

**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Объект авторского права

УДК 538.9+538.955+538.91+537.624.8.

**ЮКО**

**Дмитрий Иванович**

**ЧАСТОТНЫЕ И КОНЦЕНТРАЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ  
ПРОВОДИМОСТИ КОМПОЗИТНЫХ СРЕД НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ  
НАНОТРУБОК И ГРАФЕНОВЫХ НАНОПЛАСТИНОК В МИКРОВОЛНОВОМ  
И ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНАХ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

**Минск, 2023**

Научная работа выполнена в Белорусском государственном университете.

Научный руководитель – **Шуба Михаил Владимирович**,  
доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник  
лаборатории наноэлектромагнетизма  
НИУ «Институт ядерных проблем»  
Белорусского государственного университета.

Официальные оппоненты: **Рабинович Оскар Соломонович**,  
доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник лаборатории  
радиационно-конвективного теплообмена  
ГНУ «Институт тепло- и массообмена  
имени А.В. Лыкова НАН Беларуси»;  
**Данилюк Александр Леонидович**,  
кандидат физико-математических наук, доцент,  
доцент кафедры микро- и наноэлектроники  
УО «Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники».

Оппонирующая организация – ГО «НПЦ НАН Беларуси  
по материаловедению».

Защита состоится «02» июня 2023 г. в 16.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.16 при Белорусском государственном университете по адресу: г. Минск, ул. Ленинградская 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407.

Почтовый адрес: пр-т Независимости 4, Минск, 220030.

Телефон ученого секретаря: 209-57-09; e-mail: Fedotov@bsu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» апреля 2023 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций  
доктор физико-математических наук  
профессор



А. К. Федотов

## ВВЕДЕНИЕ

Молекулярные углеродные наноструктуры, такие как углеродные нанотрубки (УНТ) и графеновые нанопластинки (ГНП), имеют высокую проводимость. Нанопластинки обладают сплюснутой, а нанотрубки – вытянутой формой. Добавление в диэлектрическую матрицу малого количества таких наноструктур (менее 1% по массе) позволяет создать трёхмерную проводящую сетку, эффективно взаимодействующую с электромагнитным полем. Композитные среды на основе углеродных наноструктур предлагается использовать для создания поляризаторов, фильтров, экранов, поглотителей, рефлекторов микроволнового и терагерцового диапазонов.

Очевидно, что электрические и электромагнитные параметры проводящей сетки будут главным образом определяться аспектным соотношением наноструктур, их проводимостью и концентрацией, контактным сопротивлением между соприкасающимися наноструктурами, а также способом их распределения в пространстве. Теория перколяции предсказывает связь проводимости проводящей сетки с геометрическими размерами и концентрацией образующих ее наноструктур. При этом наиболее часто используемые выводы теории перколяции относятся к скоплениям наноструктур, однородно распределённых в пространстве и имеющих случайную ориентацию. Проводимость проводящей сетки как правило моделируется на низких частотах (0 – 10 МГц) с использованием модели эквивалентных схем замещения. В микроволновом и терагерцовом диапазоне теоретический анализ эффективной проводимости проводящей сетки затруднен, так как предполагает решение сложной задачи рассеяния излучения на многих телах с учетом их электромагнитной и «туннельной связи». В связи с этим экспериментальное исследование электромагнитных параметров проводящих сеток из наноструктур в высокочастотном диапазоне является актуальной и важной задачей, позволяющей установить соотношение между плотностью проводящей сетки и её проводимостью в высокочастотном диапазоне.

Существенным препятствием экспериментального исследования является то, что не всегда удаётся получить однородное распределение проводящих углеродных компонент в объёме. Например, при малых концентрациях наноструктур возможно получить их однородное распределение в полимерной матрице. Однако при больших концентрациях этого достичь не удаётся из-за эффекта агломерации. Важной составляющей настоящей работы является создание и исследование новых сред, для которых удалось соблюсти однородность распределения углеродных наноструктур в объёме при нахождении связи плотности проводящей сетки с её электромагнитным

откликом. К таким средам можно отнести впервые созданные гибридные плёнки, образованные крупными непроводящими нанотрубками дисульфида вольфрама, между которыми располагаются более тонкие проводящие углеродные нанотрубки, при этом процентное содержание углеродных нанотрубок в образцах варьировалось более чем в 100 раз. Также впервые использовалась вата из углеродных нанотрубок, что позволяло проводить исследования в микроволновом диапазоне для одного образца, увеличивая путем сжатия его плотность в 20 раз. Впервые исследовалась композитная среда из углеродных нанотрубок с полимерным покрытием, которое исключало создание проводящей сетки нанотрубок даже при их высокой концентрации. Такие впервые созданные среды позволяют добиться условий однородности распределения углеродных наноструктур в объёме, которые могут быть учтены при теоретическом моделировании композитной среды. Также полученные экспериментальные зависимости могут быть использованы для предсказаний вариаций электромагнитных параметров композитных сред, связанных с изменением концентрации проводящего наполнителя в них.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Работа по данной диссертации выполнялась в рамках заданий следующих государственных программ и других проектов: «Углеродные нанотрубки с полимерным покрытием для материала с высоким показателем преломления и низким поглощением в терагерцовой области частот» (Гос. рег. № 20180292, 2018 – 2020, проект БРФФИ Ф18Кор-002); «Создание и использование на базе научного направления «наноэлектромагнетизм» национальной междисциплинарной платформы по моделированию, экспериментальному исследованию и прикладным аспектам электромагнитных свойств наноструктурированных объектов и систем» (Гос. рег. № 20162325, 2015 – 2020, ГПНИ «Конвергенция – 2020»).

Тема диссертационной работы соответствует пункту «4. Машиностроение, машиностроительные и инновационные материалы» перечня приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021 – 2025 годы, утверждённых Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156.

### **Цель, задачи, объект и предмет исследования**

Целью диссертационной работы является экспериментальное выявление закономерностей взаимодействия электромагнитного излучения с

композитными средами на основе углеродных нанотрубок и графеновых нанопластинок, обусловленных влиянием размерных эффектов и формированием проводящей сетки из углеродных наноструктур.

Поставленная цель предполагает решение ряда задач: 1) на основе экспериментальных исследований установить концентрационные и частотные зависимости электромагнитных параметров полимерных композитных сред с включениями из углеродных нанотрубок и графеновых нанопластинок в микроволновом и терагерцовом диапазонах частот; 2) исследовать влияние плотности трёхмерной сетки из углеродных нанотрубок на её проводимость в микроволновом (26 – 37 ГГц) и терагерцовом (0.1 – 1 ТГц) диапазонах; 3) определить влияние тонкого полимерного покрытия однослойных углеродных нанотрубок на электромагнитные параметры синтезированной из них композитной среды в микроволновом, терагерцовом и инфракрасном диапазонах.

*Объектами исследования* являются композитные среды, плёнки и самоподдерживающиеся трёхмерные структуры, содержащие в качестве проводящих компонент углеродные нанотрубки и графеновые нанопластины.

*Предметом исследования* является влияние концентрации углеродных наноструктур в образованной ими среде на её электромагнитные параметры в микроволновом и терагерцовом диапазонах.

### **Научная новизна**

Впервые показано, что частотная дисперсия проводимости гибридной среды, состоящей из крупных непроводящих нанотрубок дисульфида вольфрама, между которыми располагается сетка из однослойных углеродных нанотрубок в диапазоне 0.03 – 1.0 ТГц возрастает с уменьшением концентрации УНТ. Впервые выявлено, что зависимость проводимости объемной самоподдерживающейся структуры (ваты) от плотности нанотрубок в ней на частоте 32 ГГц аппроксимируется степенным законом с показателем степени, лежащем в интервале 1.7 – 2.2. Впервые доказано на примере композитной среды, состоящей из углеродных нанотрубок с полимерным покрытием, что наличие/отсутствие контактов между нанотрубками качественно не изменяет частотную зависимость проводимости композитной среды в диапазоне 0.1 – 100 ТГц. Впервые предложен критерий количественной оценки эффективности возбуждения токов в графеновых нанопластинках композитной среды под действием микроволнового излучения.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. На основании сравнения результатов спектроскопических измерений частотных зависимостей проводимости в диапазоне частот 0.1 – 100 ТГц плёнок из индивидуальных однослойных углеродных нанотрубок (длиною около 1 мкм и диаметром 1 нм) покрытых молекулярным монослоем полимера цетилтриметиламмоний-4-винилбензоат (толщина слоя 2 нм) и плёнок с частичным повреждением данного покрытия нагревом до 90°C в течение 10 минут суспензии из указанных нанотрубок и ультразвуковым диспергированием (с частотой 44 кГц и мощностью излучателя 80 Вт) установлено, что частотные зависимости проводимости качественно не изменяются по причине слабого влияния эффекта межтрубочного туннелирования свободных носителей заряда. Это обосновывает применение подхода гомогенизации Ватермана-Труэлла, использующего невзаимодействующие друг с другом рассеиватели, для качественного описания частотной зависимости эффективной проводимости композитной среды из однослойных углеродных нанотрубок в данном частотном диапазоне.

2. Концентрационные зависимости действительной части эффективной проводимости плёнок образованных смесью неорганических нанотрубок дисульфида вольфрама и однослойных углеродных нанотрубок однородно распределённых в пространстве на частотах 0 Гц, 30 ГГц, 0.3 ТГц и 1 ТГц аппроксимируются степенными функциями с уменьшающимися с ростом частоты показателями степени равными 1.6, 1.3, 1.2, 1.1, соответственно, что обусловлено увеличением влияния собственной проводимости нанотрубок и уменьшением влияния барьеров между ними, по причине ослабления эффекта экранирования, определяемого возникновением деполяризующих полей в нанотрубках.

3. Критерий количественной оценки эффективности возбуждения токов в графеновых нанопластинках, характеризующейся количеством свободных носителей заряда, вносящих вклад в электромагнитный отклик композитной среды на основе графеновых нанопластинок при сильном влиянии эффекта экранирования на остальные носители заряда, под действием падающего микроволнового излучения определяется как величина равная отношению действительной части эффективной проводимости композитной среды на частоте 30 ГГц к той же величине на частоте 1 ТГц.

## **Личный вклад соискателя ученой степени**

Постановка задачи и общее руководство осуществлялись научным руководителем Шубой М.В. Диссертационная работа и все представленные в

ней результаты отражают личный вклад автора в проведенные исследования.

Следует отметить следующие вклады соавторов совместных публикаций: М.А. Каньгин из Института неорганической химии им. А.В. Николаева Сибирского отделения РАН (Новосибирск, Россия) синтезировал полимерные композиты с массовой долей ОУНТ 0.1% и 1.0% УНТ (раздел 3.2); А. Любимов и Д. Мейсак из НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ синтезировали композиты из УНТ с матрицами на основе эпоксидной и фенолформальдегидной смол (раздел 3.3); Лим Санг-Хван из «Корейского передового института науки и техники» (Тэджон, Корея) синтезировал нанотрубки, покрытые полимерным слоем (раздел 3.4); Мануэла Скарселли из Университета Рима Тор-Вергата (Рим, Италия) синтезировала и предоставила для исследования вату из многослойных углеродных нанотрубок (раздел 4.1); Решеф Тенне предоставил синтезированные в его лаборатории в Институте науки имени Вайцмана (Реховот, Израиль) многостенные нанотрубки дисульфида вольфрама (раздел 4.2); Альберт Насыбулин предоставил синтезированные в его лаборатории в Сколковском институте науки и технологий (Сколково, Россия) плёнки из углеродных нанотрубок (раздел 4.3); Е. Иванов из Института механики Болгарской академии наук (София, Болгария) синтезировал образцы полимерных композитных сред с многослойными УНТ и графеновыми нанопластинками (глава 5); Питер Карлсен из Университета Экзетер (Объединённое Королевство) предоставил изображения образцов, полученных сканирующим электронным микроскопом (рисунки 3.2(б), 3.9, 4.1(б,г,д), 4.8, 5.1). Также Питером Карлсеном были проведены измерения комплексного коэффициента пропускания образцов в вакууме в установке терагерцовой спектроскопии во временной области с доступом к гелиевому криостату замкнутого цикла в интервале температур 10 – 300 К (рисунок 4.13); Центром коллективного пользования уникальным научным оборудованием «Белорусский межвузовский центр обслуживания научных исследований» предоставлены спектры в инфракрасной области (рисунок 3.14) и спектры комбинационного рассеяния (рисунки 4.2, 4.12, 5.2) образцов; измерения толщин плёнок проводились сотрудниками «Центра науки и технологий Вильнюсского университета» с помощью профилометра.

В диссертационную работу не включены результаты, которые были получены другими соавторами или с другими соавторами. Материалы совместных публикаций использованы соискателем в объёме авторского вклада.

## **Апробация диссертации и информация об использовании её результатов**

Результаты, полученные в ходе исследований по теме диссертации, докладывались на следующих международных конференциях: IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communication and Electronic Systems (COMCAS) (Tel Aviv, Israel, 13-15 Nov. 2017); International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES) (Firenze, Italy, March 26-30, 2017); 8-ая Международная школа-конференция молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики – 2018» (Минск, 13-15 июня 2018 г.); 10-ая Международная научная конференция «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах» (Минск, 20-23 августа 2018 г.); Advanced Properties and Processes in Optoelectronic Materials and Systems (APROPOS) (Vilnius, Lithuania, October 10-12, 2018); «Международный Марковниковский конгресс по органической химии» (Казань, Российская Федерация, 21-28 июня 2019 г.).

### **Опубликование результатов диссертации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 12 научных работах, в том числе 6 статьях в научных рецензируемых изданиях, включённых в Перечень изданий, и в иностранных научных изданиях (общим объёмом 5,23 авторского листа), 4 статьях в сборниках материалов научных конференций и 2 тезисах докладов на научных конференциях.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация включает в себя содержание, перечень сокращений и обозначений, введение, общую характеристику работы, пять глав, содержащих аналитический обзор литературы, методику эксперимента и результаты оригинальных исследований, заключение с рекомендациями по практическому использованию полученных результатов и список использованных источников. Полный объём диссертации составляет 128 страниц. Диссертация содержит 56 рисунков (на 26 страницах) и 1 таблицу (на 1 странице). Список использованных источников включает 150 наименований, включая собственные публикации соискателя учёной степени, и занимает 13 страниц.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

**Первая глава** посвящена аналитическому обзору современного состояния теоретических и экспериментальных исследований композитных сред на основе нанотрубок, графеновых нанопластинок и графена.

В **разделе 1.1** кратко описываются особенности углеродных нанотрубок, их электронные свойства, а также приводятся общие характеристики двух типов

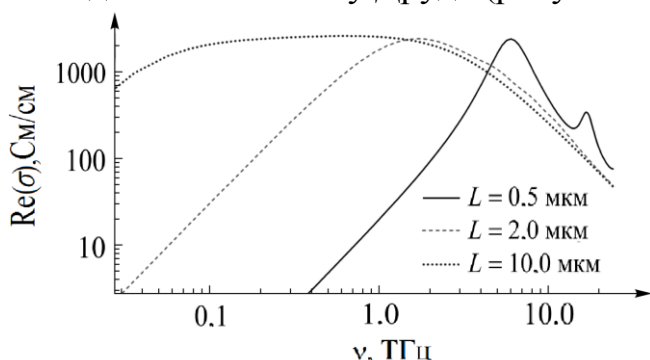


углеродных нанотрубок: металлических и полупроводниковых. В разделе 1.2 представлены характеристики графена и его производных. В разделе 1.3 рассматривается влияние размерных эффектов на электромагнитные параметры композитных сред на основе ОУНТ. В разделе 1.4 описываются концентрационные и частотные зависимости композитных сред на основе УНТ и ГНП.

Во второй главе описаны методики эксперимента используемые в диссертационной работе.

Третья глава посвящена экспериментальному обоснованию основных механизмов, отвечающих за сильную частотную дисперсию проводимости композитной среды на основе углеродных нанотрубок в микроволновом и терагерцовом диапазонах. Проводится последовательное рассмотрение влияния размерных и перколяционных эффектов на поведение электромагнитного отклика в микроволновом и терагерцовом диапазонах частот.

В разделе 3.1 рассматривается теоретическая модель композитной среды с однородно распределёнными, разориентированными в пространстве и невзаимодействующими друг с другом металлическими однослойными углеродными нанотрубками (ОУНТ). Поверхностная аксиальная проводимость каждой нанотрубки на частотах, лежащих намного ниже области межзонных переходов, описывается законом Друде. Вычисленная с учетом размерных эффектов эффективная проводимость композитной среды  $\sigma_{eff}$  на основе ОУНТ не подчиняется закону Друде (рисунок 1).



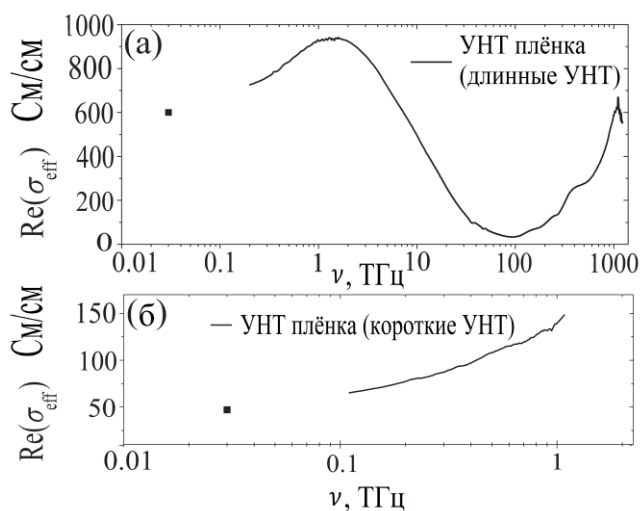
Объёмная доля нанотрубок 5%  
 Рисунок 1 – Результаты теоретических расчетов частотной зависимости эффективной проводимости композитной среды на основе ОУНТ типа зигзага (12,0) при различных длинах  $L$  нанотрубок: 0.5 мкм, 2 мкм и 10 мкм

Частотные зависимости проводимости имеют пик в терагерцовой области частот, связанный с геометрическим (плазмонным) резонансом поверхностных волн на конечной длине ОУНТ. Положение пиков зависит от длины ОУНТ. Ниже центральной частоты пика лежит область режима квазистатического взаимодействия нанотрубок с падающим излучением. В этом режиме сильный эффект экранирования аксиального тока за счет возникновения деполаризующих полей приводит к малой величине эффективной проводимости композитной среды 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 нанотрубок, то и величина  $\sigma_{eff}$  много меньше для композита из коротких ОУНТ, нежели длинных. Частотное поведение величины  $\sigma_{eff}$  на низких частотах вдали от резонанса не зависит от длины нанотрубок и описывается степенным законом  $\sigma_{eff} \sim \nu^2$ . Однако последнее справедливо, если нанотрубки не касаются друг друга. Перколяционные эффекты изменяют показатель степени, что продемонстрировано в главах 3-5.

В разделе 3.2 получены и проанализированы частотные зависимости проводимости плёнок, содержащих короткие и длинные ОУНТ (рисунок 2), а также сравниваются проводимости полимерных композитных сред на основе ОУНТ и плёнки в микроволновом (на частоте 30 ГГц) и терагерцовом (0.2 – 1.5 ТГц) диапазонах частот.

Частотная зависимость проводимости плёнки из длинных (1 – 3 мкм) ОУНТ имеет широкий пик на частоте 1.5 ТГц, который обусловлен локализованным плазмонным резонансом (рисунок 2(а)). Ниже частоты 1.5 ТГц частотная зависимость плёнки не велика. Частотная зависимость проводимости плёнки, содержащей короткие (менее 0.5 мкм) ОУНТ, значительно сильнее (рисунок 2(б)).



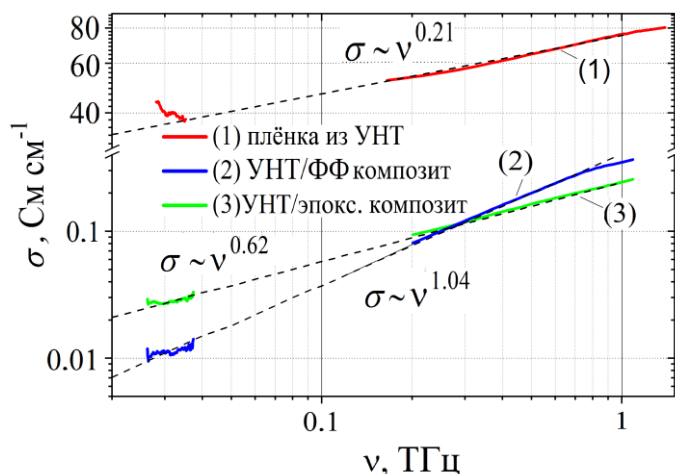
**Черные квадратные символы обозначают проводимость образцов на частоте 30 ГГц**

**Рисунок 2 – Частотная зависимость действительной части измеренной проводимости плёнки, содержащей длинные (а) и короткие (б) ОУНТ**

Из сравнения частотных зависимостей проводимостей двух различных плёнок можно судить о том, как соотносятся длины нанотрубок в них. Также показано, что частотная зависимость композитной среды с 1 масс. % ОУНТ значительно сильнее, чем для плёнок из УНТ. Полученные экспериментальные результаты могут быть объяснены, если положить, что частотная зависимость проводимости композитных сред на основе УНТ связана главным образом с явлением экранирования электромагнитных полей, как в пределах одиночных включений, так и в пределах их плотных скоплений (агломератов).

В разделе 3.3 были получены частотные зависимости проводимости для

плёнки из многослойных УНТ (МУНТ) и композитных сред с 1 масс.% МУНТ на основе эпоксидной и фенолформальдегидной смолы (рисунок 3).



**Рисунок 3 – Частотная зависимость проводимости  $\sigma(\nu)$  плёнки из МУНТ и композитной среды, содержащей 1 масс.% МУНТ в эпоксидной (эпокс.) смоле и фенолформальдегидной (ФФ) смоле**

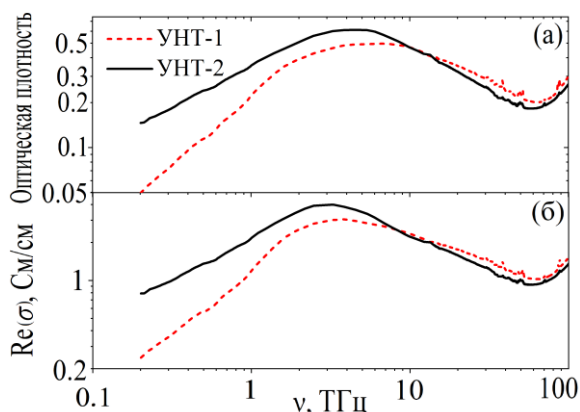
Как видно из рисунка 3, проводимость в терагерцовой области увеличивается с частотой и она намного больше проводимости в микроволновом диапазоне.

Зависимости  $\sigma(\nu)$  были аппроксимированы степенными функциями:  $\sigma(\nu) = \sigma_0 \nu^p$  (пунктирные линии на рисунке 3), где  $\sigma_0$  и  $p$  – константы аппроксимации. Для сетки, содержащей бесконечно длинные МУНТ, ожидается частотная зависимость  $\sigma(\nu)$ , соответствующая проводимости Друде в терагерцовом и микроволновом диапазонах, т.е.  $p = 0$ . Однако, в реальной сетке эффект конечной длины МУНТ приводит к тому, что  $p > 0$ .

Показатель степени  $p$  минимален для плёнки из МУНТ, а для композитных сред он зависит от способа их синтезирования. Показатель степени имеет большее значение для композитной среды, в которой нанотрубки были сильнее поломаны при синтезе. Тангенс угла диэлектрических потерь зависит от метода синтезирования образца и имеет большую величину для случая меньшего повреждения МУНТ при синтезировании композитной среды. Критерием оценки качества синтеза композитной среды могут служить тангенс угла диэлектрических потерь и показатель степени степенной частотной зависимости проводимости композитной среды.

В разделе 3.4 исследуются электромагнитные параметры уникальной композитной среды, состоящей из отдельных однослойных углеродных нанотрубок; каждая ОУНТ покрыта полимерным покрытием, которое предотвращает перколяционный эффект в композитной среде даже при объёмной доле ОУНТ 3.3%. На рисунке 4 показаны частотные зависимости оптической плотности и действительной части проводимостей плёнок из УНТ-1 (все нанотрубки практически изолированы друг от друга, проводимость на постоянном токе составляет  $4 \cdot 10^{-5}$  См/см) и УНТ-2 (полимерное покрытие нанотрубок частично повреждено, и часть нанотрубок имеют электрические контакты друг с другом, проводимость плёнки на постоянном токе

составляет  $8 \cdot 10^{-3}$  См/см).



**Рисунок 4 – Частотная зависимость оптической плотности (а) и действительной части проводимости (б) для плёнок с 1.5 масс.% р-УНТ с низкой (УНТ-1) и высокой (УНТ-2) проводимостью на постоянном токе**

Частотные зависимости имеют широкий пик в терагерцовом диапазоне, вызванный локализованным плазмонным

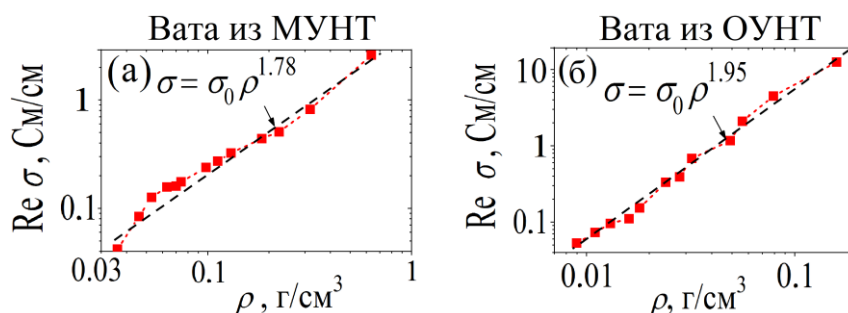
резонансом в ОУНТ. Увеличение количества электрических контактов между нанотрубками приводит к усилению частотной зависимости проводимости на низкочастотной стороне пика. В частности, в диапазоне 0.2 – 2 ТГц зависимость  $Re(\sigma(f))$  подчиняется степенному закону с показателями степени 1.0 и 0.65 для УНТ-1 и УНТ-2, соответственно.

Как видно из рисунка 4, наличие перколяции ведет к тому, что пик в терагерцовом диапазоне лишь слегка изменяется на центральной частоте и на высокочастотной стороне. Это означает, что межтрубочное туннелирование электронов слабо влияет на локализованный плазмонный резонанс в нанотрубках и на проводимость плёнки на высоких частотах. На основе этого сделан вывод, что подход гомогенизации Ватермана-Труэлла, который использует приближение невзаимодействующих друг с другом рассеивателей, может быть применен для описания частотной зависимости проводимости композита на основе ОУНТ на частоте локализованного плазмонного резонанса и выше.

**Четвёртая глава** посвящена выяснению зависимости проводимости проводящей сетки из углеродных нанотрубок от их плотности в микроволновом и терагерцовом диапазонах в широком диапазоне плотностей.

В разделе 4.1 исследуется зависимость проводимости самоподдерживающейся трёхмерной структуры (ваты) из сплетенных углеродных нанотрубок от плотности нанотрубок, которая изменяется при помощи сжатия.

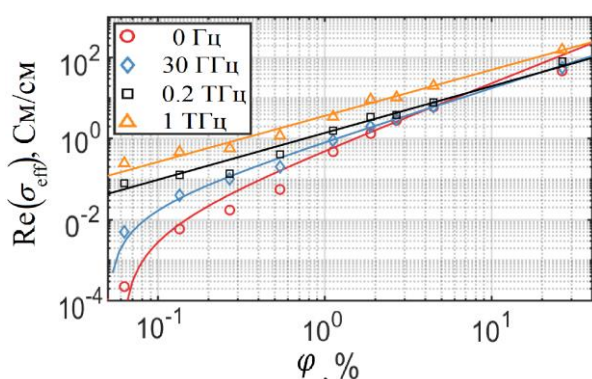
На рисунке 5 показана зависимость действительной части проводимости  $\sigma$  на частоте 32 ГГц от плотности для образцов ват из МУНТ и ОУНТ. Зависимость  $Re(\sigma)$  от плотности была аппроксимирована степенным законом:  $Re(\sigma) = \sigma_0 \rho^\beta$  с показателем степени  $\beta = 1.78$  и  $\beta = 1.95$  для структур из МУНТ и ОУНТ, соответственно (рисунки 5(а) и 5(б)).



**Рисунок 5 – Действительная часть проводимости ваты из МУНТ (а) и ваты из ОУНТ (б) на частоте 32 ГГц**

По измерениям 5-ти образцов ваты из УНТ каждого вида было найдено, что значения  $\beta$  лежат в интервалах 1.6 – 1.8 и 1.8 – 2.2 для образцов из МУНТ и ОУНТ, соответственно. То, что величина показателя степени  $\beta$  превышает единицу, обусловлено увеличением количества контактов между соседними УНТ и хлопьями УНТ во время сжатия.

В разделе 4.2 исследуется зависимость проводимости композитной среды от плотности углеродных нанотрубок (рисунок 6) посредством создания серии специально синтезированных гибридных плёнок, образованных смесью неорганических нанотрубок (ННТ) дисульфида вольфрама и ОУНТ, при различной массовой доле последних.



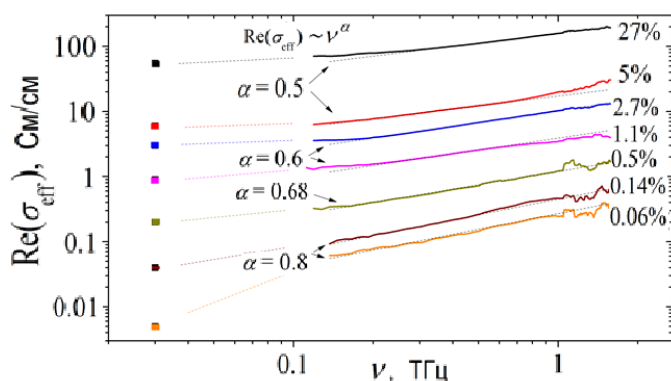
Точки представляют собой экспериментальные данные, а линии соответствуют степенным функциям вида  $\sigma(\varphi) = \sigma_0(\varphi - \varphi_0)^\beta$ , при  $\beta = 1.6, 1.3, 1.2, 1.1$  и  $\varphi_0 = 0.06\%, 0.05\%, 0\%, 0\%$  для 0 Гц, 30 ГГц, 0.3 ТГц и 1 ТГц, соответственно

**Рисунок 6 – Эффективная проводимость  $Re(\sigma_{eff})$  гибридных плёнок из ОУНТ/ННТ в зависимости от объёмной доли ОУНТ  $\varphi$**

Как видно из рисунка 6, зависимость проводимости среды от плотности нанотрубок в широком частотном диапазоне может быть описана степенным законом, в котором параметры  $\varphi_0$  и  $\beta$  уменьшаются с ростом частоты. Снижение пороговых значений  $\varphi_0$  и показателя степени  $\beta$  для более высоких частот происходит из-за увеличения влияния собственной проводимости нанотрубок и уменьшения влияния барьеров между ними. Пропорциональная зависимость  $Re(\sigma_{eff}) \sim \varphi$ , установленная для частоты 1 ТГц (рисунок 6), указывает на возможность определения объёмной доли ОУНТ  $\varphi$  по терагерцовым измерениям проводимости композитной среды на основе ОУНТ.



На рисунке 7 показаны измеренные частотные зависимости проводимости плёнок из ОУНТ/ННТ при различных объёмных долях ОУНТ. Частотная зависимость действительной части проводимости на рисунке 7 была аппроксимирована степенной функцией:  $\text{Re}(\sigma_{eff}(\nu)) \sim \nu^\alpha$ . Показатель степени  $\alpha$  возрастает с уменьшением концентрации нанотрубок, т.е. увеличение плотности проводящей сетки ведет к ослаблению частотной зависимости её эффективной проводимости.



**Объёмные доли ОУНТ  $\varphi \in$**   
**{ 0.06%; 0.14%; 0.5%;**  
**1.1%; 2.7%; 5%}; штриховые**  
**прямые линии – аппроксимация**  
**степенной функцией  $\sigma_{eff} \sim \nu^\alpha$**

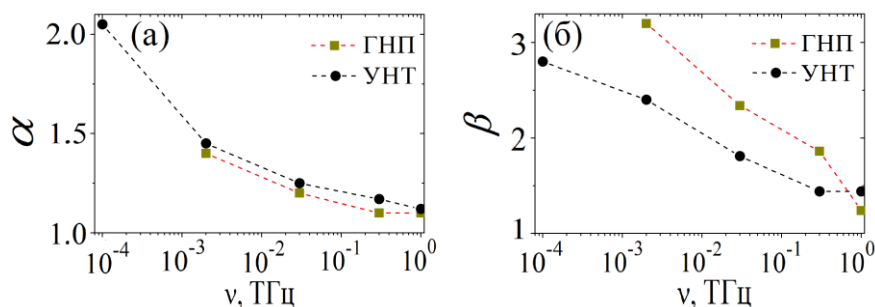
**Рисунок 7 – Частотная зависимость действительной части эффективной проводимости  $\text{Re}(\sigma_{eff})$  плёнки из УНТ/ННТ при различных объёмных долях  $\varphi$  УНТ**

В разделе 4.3 приведены результаты исследований проводимости и диэлектрической проницаемости плёнки, образованной длинными ОУНТ ( $L \approx 10$  мкм) в широком интервале температур (10 – 530 К) в терагерцовом диапазоне (0.3 – 1.5 ТГц). Аппроксимация формулой Друде измеренных частотных зависимостей электромагнитных параметров плёнки позволила установить температурную зависимость частоты электронной релаксации. В диапазоне 300 – 500 К эта частота прямо пропорциональна температуре и определяется рассеянием электронов на акустических фононах. Измеренная при комнатной температуре частота релаксации электронов в УНТ совпадает с таковой для графита и составляет около 100 фс.

В пятой главе показано, что полимерные композиты из нанотрубок и графеновых нанопластинок имеют качественно схожую частотную дисперсию проводимости, а также схожую зависимость проводимости от плотности наноструктур. Это позволяет утверждать об одних и тех же механизмах взаимодействия УНТ и ГНП с электромагнитным полем.

В разделе 5.1 представлена характеристика плёнок и композитных сред на основе МУНТ и ГНП методами электронной микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния. В разделе 5.2 приведены измеренные в диапазонах 25 Гц – 10 МГц, 0.1 – 18 ГГц, 26 – 37 ГГц и 0.1 – 1 ТГц диэлектрические проницаемости и проводимости композитных сред на основе 1.5 масс.%, 3 масс.% и 6 масс.% МУНТ и ГНП, и полимерной

матрицей из полилактидной кислоты (ПЛК). Показано, что зависимости диэлектрической проницаемости и проводимости композитной среды от массовой концентрации наполнителя  $F$  могут быть аппроксимированы степенными функциями:  $\text{Re}(\varepsilon_{eff} - \varepsilon_h) = AF^\alpha$  и  $\text{Re}(\sigma_{eff} - \sigma_h) = BF^\beta$ , где  $A$  и  $B$  – коэффициенты масштабирования. Показатели степени  $\alpha$  и  $\beta$  на разных частотах представлены соответственно на рисунках 8(а) и 8(б).



**Рисунок 8 – Частотная зависимость параметров аппроксимации  $\alpha$  (а) и  $\beta$  (б) для композитов из ГНП/ПЛК и МУНТ/ПЛК**

На низких частотах эффект экранирования сильнее, что ведет к более сильной концентрационной зависимости электромагнитных параметров  $\text{Re}(\varepsilon_{eff})$  и  $\text{Re}(\sigma_{eff})$  и, следовательно, к большим значениям показателей степени  $\alpha$  и  $\beta$ . Неравенства  $\alpha > 1$  и  $\beta > 1$  возникают из-за влияния контактов – эффект экранирования полей внутри наноструктур становится слабее при увеличении количества межчастичных контактов. Влияние контактов сильнее на более низких частотах, поэтому величины  $\alpha$  и  $\beta$  возрастают с уменьшением частоты.

В терагерцовом диапазоне влияние контактов исчезает, а значения  $\alpha$  и  $\beta$  достигают единицы. Почти линейная зависимость проводимости композитной среды от массовой доли наноструктур в терагерцовом диапазоне может быть использована для количественной оценки плотности наполнителя в полимерной матрице.

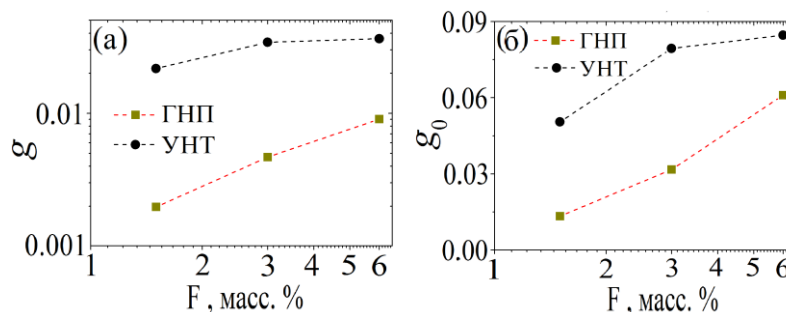
В разделе 5.3 для оценки эффективности взаимодействия электромагнитной волны с углеродными нанопластинками в композитной среде на заданной частоте  $\nu$  предлагается использовать следующие параметры:

$$g(\nu, \nu_0) = \frac{\text{Re}(\sigma_{eff}(\nu))}{\text{Re}(\sigma_{eff}(\nu_0))}, \quad g_0(\nu, \nu_0) = \frac{g(\nu, \nu_0)}{g_{film}(\nu, \nu_0)},$$

где  $\nu_0$  – частота, на которой эффект экранирования мал, а электромагнитное взаимодействие максимально возможное, причем  $\nu_0 < 1/(2\pi\tau)$ , где  $\tau$  – время электронной релаксации в графеновых нанопластинках.  $g_{film}(\nu, \nu_0)$  – это параметр  $g$  для плёнки, содержащей наноструктуры того же типа, что и композитная среда. Поскольку максимальное электромагнитное взаимодействие

с наполнителями происходит, когда они плотно упакованы, образуя плёнку; эту плёнку можно рассматривать как идеальный композит с максимально возможным параметром  $g$ . На основании экспериментальных данных в терагерцовой области спектра излучения для композита из ГНП показатель степени  $\beta$  приближается к единице. Это указывает на то, что эффект экранирования в этой области мал. Значит и для композита из ГНП можно полагать, что  $\nu_0 = 1$  ТГц. Параметры  $g$  и  $g_0$  ранее предлагалось использовать для композитных сред на основе УНТ.

На рисунке 9 показаны параметры  $g$  и  $g_0$  на частоте 30 ГГц для композитных сред на основе МУНТ и ГНП в зависимости от концентрации наноструктур. Параметр  $g$  для образцов из МУНТ составляет 0.01 – 0.02, что указывает на то, что среднее эффективное поле в пределах каждой наноструктуры составляет 1 – 2% от падающего поля. Для образцов ГНП параметр  $g$  в 4 – 10 раз меньше, чем для образцов УНТ, и он сильно зависит от концентрации наполнителя. Таким образом, несмотря на сходную внутреннюю проводимость ГНП и УНТ, последние более эффективно взаимодействуют с микроволновым излучением. Параметр  $g_0$  на частоте 30 ГГц находится в диапазоне от 0.02 до 0.09 (рисунок 9(б)), что означает, что эффективность взаимодействия наполнителя с электромагнитным полем составляет 2 – 9% по сравнению с таковой для плёнок.



**Рисунок 9 – Параметры  $g$ (30 ГГц; 1ТГц) (а) и  $g_0$ (30 ГГц; 1ТГц) (б) в зависимости от массовой доли включений для композитов из УНТ/ПЛК и ГНП/ПЛК**

В разделе 5.4 описывается возникновение синергетического эффекта в композитах с двумя типами углеродных проводящих наполнителей ГНП и МУНТ. Синергетический эффект заключается в том, что совместный вклад двух типов наполнителей в проводимость композитной среды больше, чем сумма вкладов отдельных наполнителей. Этот эффект слаб в терагерцовом диапазоне и усиливается с уменьшением частоты.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1) В микроволновом (на частоте 30 ГГц) и терагерцовом (0.2 – 1.0 ТГц) диапазонах частот экспериментально исследованы частотные зависимости проводимости плёнок и композитных сред из однослойных и многослойных углеродных нанотрубок. Установлено, что частотная зависимость проводимости композитной среды определяется длиной нанотрубок и плотностью проводящей сетки, которую они образуют. Частотные зависимости эффективной проводимости образцов описываются степенными законами с показателями степени, лежащими в диапазоне 0.2 – 1.0 [1,3].

2) Исследованы электромагнитные параметры среды, содержащей индивидуальные однослойные углеродные нанотрубки, покрытые слоем полимерных молекул. В результате исследований таких сред впервые установлено, что увеличение проводимости плёнки на постоянном токе в 200 раз за счет увеличения количества контактов между нанотрубками, посредством частичного разрушения полимерного покрытия нанотрубок, изменяет положение и высоту плазмонного пика проводимости плёнки в терагерцовом диапазоне менее чем на 30 %. Это указывает на то, что эффекты межтрубчатого туннелирования качественно не изменяют частотную зависимость проводимости плёнки в диапазоне частот 0.1 – 100 ТГц, что обосновывает использование модели невзаимодействующих частиц для качественного описания частотной зависимости эффективной проводимости композитной среды в области плазмонного резонанса однослойных углеродных нанотрубок [6].

3) На частоте 32 ГГц получена проводимость ваты из углеродных нанотрубок – трёхмерной самоподдерживающейся структуры, состоящей из переплетенных углеродных нанотрубок. Исследования зависимости проводимости трёхмерной структуры от плотности нанотрубок в ней проводились при различных степенях сжатия трёхмерной структуры. Впервые установлено, что такая зависимость подчиняется степенному закону с показателем степени  $1.7 \pm 0.1$  и  $2.0 \pm 0.2$  для ват из многослойных и однослойных углеродных нанотрубок, соответственно [2].

4) Методом фильтрации водной суспензии наноструктур получены гибридные среды в которых между трёхмерной сеткой толстых непроводящих нанотрубок дисульфида вольфрама расположена сетка из более тонких проводящих однослойных углеродных нанотрубок. Синтезированные гибридные среды характеризуются равномерным распределением в

пространстве среды нанотрубок при объёмном коэффициенте заполнения, изменяющемся от 0.06% до 5%. Впервые экспериментально получено, что для таких сред концентрационная зависимость эффективной проводимости, так же как и на постоянном токе, аппроксимируется степенным законом с показателем степени равным 1.6, 1.3, 1.2 и 1.1 на частотах 0, 0.03, 0.2 и 1 ТГц, соответственно. Показано, что в области от 27 ГГц до 1 ТГц частотная зависимость действительной части проводимости аппроксимируется степенной функцией с показателем степени, который возрастает с уменьшением концентрации нанотрубок, то есть увеличение плотности проводящей сетки приводит к ослаблению частотной зависимости её эффективной проводимости [3,4].

5) В диапазонах 0.1 – 10 ГГц, 26 – 37 ГГц и 0.2 – 1 ТГц исследованы частотные зависимости диэлектрической проницаемости и проводимости полимерных композитных сред, содержащих многослойные углеродные нанотрубки и графеновые нанопластины, а также их смеси в различных пропорциях. Установлены общие закономерности в частотной и концентрационной зависимости электромагнитных параметров сред, содержащих только углеродные нанотрубки и только графеновые нанопластины. Обосновано, что одним из основных факторов, определяющих эффективную проводимость исследованных сред в микроволновом диапазоне, является эффект экранирования, который обусловлен возникновением деполяризующих полей в наноструктурах конечных размеров. Продемонстрировано слабое влияние эффекта экранирования на проводимость композитной среды на частоте 1 ТГц. Это позволяет ввести критерий количественной оценки эффективности возбуждения токов в графеновых нанопластинах под действием микроволнового излучения как отношение действительных частей проводимости композитной среды в микроволновом (на частоте 30 ГГц) и терагерцовом (на частоте 1 ТГц) диапазонах [5].

6) В интервале температур (10 – 530 К) в терагерцовом диапазоне (0.3 – 1.5 ТГц) для плёнки, образованной длинными ( $L \approx 10$  мкм) однослойными углеродными нанотрубками, установлена температурная зависимость частоты электронной релаксации в нанотрубках, которая в диапазоне 300 – 500 К прямо пропорциональна температуре и определяется рассеянием электронов на акустических фононах [4].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Экспериментальное исследование композитной среды на основе углеродных нанотрубок с полимерным покрытием даст возможность значительно упростить теоретическое моделирование и позволит определять

электромагнитный отклик композитных сред откликом отдельных проводящих включений, минимизируя при этом вклад матрицы, на частоте локализованного плазмонного резонанса нанотрубок и выше (то есть в диапазоне 0.1 – 100 ТГц).

Экспериментальный анализ микроволновых параметров трёхмерной сетки (ваты) из углеродных нанотрубок в микроволновом частотном диапазоне указывает на возможность создания структуры с плавно перестраиваемым электромагнитным откликом посредством механического воздействия, которая может использоваться в качестве активного элемента электронных устройств.

Предложенный критерий количественной оценки эффективности возбуждения токов в графеновых нанопластинках, являющихся проводящими включениями в композитной среде, под действием микроволнового излучения (26 – 37 ГГц), позволит контролировать качество синтеза композитных сред с точки зрения их электромагнитных применений.

Экспериментально установленные степенные зависимости проводимости композитной среды из углеродных нанотрубок и графеновых нанопластинок от плотности наноструктур в микроволновом (26 – 37 ГГц) и терагерцовом (0.2 – 1 ТГц) диапазонах дают экспериментальный материал, необходимый для оценки справедливости развиваемых теоретических подходов гомогенизации для описания композитных сред.

Полученная температурная зависимость скорости электронной релаксации в углеродных нанотрубках в терагерцовом диапазоне (0.3 – 1.5 ТГц), может использоваться в теоретических расчетах электромагнитных параметров углеродных нанотрубок и сред на их основе.

Полученные почти линейные зависимости эффективной проводимости композитной среды от плотности включений (углеродных нанотрубок и графеновых нанопластинок) в терагерцовом диапазоне (0.1 – 1 ТГц) могут быть использованы для определения доли включений в композитной среде на основе бесконтактных терагерцовых измерений.

## **Список публикаций соискателя учёной степени**

### **Статьи в научных рецензируемых изданиях, включённых в Перечень изданий, и в иностранных научных изданиях**

1. Влияние эффекта экранирования на частотную зависимость электропроводности композитного материала на основе углеродных нанотрубок / М.В. Шуба, Д.И. Юко, Д.Н. Мейсак, О.В. Седельникова, М.А. Каныгин, А.В. Окотруб // Журнал Белорусского государственного университета. – 2018. – № 1. – С. 80-87.

2. Carbon nanotube sponges as tunable materials for electromagnetic applications / M.V. Shuba, D.I. Yuko, P.P. Kuzhir, S.A. Maksimenko, M.De Crescenzi, M. Scarselli // Nanotechnology. – 2018. – Vol. 29. – P. 375202 (7 pp).

3. How effectively do carbon nanotube inclusions contribute to the electromagnetic performance of a composite material? Estimation criteria from microwave and terahertz measurements / M.V. Shuba, D.I. Yuko, P.P. Kuzhir, S.A. Maksimenko, M.A. Kanygin, A.V. Okotrub, R. Tenne, Ph. Lambin // Carbon. – 2018. – Vol. 129. – P. 688-694.

4. Influence of nanotube length and density on the plasmonic terahertz response of single-walled carbon nanotubes / P. Karlsen, M.V. Shuba, C. Beckerleg, D.I. Yuko, P.P. Kuzhir, S.A. Maksimenko, V. Ksenevich, Ho Viet, A.G. Nasibulin, R. Tenne, E. Hendry // Journal of Physics D : Applied Physics. – 2018. – Vol. 51. – P. 014003 (9 pp).

5. Frequency and density dependencies of the electromagnetic parameters of carbon nanotube and graphene nanoplatelet based composites in the microwave and terahertz ranges / M.V. Shuba, D.I. Yuko, G. Gorokhov, D. Meisak, D.S. Bychanok, P.P. Kuzhir, S.A. Maksimenko, P. Angelova, E. Ivanov, R. Kotsilkova // Mater. Res. Express. – 2019. – Vol. 6. – P. 095050.

6. Electromagnetic and optical responses of a composite material comprising individual single-walled carbon-nanotubes with a polymer coating / M.V. Shuba, D.I. Yuko, P.P. Kuzhir, S.A. Maksimenko, V.K. Ksenevich, Lim Sung-Hwan, Kim Tae-Hwan, Choi Sung-Min // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10. – P. 9361 (9 pp).

### **Статьи в сборниках материалов научных конференций**

7. Comparison of the Electrical Conductivity of Polymer Composites in the Microwave and Terahertz Frequency Ranges [Electronic resource] / M. Shuba, D. Yuko, D. Bychanok, A. Liubimau, D. Meisak, I. Bochkov, P. Kuzhir // 2017 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications

and Electronic Systems (COMCAS), Tel-Aviv, Israel, 13-15 November 2017. – IEEE, 2017. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8244754>. – Date of access: 13.10.2022.

8. Tunable electromagnetic response of free-standing 3D carbon nanotube network in the Ka-band [Electronic resource] / M.V. Shuba, D. Yuko, P.P. Kushir, S.A. Maksimenko, M. Scarselli // 2017 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES), Firenze, Italy, 26-30 March 2017. – IEEE, 2017. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7916336>. – Date of access: 13.10.2022.

9. Юко, Д.И. Использование углеродных губчатых структур в электромагнитных приложениях / Д.И. Юко, М.В. Шуба // Международная школа-конференция молодых ученых и специалистов “Современные проблемы физики”, Минск, 13-15 июня 2018 г. : сб. науч. тр. / НАН Беларуси ; ГНУ “Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси”. – Минск, 2018. – С. 261-265.

10. Юко, Д.И. Зависимость микроволновых параметров от плотности для трёхмерной сети из одностенных углеродных нанотрубок / Д.И. Юко, М.В. Шуба, С.А. Максименко // Наноструктуры в конденсированных средах : сб. науч. ст. [материалы 10-й Междунар. науч. конф. “Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах”, Минск, 20-23 августа 2018 г.] / Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси ; БРФФИ ; редкол.: академик НАН Беларуси П.А. Витязь [и др.]. – Минск, 2018. - С. 43-47.

### Тезисы

11. Shuba, M. Density dependence of the microwave conductivity of carbon nanotube based composites / M. Shuba, D. Yuko, S. Maksimenko // Advanced Properties and Processes in Optoelectronic Materials and Systems, APROPOS 16 : book of abstracts of the 16<sup>th</sup> International Conference, Vilnius, Lithuania, October 10-12, 2018. – Vilnius, 2018. –P. 48.

12. Yuko, D. 3D carbon nanotube structures for electromagnetic applications / D. Yuko, M. Shuba, P. Kuzhir // Markovnikov Congress on Organic Chemistry, Moscow-Kazan, 21-28 June 2019 / Российский фонд фундаментальных исследований. – М., 2019. – P. 214.



## РЕЗЮМЕ

Юко Дмитрий Иванович

### **Частотные и концентрационные зависимости проводимости композитных сред на основе углеродных нанотрубок и графеновых нанопластинок в микроволновом и терагерцовом диапазонах**

**Ключевые слова:** углеродные нанотрубки, графеновые нанопластины, композитные среды, эффективная проводимость, микроволновый и терагерцовый диапазоны.

**Цель работы:** выявление особенностей взаимодействия электромагнитного излучения с композитными средами на основе углеродных нанотрубок и графеновых нанопластинок, обусловленных влиянием размерных эффектов и формированием проводящей сетки из углеродных наноструктур.

**Методы исследования:** для исследования эффективной проводимости композитных сред применялся волноводный метод в микроволновом диапазоне и спектроскопия с временным разрешением в терагерцовом диапазоне; в качестве образцов выступали плёнки и плоскопараллельные пластинки композитных сред на основе углеродных наноструктур.

**Полученные результаты и их новизна:** Показано, что в микроволновом (26 – 37 ГГц) и терагерцовом (0.1 – 1 ТГц) диапазонах частот концентрационные зависимости эффективной проводимости композитных сред на основе углеродных нанотрубок и графеновых нанопластинок могут быть аппроксимированы степенными функциями, в которых показатель степени уменьшается с ростом частоты. В терагерцовом диапазоне (0.1 – 1 ТГц) частотные зависимости проводимости этих композитных сред могут быть аппроксимированы степенными функциями, в которых показатель степени возрастает с уменьшением концентрации наноструктур. Обосновано использование отношения действительной части эффективной проводимости композитной среды на основе графеновых нанопластинок в микроволновом диапазоне к той же величине в терагерцовом диапазоне в качестве критерия количественной оценки эффективности взаимодействия графеновых нанопластинок с микроволновым излучением. Экспериментально показано, что изменение количества контактов между углеродными нанотрубками качественно не изменяет частотную зависимость проводимости композитной среды в диапазоне, лежащем выше частоты локализованного плазмонного резонанса в углеродных нанотрубках.

*Результаты могут найти применение* в инженерии при разработке композитных сред на основе углеродных наноструктур, эффективно взаимодействующих с терагерцовым и микроволновым излучением.

## РЭЗІЮМЭ

Юко Дзмітрый Іванавіч

### Частотныя і канцэнтрацыйныя залежнасці праводнасці кампазітных асяроддзяў на аснове вугляродных нанатрубак і графенавых нанапласцінак у мікрахвалевым і терагерцовым дыяпазонах

**Ключавыя словы:** вугляродныя нанатрубка, графенавыя нанапласцінкі, кампазітныя сярэды, эфектыўная праводнасць, мікрахвалевы і терагерцовы дыяпазоны.

**Мэта працы:** выяўленне асаблівасцяў ўзаемадзеяння электрамагнітнага выпраменьвання з кампазітнымі асяроддзямі на аснове вугляродных нанатрубак і графенавых нанапласцінак, абумоўленых уплывам размерных эфектаў і фарміраваннем праводнай сеткі з вугляродных нанаструктур.

**Метады даследавання:** для даследавання эфектыўнай праводнасці кампазітных асяроддзяў выкарыстоўваўся хваляводны метад у мікрахвалевым дыяпазоне і спектраскапія з часовым дазволам у терагерцовым дыяпазоне; у якасці узораў выступалі плёнкі і плоскапаралельныя пласцінкі кампазітных сярэд на аснове вугляродных нанаструктур.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** Паказана, што ў мікрахвалевым (26 – 37 ГГц) і терагерцовым (0.1 – 1 ТГц) дыяпазонах частот канцэнтрацыйныя залежнасці эфектыўнай праводнасці кампазітных сярэд на аснове вугляродных нанатрубак і графенавых нанапласцінак могуць быць апраксімаваны ступеннымі функцыямі, у якіх паказчык ступені памяншаецца з ростам частаты. У терагерцовым дыяпазоне (0.1 – 1 ТГц) частотныя залежнасці праводнасці гэтых кампазітных сярэд могуць быць апраксімаваны ступеннымі функцыямі, у якіх паказчык ступені ўзрастае з памяншэннем канцэнтрацыі нанаструктур. Абгрунтавана выкарыстанне адносіны сапраўднай часткі эфектыўнай праводнасці кампазітнага асяроддзя на аснове графенавых нанапласцінак ў мікрахвалевым дыяпазоне да той жа велічыні ў терагерцовым дыяпазоне ў якасці крытэрыю колькаснай ацэнкі эфектыўнасці ўзаемадзеяння графенавых нанапласцінак з мікрахвалевым выпраменьваннем. Эксперыментальна паказана, што змяненне колькасці кантактаў паміж вугляродныя нанатрубкамі якасна не змяняе частотную залежнасць праводнасці кампазітнага асяроддзя ў терагерцовым дыяпазоне, які ляжыць вышэй частаты лакалізаванага плазмоннага рэзанансу ў вугляродных нанатрубках.

*Вынікі могуць знайсці выкарыстанне ў інжынерыі пры распрацоўцы кампазітных сярэд на аснове вугляродных нанаструктур, эфектыўна ўзаемадзеючых з терагерцовым і мікрахвалевым выпраменьваннем.*

## SUMMARY

**Yuko Dzmitry Ivanavich**

### **Frequency and concentration dependences of the conductivity of composite environment based on carbon nanotubes and graphene nanoplatelets in the microwave and terahertz ranges**

**Key words:** carbon nanotubes, graphene nanoplatelets, composite environment, effective conductivity, microwave and terahertz ranges.

**Purpose of the work is** detection of the features of the interaction of electromagnetic radiation with the composite environments comprising carbon nanotubes and graphene nanoplatelets, that is caused by the influence of the size effects and the formation of a conducting network of carbon nanostructures.

**Research methods:** to study the effective conductivity of composite environments, a waveguiding method in the microwave range and time-domain terahertz spectroscopy are used; the samples are films and plane-parallel plates of carbon nanostructures based composite.

**The results obtained and their novelty.** It has been shown that in the microwave (26 – 37 GHz) and terahertz (0.1 – 1 THz) frequency ranges, the concentration dependences of the effective conductivity of composite environment based on carbon nanotubes and graphene nanoplatelets can be approximated by power functions, in which the exponent decreases with increasing frequency. In the terahertz range (0.1 – 1 THz), the frequency dependences of the conductivity of these composite environment can be approximated by power functions, in which the exponent increases with decreasing nanostructures concentration. The ratio of the real part of the effective conductivity of a composite environment based on graphene nanoplatelets in the microwave range to the same value in the terahertz range has been proposed as a criterion for quantitative estimation of the efficiency of graphene nanoplatelet interaction with microwave radiation. It has been shown experimentally that a change in the number of contacts between carbon nanotubes does not qualitatively change the frequency dependence conductivity of the composite environment in the range above the frequency of localized plasmon resonance in carbon nanotubes.

*The obtained results can be used* in engineering for the development of carbon nanostructures based composites effectively interacting with the terahertz and microwave radiation.





Подписано в печать 20.04.2023. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.  
Цифровая печать. Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,5.  
Тираж 60 экз. Заказ 85.

Отпечатано с оригинала-макета заказчика  
в республиканском унитарном предприятии  
«Издательский центр Белорусского государственного университета».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 2/63 от 19.03.2014.  
Ул. Красноармейская, 6, 220030, Минск.

