая частотная зависимость $\sigma_{\text{eff}} \sim f^{0,14}$, объясняемая слабым эффектом экранировки вследствие того, что трубки объединены в общую проводящую сеть и средняя эффективная длина УНТ в такой сети много больше реальной длины трубок в материале.

При увеличении концентрации трубок в 10 раз (с 0,1 до 1,0 %), как следует из рис. 2, эффективная электропроводность композита увеличивается только в 2 раза. Согласно модели для агломерированных УНТ и формулам (3), (4) это может быть объяснено тем, что доля агломерированных трубок в композите при 1,0 % УНТ значительно больше таковой для композита при 0,1 % УНТ. Вклад же агломератов в общий отклик композитного материала много меньше вклада отдельных УНТ.

Интересно также сравнить композитный материал с весовым содержанием трубок 0,1 % (см. рис. 2, а) и пленку (см. рис. 2, б), у которой содержание трубок составляет приблизительно 18 %. При отличии концентраций трубок примерно в 180 раз их удельные электропроводности на частоте 1 ТГц (где эффект экранирования мал) отличаются в 530 раз, а на частоте 30 ГГц (где влияние экранирования велико) – в 50 000 раз. Отметим, что в работе [20] было сказано о подобном существенном отличии частотной дисперсии оптических плотностей для пленки и композитного материала из УНТ. Однако авторы не смогли найти этому объяснения.

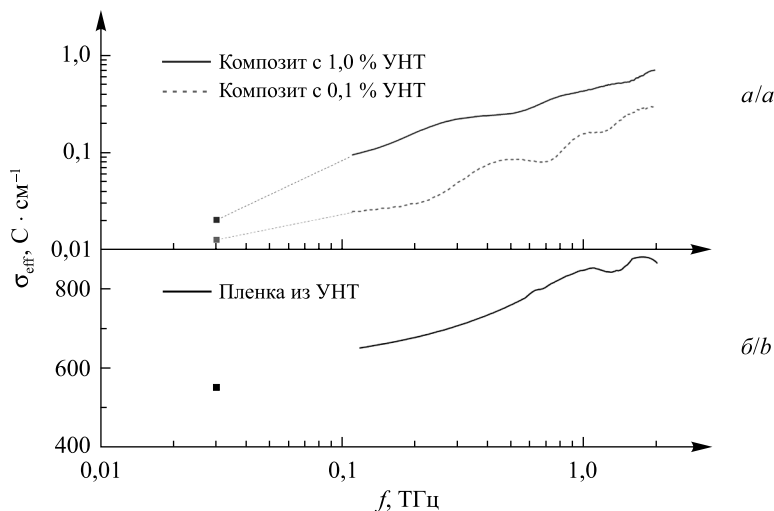


Рис. 2. Экспериментальная зависимость эффективной удельной электропроводности:
а – полимерных композитов при весовой доле 0,1 и 1,0 % УНТ; б – тонкой пленки из УНТ.
Квадратный символ (■) указывает на электропроводность на частоте 30 ГГц

Fig. 2. Experimental frequency dependence of the effective conductivity:
а – polymer CNT-based composites at wt. 0.1 and 1.0 %;
b – a CNT thin film.
A square symbol (■) indicates the electrical conductivity at a frequency of 30 GHz

Таким образом, частотная зависимость композитных материалов на основе УНТ связана главным образом с явлением экранирования электромагнитных полей как в пределах одиночных включений, так и в пределах их плотных скоплений (агломератов).

Заключение

В настоящей работе рассчитана удельная электропроводность композитного материала, состоящего из УНТ, которые не взаимодействуют друг с другом. Показано теоретически, что сильная частотная зависимость электропроводности композитного материала в микроволновом и терагерцовом диапазонах может быть связана с эффектами экранирования излучения в отдельных наночастицах. Эффект агломерации уменьшает электромагнитный отклик композиционного материала, поскольку поляризуемость отдельных агломератов мала.

Экспериментально исследованы частотные зависимости удельной электропроводности пленки из УНТ и композитных материалов на основе УНТ при разной концентрации нанотрубок. Показано, что частотная зависимость слабее в случае пленки из УНТ, где благодаря множеству контактов между соприкасающимися трубками эффект экранирования слабый. Отличие концентрации трубок в композитном материале в 10 раз приводит к двукратному отличию их терагерцовой удельной электропроводности, что объясняется наличием эффекта агрегации трубок в композите.

Библиографические ссылки

1. Slepyan G. Y., Maksimenko S. A., Lakhtakia A., et al. Electrodynamics of carbon nanotubes: Dynamic conductivity, impedance boundary conditions, and surface wave propagation // Phys. Rev. B. 1999. Vol. 60, issue 24. P. 17136–17149. DOI: 10.1103/PhysRevB.60.17136.
2. Maksimenko S. A., Slepyan G. Ya. Electromagnetic fields in unconventional materials and structures / ed. by O. N. Singh, A. Lakhtakia. New York : Wiley, 2000. P. 217–255.
3. Hanson G. Fundamental transmitting properties of carbon nanotube antennas // IEEE Trans. Antenn. Propagat. 2005. Vol. 53, issue 11. P. 3426–3435. DOI: 10.1109/TAP.2005.858865.
4. Slepyan G. Ya., Shuba M. V., Maksimenko S. A., et al. Theory of optical scattering by achiral carbon nanotubes and their potential as optical nanoantennas // Phys. Rev. B. 2006. Vol. 73, issue 19. Article ID: 195416. DOI: 10.1103/PhysRevB.73.195416.
5. Shuba M. V., Melnikov A. V., Paddubskaya A. V., et al. The role of finite size effects in the microwave and sub-terahertz electromagnetic response of multiwall carbon nanotube based composite: theory and interpretation of experiment // Phys. Rev. B. 2013. Vol. 88, issue 4. Article ID: 045436. DOI: 10.1103/PhysRevB.88.045436.
6. Shuba M. V., Slepyan G. Y., Maksimenko S. A., et al. Radiofrequency field absorption by carbon nanotubes embedded in a conductive host // J. Appl. Phys. 2010. Vol. 108, issue 11. Article ID: 114302. DOI: 10.1063/1.3516480.
7. Reich S., Thomsen C., Maultzsch J. Carbon Nanotubes: Basic Concepts and Physical Properties. New York : Wiley, 2004. DOI: 10.1002/9783527618040.

8. Shuba M. V., Paddubskaya A. G., Kuzhir P. P., et al. Experimental evidence of localized plasmon resonance in composite materials containing single-wall carbon nanotubes // *Phys. Rev. B*. 2012. Vol. 85, issue 16. Article ID: 165435. DOI: 10.1103/PhysRevB.85.165435.
9. Shuba M. V., Paddubskaya A. G., Kuzhir P. P., et al. Observation of the microwave near-field enhancement effect in suspensions comprising single-walled carbon nanotubes // *Mater. Res. Express*. 2017. Vol. 4, № 7. Article ID: 075033. DOI: 10.1088/2053-1591/aa78e1.
10. Andreev A. S., Kazakova M. A., Ishchenko A. V., et al. Magnetic and dielectric properties of carbon nanotubes with embedded cobalt nanoparticles // *Carbon*. 2017. Vol. 114. P. 39–49. DOI: 10.1016/j.carbon.2016.11.070.
11. Almond D. P., West A. R. Impedance and modulus spectroscopy of «real» dispersive conductors // *Solid State Ion*. 1983. Vol. 11. P. 57–64. DOI: 10.1016/0167-2738(83)90063-2.
12. Potschke P., Dudkin S. M., Alig I. Dielectric spectroscopy on melt processed polycarbonated multiwalled carbon nanotube composites // *Polymer*. 2003. Vol. 44. P. 5023–5030. DOI: 10.1016/S0032-3861(03)00451-8.
13. Slepyan G. Y., Shuba M. V., Maksimenko S. A., et al. Terahertz conductivity peak in composite materials containing carbon nanotubes: Theory and interpretation of experiment // *Phys. Rev. B*. 2010. Vol. 81, issue 20. Article ID: 205423. DOI: 10.1103/PhysRevB.81.205423.
14. Shuba M. V., Paddubskaya A., Kuzhir P. P., et al. Short-length carbon nanotubes as building blocks for high dielectric constant materials in the terahertz range // *J. Phys. D*. 2017. Vol. 50, № 8. Article ID: 08LT01. DOI: 10.1088/1361-6463/aa5628.
15. Kazakova M. A., Kuznetsov V. L., Semikolenova N. V., et al. Comparative study of multiwalled carbon nanotube/polyethylene composites produced via different techniques // *Phys. Stat. Sol. B*. 2014. Vol. 251, issue 12. P. 2437–2443. DOI: 10.1002/pssb.201451194.
16. Kranauskaite I., Macutkevicius J., Banyas J., et al. Length-dependent broadband electric properties of PMMA composites filled with carbon nanotubes // *Phys. Stat. Sol. A*. 2016. Vol. 213, issue 4. P. 1025–1033. DOI: 10.1002/pssa.201532289.
17. Gavrilov N., Okotrub A., Bulusheva L., et al. Dielectric properties of polystyrene/onion-like carbon composites in frequency range of 0.5–500 kHz // *Compos. Sci. Technol*. 2010. Vol. 70, № 5. P. 719–724. DOI: 10.1016/j.compscitech.2009.12.026.
18. Standard test method for measuring relative complex permittivity and relative magnetic permeability of solid materials at microwave frequencies : An American National Standard, designation D5568-08. 2009.
19. Chung B. K. Dielectric constant measurement for thin material at microwave frequencies // *Prog. Electromagn. Res*. 2007. Vol. 75. P. 239–252. DOI: 10.2528/PIER07052801.
20. Akima N., Iwasa Y., Brown S., et al. Strong anisotropy in the far-infrared absorption spectra of stretch-aligned single-walled carbon nanotubes // *Adv. Mater*. 2006. Vol. 18, issue 9. P. 1166–1169. DOI: 10.1002/adma.200502505.

References

1. Slepyan G. Y., Maksimenko S. A., Lakhtakia A., et al. Electrodynamics of carbon nanotubes: Dynamic conductivity, impedance boundary conditions, and surface wave propagation. *Phys. Rev. B*. 1999. Vol. 60, issue 24. P. 17136–17149. DOI: 10.1103/PhysRevB.60.17136.
2. Maksimenko S. A., Slepyan G. Ya. Electromagnetic fields in unconventional materials and structures. New York : Wiley, 2000. P. 217–255.
3. Hanson G. Fundamental transmitting properties of carbon nanotube antennas. *IEEE Trans. Antenn. Propagat*. 2005. Vol. 53, issue 11. P. 3426–3435. DOI: 10.1109/TAP.2005.858865.
4. Slepyan G. Ya., Shuba M. V., Maksimenko S. A., et al. Theory of optical scattering by achiral carbon nanotubes and their potential as optical nanoantennas. *Phys. Rev. B*. 2006. Vol. 73, issue 19. Article ID: 195416. DOI: 10.1103/PhysRevB.73.195416.
5. Shuba M. V., Melnikov A. V., Paddubskaya A. V., et al. The role of finite size effects in the microwave and sub-terahertz electromagnetic response of multiwall carbon nanotube based composite: theory and interpretation of experiment. *Phys. Rev. B*. 2013. Vol. 88, issue 4. Article ID: 045436. DOI: 10.1103/PhysRevB.88.045436.
6. Shuba M. V., Slepyan G. Y., Maksimenko S. A., et al. Radiofrequency field absorption by carbon nanotubes embedded in a conductive host. *J. Appl. Phys*. 2010. Vol. 108, issue 11. Article ID: 114302. DOI: 10.1063/1.3516480.
7. Reich S., Thomsen C., Maultzsch J. Carbon Nanotubes: Basic Concepts and Physical Properties. New York : Wiley, 2004. DOI: 10.1002/9783527618040.
8. Shuba M. V., Paddubskaya A. G., Kuzhir P. P., et al. Experimental evidence of localized plasmon resonance in composite materials containing single-wall carbon nanotubes. *Phys. Rev. B*. 2012. Vol. 85, issue 16. Article ID: 165435. DOI: 10.1103/PhysRevB.85.165435.
9. Shuba M. V., Paddubskaya A. G., Kuzhir P. P., et al. Observation of the microwave near-field enhancement effect in suspensions comprising single-walled carbon nanotubes. *Mater. Res. Express*. 2017. Vol. 4, No. 7. Article ID: 075033. DOI: 10.1088/2053-1591/aa78e1.
10. Andreev A. S., Kazakova M. A., Ishchenko A. V., et al. Magnetic and dielectric properties of carbon nanotubes with embedded cobalt nanoparticles. *Carbon*. 2017. Vol. 114. P. 39–49. DOI: 10.1016/j.carbon.2016.11.070.
11. Almond D. P., West A. R. Impedance and modulus spectroscopy of «real» dispersive conductors. *Solid State Ion*. 1983. Vol. 11. P. 57–64. DOI: 10.1016/0167-2738(83)90063-2.
12. Potschke P., Dudkin S. M., Alig I. Dielectric spectroscopy on melt processed polycarbonated multiwalled carbon nanotube composites. *Polymer*. 2003. Vol. 44. P. 5023–5030. DOI: 10.1016/S0032-3861(03)00451-8.
13. Slepyan G. Y., Shuba M. V., Maksimenko S. A., et al. Terahertz conductivity peak in composite materials containing carbon nanotubes: Theory and interpretation of experiment. *Phys. Rev. B*. 2010. Vol. 81, issue 20. Article ID: 205423. DOI: 10.1103/PhysRevB.81.205423.
14. Shuba M. V., Paddubskaya A., Kuzhir P. P., et al. Short-length carbon nanotubes as building blocks for high dielectric constant materials in the terahertz range. *J. Phys. D*. 2017. Vol. 50, No. 8. Article ID: 08LT01. DOI: 10.1088/1361-6463/aa5628.
15. Kazakova M. A., Kuznetsov V. L., Semikolenova N. V., et al. Comparative study of multiwalled carbon nanotube/polyethylene composites produced via different techniques. *Phys. Stat. Sol. B*. 2014. Vol. 251, issue 12. P. 2437–2443. DOI: 10.1002/pssb.201451194.

16. Kranauskaite I., Macutkevicius J., Banys J., et al. Length-dependent broadband electric properties of PMMA composites filled with carbon nanotubes. *Phys. Stat. Sol. A*. 2016. Vol. 213, issue 4. P. 1025–1033. DOI: 10.1002/pssa.201532289.
17. Gavrilov N., Okotrub A., Bulusheva L., et al. Dielectric properties of polystyrene/onion-like carbon composites in frequency range of 0.5–500 kHz. *Compos. Sci. Technol.* 2010. Vol. 70, No. 5. P. 719–724. DOI: 10.1016/j.compscitech.2009.12.026.
18. Standard test method for measuring relative complex permittivity and relative magnetic permeability of solid materials at microwave frequencies : An American National Standard, designation D5568-08. 2009.
19. Chung B. K. Dielectric constant measurement for thin material at microwave frequencies. *Prog. Electromagn. Res.* 2007. Vol. 75. P. 239–252. DOI: 10.2528/PIER07052801.
20. Akima N., Iwasa Y., Brown S., et al. Strong anisotropy in the far-infrared absorption spectra of stretch-aligned single-walled carbon nanotubes. *Adv. Mater.* 2006. Vol. 18, issue 9. P. 1166–1169. DOI: 10.1002/adma.200502505.

Статья поступила в редколлегию 13.10.2017.
Received by editorial board 13.10.2017.