



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИТ СО РАН
академик РАН Д.М. Маркович

«24» июня 2024 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)**

Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук «Термоакустика графеновых покрытий и влияние графенового покрытия на теплоотдачу» выполнена в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. В период подготовки диссертации соискатель Бойко Евгений Викторович работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН в Лаборатории синтеза новых материалов. В 2018 г. окончил магистратуру Новосибирского государственного университета по направлению подготовки 03.04.02 «Физика». В 2022 году окончил аспирантуру Новосибирского государственного университета по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия» по специальности 1.3.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

По итогам обсуждения принято следующее **заключение**:

Актуальность работы. Активное изучение свойств новой аллотропной модификации углерода — графена стали причиной возникновения на его основе широкого класса композитов и функциональных покрытий для модификации поверхностей, так как компоненты на основе графена способны выдерживать значительные энергетические нагрузки, а также обладают высокой химической устойчивостью к агрессивным средам. Особенный интерес представляют два направления использования графена: в качестве модификатора теплофизических свойств материалов и в качестве самостоятельного активного термоакустического элемента.

В первом случае само по себе графеновое покрытие не добавляет свойств материалу подложке. Обладая высоким коэффициентом теплопроводности, низкой теплоемкостью в сочетании с чрезвычайно малой толщиной графеновое покрытие фактически не оказывает влияние на теплообмен с внешней средой. Однако модификация свойств поверхности обусловлено косвенным воздействием графенового покрытия. Так, например, конвективный теплообмен металлического изделия, покрытого графеновым слоем, не изменяется. Но графен, будучи газонепроницаемым, выполняет защитную функцию и предотвращает диффузию молекул кислорода к поверхности металла и, соответственно, последующего процесса окисления. Чистая неокисленная гладкая поверхность металла обладает малым значением степени черноты. Графеновое покрытие предотвращает изменение степени черноты, что в свою очередь, оказывает влияние на лучистую теплоотдачу в окружающую среду. Подобные свойства графенового покрытия открывают перспективы его использования в микро- и нанoeлектронике, где требуется интеграция с другими элементами, сохраняя при этом их основные свойства без изменений. Следует отметить, что выдающиеся свойства графена не могут быть использованы в полной мере из-за наличия дефектов в самом графеновом покрытии. Большинство приложений подразумевают использование поликристаллического графена в качестве функционализирующего покрытия металлов, полимеров. И хотя вопросы теплообмена в подобных системах играют чрезвычайно важную роль — на сегодняшний день они изучены слабо.

Второй случай — использование графена не как функционального покрытия, а в качестве самостоятельного активного термоакустического элемента или термофона. Главное отличие термофонов — устройств, в основе работы которых лежит явление термоакустики, или преобразования тепла в звук, от обычных источников звука, например, динамиков, пьезопреобразователей — полное отсутствие механически подвижных элементов в конструкции устройства. Данное обстоятельство приводит к тому, что амплитудно-частотная характеристика термофонов является однородной в широком частотном диапазоне (до 1 МГц). Для максимизации коэффициента полезного действия, термоакустическое устройство должно сочетать в себе ряд свойств:

а) для генерации акустических волн, активный элемент должен характеризоваться низким показателем теплоемкости;

б) токопроводящий слой должен обеспечивать однородное тепловыделение по всей поверхности;

в) подложка должна обеспечивать минимальные кондуктивные тепловые потери.

Графен является идеальным кандидатом под вышеописанные требования: будучи двухмерной структурой, с толщиной около 3 ангстрем, графен имеет минимальную теплоёмкость по сравнению с другими материалами. Для термоакустики наиболее подходящим является графен, получаемый методом химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ). Данный метод позволяет контролировать количество слоёв и площадь покрытия, что в свою очередь влияет на общую теплоёмкость графеновой плёнки и вольтамперные характеристики соответственно. Графеновое покрытие, полученное ХОГФ методом, является поликристаллическим. В работе [Smovzh et al. 2020] показано, что при протекании электрического тока через поликристаллическое покрытие графена возникает неравномерное температурное распределение в пределах отдельно взятых кристаллов графена: периферия кристалла графена имеет более высокую температуру по сравнению с его центром и подобный перепад температур может достигать десятков градусов, что, в свою очередь, может влиять на акустическое поле у поверхности графена. В основе существующих теоретических моделей термоакустического излучения графена лежит предположение, что тепло в графеновом покрытии выделяется равномерно и особенности тепловыделения в кристаллических зернах графена не рассматриваются. Очевидно, что необходима более точная модель, учитывающая поликристаллическую структуру ХОГФ графена для описания термоакустического излучения.

Таким образом, в данной работе внимание сосредоточено на исследовании влияния поликристаллического ХОГФ графена на конвективный и радиационный теплообмен, а также исследовании формируемого звукового поля при термоакустическом эффекте в композитах на основе графена.

Целями настоящей работы являются:

1. Разработка технологии нанесения графенового покрытия на поверхности различных материалов и различной геометрии;
2. Исследование термоакустики графеновых композитов;
3. Исследование эффективности графенового покрытия в управлении теплоотдачей в окружающую среду в режимах радиационно-конвективного теплообмена.

В соответствии с поставленными целями необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать метод создания металлических, полимерных и стеклянных композитов на основе поликристаллической графеновой пленки, полученной методом химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ).
2. Исследовать влияние неравномерного нагрева поверхности поликристаллического графена на интенсивность создаваемого звука в условиях термоакустики.
3. Исследовать процессы лучисто-конвективной теплоотдачи в окружающую среду нагретых медных цилиндров с графеновым покрытием, включая определение степени черноты поверхности образцов.

Научная новизна.

1. Развита и отработана методика синтеза графенового покрытия на металлических образцах и переноса на полимерные и стеклянные образцы.
2. Исследован термоакустический эффект в графен-полимерных и графен-стеклянных композитах. Впервые экспериментально изучен вклад механических колебаний поверхности композитов при генерации звука.
3. Впервые исследовано влияние неравномерного прогрева кристаллов графена на формирование звукового поля вблизи поверхности термоакустического преобразователя.
4. Исследованы защитные свойства графена для предотвращения окисления поверхности металла. Исследовано изменение степени черноты медно-графеновых композитов с ростом температуры. Проведено исследование влияние графенового покрытия на процессы лучистой и конвективной теплоотдачи от металлических цилиндров в окружающую газовую среду.

Практическая значимость.

Научная значимость работы, состоит в развитии подходов к модификации теплофизических свойств с использованием графеновых покрытий и разработке теоретических моделей теплообмена графеновых пленок с окружающей средой. Практически показано, что графеновое покрытие может эффективно использоваться в качестве покрытия стабилизирующего степень черноты тел в диапазоне температур до 260 °С, что может быть востребовано в современных теплообменных устройствах и антеннах. Полученные экспериментальные и теоретические данные могут быть использованы при изготовлении термоакустических преобразователей на основе поликристаллического графена.

Положения, выносимые на защиту.

1. Результаты разработки метода создания металлических, полимерных и стеклянных композитов на основе поликристаллической графеновой пленки, полученной методом химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ).
2. Результаты исследований влияния неравномерного нагрева поверхности поликристаллического графена на интенсивность звука, формируемого в результате термоакустического эффекта.
3. Экспериментальные данные об амплитуде механических колебаний поверхности графенового композита при термоакустическом эффекте.
4. Результаты исследования влияния графенового покрытия на степени черноты медных образцов и на процессы лучисто-конвективной теплоотдачи медных образцов в окружающую среду.

Достоверность полученных результатов обеспечена использованием современных аналитических методов, стандартных экспериментальных методик, оценкой величин погрешностей, воспроизводимостью результатов, проведением калибровочных измерений, сравнением с известными в литературе экспериментальными, аналитическими и численными результатами.

Личный вклад автора

Основные научные результаты, включенные в диссертацию и выносимые на защиту, получены соискателем лично. Постановка задач исследования проводилась

диссертантом лично и в соавторстве с коллегами д.ф.-м.н. Д.В. Смовж, к.ф.-м.н. И.А. Костогруд, к.ф.-м.н. А.А. Пильник, П.Е. Маточкин. Автор принимал непосредственное участие в проектировании, изготовлении и запуске экспериментальных установок, проведении экспериментальных исследований, анализе экспериментальных данных, подготовке публикаций по результатам исследований.

Публикации автора по материалам диссертации в изданиях из перечня ВАК России

1. D. V. Smovzh et al., "Joule heater based on single-layer graphene" // Nanotechnology. – 2020. – Т. 31. – №. 33. – С. 335704.
2. E. V. Boyko, I. A. Kostogrud, I. A. Bezrukov, A. S. Krivenko, and D. V. Smovzh, "The influence of the crystallographic orientation of the copper catalytic substrate crystallites on the mechanical transfer of graphene" // Material Research Express. – 2019. – Т. 6. – №. 12. – С. 125628.
3. E. V. Boyko, I. A. Kostogrud, A. A. Pilnik, and D. V. Smovzh, "Thermoacoustics and Temperature Distribution on the Surface of a Polymer-Graphene Composite" // International Journal of Thermophysics. – 2022. – Т. 43. – №. 2. – С. 1–10.
4. Д.В. Смовж, И.А. Костогруд, Е.В. Бойко, П.Е. Маточкин, И.А. Безруков, А.С. Кривенко. «Синтез графена методом химического осаждения из газовой фазы и его перенос на полимер» // Прикладная механика и техническая физика. – 2020. – №5
5. I. A. Kostogrud, E. V. Boyko, and D. V. Smovzh, "The main sources of graphene damage at transfer from copper to PET/EVA polymer" // Materials Chemistry and Physics. – 2018. – Т. 219. – С. 67–73.
6. I. A. Kostogrud, E. V. Boyko, and D. V. Smovzh, "CVD Graphene Transfer from Copper Substrate to Polymer" // Materials Today: Proceedings. – 2017. – Т. 4. – №. 11. – С. 11476–11479.
7. D. V. Smovzh, E. V. Boyko, and I. A. Kostogrud, "Modification of crystal structure of copper surface during graphene synthesis" // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Т. 1128. – №. 1.
8. E. V. Boyko, I. A. Kostogrud, D. V. Smovzh, and P. E. Matochkin, "Method for determining the adhesion force between graphene and copper" // EPJ Web of Conferences. – 2019. – Т. 196. – С. 00057.

9. I. A. Kostogrud and E. V. Boyko, "The effect of grains crystallographic orientations of copper substrate on graphene growth" // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – T. 1359. – №. 1. – C. 012102.
10. E. V. Boyko and D. V. Smovzh, "Morphology and optical properties of films based on CVD graphene and nanostructured gold" // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – T. 1359. – C. 12100.
11. E. V. Boyko, I. A. Kostogrud, and D. V. Smovzh, "Optical properties of polymer-graphene composites coated with gold and silver alloy nanoparticles" // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – T. 1675. – №. 1. – C. 012089.
12. I. A. Kostogrud, E. V. Boyko, and D. V. Smovzh, "Formation of graphene on the surface of copper under the conditions of chemical deposition from the gas phase" // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – T. 1105. – №. 1. – C. 12139.
13. D. V. Smovzh, E. V. Boyko, and I. A. Kostogrud, "Modification of crystal structure of copper surface during graphene synthesis," in Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – T. 1128. – №. 1. – C. 012109.
14. E. V. Boyko and I. A. Kostogrud, "Plasmon resonance in CVD graphene-silver nanoparticle composites" // XXXV Sib. Thermophys. Semin. Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – T. 1382. – C. 12150.
15. I. A. Kostogrud, E. V. Boyko, and D. V. Smovzh, "Effect of hydrogen concentration on CVD synthesis of graphene" // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – T. 1382. – №. 1. – C. 012157.

Апробация работы

Результаты и материалы диссертационного исследования обсуждались:

– на международных конференциях:

Международная конференция «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология», (Москва, г. Троицк, 2021), Международная конференция Новые Углеродные Наноматериалы: Ультратонкие Алмазные Пленки, (Москва, 2021), 58-я Международная научной студенческой конференции» (Новосибирск, Россия, 2020)

– на всероссийских конференциях:

XXXVI «Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2020), Всероссийская школа-конференции молодых ученых с международным участием

«Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2020), V Всероссийская конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта, 2020), Всероссийская научная конференция с элементами школы молодых учёных «Теплофизика и физическая гидродинамика», (Севастополь, 2021), Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, (Санкт-Петербург, 2021),

Соответствие диссертации паспорту специальности

Диссертация Бойко Е.В. посвящена исследованиям влияния поликристаллического ХОГФ графена на радиационный и конвективный теплообмен, а также исследованию термоакустического эффекта в графеновых композитах. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника для физико-математических наук.

Решение о рекомендации работы к защите

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Термоакустика графеновых покрытий и влияние графенового покрытия на теплоотдачу» Бойко Евгения Викторовича представляет законченную научную работу, посвященную исследованиям влияния поликристаллического ХОГФ графена на радиационный и конвективный теплообмен, а также исследованию термоакустического эффекта в графеновых композитах. Работа обладает новизной и высокой степенью апробации в научной литературе и на конференциях. Результаты работы имеют большое значение для развития научных основ теплофизики тонких углеродных плёнок.

Работа «Термоакустика графеновых покрытий и влияние графенового покрытия на теплоотдачу» Бойко Евгения Викторовича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Заключение принято на заседании семинара Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе

Сибирского отделения Российской академии наук под руководством д.ф.-м.н.
Морозова А. А.

Присутствовало на заседании 24 чел., в том числе 5 докторов и 7 кандидатов наук. Результаты голосования: «за» - 24 человека, «против» - нет, «воздерж.» - нет, протокол № 7 от «19» июня 2024 г.



Председатель семинара
ИТ СО РАН
Морозов А. А., д.ф.-м.н.



Секретарь семинара
ИТ СО РАН
Чеверда В.В., к.ф.-м.н.