

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права

УДК 535, 537.86, 537.876, 538.9, 620.22

**ВОЛЫНЕЦ
НАДЕЖДА ИГОРЕВНА**

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ
СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.05 – оптика

Минск – 2024

(ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ)

Научная работа выполнена в **Белорусском государственном университете и НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ**.

Научный руководитель - **Кужир Полина Павловна**,
кандидат физико-математических наук.

Официальные оппоненты: **Малевич Виталий Леонидович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры физики
УО «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»;

Самофалов Андрей Леонидович,
кандидат физико-математических наук, доцент,
декан факультета физики и информационных
технологий УО «Гомельский государственный
университет имени Ф. Скорины».

Оппонирующая организация – **ГНУ «Институт физики
имени Б.И. Степанова НАН Беларуси»**.

Защита состоится «27» сентября 2024 г. в 14.00 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.17 при Белорусском государственном университете по адресу: Минск, ул. Ленинградская, 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407.

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

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

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан « 19 » _____ 08 _____ 2024 года.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
кандидат физ.-мат. наук доцент



О. Г. Романов

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной электроники в последние десятилетия привело к появлению нового фактора, отрицательно воздействующего на работу электронных приборов и здоровье людей, называемого электромагнитным (ЭМ) «загрязнением». В научном мире признано, что потенциальная угроза влияния электромагнитного излучения на большую часть человечества превышает угрозу радиационного загрязнения. Основным способом устранения негативного воздействия ЭМ излучения является экранирование с помощью радиопоглощающих материалов (РПМ). Современный РПМ должен иметь заданный набор электрофизических свойств, определяемый его назначением. Для эффективного решения практических задач, связанных с электромагнитной совместимостью и защитой от воздействия электромагнитного излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, необходима разработка широкополосных РПМ на базе сред с высокой диэлектрической проницаемостью. Несмотря на интенсивные исследования в данной области, проводимые учеными по всему миру, проблемы, связанные с разработкой новых дешевых материалов, эффективно взаимодействующих с электромагнитным излучением в широком диапазоне частот, еще далеки от своего решения.

Прогресс в развитии методов синтеза наноструктурированных и, в частности, наноуглеродных материалов, открыл новые технологические возможности. Одним из наиболее перспективных двумерных материалов XXI века для генерации, детектирования и экранирования излучения СВЧ и ТГц диапазонов является графен, представляющий собой одноатомный слой углерода. Интерес к данному материалу связан с его уникальными электронными, оптическими и механическими свойствами, обусловленными двумерной структурой. Графен, сочетающий высокую проводимость при комнатной температуре, подвижность носителей заряда и прозрачность в видимой части спектра, способен многое предложить современной электронике. На основе графена могут быть получены тонкие, гибкие углеродные элементы высокоскоростной полностью углеродной электроники. В связи с этим, научное сообщество проявляет неослабевающий интерес к исследованиям свойств структур на основе графена и возможности их применения в качестве базовых элементов новых устройств. При этом, особое значение приобретает решение задачи взаимодействия ЭМ излучения с полученными структурами на основе графена для осуществления реальной интеграции наноразмерного устройства с макроскопическим миром. Ввиду этого, необходимость получения тонкопленочных структур на основе графена, пригодных для создания пассивных оптических элементов, приобретает особо важное значение и обуславливает *актуальность* данной работы.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Исследования, результаты которых вошли в диссертацию, проводилось в Научно-исследовательском учреждении «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета в период с 2013 по 2024 год в рамках: ГПНИ «Конвергенция» (2011–2015 гг., № ГР 20112081); ГПНИ «Конвергенция–2020» (задание 3.10.1 (2016–2020 гг., № ГР 20162325)); ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Полимерные материалы и технологии» (задание 6.23 (2016–2018 гг., № ГР 20162660) и задание 6.56 (2018–2020 гг., № ГР 20190653); ГПНИ «Конвергенция–2025» (задание 3.02.2 (2021–2025 гг., № ГР 20210879).

Исследования были поддержаны БРФФИ по договору Ф14 КОР-001 (Разработка физико-химических принципов создания новых материалов для супернакопителей на основе графена и графеноподобных наноструктур (23.05.2014–31.03.2016, № ГР 20143095)), а также РФФИ по грантам № 13-03-90915 (Взаимодействие микроволнового излучения с композиционными материалами на основе химически модифицированного графена в полимерной матрице (1.09.2013–29.11.2013 г.)) и № 15-33-50490 (Исследование процессов взаимодействия электромагнитного излучения терагерцового и микроволнового диапазонов частот с нанометровыми пленками частично окисленного и фторированного графена (15.08.2015–14.12.2015 г.)), Институт неорганической химии СО РАН, Новосибирск, РФ.

Исследования, представленные в работе, проводились в рамках международных проектов: Institutional Development of Applied Nanoelectromagnetics: Belarus in ERA Widening (EU FP7 BY-NanoERA), project FP7-266529 (2010–2013); Nanocarbon based components and materials for high frequency electronics (EU FP7 CACOMEL), project FP7-247007, FP7-PEOPLE-2009-IRSES, (2010–2014); Fundamental and Applied Electromagnetics of Nano-Carbons (FAEMCAR), project FP7-318617, FP7-PEOPLE-2012-IRSES, (2012–2017); Nano-Thin and Micro-Sized Carbons: Toward Electromagnetic Compatibility Application (NAMICEMC), project FP7-610875, FP7-PEOPLE-2013-IRSES, (2014–2017); Graphene Flagship EU FP7, project FP7-604391, work package 4 High frequency electronics, (2014–2016); Проект «ГРАФЕНКОР 1», специальное соглашение о гранте № 696656, в рамках продолжения соглашения о грантах 7РП «Революционные материалы на основе графена для информационно-компьютерных технологий и других приложений» (01.04.2016–31.03.2018); Collective Excitations in Advanced Nanostructures (CoExAN), H2020-MSCA-RISE-2014, project number: 644076 (2019–2024); Multifunctional Graphene-based

Nanocomposites with Robust Electromagnetic and Thermal Properties for 3D-printing Application, H2020 RISE Graphene 3D, project number: 734164 (2019–2024).

Тема диссертационной работы соответствует пунктам «6. Электроника» и «8. Многофункциональные материалы и технологии» перечня приоритетных направлений, определенных постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 №190 «О приоритетных направлениях научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы», и пункту 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: микро-, опто- и СВЧ-электроника, фотоника, микросенсорика; композиционные и многофункциональные материалы; наноматериалы и нанотехнологии, нанодиагностика» перечня приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 гг., установленных Указом Президента РБ от 7.05.2021 г. №156.

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель диссертационной работы заключалась в получении тонких проводящих пленок на основе графеновых наноструктур различной морфологии (многослойный графен, химически модифицированный графен (ХМГ)); создании с использованием аддитивных технологий периодических слоистых структур на основе полимерных материалов с наноуглеродными включениями; установлении закономерностей изменения характеристик поглощения и отражения электромагнитного излучения СВЧ и ТГц диапазонов в зависимости от морфологии, структуры и функционального состава графеновых наноструктур, а также определении возможностей применения полученных материалов в качестве основных рабочих элементов пассивных оптических устройств (поглотитель, экранирующее покрытие, частотный фильтр, поляризатор) в исследуемых диапазонах частот.

Для достижения поставленной цели были решены следующие *задачи*.

1) Оптимизирована методика синтеза многослойного графена. Получена серия тонких пленок на основе многослойного графена на диэлектрических подложках. Проведены измерения и интерпретация электромагнитного отклика многослойного графена, который может быть использован для создания пассивных оптических элементов на его основе в диапазонах 26–37 ГГц и свыше 100 ГГц (0.1–1.0 ТГц), изучена зависимость электромагнитного отклика полученных пленок от количества слоев многослойного графена.

2) Изготовлена серия пленок на основе химически модифицированного графена на диэлектрической подложке, обладающих различной степенью электрической проводимости. Проведен ряд экспериментальных исследований по определению поведения спектральных характеристик исследуемого ХМГ при изменении толщины пленок, полученных на его основе. Оценена возможность

перестройки электромагнитных свойств пленок в СВЧ и ТГц частотных диапазонах путем их химической и термической обработки. Определено влияние степени фторирования графена на электромагнитный отклик пленок нанометровой толщины в исследуемых диапазонах.

3) Получена серия решетчатых структур на основе фторированного графена (ФГ) для демонстрации влияния поляризации падающего электромагнитного излучения в ТГц диапазоне частот и подтверждена возможность использования таких структур в качестве поляризатора (фильтра).

4) Создана с помощью технологии 3D печати серия периодических слоистых структур, состоящих из легированного наноуглеродным наполнителем полимерного слоя, разделенного слоем диэлектрического материала. Показано, что реализованные многослойные структуры могут выступать в качестве пассивных компонентов СВЧ/ТГц фотоники, обеспечивающих высокий уровень защиты от электромагнитных помех. Определена оптимальная геометрия многослойной структуры для достижения высоких значений величины электромагнитной экранировки в СВЧ и ТГц частотных диапазонах, главным образом, за счет поглощения электромагнитного излучения. Исследовано влияние концентрации углеродного наполнителя на диэлектрические свойства периодических слоистых структур в исследуемых диапазонах.

Объектом исследований являлись:

- 1) ультратонкие пленки на основе многослойного графена;
- 2) пленки и решетчатые структуры на основе химически модифицированного графена (фторированного графена);
- 3) слоистые периодические структуры из полимерных композитных материалов на основе различных форм наноуглеродного наполнителя.

Предметом исследований выступали процессы взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ и ТГц частотных диапазонов с углеродными структурами (тонкими пленками на основе многослойного и фторированного графена, решетчатыми структурами на основе ХМГ и слоистыми периодическими структурами).

Научная новизна

Научная новизна проведенных исследований заключается в установлении закономерностей изменения электромагнитного отклика в широком спектральном диапазоне (26–37 ГГц и свыше 100 ГГц (0.1–1.0 ТГц)) тонких графеноподобных пленок и многослойных структур в зависимости от типа используемого наполнителя, которая состоит в следующем:

- 1) показано, что оптимизированная методика синтеза многослойного графена методом химического осаждения из газовой фазы позволяет получать пленки нанометровой толщины, обеспечивающие высокую эффективность

электромагнитного экранирования, а именно, поглощение в диапазоне 26–37 ГГц достигает 35–43 % в зависимости от частоты. Продемонстрирована возможность понижения коэффициента прохождения ТГц излучения при увеличении количества слоев графена;

2) впервые получены экранирующие пленки СВЧ и ТГц диапазонов частот на основе ХМГ. Показано, что, используя различные методы восстановления электрической проводимости пленок ФГ, а именно химическую или термическую обработку, а также варьируя длительность обработки, можно регулировать уровень поглощения/отражения электромагнитного излучения в исследуемых диапазонах частот. Определено, что термическая обработка (отжиг) пленок приводит к увеличению электрической проводимости и, как следствие, к росту поглощения пленки фторированного графена толщиной 120 нм до 34 % на частоте 30 ГГц. Установленные взаимосвязи между составом и способами обработки пленок, а также их электромагнитными свойствами могут быть использованы для дизайна пассивных элементов высокочастотной оптики, в частности, экранирующих покрытий;

3) предложена оригинальная методика создания высокочастотного поляризатора (фильтра) ТГц диапазона частот на основе решетчатой структуры, полученной путем гравировки маломощным ультрафиолетовым лазерным излучением пленки фторированного графена на подложке из каптоновой ленты. Экспериментально подтверждена анизотропия электромагнитных свойств решетчатых структур графен/фторированный графен в ТГц диапазоне частот. Установлено влияние параметров созданной решетчатой структуры на результирующий электромагнитный отклик;

4) методом 3D печати получены периодические слоистые структуры. Продемонстрировано, что такие структуры, содержащие один слой наноглеродного наполнителя, пропускают всего 18 % излучения СВЧ диапазона частот и способны поглотить 80–100 % излучения ТГц диапазона, в случае, когда ЭМ излучение падает со стороны полимерного слоя. Методом прессования полученных 3D печатных многослойных структур получены структуры с улучшенными механическими и электромагнитными свойствами (модуль упругости достигает 0.8 ГПа, поглощение $A = 40$ % для прессованной структуры, содержащей 3 слоя наноглеродного наполнителя).

Положения, выносимые на защиту

1) Ослабление пропускания электромагнитного излучения СВЧ и ТГц диапазонов синтезированными пленками многослойного графена, полученными методом CVD. Экранирующее покрытие из пленки на основе многослойного графена обеспечивает ослабление ЭМ сигнала на уровне 57 % за счет увеличения поглощения до уровня 43 % на частоте 26 ГГц.

(ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ)

2) Химико-физическая модификация морфологии пленок фторированного графена, впервые полученных на кварцевых подложках методом напыления из раствора, приводит к перестройке электромагнитных свойств пленок. Поглощение ЭМ излучения в диапазоне частот 26–37 ГГц достигает максимальных значений при термической обработке пленок и составляет 22 % и 34 % для пленок толщиной 50 нм и 120 нм, соответственно.

3) Экспериментально обнаружена анизотропия электромагнитных свойств решетчатых структур, полученных путем гравировки ультрафиолетовым лазерным излучением ($\lambda=380$ нм, 100 мВт) пленки фторированного графена на подложке из каптоновой ленты, и подтверждена возможность применения таких структур в качестве гибкого поляризатора терагерцового излучения.

4) Применение периодической слоистой системы, состоящей из слоев нанокремнистого наполнителя, разделенных диэлектрическим материалом, увеличивает эффективность взаимодействия электромагнитных волн СВЧ и ТГц диапазонов с углеродным наполнителем, из которого выполнены структуры. Максимальное уменьшение пропускания электромагнитного излучения СВЧ диапазона частот достигается за счет увеличения поглощения до 37 % и отражения до 60 % для структуры, содержащей 4 углеродных слоя. Максимальное поглощение прессованной многослойной структуры, содержащей 3 углеродных слоя, в СВЧ диапазоне составляет 40 %.

Личный вклад соискателя ученой степени

Основные результаты, приведенные в диссертационной работе, получены автором лично. Работа выполнена под руководством кандидата физ.-мат. наук Кузир П. П., которой была сформулирована научная идея исследования и поставлены задачи, принималось участие в обсуждении результатов, решались организационные вопросы. В обсуждении ключевых идей проведенных исследований участвовал кандидат физ.-мат. наук Батраков К. Г. Численное моделирование графеновых структур выполнено совместно с соавтором Поддубской О. Г. Исследование химически модифицированного графена осуществлялось под руководством доктора физ.-мат. наук Окотруба А. В. Синтез химически модифицированного графена проводился соавтором кандидатом хим. наук Сысоевым В. И. Результаты, полученные другими соавторами или с другими соавторами, не вошли в диссертационную работу. Подготовка материалов для публикаций в научных журналах проводилась совместно с научным руководителем и соавторами.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты, полученные в ходе исследований по теме диссертации, докладывались на 11 международных конференциях: «Functional materials and

nanotechnologies–2013» (Tartu, Estonia, 21-24 April 2013); «International Conference Nanomeeting–2013» (Минск, 28-31 мая 2013); «The Fourth International Workshop on Nanocarbon Photonics and Optoelectronics» (Полвиярви, Финляндия, 28 июля – 1 августа 2014); «International Conference Nanomeeting – 2015» (Минск, 26–29 мая 2015); «Baltic Polymer Symposium 2015» (Сигулда, Латвия, 16–18 сентября 2015); «7th international workshop on advances in nanoscience» (Szeged, Hungary, 12–15 October 2016); «19th International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications» (Verona, Italy, 11–15 September, 2017); 1-й, 2-й и 4-й российских конференциях «Графен: молекула и 2D-кристалл» (Новосибирск, РФ, 8–12 сентября 2015, 7–11 августа 2017, 14–18 августа 2023); VI Белорусско-Российском семинаре-конференции «Углеродные наноструктуры, тонкие пленки и композиты: синтез, физико-химические свойства и применения» (Минск, 2–5 ноября 2022).

Достоверность результатов подтверждается воспроизводимостью результатов, высоким уровнем используемого экспериментального оборудования, применением современных методов обработки при анализе результатов. Полученные в работе результаты внедрены в образовательный процесс Белорусского государственного университета и Белорусского государственного технологического университета, что подтверждается двумя актами о практическом использовании результатов исследования.

Опубликованность результатов диссертации

Основные научные результаты диссертационного исследования опубликованы в 18 научных работах, среди которых 7 статей в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень изданий, и в иностранных научных изданиях (общим объемом 7,8 авторского листа), а также 3 статьи в сборниках материалов научных конференций, 8 тезисов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из терминов и определений, перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, шести глав, заключения, списка использованных источников и одного приложения. Полный объем диссертации составляет 158 страниц, в том числе 55 рисунков занимают 32 страницы, 8 таблиц на 2 страницах, одно приложение занимает 3 страницы. Список использованных источников содержит 275 наименований, включая собственные публикации соискателя ученой степени (на 24 страницах).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных рецензируемых изданиях, включенных в перечень изданий, и в иностранных научных изданиях

1. Multilayered Graphene in K_a-Band: Nanoscale Coating for Aerospace Applications / P. Kuzhir, N. Volynets, S. Maksimenko, T. Kaplas, Yu. Svirko // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. – 2013. – Vol. 13, № 8. – P. 5864-5867.

2. Электромагнитные свойства фторографена в микроволновой области частот / Н.И. Волынец, О.Г. Поддубская, П.П. Кузир, Л.Г. Булушева, А.В. Окотруб // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, №8/3. – С. 156-158.

3. Electromagnetic and thermal properties of three-dimensional printed multilayered nano-carbon/poly(lactic) acid structures / A. Paddubskaya, N. Valynets, P. Kuzhir, K. Batrakov, S. Maksimenko, R. Kotsilkova, H. Velichkova, I. Petrova, I. Biró, K. Kertész, G.I. Márk, Z.E. Horváth, L.P. Biró // Journal of Applied Physics. – 2016. – Vol. 119, iss. 13. – P. 135102 (1–9).

4. Mechanical and electromagnetic properties of 3D printed hot pressed nanocarbon/poly(lactic) acid thin films / R. Kotsilkova, E. Ivanov, P. Todorov, I. Petrova, N. Volynets, A. Paddubskaya, P. Kuzhir, V. Uglov, I. Biró, K. Kertész, G.I. Márk, L.P. Biró // Journal of Applied Physics. – 2017. – Vol. 121. – P. 064105 (1-8).

5. Main principles of passive devices based on graphene and carbon films in microwave – THz frequency range / P.P. Kuzhir, A.G. Paddubskaya, N.I. Volynets, K.G. Batrakov, T. Kaplas, P. Lamberti, R. Kotsilkova, P. Lambine // Journal of Nanophotonics. – 2017. – Vol. 11 (3). – P. 032504 (1–19).

6. Fluorination as Effective Method for Tuning the Electromagnetic Response of Graphene / N.I. Valynets, A.G. Paddubskaya, P.P. Kuzhir, V.I. Sysoev, L.G. Bulusheva, A.V. Okotrub // Physica Status Solidi B. – 2018. – Vol. 255, iss. 1. – P. 1700226 (1–5).

7. Fluorinated graphene grating metasurface for terahertz dark state excitation / N.I. Valynets, A.G. Paddubskaya, V.I. Sysoev, D.V. Gorodetskiy, L.G. Bulusheva, A.V. Okotrub // Nanotechnology. – 2023. – Vol. 34. – P. 185703 (1–8).

Статьи в сборниках материалов научных конференций

8. Multilayered graphene in microwaves / P. Kuzhir, N. Volynets, S. Maksimenko, T. Kaplas, Yu. Svirko // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures: reviews and short notes of Internat. Conf. Nanomeeting – 2013,

Minsk, May 28–31, 2013 / Ed. by V.E. Borisenko [et. al]. – World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2013. – P. 210-213.

9. Fluorographene in microwaves / N. Valynets, P. Kuzhir, V. Sysoev, L. Bulusheva, A. Okotrub // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures: reviews and short notes of Internat. Conf. Nanomeeting – 2015, Minsk, May 26–29, 2015 / Ed. by V.E. Borisenko [et. al]. – World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2015. — P. 222-224.

10. THz and microwave properties of 3D-printed nanocarbon based multilayers [Electronic resource] / P. Kuzhir, A. Paddubskaya, N. Volynets, R. Kotsilkova, E. Ivanov, I. Biró, G.I. Márk, L.P. Biró, S. Maksimenko // ICEAA'17 : proc. of the 2017 Internat. Conf. on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), Verona, Italy, Sept. 11-15, 2017. – P. 822–823. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8065377>. – Date of access: 01.03.2024.

Тезисы

11. Multi-layerd graphene in microwaves / P. Kuzhir, N. Valynets, A. Paddubskaya, S. Voronovich, K. Batrakov, S. Maksimenko, T. Kaplas, Y. Svirko // Functional materials and Nanotechnologies : book of abstracts of Internet. conf, Tartu, Estonia, April 21-24, 2013 / Institute of Physics, University of Tartu, ed. by T. Plank, R. Pärna. – Tartu, 2013. – P. 78.

12. Nanocarbon based composites vs fluorinated graphene: dielectric and electromagnetic properties / N. Valynets, P. Kuzhir, A. Paddubskaya, M. Shuba, S. Maksimenko, V. Sysoev, V. Tur, L. Bulusheva, A. Okotrub, J. Macutkevici, J. Banys, F. Micciulla, L. Coderoni, S. Bellucci, V. Fierro, V. Ksenevich, N. Gorvachuk, T. Veselova, N. Poklonski, A. Wieck, G. Rinaldi, A. Celzard // Proceedings of The Fourth International Workshop on Nanocarbon Photonics and Optoelectronics (NPO 2014), Polvijärvi, Finland, 28 July – 1 August 2014 / University of Eastern Finland, Institute of Photonics, ed. by Y. Svirko, A. Obraztsov. – University of Eastern Finland, Institute of Photonics. – Joensuu, Finland, 2014. – P. 110.

13. Graphene/polymer sandwiches at high frequencies. Influence of cvd graphene quality on the electromagnetic shielding performance / K. Batrakov, P. Kuzhir, S. Maksimenko, A. Paddubskaya, N. Volynets, T. Kaplas, Yu. Svirko, M. Lobet, N. Reckinger, Ph. Lambin // Первая российская конференция «Графен: молекула и 2D-кристалл» : программа и сб. тез. докл., Новосибирск, 8-12 сентября 2015 г. / ФГБУН «Ин-т неорганич. химии им. А.В. Николаева СО РАН», ФГБУН «Ин-т катализа им. Г.К. Борескова СО РАН», ФГБУН «Ин-т физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН», ФГБУН «Ин-т общей и неорганич. химии им. Н.С. Курнакова РАН», ФГАОУ ВО «Новосиб. нац. исслед. гос. ун-т». - Новосибирск, 2015. – С. 30.

14. Graphene/polymer sandwiches at high frequencies. Influence of cvd graphene quality on the lectromagnetic shielding performance / K. Batrakov, P. Kuzhir, S. Maksimenko, A. Paddubskaya, N. Volynets, T. Kaplas, Yu. Svirko, M. Lobet, N. Reckinger, Ph. Lambin // Baltic Polymer Symposium – 2015 : programme and proc., Sigulda, Latvia, Sept. 16-18 2015 / Riga Technical University, Institute of Polymer Materials. – Riga, 2015. – P. 36.

15. Carbonaceous nano-films for microwave shielding applications [Electronic resource] / P. Kuzhir, A. Paddubskaya, N. Valynets, K. Batrakov, S. Maksimenko, T. Kaplas, Y. Svirko // SIWAN7. 7th Szeged International Workshop on Advances in Nanoscience, Szeged, Hungary, October 12-15, 2016. – P. 40. – Mode of access: https://publicatio.bibl.u-szeged.hu/26741/1/SIWAN_2016_3127600.pdf. – Date of access: 01.03.2024.

16. Углеродные 2D поверхности в задачах электромагнитной совместимости 5G / П.П. Кужир, О.Г. Поддубская, Н.И. Волынец, К.Г. Батраков, С.А. Максименко, Т. Каплас, Ю.П. Свирко // ГРАФЕН. Молекула и 2D-кристалл : программа и сб. тез. Второй российской конф., Новосибирск, 7-11 авг. 2017 г. / ФГБУН «Ин-т неорганич. химии им. А.В. Николаева СО РАН», ФГБУН «Ин-т катализа им. Г.К. Борескова СО РАН», ФГБУН «Ин-т физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН», ФГБУН «Ин-т общей и неорганич. химии им. Н.С. Курнакова РАН», ФГАОУ ВО «Новосиб. нац. исслед. гос. ун-т». – Новосибирск, 2017. – С. 77.

17. Решетчатая структура на основе фторированного графена в качестве поляризатора ТГц излучения [Электронный ресурс] / Н.И. Волынец, О.Г. Поддубская, В.И. Сысоев, Д.В. Городецкий, Л.Г. Булушева, А.В. Окотруб // Углеродные наноструктуры, тонкие пленки и композиты: синтез, физико-химические свойства и применения : тез. докл. VI Белорус.-Рос. семинара-конф., Минск, 2–5 нояб. 2022 г. / Белорус. гос. ун-т, Ин-т ядерных проблем БГУ, Нац. исследоват. Томский гос. ун-т ; редкол.: С.А. Максименко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2022. – С. 21. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

18. Гибкие 2D и 3D структуры на основе графена для ТГц фотоники / Н.И. Волынец, О.Г. Поддубская, В.И. Сысоев, Д.В. Городецкий, Л.Г. Булушева, А.В. Окотруб // Графен: молекула и 2D кристалл : сб. тез. докл. Четвертой российской конф., Новосибирск, 14-18 авг. 2023 г. / ФГАОУ ВО «Новосиб. нац. исслед. гос. ун-т», ФГБУН «Ин-т неорганич. химии им. А.В. Николаева СО РАН», ФГБУН «Ин-т катализа им. Г.К. Борескова СО РАН», ФГБУН «Ин-т физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН», ФГБУН «Ин-т общей и неорганич. химии им. Н.С. Курнакова РАН», СО РАН. – Новосибирск, 2023. – С. 23.



РЕЗЮМЕ

Волынец Надежда Игоревна

Электромагнитные свойства тонкопленочных структур на основе графена

Ключевые слова: тонкопленочные структуры, графен, электромагнитные свойства, пассивные оптические элементы, СВЧ и ТГц диапазоны частот.

Цель работы: получить тонкие проводящие пленки на основе графеновых наноструктур различной морфологии (многослойный графен, химически модифицированный графен); создать с использованием аддитивных технологий периодические слоистые структуры на основе полимерных материалов с нанougлеродными включениями; установить закономерности изменения характеристик поглощения и отражения электромагнитного излучения СВЧ и ТГц диапазонов в зависимости от морфологии, структуры и функционального состава графеновых наноструктур, а также определить возможность применения полученных материалов в качестве основных рабочих элементов пассивных оптических устройств (поглотитель, защитный экран, фильтр, поляризатор) исследуемых диапазонов частот.

Методы исследования и использованная аппаратура: универсальная трубчатая печь Carbolite Gero; лазерный гравер, оснащенный УФ лазером; 3D принтер. Спектроскопические и микроскопические методы исследования. Оборудование для анализа высокочастотного отклика полученных структур: скалярный анализатор цепей P2 – 408 P, терагерцовый спектрометр (T-SPEC Exspla) с возможностью измерения ЭМ отклика в режиме на прохождение и на отражение, а также анализа угловых и поляризационных зависимостей.

Полученные результаты и их новизна: 1) впервые получены экранирующие пленки на основе графена и химически модифицированного графена для СВЧ и ТГц диапазонов частот, исследованы их электромагнитные характеристики; 2) впервые получены тонкие поляризационно-чувствительные компоненты (поляризатор или фильтр) ТГц диапазона частот на основе решетчатых структур из пленки фторированного графена; 3) установлена зависимость электромагнитного отклика периодической системы слоев, обладающих различной электрической проводимостью, от ее структурных параметров.

Рекомендации по использованию и область применения: результаты проведенных исследований могут быть использованы для создания функциональных покрытий, эффективно взаимодействующих с электромагнитным излучением СВЧ и ТГц диапазонов частот. Полученные нанометровые пленки на основе фторированного графена могут быть использованы в областях, связанных с экранировкой в СВЧ диапазоне, а также в качестве поляризатора (фильтра) ТГц излучения. Пленки на основе графена могут быть использованы при разработке детекторов и широкополосных поглотителей.

РЭЗЮМЕ

Валынец Надзея Ігараўна

Электрамагнітныя ўласцівасці тонкапленкавых структур на аснове графену

Ключавыя словы: тонкапленкавыя структуры, графен, электрамагнітныя ўласцівасці, пасіўныя аптычныя элементы, звышвысокачастотны (ЗВЧ), ТГц дыяпазон частот.

Мэта працы: атрымаць тонкія электраправодныя плёнкi на аснове графенавых нанаструктур рознай марфалогіі (шматслойны графен, хімічна мадыфікаваны графен); стварыць з выкарыстаннем адытыўных тэхналогій перыядычныя слаістыя структуры на аснове палімерных матэрыялаў з нанавугляроднымі ўключэннямі; ўсталяваць заканамернасці змены характарыстак паглынання і адлюстравання электрамагнітнага выпраменьвання ЗВЧ і ТГц дыяпазонаў ў залежнасці ад марфалогіі, структуры і функцыянальнага складу графенавых нанаструктур, а таксама вызначыць магчымасць ужывання атрыманых матэрыялаў у якасці пасіўных аптычных элементаў (паглынальнік, ахоўны экран, фільтр, палярызатар) ЗВЧ і ТГц дыяпазонах частот.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: ўніверсальная трубчатая печ Carbolite Gero; лазерны гравёр, абсталяваны УФ лазерам; 3D прынтар. Спектраскапічныя і мікраскапічныя метады даследавання. Абсталяванне для аналізу высокачастотных ўласцівасцяў атрыманых структур: скалярны аналізатар цэп P2 – 408 P, ТГц спектрометр (T-SPEC Exspla) з магчымасцю вымярэння ЭМ ўласцівасцяў ў рэжыме праходжання і адлюстравання, а таксама аналізу вуглавых і палярызацыйных залежнасцей.

Атрыманы вынікі і іх навізна: 1) упершыню атрыманы плёнкi, якія экраніруюць вылучэнне ЗВЧ і ТГц дыяпазона частот на аснове графену і хімічна мадыфікаванага графену, даследаваны іх электрамагнітныя характарыстыкі, 2) упершыню атрыманы тонкія палярызацыйна-адчувальныя кампаненты (палярызатар або фільтр) ТГц дыяпазону частот на аснове рашоткавай структуры з плёнкi фтарыраванага графену, 3) устаноўлены ўзаемасувязі паміж складам перыядычных слаістых структур з углеродным напаўняльнікам і іх электрамагнітнымі ўласцівасцямі.

Рэкамендацыі па выкарыстанню і галіна ўжывання: вынікі праведзенага даследавання могуць быць выкарыстаны для стварэння функцыянальных пакрыццяў, эфектыўна ўзаемадзейнічаючых з электрамагнітным вылучэннем ЗВЧ і ТГц дыяпазону частот. Атрыманыя нанаметровыя плёнкi на аснове фтарыраванага графена могуць быць выкарыстаны для антыстатычнай экраніроўкі ў дыяпазоне ЗВЧ, а таксама ў якасці палярызатара (фільтра) ТГц вылучэння. Плёнкi на аснове графену могуць быць выкарыстаны пры распрацоўцы дэтэктараў і шырокапалосных паглынальнікаў.

SUMMARY

Valynets Nadzeya

Electromagnetic properties of graphene-based thin films

Keywords: graphene films, electromagnetic properties, passive optical elements, microwave optics, terahertz optics.

The goal of the present research is to obtain thin conductive films based on graphene nanostructures of various morphologies (multilayer graphene, chemically modified graphene); to create periodic layered structures based on polymer materials with nanocarbon inclusions using additive technologies; to establish changes in the characteristics of absorption and reflection of electromagnetic radiation in the microwave and THz ranges depending on the morphology, inner structure and functional composition of graphene nanostructures, as well as to determine the possibility of using the obtained materials as passive optical elements (absorbers, electromagnetic shields, filters, polarizers, etc.) in microwave and THz frequency ranges.

Research methods: the synthesis of graphene by chemical vapor deposition method was performed using Carbolite Gero universal furnace, the profiling of fluorinated graphene (FG) films was done using a laser engraver with ultraviolet laser, periodic layered structures were prepared using filament deposition 3D printer. Equipment for spectroscopic and microscopic characterization. The high-frequency response of the obtained structures was investigated by means of scalar network analyzer R2-408R and terahertz spectrometer (T-SPEC Expla) with the possibility of measuring the EM response in the transmission and reflection modes, as well as the angular and polarization dependencies characterization.

Obtained results and their novelty: 1) shielding films for microwave and THz frequency ranges based on chemically modified graphene were obtained, their electromagnetic characteristics were studied; 2) thin polarization-sensitive components (polarizers or filters) in the THz frequency range were created using the lattice structures made of fluorinated graphene film; 3) the relations between composition of periodic layered structures with carbon filler and their electromagnetic properties. The relation between the electromagnetic properties of the system of periodic layers with different conductivity and its structural parameters was established.

Recommendations for use and field of application: the results of the study can be used for the creation of functional coatings that effectively interact with electromagnetic radiation in the microwave and THz frequency ranges. The obtained films based on fluorinated graphene can be used for electromagnetic shielding in the microwave range and as polarizers or filters in the THz range. Graphene films can be used to achieve broadband electromagnetic shielding in protected electronic circuits or to solve the problem of electromagnetic pollution.

