

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права

УДК 537.31, 537.847, 546.26-126, 54-126

ПАРФИМОВИЧ
Иван Дмитриевич

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ
КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ МАТРИЦ
С ДОБАВКАМИ НАНОРАЗМЕРНЫХ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.03 – Радиофизика

Минск, 2024

Научная работа выполнена в **Белорусском государственном университете и НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета.**

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ -

Комаров Фадей Фадеевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
академик НАН Беларуси,
заведующий лабораторией элионики
НИУ «Институт прикладных физических
проблем имени А.Н. Севченко»
Белорусского государственного университета.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Борботько Тимофей Валентинович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой защиты информации
УО «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»;

Малый Сергей Владимирович,
кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры радиофизики и цифровых
медiateхнологий
Белорусского государственного университета.

ОППОНИРУЮЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ –

**ГНПО «Научно-практический центр
НАН Беларуси по материаловедению».**

Защита состоится **«15» марта 2024 года в 14.00** на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.10 при Белорусском государственном университете по адресу: *Минск, ул. Ленинградская 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407.* Телефон ученого секретаря 209-57-09.

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

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан **«25»** 01 2024 года.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
кандидат технических наук



А.Ф. Романов

ВВЕДЕНИЕ

Индустрия нано- систем и материалов является одним из приоритетных и определяющих направлений науки и техники в XXI веке. Основные вехи развития данного направления неотъемлемо связаны с поиском и созданием новых многофункциональных материалов. Ярчайшим примером таких усилий является открытие и синтез таких наноструктур с уникальными электрическими и механическими свойствами, как однослойные углеродные нанотрубки и графен.

К сожалению, на данном этапе развития методов синтеза углеродных наноструктур, пока не удалось найти подход к налаживанию массового производства углеродных наноматериалов с полностью идентичной структурой, что воспрепятствовало осуществлению поистине значимого скачка в области нанотехнологий. Вместе с тем, в промышленном масштабе удалось наладить синтез менее совершенных многослойных углеродных нанотрубок и графеновых плоскостей с воспроизводимой структурной схожестью массивов материала. Данная особенность позволила использовать многослойные углеродные наноструктуры для создания новых типов композиционных материалов, обладающих уникальными эксплуатационными и функциональными свойствами. Поэтому, в последнее время, интенсивно развивается направление по созданию новых композиционных материалов, и, особенно, на основе полимеров, содержащих в своей матрице углеродные наноструктуры.

Примечательно, что перколяционный порог, при котором происходит существенный рост функциональных свойств, при добавлении углеродных наноматериалов (УНМ) весьма мал – менее 1 вес. %. При таких концентрациях наполнителя все остальные свойства полимера остаются неизменными либо меняются весьма незначительно. Например, полимерные материалы, модифицированные углеродными нанотрубками, могут существенно повысить свою электропроводность и, тем самым, быть интересными для применений в качестве антистатических покрытий. Придание полимерам проводящих свойств открывает дорогу к созданию экранирующих и радиопоглощающих материалов (РПМ). По сравнению с обычными экранирующими РПМ на основе металлов, электропроводящие полимерные композиты на основе углерода становятся привлекательными из-за их малого веса, устойчивости к коррозии, гибкости и технологических преимуществ.

Эффективность экранирования электромагнитных помех в композиционном материале зависит от таких факторов, как собственная проводимость наполнителя, массовая концентрация наполнителя и аспектное соотношение частиц добавки. При более высоких концентрациях наполнителя композитная система страдает от плохих механических свойств из-за плохого

взаимодействия наполнителя с матрицей. Среди углеродных наполнителей в качестве проводящего наполнителя широко используется технический углерод. При использовании технического углерода в качестве наполнителя основным недостатком является его большое количество, около 30–40% для достижения желаемых уровней проводимости, что приводит к ухудшению механических свойств полимера. Поэтому более выгодным вариантом рассматривается применение углеродных нанотрубок (УНТ). Основным преимуществом их использования является то, что проводящие композиты на их основе могут образовываться при низкой концентрации УНТ из-за низкого порога перколяции. Малый диаметр, высокая проводимость и механическая прочность УНТ делают их отличным вариантом для создания проводящих композитов для высокоэффективных экранирующих и поглощающих материалов.

Вышеизложенные особенности применения углеродных наноструктур определяют актуальность научной работы, посвященной разработке и созданию новых композитных материалов на основе различных типов полимерных матриц, с добавлением углеродных наноструктур, обеспечивающих экранирование электромагнитного излучения за счет процессов отражения либо поглощения.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами) и темами

Тематика научной работы соответствует приоритетному направлению научных исследований Республики Беларусь «Многофункциональные материалы и технологии».

Диссертационная работа выполнялась в НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ в рамках республиканских комплексных программ, утвержденных Постановлениями Президиума Национальной академии наук Беларуси:

ГПНИ «Информатика, космос и безопасность», подпрограмма «Информатика и космические исследования», НИР - «Разработать и исследовать физико-технологические режимы формирования новых композитных материалов на основе наноструктурированных полимеров (с добавками таунитов, полиграфена, микро- и нанопорошков металлов) для защиты от электромагнитного излучения систем космических аппаратов» (2017 – 2018 гг., № ГР 20163054);

ГПНИ «Информатика, космос и безопасность», подпрограмма «Информатика и космические исследования», НИР - «Разработать режимы изготовления и исследовать характеристики материалов на основе наноструктурированных полимеров с добавками углеродных наноматериалов

для защиты от электромагнитного излучения систем космических аппаратов» (2019 – 2020 гг., № ГР 20190356);

ГПНИ «Цифровые и космические технологии, безопасность человека, общества и государства», подпрограмма «Цифровые технологии и космическая информатика», НИР - «Технологические режимы изготовления высокоэффективных материалов и структур для защиты электронных и оптоэлектронных систем специального назначения от воздействия электромагнитных излучений в широком спектральном диапазоне (900 Гц – 110 ГГц)» (2021 – 2025 гг. № ГР 20212657).

Исследования были поддержаны Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований по гранту: НИР Т18Р-249 «Разработка композиционных материалов на основе полимера с углеродными наноструктурами для суперконденсаторов и систем защиты от электромагнитных излучений», (2018 – 2019 гг., № ГР 20181352).

Работа выполнялась в НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ в рамках ГП «Научные технологии и техника» на 2016-2020 годы, подпрограммы 7 «Исследование и использование космического пространства в мирных целях в 2016-2020 г.г. и в период до 2030 года», задание №8 «Разработка функциональных материалов для аэрокосмических систем и комплексов», НИОК(Т)Р «Разработка функциональных материалов для аэрокосмических систем и комплексов», (2016 – 2020 гг., № ГР 20180070).

В рамках ГП «Научные технологии и техника» на 2021–2025 годы, подпрограммы 2 «Освоение в производстве новых и высоких технологий», мероприятия 32 «Разработать новые материалы, покрытия и системы для защиты радиоэлектронного, оптоэлектронного и информационного оборудования, биологических объектов от внешних энергетических воздействий, обеспечения их экологической и информационной безопасности, высокой функциональной надежности и работоспособности», НИОК(Т)Р «Разработка радиационностойких, антибликовых, терморегулирующих, обеспечивающих электромагнитную совместимость систем электроники, функциональных материалов, структур и покрытий для аэрокосмических и специальных систем и комплексов» (2021 – 2025 гг. № ГР 20220013).

Цель задачи, объект и предмет исследования

Целью диссертационной работы является установление закономерностей изменения электропроводящих свойств, характеристик поглощения и отражения электромагнитных излучений в широком спектральном диапазоне в зависимости от типа, концентрации углеродных наноматериалов и условий их наполнения в полимерные матрицы, а также формирование комплексного подхода разработки

функциональных композитных материалов на основе полимерных матриц, модифицированных углеродными наноструктурами для систем защиты от электромагнитного излучения.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- проведение анализа и обобщение известных данных об особенностях применения углеродных добавок и полимерных матриц при формировании композитов;

- разработка методик формирования функциональных композитных материалов с заданными свойствами на основе различных типов углеродных наноструктур и полимерных матриц;

- определение влияния концентрации, типа и структурных параметров углеродных добавок, методов их обработки и диспергирования в полимере на электрофизические параметры композита;

- изготовление образцов композитных материалов на основе полимеров, наполненных углеродными наноструктурами, для решения прикладных задач экранирования и поглощения электромагнитного излучения;

- установление влияния целенаправленного модифицирования топологии поверхности сформированных композитных материалов путем лазерной импульсной обработки и воздействия кислородной плазмы на оптические характеристики в ближнем ИК-диапазоне.

Объектами исследования диссертационной работы являлись многослойные углеродные нанотрубки, графеновые нанопластины, полимерные композитные материалы, содержащие углеродные наноструктуры.

Предметом исследования выступало взаимодействие микроволнового электромагнитного излучения с композитными материалами, содержащими углеродные наноструктуры.

Научная новизна

Научная новизна состоит в установлении закономерностей влияния структуры различных по типу наноразмерных углеродных добавок (нанотрубки, полиграфеновые слои) в полимеры на процессы взаимодействия электромагнитного излучения с новыми типами функциональных композитных материалов на их основе, разработке методик теоретического прогнозирования влияния топологии структурных элементов систем защиты от ЭМИ на их эффективность, а также разработке методик формирования композитных материалов со сложной иерархической структурой, обеспечивающей широкополосное экранирование электромагнитного излучения.

Разработаны и апробированы методики диспергирования углеродных наноматериалов в полимерных матрицах различной вязкости, позволяющие

синтезировать композиты с прогнозируемыми электропроводящими и радиопоглощающими характеристиками. Продемонстрирована возможность использования углеродных наноструктур для создания эффективных экранирующих и радиопоглощающих материалов.

Представлена физическая модель разрабатываемых поглотителей электромагнитного излучения различной структурной организации для применений в радиочастотных безэховых камерах. Изготовлены образцы новых типов эффективных износостойких поглотителей для применений в безэховых камерах.

Впервые продемонстрирована возможность создания антибликовых и антиотражающих в ближнем ИК-диапазоне материалов с профилированной поверхностью с использованием методов импульсного лазерного воздействия и воздействия потока атомарного кислорода.

Положения, выносимые на защиту

1. Установленные закономерности формирования в структуре полимерных композитных материалов с углеродными нанотрубками сквозной проводимости и обеспечения наибольших значений электропроводности, заключающиеся в применении процесса диспергирования сфокусированного ультразвукового воздействия с предварительной нековалентной функционализацией поверхности многостенных углеродных нанотрубок с высоким аспектным соотношением, что позволяет достичь постоянного значения удельной электропроводности в 0,01 См/см при частотах переменного тока от 50 Гц до 1 МГц при концентрации наполнителя в 0,5 вес.%

2. Методика создания наноструктурированных пирамидальных поглотителей, предназначенных для безэховых камер и измерительных площадок, заключающаяся в модификации пенополиуретановой матрицы высокодисперсным акриловым раствором многослойных углеродных нанотрубок «Таунит-МД» с концентрацией 2 вес.%, позволяющая достичь эффективного ослабления отраженного электромагнитного излучения в частотном диапазоне 1 – 50 ГГц на уровне – 45 дБ и обеспечивающая отсутствие сыпучести наполнителя и сохранение эластичных механических свойств изделия.

3. Методики формирования антиотражающих покрытий, для применения в оптических и оптоэлектронных системах космического и наземного базирования, основанные на применении импульсной лазерной обработки ($\lambda = 1064$ нм, $\nu_{\text{имп}} = 50$ Гц, $W = 19 - 21$ мДж/см²), а также воздействия потоков кислородной плазмы с эффективным флюенсом 3×10^{21} атом/см² и средней энергией атомарных ионов 20 – 40 эВ, обеспечивающие низкие

коэффициенты зеркально ($\leq 0,02\%$) и диффузно ($\leq 1\%$) отраженного света в диапазоне 190 – 2500 нм.

Личный вклад соискателя

Представленные в диссертации основные результаты и выводы получены соискателем самостоятельно. Лично соискателем осуществлялось получение микрофотографий просвечивающей электронной микроскопии и сканирующей электронной микроскопии образцов исследуемых углеродных наноструктур, производилось изготовление образцов композитных материалов, исследование их взаимодействия с электромагнитным излучением ИК- и СВЧ-диапазона. Производился анализ и интерпретация результатов электрофизических исследований. Постановка цели и задач исследования и обсуждение результатов проведена совместно с научным руководителем. Опубликованные работы написаны в соавторстве с Мильчаниным О.В., Пархоменко И.Н., Власуковой Л.А., Жуковским П.В., Ткачевым А.Г., Щегольковым А.В., Щегольковым А.В., Новиковым Л.С., Черником В.Н. Вклад этих соавторов опубликованных работ состоит в проведении экспериментов методом просвечивающей электронной микроскопии, регистрации ИК спектров поглощения, проведении экспериментов по взаимодействию излучения УФ, видимого и ИК-диапазонов спектра с образцами покрытий, проведении электрофизических измерений, синтезе углеродных наноструктур, формировании антиотражающих покрытий, а также в совместном обсуждении результатов исследований.

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

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: II, III, IV Международной научно-практической конференции «Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение» (Тамбов, Россия, 15-17 ноября 2017 г., 13-15 ноября 2019 г., 6-8 октября 2021 г.), Международной научной конференции «Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы» (Витебск, 26–29 сентября 2016 г.), IV, V Международной научно-практической конференции «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (Минск, 11-12 мая 2017 г., 16-17 мая 2019 г.), 12-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Минск, 19-22 сентября 2017 г.), 8th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP 2018) (Zatoka, Ukraine,

September 9-14 2018), 72-й, 73-й, 75-й, 77-й, 78-й научной конференции студентов и аспирантов БГУ (Минск, 11-22 мая 2015 г., 16-25 мая 2016 г., 14-23 мая 2018 г., 11–22 мая 2020 г., 10–21 мая 2021 г.), X Международной научной конференции «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах», посвященной 90-летию НАН Беларуси и 25-летию ММАН СНГ (Минск, 20-23 августа 2018 г.), V International conference for young scientists, post-graduate students and students isotopes: technologies, materials and application (Tomsk, November 19–23, 2018), 14th International Conference «Advanced Carbon Nanostructures. ACNS`2019. School for young scientists» (St. Peterburg, July 1-5 2019), VIII Белорусском космическом конгрессе (Минск, 25-27 октября 2022 г.), XII Всероссийской научно-технической конференции «Электромагнитная совместимость» (Москва, 8–9 июня 2023 г.).

Результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс на факультете радиофизики и компьютерных технологий БГУ (получен 1 акт о внедрении).

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 39 научных работах, в числе которых: 9 – статьи в научных изданиях, включенных в перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований, и в иностранных научных изданиях (общим объемом 6,32 авторского листа), 3 – статьи в других научных изданиях, 25 – статьи в сборниках материалов и трудов научных конференций, 2 – тезисы доклада.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников, 1 приложения. Полный объем диссертации составляет 178 страниц, в том числе 7 таблиц занимают 4 страницы, 96 рисунков занимают 58 страниц. Список использованных источников содержит 209 наименований, включая собственные публикации автора (21 страница).

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Первая глава диссертации содержит аналитический обзор литературы. Рассмотрена проблематика формирования композитных материалов на основе полимерных матриц, модифицированных углеродными наноструктурами.

Проанализировано влияние методов функциональной обработки углеродных наноструктур на обеспечение равномерного пространственного распределения нанонаполнителей в матрице композита. Проанализировано влияние структурных особенностей углеродных наноматериалов и методов их

диспергирования в полимерных матрицах на процессы формирования электропроводящих путей в структуре композита.

Отмечен ряд ключевых особенностей для создания эффективных функциональных композитов системы полимер/углеродный наноматериал.

Во **второй главе** диссертации представлен основной метод формирования объектов исследования, используемое в работе оборудование и методы исследования. В качестве основных компонентов композитных материалов рассматривались системы на основе многослойных углеродных нанотрубок серии «Таунит» производства ООО «НаноТехЦентр» (г. Тамбов), графеновые нанопластины и акриловая, эпоксидная и пенополиуретановая полимерные матрицы. В качестве вспомогательного диспергирующего компонента использовалось неионогенное поверхностно-активное вещество ОП-7.

Сочетание акриловой и пористой пенополиуретановой матриц предназначено для синтеза упругих, гибких и легковесных объемных радиопоглощающих материалов пирамидального типа с целью дальнейшего их применения в радиочастотных безэховых камерах. Изготовление данного типа материалов заключалось в предварительной функциональной обработке поверхности наноструктур концентрацией 1 – 10 г/л в водных растворах неионогенных поверхностно активных веществ концентрацией 100 мМ, последующей сфокусированной ультразвуковой обработке на частоте 24 кГц и мощности в пределах 20 – 100 Вт в матрице акрилового полимера и в пропитке пенополиуретановой матрицы сформированной суспензией.

Синтез композитов на основе эпоксидной матрицы заключался в обработке УНМ в 100 мМ-растворе неионогенных ПАВ в ацетоне посредством УЗ-воздействия на частоте 24 кГц и мощностью до 80 Вт, выпаривании растворителя до пастообразного состояния, ввода пастообразной смеси в матрицу полимера при 24 кГц УЗ-воздействии мощностью до 40 Вт и завершающей процедуре перемешивания полного состава компонентов композита в течение 3-5 минут с помощью устройства механического перемешивания на оборотах вращения пропеллера до 200 об/мин.

Исследования структурно-фазовых особенностей, используемых для модификации композитов, углеродных наноматериалов проводились с помощью методов просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии. Для анализа электропроводящих свойств разработанных материалов использовалась измерительная установка частотной диэлектрической спектроскопии в температурном интервале 20 К – 375 К и частотном интервале 50 Гц – 1 МГц.

Изучение особенностей взаимодействия электромагнитного излучения с образцами композитных материалов в радиочастотном диапазоне (1 – 50 ГГц) проводилось с применением программно-аппаратного комплекса исследования

параметров материалов на основе векторного анализатора цепей Keysight Electronics N5290A методами волноводной линии передачи и свободного пространства. Для получения спектральных характеристик композитных материалов в УФ-, видимом-, ближнем ИК-диапазоне использовался спектрофотометр LAMBDA-1050. Спектры отражения регистрировались в диапазоне 190 – 2500 нм с использованием приставки зеркального отражения, а также с помощью «Интегрирующей сферы» для регистрации диффузного отражения.

В **третьей главе** диссертации представлены результаты исследования электрофизических характеристик композитных материалов на основе эпоксидного полимера, модифицированного углеродными наноструктурами. Продемонстрировано влияние методов диспергирования и «размерного эффекта» МУНТ на формирование электропроводящих путей в структуре разрабатываемых композитов.

Для исследования влияния методов функциональной обработки углеродных наноструктур, параметров диспергирования в матрице полимера, типа и концентрации добавок, были разработаны ряд методов синтеза композитов.

С целью исследования влияния типа углеродной добавки применялся **метод совмещенного механического и расфокусированного ультразвукового воздействия**. В данном методе углеродные нанотрубки «Тунит» и «Таунит-М», различающиеся структурными характеристиками, диспергировались в матрице композита в УЗ-ванне при частоте 35 кГц и мощностью 30 Вт, а также при механическом перемешивании состава композита при оборотах пропеллера 500 – 2000 об/мин.

Сравнивая размерные характеристики углеродных нанотрубок «Таунит» (*протяженность 1-2 мкм, внутренний диаметр 10 – 20 нм, внешний диаметр 35 – 75 нм*) и размерные характеристики углеродных нанотрубок «Таунит-М» (*протяженность 1 – 2 мкм, внутренний диаметр 8 – 12 нм, внешний диаметр 10 – 20 нм*), а также электропроводящие характеристики композитов на их основе (рисунок 1), сформированных по одной методике синтеза, установлено, что нанотрубки с меньшим диаметром позволяют достичь как минимум **на 2 порядка** больших значений величины электропроводности.

Для исследования влияния функционализации поверхности углеродных наноструктур метод совмещенного механического и расфокусированного ультразвукового воздействия был дополнен этапом функциональной обработки поверхности углеродных наноструктур: **ковалентная обработка** 2 вес.% МУНТ «Таунит-М» стеариновой кислотой, а также **нековалентная обработка** 2 вес.% МУНТ «Таунит-М» неионогенными поверхностно-активными веществами (рисунок 2).

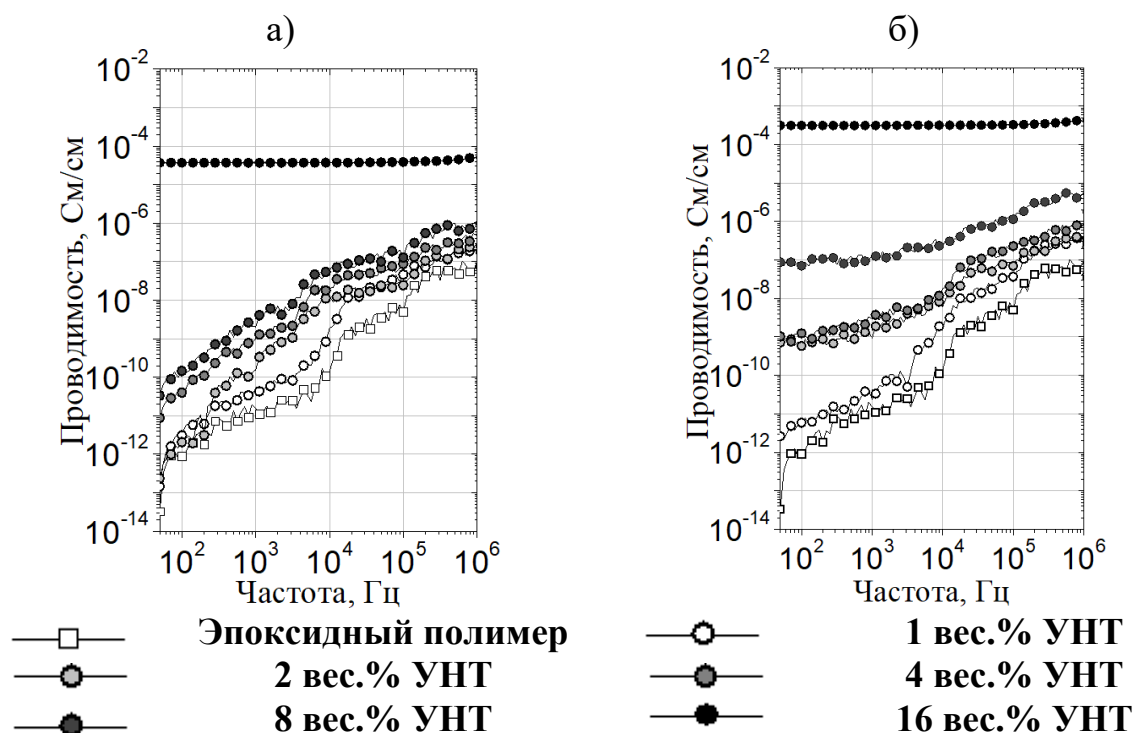


Рисунок 1 – Частотная зависимость удельной электропроводности образцов композитных материалов с добавлением углеродных нанотрубок а) «Таунит» и б) «Таунит-М»

В случае применения нековалентной функционализации, наблюдаются на **2-4 порядка** большие величины электропроводности в сравнении с образцом с равной концентрацией наполнителя «Таунит-М», полученного без применения функционализации. Использование стеариновой кислоты в качестве функционализатора приводит к менее существенному росту величины электропроводности – на **3 порядка** в низкочастотной области (50 – 1кГц) и на **1 порядок** в высокочастотной (1 МГц).

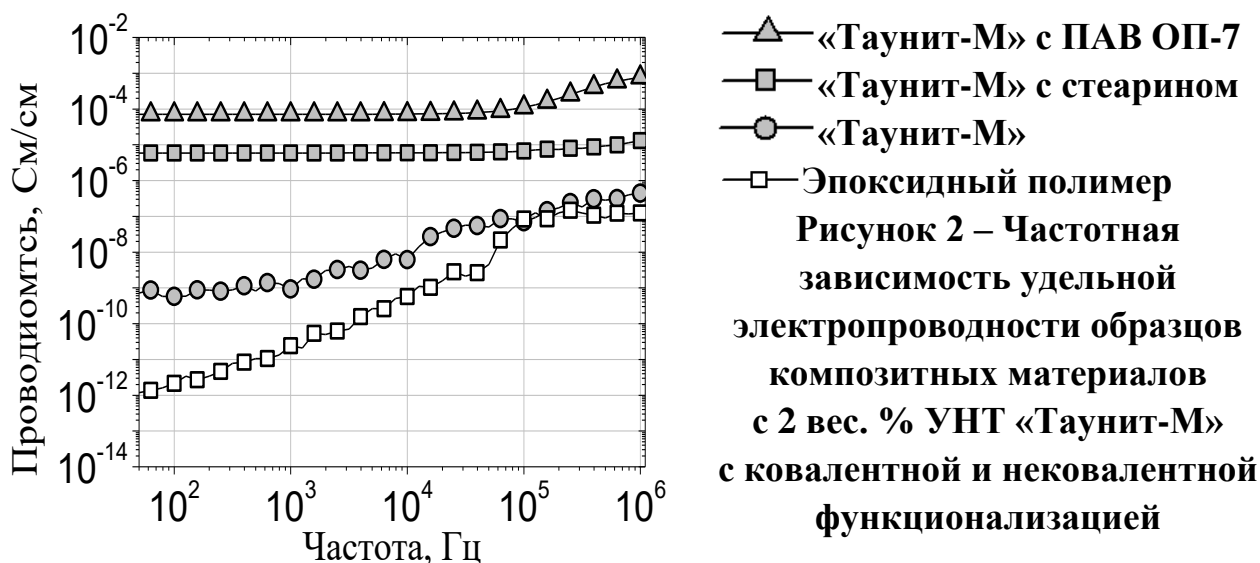


Рисунок 2 – Частотная зависимость удельной электропроводности образцов композитных материалов с 2 вес. % УНТ «Таунит-М» с ковалентной и нековалентной функционализацией

Для исследования влияния параметров диспергирования углеродных наноматериалов был применен метод **сфокусированного ультразвукового воздействия с предварительной функционализацией углеродных наноструктур**, представленный в главе 2. Данный метод позволяет добиться постоянного значения проводимости в **0,01 См/см** в диапазоне частот от **50 Гц** до **1 МГц**, при концентрации наполнителя **0,5 вес. %**.

На основе дополнительного анализа фазо-частотной характеристики композитов, а также анализа частотной (50 – 10⁶ Гц) и температурной (20 – 375 К) зависимости электропроводности композитных материалов с различной степенью диспергирования наполнителя, рассмотрены механизмы электропереноса в структуре композита. Получены сведения о наличии в композитных материалах, по крайней мере 3-х механизмов, связанных с переносом носителей за счет туннелирования, прыжковой проводимости, и механизма активированных диэлектрических потерь.

В **четвертой главе** диссертации разработаны методы создания эффективных пирамидальных радиопоглощающих материалов на основе пенополиуретановой матрицы с однородным ее заполнением многослойными углеродными нанотрубками.

Радиопоглотитель представляет собой массив пирамидальных структур, сформированных из пенополиуретановой матрицы, и пропитанный высокодисперсным раствором многослойных углеродных нанотрубок «Таунит-МД» и предназначен для покрытия внутренних поверхностей и оборудования рабочих мест в высококачественных безэховых камерах (рисунок 3).

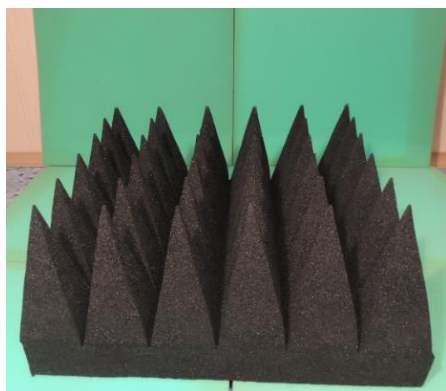


Рисунок 3 – 250 миллиметровый образец пирамидального радиопоглощающего материала с 2 вес.% УНТ «Таунит-МД»»

Процесс изготовления пирамидальных РПМ заключался в формировании серии пробных образцов композитов, исследовании электрофизических параметров, построении на их основе объемной модели поглотителя и, в случае демонстрации оптимальных поглощающих характеристик, синтезе натурального образца. Определение электрофизических параметров пробных образцов: комплексной диэлектрической и магнитной проницаемости, осуществлялось при

помощи векторного анализатора цепей методом линии передачи в коаксиальном волноводе в диапазоне частот 1 – 18 ГГц. На основе полученных экспериментальных данных в дальнейшем проводилось построение модели поглотителей и выявление оптимальных концентраций углеродных наноструктур, требуемых для обеспечения эффективного ослабления отраженного электромагнитного сигнала.

Геометрические параметры поглотителя подбирались на основе расчёта по формуле вертикального перемещения луча в поглощающей полости, позволяющей определить N минимальное количество переотражений плоской волны до её полного выхода из полости:

$$h_n = \frac{2(H - \sum_{i=1}^n h_i) \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{\left(\operatorname{tg} \theta_{n-1} + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}\right)}, \quad (1)$$

где $\theta_{n-1} = \alpha(n - 1) + \theta$,

α – угол основания пирамиды,

θ – угол падения волны,

H – высота пирамиды.

В качестве поглощающих материалов рассеивающего типа были подобраны конфигурации, состоящие из массива пирамид высотой 75 мм, длиной основания 25 мм и толщиной подложки 25 мм, рабочие частоты от 10÷12 ГГц, а также РПМ в виде массива пирамид высотой 190 мм, длиной основания 60 мм, толщиной подложки 60 мм с рабочими частотами от 1 ГГц.

На основе результатов моделирования было установлено, что для изготовления эффективного поглотителя пирамидального типа достаточно всего 1 ÷ 2 вес.% МУНТ «Таунит-МД». Расчётные значения уровня ослабления отраженного электромагнитного излучения (ЭМИ) по результатам моделирования составили -45 дБ для 100- миллиметрового поглотителя и -50 дБ для 250-миллиметрового поглотителя при нормальном падении на рабочих частотах.

Результаты натурных измерений установили полное согласование с результатами моделирования и продемонстрировали широкополосное ослабление отраженного электромагнитного излучения на уровне -40 – - 45 дБ для 100 мм РПМ и -50 – - 60 дБ для 250 мм РПМ при нормальном падении ЭМИ (рисунок 4).

Анализ результатов испытаний на циклическое осевое сжатие РПМ при давлении 10 кПа в цикле из 200 повторений продемонстрировал полное сохранение свойств по экранированию ЭМИ в исследуемом диапазоне. В то же время у промышленного образца, использующего 60 вес.% технического

углерода в качестве наполнителя, наблюдается снижение эффективности ослабления прошедшего излучения на -20 дБ в исследуемом диапазоне частот.

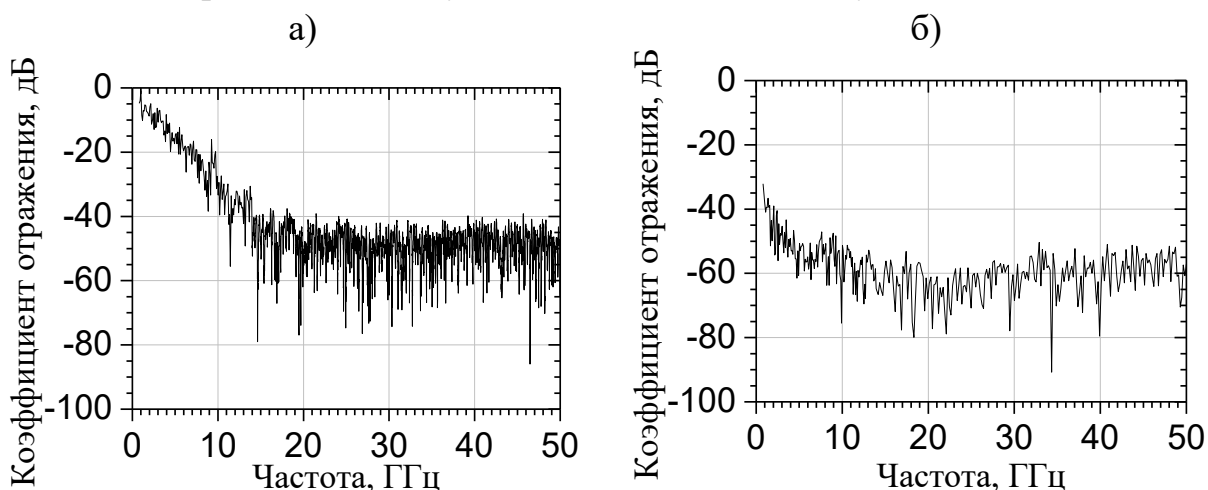


Рисунок 4 – Частотная зависимость ослабления коэффициента отражения образцами РПМ на металлической подложке:

- а) 100-мм РПМ с 2 вес.% УНТ «Таунит-МД»,**
- б) 250-мм РПМ с 2 вес.% УНТ «Таунит-МД»**

С помощью методов программного моделирования, продемонстрирована возможность применения разработанных РПМ, различных геометрических вариаций, в качестве рабочих элементов малогабаритных безэховых камер в частотном диапазоне от 1 ГГц. Амплитуда паразитного сигнала в безэховой зоне подобной камеры на 30 дБ меньше основного электромагнитного излучения.

В **пятой главе** диссертации описаны методы создания антибликовых и антиотражающих в ближнем ИК-диапазоне покрытий на основе эпоксидных полимеров, модифицированных углеродными наноструктурами, для применения в оптических и оптоэлектронных системах космического и наземного базирования. В качестве основного подхода при создании данных материалов рассматривалась целенаправленная модификация топологии поверхности покрытий, направленная на согласование показателей преломления на границе воздух/поверхность.

Первый метод заключался в формировании периодической структуры на поверхности композита *импульсным ND:YAG лазером* с длиной волны 1064 нм, частотой импульсов 50 Гц и плотностью энергии от 19 до 21 мДж/см². Сфокусированный лазерный пучок многократно проходил по образцу, формируя параллельные бороздки. При повторном воздействии в перпендикулярном направлении профилирование поверхности представляло собой массив пирамид (рисунок 5). Анализ спектральной зависимости коэффициента зеркального отражения продемонстрировал существенное снижение величины коэффициента по сравнению с исходным полимером вплоть до 0,03% в видимом диапазоне (400 – 800 нм) и до 0,01% в ближнем ИК (1000 – 2500 нм).

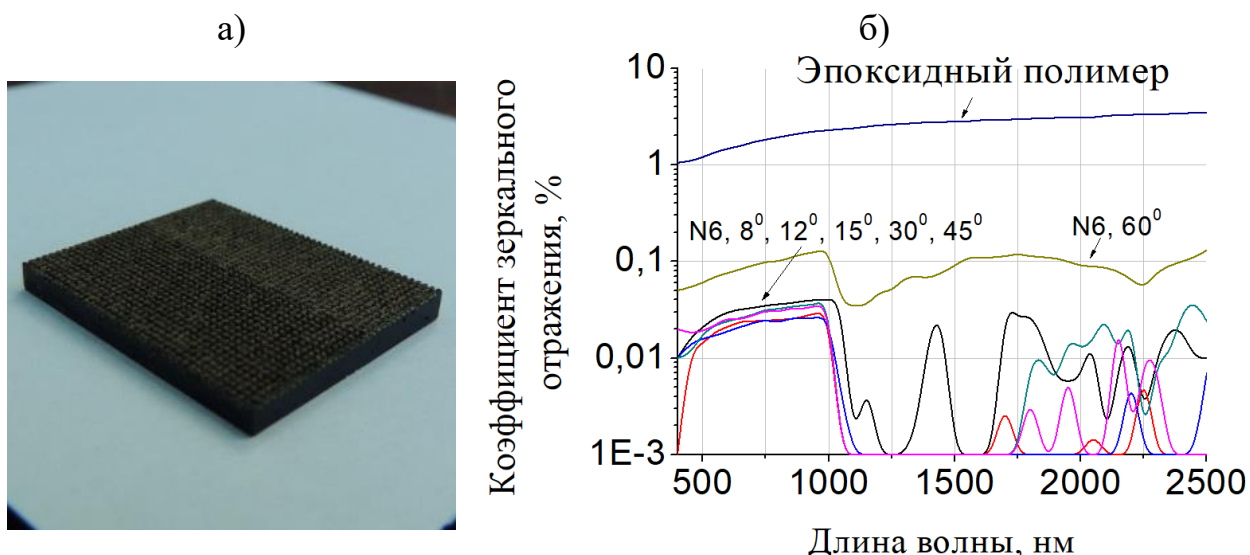


Рисунок 5 – Образец композитного материала с профилированной поверхностью: а) внешний вид, б) спектр отражения

При втором методе целенаправленной модификации поверхности образцы композитов подвергались воздействию потоков атомарного кислорода со средней энергией ионов 20 – 40 эВ и флуенсом 3×10^{21} атом/см² с помощью магнитоплазодинамического ускорителя с внешним магнитным полем.

Облучение поверхности композита потоками атомарного кислорода приводит к формированию пространственной неоднородности поверхности за счет образования развитого эрозионного рельефа, направленного навстречу потоку атомарного кислорода. Продемонстрировано, что формирование развитого эрозионного рельефа приводит к заметному снижению отражательной способности композитов с углеродными наполнителями в спектральной области 0,2 – 2,5 мкм. Наиболее низкие коэффициенты диффузного (<1%) и зеркального (<0,02%) отражения характерны для облученных полимеров с углеродными нанотрубками (рисунок 6).

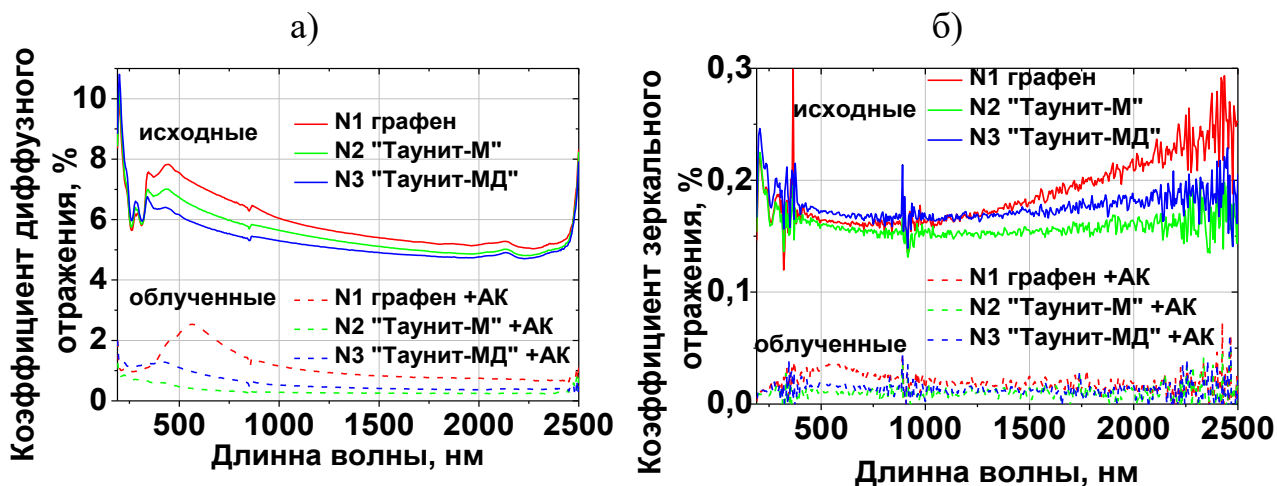


Рисунок 6 – Спектры диффузного (А) и зеркального (Б) отражения образцов композитов с углеродными наноструктурами

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработан и апробирован метод создания полимерных композитных материалов, модифицированных углеродными наноструктурами. На основе анализа фазо-частотной характеристики композитов установлено, что при варьировании способа функциональной обработки углеродных наноматериалов, параметров ультразвукового диспергирования, типа и концентрации добавок, достигается возможность управления электропроводящими свойствами композитов [6, 15, 33]

2. Продемонстрировано, что для достижения наибольших значений удельной электропроводности композитного материала системы эпоксидный полимер/УНТ, в сочетании со сфокусированным ультразвуковым воздействием на частоте 24 кГц и в пределах мощности 20 – 100 Вт, необходимо предварительно проводить функционализацию поверхности углеродных нанотрубок с концентрацией 1 – 10 г/л в растворах неионогенных поверхностно-активных веществ. Данный метод позволяет добиться постоянного значения проводимости в 0,01 См/см в диапазоне частот от 50 Гц до 1 МГц при концентрации наполнителя 0,5 вес.% [1, 2, 5, 6, 13, 14, 19].

3. На основе зарегистрированных частотных и температурных зависимостей электропроводности композитных материалов системы эпоксидный полимер/УНМ установлено наличие механизмов туннелирования носителей заряда диапазон от 20 К до ~100 К, механизма прыжковой проводимости – диапазон от ~100 К до ~250 К, а также механизма активированных диэлектрических потерь – диапазон от 250 К до 375 К, вносящих вклад в общую проводимость [1, 2, 3, 6, 14, 19].

4. Основываясь на разработанных методах получения полимерных композитов с добавлением углеродных наноструктур с прогнозируемыми электрофизическими параметрами, изготовлены эффективные широкополосные радиопоглощающие материалы, представляющие собой массив пирамидальных структур, сформированных из пенополиуретановой матрицы, и пропитанные высокодисперсным раствором многослойных углеродных нанотрубок «Таунит-МД» концентрацией 2 вес.%. Мощность отраженного сигнала от таких материалов при нормальном падении ЭМИ имеет значения менее - 40 – - 50 дБ в рабочем диапазоне частот (1 – 50 ГГц) [7, 11, 12, 23, 26, 28, 31, 34, 35, 37].

5. Для изготовленных образцов пирамидальных РПМ с 2 вес. % МУНТ «Таунит-МД» продемонстрировано сохранение свойств поглощения электромагнитного излучения после цикла механических испытаний на осевое сжатие. Сравнительные результаты для пирамидального РПМ с техническим

углеродом продемонстрировали ухудшение характеристики поглощения электромагнитного излучения на – 20 дБ [7, 12, 23, 26, 28, 31, 34, 35, 37].

6. Продемонстрировано наличие «размерного эффекта» в композитных материалах с углеродными нанотрубками. При исследовании электропроводящих свойств композитов на основе эпоксидных полимеров с добавлением углеродных нанотрубок, при равных концентрациях добавки и схожести структуры массивов нанотрубок (их запутанности), наблюдались как минимум на 2 порядка большие значения электропроводности при использовании МУНТ с меньшим диаметром [1, 2, 4, 6, 10, 13, 15, 17, 18, 20, 21, 22, 30, 38].

7. Методами импульсной лазерной обработки ($\lambda = 1064$ нм, $\nu_{\text{имп}} = 50$ Гц, $W = 19 - 21$ мДж/см²) и обработкой потоками кислородной плазмы с эффективным флюенсом 3×10^{21} атом/см² поверхности композитных материалов, модифицированных углеродными наноструктурами, впервые сформированы антибликовые и антиотражающие покрытия. Коэффициенты зеркального и диффузного отражения света в УФ, видимом и ближнем ИК-диапазоне (190 – 2500 нм) сформированных материалов не превышают 0,02% и 1% соответственно [4, 8, 9, 22, 25, 32, 36, 39].

Рекомендации по практическому использованию результатов:

Разработанные в рамках выполнения диссертационной работы методы формирования функциональных композитных материалов системы полимер/углеродные наноструктуры могут быть применены на промышленных предприятиях и в исследовательских лабораториях РФ и РБ (ОАО «ИНТЕГРАЛ», ОАО «Пеленг», МНИИРМ) для создания экранирующих материалов, устраняющих влияние фонового электромагнитного шума на работоспособность приборов, а также обеспечивающих электромагнитную совместимость элементов высокочувствительных измерительных комплексов наземных и космических аппаратов. Потенциальными областями применения являются также широкополосные радиопоглощающие материалы для радиочастотных безэховых камер, обеспечивающих высокоточное тестирование работоспособности телекоммуникационных систем, построения диаграмм эффективной площади рассеяния наземных, летательных и космических объектов, проведения испытаний на электромагнитную совместимость; антибликовые покрытия для авиакосмических аппаратов, беспилотных летательных систем. Результаты используются в учебном процессе на факультете радиофизики и компьютерных технологий БГУ (получен 1 акт о внедрении в учебный процесс).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТУПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. A composite based on epoxy polymer and carbon nanotubes: structure, optical properties and interaction with microwave radiation / F.F. Komarov, A.G. Tkachev, O.V. Milchanin, I.D. Parfimovich, M.V. Grinchenko, I.N. Parkhomenko, D.S. Vychenok // *Advanced Materials & Technologies*. – 2017. – № 2. – P. 19-25.
2. Absorption and reflectance spectra of microwave radiation by an epoxy resin composite with multi-walled carbon nanotubes / F.F. Komarov, O.V. Milchanin, I.D. Parfimovich, M.V. Grinchenko, I.N. Parkhomenko, A.G. Tkachev, D.S. Vychenok // *Journal of Applied Spectroscopy*. – 2017. – Vol. 84, № 4. – P. 596–602.
3. Микроволновые характеристики композитного материала на основе эпоксидного полимера с добавлением графеновых и ферритных наноматериалов / И.Д. Парфимович, Ф.Ф. Комаров, О.В. Мильчанин, А.Г. Ткачев, А.В. Щегольков // *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. – 2019. – Т. 63, № 1. – С. 22–28.
4. Импульсная лазерная обработка поверхности композитного материала в процессах формирования широкополосных антиотражающих покрытий / И.Д. Парфимович, Ф.Ф. Комаров, О.В. Мильчанин, А.Г. Ткачев, О.Р. Людчик, М.Н. Кольчевская, Р.Б. Миранович // *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. – 2020. – Т. 64, № 1. – С. 21–27.
5. Влияние углеродных нанотрубок на электропроводность реактопластов и эластомеров / А.В. Щегольков, Ф.Ф. Комаров, И.Д. Парфимович, О.В. Мильчанин, А.В. Щегольков, А.В. Хроба, А.В. Семенкова // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. – 2020. – № 3. – С. 65-71.
6. Влияние методов формирования полимерных композитных материалов с углеродными нанотрубками на механизмы электропроводности / Ф.Ф. Комаров, И.Д. Парфимович, А.Г. Ткачев, А.В. Щегольков, А.В. Щегольков, О.В. Мильчанин, В. Бондарев // *Журнал технической физики*. – 2021. – Т. 91, № 3. – С. 475-483.
7. Радиопоглощающие композитные материалы рассеивающего типа на основе углеродных нанотрубок / И.Д. Парфимович, Ф.Ф. Комаров, О.В. Мильчанин, А.В. Щегольков, А.Г. Ткачев, А.В. Щегольков // *Материаловедение*. – 2022. – № 10. – С. 24–30.
8. Воздействие потоков кислородной плазмы на полимерные нанокompозиты с углеродными наполнителями / И.Д. Парфимович,

Ф.Ф. Комаров, Л.А. Власукова, И.Н. Пархоменко, Л.С. Новиков, В.Н. Черник, Д.В. Жигулин // Поверхность. Рентгеновские синхротронные и нейтронные исследования. – 2023. – № 1. – С. 31–36.

9. Atomic oxygen exposure effect on carbon nanotubes/epoxy composites for space systems / I.N. Parkhomenko, L.A. Vlasukova, I.D. Parfimovich, F.F. Komarov, L.S. Novikov, V.N. Chernik, D.V. Zhigulin // Acta Astronautica. – 2023. – Vol. 204. – P. 124–131.

Статьи в других научных изданиях

10. Аспекты направленного синтеза углеродных нанотрубок для создания иерархических радиопоглощающих композитных материалов / А.В. Щегольков, А.В. Щегольков, И.Д. Парфимович, Е.А. Буракова, А.В. Кобелев, Т.П. Дьячкова // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2018. – Т. 80, № 4. – С. 337–343.

11. Применение углеродных нанотрубок для создания материалов поглощающих электромагнитное излучение и электродов суперконденсаторов / А.В. Щегольков, А.В. Щегольков, Ф.Ф. Комаров, И.Д. Парфимович, О.В. Мильчани, А.В. Кобелев // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2020. – Т. 82, № 1. – С. 267–272.

12. Broadband radio absorbing coating nanostructured by carbon nanotubes / I.D. Parfimovich, F.F. Komarov, V.P. Knysh, A.G. Tkachev // Journal of Advanced Materials and Technologies. – 2023. – Vol. 8, № 3. – P. 185–195.

Статьи в сборниках материалов международных научных конференций

13. Парфимович, И.Д. Формирование и исследование микро- и наноструктурированного полимерного композита на основе полимера Durofix – 2 Kit [Электронный ресурс] / И.Д. Парфимович, М.В. Гринченко // Сборник работ 72-й научной конференции студентов и аспирантов Белорусского государственного университета, Минск, 11–22 мая 2015. В 3 ч. / Бел. гос. ун-т. - Мн., 2015. – Ч. 1. – С. 418–422. – Режим доступа : <http://elib.bsu.by/handle/123456789/150328>. – Дата доступа : 17.10.2023.

14. Гринченко, М.В. Электрофизические характеристики полимерных материалов на основе эпоксидной смолы, содержащей углеродные нанотрубки [Электронный ресурс] / М.В. Гринченко, И.Д. Парфимович // Сборник работ 73-й научной конференции студентов и аспирантов Белорусского государственного университета, Минск, 16-25 мая 2016. В 3 ч. / Бел. гос. ун-т. - Мн., 2016. – Ч. 1. – С. 315–320. – Режим доступа : <http://elib.bsu.by/handle/123456789/167864>. – Дата доступа : 17.10.2023.

15. Совместное ультразвуковое и гидромеханическое диспергирование углеродных нанотрубок в эпоксидном композите / Ф.Ф. Комаров, О.В. Мильчанин, М.В. Гринченко, И.Д. Парфимович // Международная научная

конференция «Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы», Витебск, 26–29 сентября 2016 г.: материалы конференции / НАН Беларуси, Межгос. координац. совет по физике прочности и пластичности материалов, Мин. обр. Респ. Бел., БРФФИ, Витеб. обл. исп. к-т, Витеб. гос. технол. у-т, Полоцкий гос. аграрно-экон. Колледж, ИТА НАН Б. – Витебск, 2016. – С. 100–102.

16. Взаимодействие электромагнитного излучения с полимерными материалами, содержащими углеродные нанотрубки [Электронный ресурс] / М.В. Гринченко, И.Д. Парфимович, Ф.Ф. Комаров, О.В. Мильчанин, Е.С. Григорчук, А.Г. Ткачев // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 11-12 мая 2017 г. / Мин. обр. Респ. Бел., НИУ «Ин-т приклад. физич. проблем им. А.Н. Севченко» Бел. гос. ун-та; редкол.: В.И. Попечиц (гл. ред.) [и др.]. - Минск, 2017. – С. 46-48. – Режим доступа : <http://elib.bsu.by/handle/123456789/167864>. – Дата доступа : 17.10.2023.

17. Электрофизические и оптические свойства эпоксидного полимера с добавками многостенных углеродных нанотрубок [Электронный ресурс] / И.Д. Парфимович, М.В. Гринченко, Ф.Ф. Комаров, О.В. Мильчанин, Е.С. Григорчук, А.Г. Ткачев // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы IV Междунар. науч.-практич. конф., Минск, 11-12 мая 2017 г. / Мин. обр. Респ. Бел., НИУ «Ин-т приклад. физич. проблем имени А.Н. Севченко» Белорус. гос. ун-та; редкол. : В.И. Попечиц (гл. ред.) [и др.]. - Минск, 2017. – С. 114-116. – Режим доступа : <http://elib.bsu.by/handle/123456789/178651>. – Дата доступа : 17.10.2023.

18. Формирование эффективно поглощающего СВЧ излучение материала на основе полимерной матрицы с добавлением углеродных нанотрубок / И.Д. Парфимович, М.В. Гринченко, P. Zukowski, О.В. Мильчанин, K. Czarnaка, А.Г. Ткачев, Т.П. Дьячкова, Н.Р. Меметов // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 12-й Междунар. конф., Минск, 19-22 сентября 2017 г. / Мин. обр. Респ. Бел., НАН Беларуси, БРФФИ, БГУ. – Минск, 2017. – С. 263–265.

19. Влияние концентрации и типа углеродных нанотрубок в составе эпоксидного композита на его электрофизические и оптические характеристики / Ф.Ф. Комаров, А.Г. Ткачев, О.В. Мильчанин, И.Д. Парфимович, М.В. Гринченко, Н.Р. Меметов, К. Чарнака // II-я Международная научно-практическая конференция «Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение», г. Тамбов, 15–17 ноября 2017 г.: материалы конференции / Мин. обр. и науки РФ, Фонд инфраструктур. и образоват. программ РОСНАНО, Ин-т проблем химич. физики РАН, Неправит. экол. фонд

им. В.И. Вернадского, Технологич. ун-т сверхтвердых и новых углерод. м-лов, Рос.-Кит. науч.-исслед. ин-т графена, БГУ, ООО «НаноТехЦентр», Тамбов. гос. технич. ун-т. - Тамбов, 2017. – С 135–137.

20. Структурные свойства композитных материалов на основе эпоксидного полимера с многостенными углеродными нанотрубками и графеновыми слоистыми структурами / О.В. Мильчанин, Ф.Ф. Комаров, А.Г. Ткачев, Н.Р. Меметов, И.Д. Парфимович, И.Н. Пархоменко // II-я Международная научно-практическая конференция «Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение», г. Тамбов, 15–17 ноября 2017 г.: материалы конференции / Мин. обр. и науки РФ, Фонд инфраструктур. и образоват. программ РОСНАНО, Ин-т проблем химич. физики РАН, Неправит. экол. фонд им. В.И. Вернадского, Технологич. ун-т сверхтвердых и новых углерод. м-лов, Рос.-Кит. науч.-исслед. ин-т графена, БГУ, ООО «НаноТехЦентр», Тамбов. гос. технич. ун-т. - Тамбов, 2017. – С 287–289.

21. Радиопоглощающие композитные материалы на основе эпоксидного полимера с графеновыми и ферритными добавками / И.Д. Парфимович, Ф.Ф. Комаров, А.Г. Ткачев, О.В. Мильчанин, М.В. Гринченко, Н.Р. Меметов // II-я Международная научно-практическая конференция «Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение», г. Тамбов, 15–17 ноября 2017 г.: материалы конференции / Мин. обр. и науки РФ, Фонд инфраструктур. и образоват. программ РОСНАНО, Ин-т проблем химич. физики РАН, Неправит. экол. фонд им. В.И. Вернадского, Технологич. ун-т сверхтвердых и новых углерод. м-лов, Рос.-Кит. науч.-исслед. ин-т графена, БГУ, ООО «НаноТехЦентр», Тамбов. гос. технич. ун-т. - Тамбов, 2017. – С 316–318.

22. Миранович, Р.Б. Влияние топологии поверхности на оптические свойства нанокompозита на основе эпоксидного полимера с углеродными нанотрубками [Электронный ресурс] / Р.Б. Миранович, И.Д. Парфимович // 75-я научная конференция студентов и аспирантов Белорусского государственного университета : материалы конф., Минск, 14–23 мая 2018 г. В 3 ч. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В.Г. Сафонов (пред.) [и др.]. – Минск, 2018. - Ч. 3 – С. 540-543. – Режим доступа : <http://elib.bsu.by/handle/123456789/216785>. – Дата доступа : 17.10.2023.

23. Савкин, Н.А. Взаимодействие электромагнитного излучения в диапазоне 8–12 ГГц с полимерными материалами, содержащими углеродные нанотрубки [Электронный ресурс] / Н.А. Савкин, И.Д. Парфимович // 75-я научная конференция студентов и аспирантов Белорусского государственного университета : материалы конф., Минск, 14–23 мая 2018 г. В 3 ч. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В.Г. Сафонов (пред.) [и др.]. – Минск, 2018. - Ч.

3 – С. 564-568. – Режим доступа : <http://elib.bsu.by/handle/123456789/216792>. – Дата доступа : 17.10.2023.

24. Ku-Band Microwave Characterization of Composite Based on Epoxy Polymer and Multi-Walled Carbon Nanotubes / F.F. Komarov, O.V. Milchanin, I.D. Parfimovich, P.V. Kuchinski, A.G. Tkachev, A.V. Melezhik, N.R. Memetov, R.A. Stolyarov, K. Charnacka // Proceedings of the 2018 IEEE 8th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2018), Zatokas, Ukraine, September 9–14, 2018 / Ministre of Education and Science of Ukraine Sumy State University. - Sumy: Sumy State University, 2018. – P. 02CBM11 (1-5).

25. Антиотражающие композитные покрытия для видимого- и ближнего ИК- излучений / И.Д. Парфимович, Ф.Ф. Комаров, О.В. Мильчанин, П.В. Кучинский, Р.Б. Миранович, М.Н. Кольчевская, А.Г. Ткачев // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы пятой Междунар. науч.-практич. конф., Минск, 16–17 мая 2019 г. / Мин. обр. Респ. Бел., НИУ «Ин-т приклад. физич. проблем имени А.Н. Севченко» БГУ. - Минск, 2019. – С. 69–71.

26. Пирамидальные радиопоглощающие материалы с углеродными нанотрубками / И.Д. Парфимович, Ф.Ф. Комаров, О.В. Мильчанин, А.Г. Будай, В.П. Кныш, А.Г. Ткачев, Н.А. Савкин, Е.С. Григорчук // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы пятой Междунар. науч.-практич. конф., Минск, 16–17 мая 2019 г. / Мин. обр. Респ. Бел., НИУ «Ин-т приклад. физич. проблем имени А.Н. Севченко» БГУ. - Минск, 2019. – С. 190–192.

27. Использование комбинации методов просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии для структурной характеристики углеродных наноматериалов / О.В. Мильчанин, Ф.Ф. Комаров, И.Д. Парфимович, А.Г. Ткачев, А.В. Щегольков // Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение (GRS-2019) : материалы III Междунар. науч.-практич. конф., Тамбов, 13–15 ноября 2019 г. / Мин. науки и высш. обр. РФ, Фонд инфраструктур. и образоват. программ РОСНАНО, Ин-т проблем химич. физики РАН, Неправит. экол. фонд им. В.И. Вернадского, Технол. ин-т сверхтвердых и новых углерод. м-лов, БГУ. - Тамбов, 2019. – С. 158–159.

28. Поглотители электромагнитного излучения пирамидального типа на основе пенополиуретана с углеродными нанотрубками / И.Д. Парфимович, Ф.Ф. Комаров, О.В. Мильчанин, А.Г. Ткачев, А.В. Щегольков // Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение (GRS-2019) : материалы III Междунар. науч.-практич. конф., Тамбов, 13–15 ноября 2019 г. / Мин. науки и высш. обр. РФ, Фонд инфраструктур. и образоват. программ

РОСНАНО, Ин-т проблем химич. физики РАН, Неправит. экол. фонд им. В.И. Вернадского, Технол. ин-т сверхтвердых и новых углерод. м-лов, БГУ. - Тамбов, 2019. – С. 164–165.

29. Nanomodified Polymer Composites: Electrical Conductivity and Practical Application [Электронный ресурс] / V. Yagubov, A. Shegolkov, A. Tkachev, A. Kagdin, A. Kobelev, A. Shegolkov, I. Parfimovich // AIP Conf. Proc. – 2019. – Vol. 2101 : V International Conference for Young Scientists, Post-Graduate Students and Students, Tomsk, November 19–23, 2018: proceedings of the conference / Tomsk Polytechnic University. – P. 020012(1-6). – Режим доступа : <http://doi.org/10.1063/1.5099604>. – Дата доступа : 17.10.2023.

30. Исмаилова, А.С. Исследование структурных характеристик функционализированных углеродных нанотрубок, синтезированных на различных каталитических системах [Электронный ресурс] / А.С. Исмаилова, И.Д. Парфимович // 77-я научная конференция студентов и аспирантов Белорусского государственного университета: материалы конф., Минск, 11–22 мая 2020 г. В 3 ч. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: В.Г. Сафонов (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2020. – Ч. 1. – С. 181-184 – Режим доступа : <http://elibr.lib.bsu.by/bitstream/123456789/259894/1/181-184.pdf>. – Дата доступа : 17.10.2023.

31. Кольчевская, М.Н. Эффективный радиопоглощающий композитный материал на основе полиуретана с углеродными нанотрубками / М.Н. Кольчевская, И.Д. Парфимович, Н.А. Савкин // 77-я научная конференция студентов и аспирантов Белорусского государственного университета : материалы конф., Минск, 11–22 мая 2020 г. В 3 ч. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: В.Г. Сафонов (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2020. – Ч. 1. – С. 193-196. – Режим доступа : <http://elibr.lib.bsu.by/handle/123456789/259897>. – Дата доступа : 17.10.2023.

32. Fabrication and Pulsed Laser Modification of Antireflective Composite Materials for the Visible and Near-IR Ranges (Ch. 34) / F.F. Komarov, I.D. Parfimovich, O.V. Milchanin, A.G. Tkachev, A.V. Melezhik, N.R. Memetov, R.A. Stolyarov, O.R. Ludchik, M.N. Kolchevskaya, R.B. Miranovich // Springer Proceedings in Physics. – 2020. – Vol. 240 : Microstructure and Properties of Micro- and Nanoscale Materials, Films, and Coatings (NAP 2019), Singapore, January 29, 2020; Pogrebnjak A., Bondar O. (eds). – P. 353–359.

33. Исмаилова, А.С. Влияние концентрации поверхностно-активных веществ и типа углеродных нанотрубок на процессы формирования водных дисперсий на их основе [Электронный ресурс] / А.С. Исмаилова, И.Д. Парфимович // 78-я научная конференция студентов и аспирантов Белорусского государственного университета: материалы конф., Минск, 10–

21 мая 2021 г. В 3 ч. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В.Г. Сафонов (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2021. - Ч. 1. – С.194–197. – Режим доступа : <https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/293870/1/194-197.pdf>. – Дата доступа : 17.10.2023.

34. Радиопоглощающие композитные материалы рассеивающего типа для применений в безэховых камерах [Электронный ресурс] / И.Д. Парфимович, Ф.Ф. Комаров, М.Н. Кольчевская, О.В. Мильчанин, А.Г. Ткачев, А.В. Щегольков // Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение (GRS-2021) : материалы IV Междунар. науч.-практич. конф., Тамбов, 6-8 октября 2021 г. / Мин. науки и высш. обр. РФ, Тамбов. гос. технич. ун-т, Технологич. ин-т сверхтвердых и новых углеродных материалов, Ин-т проблем химич. физики РАН, Рос.-Китай. науч.-исслед. ин-т графена, БГУ, ООО «НаноТехЦентр». - Тамбов, 2021. – С. 18–22. – Режим доступа : https://www.tstu.ru/book/elib/pdf/2021/graphene_conf.pdf. – Дата доступа : 17.10.2023.

35. Композитные материалы с наполнителем из углеродных наноструктур для систем защиты от электромагнитных излучений / Ф.Ф. Комаров, А.Г. Ткачев, И.Д. Парфимович, М.Н. Кольчевская, В.Н. Бондарев // Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение (GRS-2021) : материалы IV Междунар. науч.-практич. конф., Тамбов, 6-8 октября 2021 г. / Мин. науки и высш. обр. РФ, Тамбов. гос. технич. ун-т, Технологич. ин-т сверхтвердых и новых углеродных материалов, Ин-т проблем химич. физики РАН, Рос.-Китай. науч.-исслед. ин-т графена, БГУ, ООО «НаноТехЦентр». - Тамбов, 2021. – С. 284-288. – Режим доступа : https://www.tstu.ru/book/elib/pdf/2021/graphene_conf.pdf. – Дата доступа : 17.10.2023.

36. Антибликовые покрытия на основе облученных атомарным кислородом полимерных композитов с углеродными нанотрубками / И.Д. Парфимович, Ф.Ф. Комаров, Л.А. Власукова, И.Н. Пархоменко, Л.С. Новиков, В.Н. Черник // Восьмой Белорусский космический конгресс : материалы конгресса, Минск, 25–27 октября 2022 г. В 2 т. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2022. – Т. 2. – С. 103–106.

37. Рассеивающие электромагнитное излучение композиты, структурированные углеродными нанотрубками / Ф.Ф. Комаров, С.С. Грабчиков, И.Д. Парфимович, В.П. Кныш, А.Г. Ткачев // Сборник докладов XII Всероссийской Научно-Технической Конференции «Электромагнитная совместимость (ЭМС)», Москва, 8–9 июня 2023 г. / АО «ТЕСТПРИБОР» совместно с АО «Кронштадт», ГО НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, при участии ФГУП ВНИИФТРИ. – М., 2023. – С. 47–56.

Тезисы докладов на научных конференциях

38. Structural characterization of carbon nanomaterials by electron microscopy / I.D. Parfimovich, F.F. Komarov, O.V. Milchanin, A.G. Tkachev, A.V. Shchegolkov // 14th International Conference “Advanced Carbon Nanostructures. ACNS’2019. School for young scientists”, Saint-Petersburg, July 1–5, 2019: book of abstracts / St. Petersburg Academic University; Nanotechnology Research and Education Centre of the Russian Academy of Sciences. – St. Peterburg, 2019. – P. 209.

39. Формирование антиотражающих композитных покрытий с углеродными наноструктурами методом импульсной лазерной обработки / Ф.Ф. Комаров, И.Д. Парфимович, О.В. Мильчанин, А.Г. Ткачев, М.Н. Кольчевская // Графен и родственные структуры : синтез, производство и применение (GRS-2019) : материалы III Междунар. науч.-практич. конф., Тамбов, 13-15 ноября 2019 г. / Мин. науки и высш. обр. РФ, Фонд инфраструктур. и образоват. программ РОСНАНО, Ин-т проблем химической физики РАН, Неправительств. экологич. фонд им. В.И. Вернадского, Технол. ин-т сверхтвердых и новых углеродных материалов, Ин-т проблем химической физики РАН, Рос.-Китайс. НИИ графена, БГУ, ООО «НаноТехЦентр», Тамбов. гос. технич. ун-т. – Тамбов, 2019. – С. 146-147.



РЕЗЮМЕ

Парфимович Иван Дмитриевич

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ МАТРИЦ С ДОБАВКАМИ НАНОРАЗМЕРНЫХ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ключевые слова: углеродные наноматериалы, нанотрубки, композитные материалы, полимер, электромагнитное излучение, радиопоглощающий материал, антибликовая поверхность.

Цель работы: установление закономерностей изменения электропроводящих свойств, характеристик поглощения и отражения электромагнитных излучений в широком спектральном диапазоне в зависимости от типа, концентрации углеродных наноматериалов и условий их наполнения в полимерные матрицы, а также формирование комплексного подхода разработки функциональных композитных материалов на основе полимерных матриц, модифицированных углеродными наноструктурами для систем защиты от электромагнитного излучения.

Методы исследования и использованная аппаратура: просвечивающая электронная микроскопия, сканирующая электронная микроскопия, частотная диэлектрическая спектроскопия, спектрофотометрия в УФ-, видимом, ближнем ИК-диапазоне, радиочастотные методы исследования.

Полученные результаты и их новизна: Разработан комплексный метод формирования функциональных композитных материалов, модифицированных углеродными наноструктурами, обеспечивающих широкополосное поглощение и экранирование электромагнитного излучения радиочастотного, ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного диапазона. Установлены закономерности влияния методов формирования композитных материалов и структурных параметров углеродных наноструктур на их электрофизические характеристики. Разработаны эффективные наноструктурированные широкополосные радиопоглощающие покрытия, отличающиеся повышенной износостойкостью и эластичностью, для применений в безэховых камерах. Впервые, методами импульсной лазерной обработки и воздействием потоков кислородной плазмы, сформированы антибликовые и антиотражающие в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном диапазонах покрытия.

Рекомендации по использованию и область применения: результаты могут быть применены для создания экранирующих и поглощающих материалов, обеспечивающих электромагнитную совместимость оптических и электронных устройств.

РЭЗІЮМЭ

Парфімовіч Іван Дзмітрыевіч

СТРУКТУРА І ЎЛАСЦІВАСЦІ РАДЫЯПАГЛЫНАЛЬНЫХ КАМПАЗІТАЎ НА АСНОВЕ ПАЛІМЕРНЫХ МАТРЫЦ З ДАДАТКАМІ НАНАРАЗМЕРНЫХ ВУГЛЕРОДНЫХ МАТЭРЫЯЛАЎ

Ключавыя словы: вугляродныя нанаматэрыялы, нанатрубкі, кампазітныя матэрыялы, палімер, электрамагнітнае выпраменьванне, радыёпаглынальны матэрыял, антыблікавая паверхня.

Мэта работы: устанаўленне заканамернасцей змянення электраправодных уласцівасцей, характарыстык паглынання і адлюстравання электрамагнітных выпраменьванняў у шырокім спектральным дыяпазоне ў залежнасці ад тыпу, канцэнтрацыі вугляродных нанаматэрыялаў і ўмоў іх нападзення ў палімерныя матрыцы, а таксама фарміраванне комплекснага даследавання функцыянальных кампазітных матэрыялаў на аснове палімерных матрыц, мадыфікаваных вугляроднымі нанаструктурамі для сістэм абароны ад электрамагнітнага выпраменьвання.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: прасвечваючая электронная мікраскапія, сканавальная электронная мікраскапія, частотная дыэлектрычная спектраскапія, спектрафотаметрыя ва УФ-, бачным, блізкім ІЧ-дыяпазоне, радыёчастотныя метады даследавання.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: Распрацаваны комплексны метады фармавання функцыянальных кампазітных матэрыялаў, мадыфікаваных вугляроднымі нанаструктурамі, якія забяспечваюць шырокапалоснае паглыннанне і экранаванне электрамагнітнага выпраменьвання радыёчастотнага, ультрафіялетавага, бачнага і блізкага інфрачырвонага спектру. Устаноўлены заканамернасці ўплыву метадаў фарміравання кампазітных матэрыялаў і структурных параметраў вугляродных нанаструктур на іх электрафізічныя характарыстыкі. Распрацаваны нанаструктураванія шырокапалосныя радыёпаглынальныя пакрыцці, якія адрозніваюцца павышанай зносаўстойлівасцю і эластычнасцю, для ўжывання ў безрэхавых камерах. Упершыню, метадамі імпульснай лазернай апрацоўкі і ўздзеяннем патокаў кіслароднай плазмы, сфарміраваны антыблікавыя і антыадбівалыя ва ўльтрафіялетавым, бачным і блізкім інфрачырвоным дыяпазонах пакрыцця.

Рэкамендацыі па ўжыванні і вобласці ўжывання: вынікі могуць быць ужытыя для стварэння экраніруючых і паглынальных матэрыялаў, якія забяспечваюць электрамагнітную сумяшчальнасць аптычных і электронных прылад.

SUMMARY

Ivan D. Parfimovich

STRUCTURE, AND PROPERTIES OF RADIO ABSORBING COMPOSITES BASED ON POLYMER MATRIXES WITH ADDITIONS OF NANOSIZED CARBON MATERIALS

Key words: carbon nanomaterials, nanotubes, composite materials, polymer, electromagnetic radiation, radio absorbing materials, anti-reflective surface.

The aim is to establish the regularities of changes in electrical conductive properties, absorption and reflection characteristics of electromagnetic radiation in a wide spectral range depending on the type, concentration of carbon nanomaterials and conditions of their filling into polymer matrices, as well as the formation of an integrated approach to the development of functional composite materials based on polymer matrices modified with carbon nanostructures for electromagnetic radiation protection systems.

Research methods and equipment used: transmission electron microscopy, scanning electron microscopy, frequency dielectric spectroscopy, spectrophotometry in the UV, visible, near IR range, radio frequency research methods.

Obtained results and novelty: A complex method has been developed for the formation of functional composite materials modified with carbon nanostructures that provide broadband absorption and shielding of electromagnetic radiation in the radio frequency, ultraviolet, visible and near infrared ranges. The regularities of influence of composite materials formation methods and structural parameters of carbon nanostructures on their electrophysical characteristics have been established. Efficient nanostructured broadband radio-absorbing coatings, characterized by increased wear resistance and elasticity, have been developed for applications in anechoic chambers. For the first time, by methods of pulsed laser processing and exposure to oxygen plasma flows, anti-reflective coatings in the ultraviolet, visible and near infrared ranges have been developed.

Recommendation for use and area of application: The results can be used to create shielding and absorbing materials that provide electromagnetic compatibility of optical and electronic devices.



Подписано в печать 16.01.2024. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Цифровая печать. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,75.
Тираж 60 экз. Заказ 15.

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.