

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д003.053.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА
ТЕПЛОФИЗИКИ ИМ. С.С. КУТАТЕЛАДЗЕ СИБИРСКОГО
ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК**

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 25.11.2020 г. № 10/2020

О присуждении Костограду Илье Алексеевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Экспериментальное исследование процессов термического синтеза графена на меди и переноса графена на полимер» по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника принята к защите 24.09.2020 г., протокол № 5-2/2020, диссертационным советом Д 003.053.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН), 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1, утвержденным приказом Рособнадзора №105/НК от 11.04.2012 года.

Соискатель Костоград Илья Алексеевич, 1990 года рождения, на момент защиты диссертации работает в должности младшего научного сотрудника в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук. В 2015 году Костоград Илья Алексеевич окончил магистратуру в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (НГУ) по направлению «Физика»

по специальности «Физика кинетических явлений», в 2019 г. окончил очную аспирантуру ИТ СО РАН по направлению подготовки 03.06.01 – Физика и астрономия.

Диссертация выполнена в лаборатории разреженных газов (№ 4.1) и в лаборатории синтеза новых материалов (№ 4.2) ИТ СО РАН. Научный руководитель – кандидат физико-математических наук Смовж Дмитрий Владимирович, заведующий лабораторией синтеза новых материалов (№ 4.2) ИТ СО РАН.

Официальные оппоненты: Дмитриев Александр Сергеевич, доктор технических наук, заведующий Лабораторией теплофизики наноструктур Института тепловой и атомной энергетики, профессор кафедры низких температур Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва; Окотруб Александр Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий Лабораторией физикохимии наноматериалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института неорганической химии им. А.В. Николаева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), г. Москва, в своем положительном заключении, подписанном д.ф.-м.н. Амировым Равилем Хабибуловичем, ученым секретарем ОИВТ РАН, заведующим лабораторией плазмы ОИВТ РАН, и к.т.н. Шавелкиной Мариной Борисовной, с.н.с лаборатории плазмы ОИВТ РАН указала, что «В результате проделанной работы, определены оптимальные параметры термического синтеза однослойных и многослойных графеновых структур (температура синтеза, расход метана, расход водорода). Определены основные теплофизические механизмы, влияющие на изменение сопротивления

графеновых пленок, при переносе на термополимер методом горячего прессования. Проведенные исследования позволяют получать графен-полимерные композиты с сопротивлением от 1,5 до 8 кОм/кв. Данные композиты могут быть использованы в качестве гибких и прозрачных электродов и нагревателей, чувствительных элементов в различных сенсорах, а также в качестве термоакустических элементов. Результаты, представленные в диссертации, могут быть использованы в российских научных и образовательных организациях: ИТ СО РАН, ИТ УО РАН, ИТПМ СО РАН, СФУ, ТГУ, МГУ, МГТУ, МЭИ и др.»

Соискатель имеет 47 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 34 работы, из них в изданиях из списка ВАК 9 работ (общим объемом 53 стр.). Вклад Костограда Ильи Алексеевича в опубликованных работах состоял в подготовке и проведении всех представленных в работах экспериментов, обработке, анализе и интерпретации результатов. Теоретический анализ, подготовка текста для публикаций в рецензируемых журналах были проведены в составе научного коллектива с непосредственным участием автора. Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Boyko E.V., Kostogrud I.A., Bezrukov I.A., Krivenko A.S., Smovzh D.V. The influence of the crystallographic orientation of the copper catalytic substrate crystallites on the mechanical transfer of graphene // Mater. Res. Express, 6, 125628 (2019).

2. Kostogrud I.A., Boyko E.V., Smovzh D.V. The main sources of graphene damage at transfer from copper to PET/EVA polymer // Materials Chemistry and Physics, 219, 67-73 (2018).

3. Smovzh D.V., Kostogrud I.A., Sakhapov S.Z., Zaikovskii A.V., Novopashin S.A. The synthesis of few-layered graphene by the arc discharge sputtering of a Si-C electrode // Carbon, Volume 112, Pages 97-102 (2017).

4. Kostogrud I.A., Boyko E.V., Smovzh D.V. CVD Graphene Transfer from Copper Substrate to Polymer // Materials Today: Proceedings, Volume 4, Issue 11, Part 1, Pages 11325-11504 (2017).

5. Kostogrud I.A., Trusov K.V., Smovzh D.V. Influence of Gas Mixture and Temperature on AP-CVD Synthesis of Graphene on Copper Foil // Advanced Materials Interfaces. Vol. 3, Issue 8, P.1500823 (1-6) (2016).

На автореферат диссертации поступило 3 отзыва. Все отзывы положительные. В отзывах отмечены новизна, научная и практическая значимость, достоверность полученных результатов, актуальность направлений исследований, наиболее значительные научные и практические результаты по отжигу меди, синтезу графена методом AP-CVD и методам переноса графена на полимер.

В отзыве д.ф.-м.н. Антоновой Ирины Вениаминовны, ведущего научного сотрудника Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, содержится замечание: «В автореферате отмечается обнаруженный экспериментальный факт, что наличие достаточно больших концентраций водорода в смеси газов во время синтеза графена на меди меняет форму кристаллов графена с произвольной на гексагональную. Этот факт известен и является одним из двух эффектов (форма и толщина зародышей), связанных с водородом во время роста графена».

В отзыве к.ф.-м.н. Федорова Георгия Евгеньевича, доцента кафедры общей физики МФТИ содержатся три замечания: «1. Неудачно сформулировано основное содержание четвертой главы: сказано, что она посвящена исследованию условий синтеза графена, хотя на самом деле речь идет об исследовании влияния условия синтеза на процесс формирования графена. 2. В изложении содержания пятой главы на рисунке 7 приводятся значения сопротивления пленок многослойного и однослойного графена. При этом не указывается количество слоев для многослойного графена или

хотя бы его оценка. 3. В изложении содержания пятой главы не приводится обсуждения того, почему сопротивление пленок многослойного графена оказывается больше сопротивления пленок однослойного графена».

В отзыве д.ф.-м.н. Конобеевой Натальи Николаевны, доцента, профессора кафедры информационных систем и компьютерного моделирования Волгоградского государственного университета, не содержится замечаний: «Критических замечаний нет. Можно отметить лишь ряд пропущенных запятых».

Выбор официальных оппонентов обосновывается высокой квалификацией специалистов, наличием публикаций, соответствующих тематике диссертации, способностью определить научную и практическую ценность диссертации. Д.т.н., профессор Дмитриев Александр Сергеевич является одним из ведущих специалистов в области нанотеплофизики и наноэнергетики. Одно из основных направлений исследований лаборатории д.ф.-м.н., профессора Окотруба Александра Владимировича – изучение влияния параметров синтеза на структуру и свойства каркасных углеродных наноструктур: фуллеренов, нанотрубок, графена, мезопористого углерода и композитных материалов на их основе.

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что ее сотрудники, д.ф.-м.н., профессор Амиров Равиль Хабибулович и к.т.н. Шавелкина Марина Борисовна, являются признанными специалистами в областях науки, связанных с темой диссертации, а именно синтез графена. Благодаря своей квалификации они могут дать обоснованную экспертную оценку достоверности, научной и практической значимости результатов работы.

Диссертационный совет отмечает, что на основе выполненных соискателем экспериментальных исследований определены термодинамические параметры синтеза графена, а именно, скорость роста и скорость зародышеобразования, энергия активации роста графена; определен вклад

термических напряжений системы медь-графен-полимерный слой в степень повреждения графена при переносе методом горячего прессования.

Научная значимость работы обоснована тем, что полученные результаты способствуют более глубокому пониманию процессов, происходящих при высокотемпературной обработке медной фольги при температурах близких к фазовому переходу твердое тело – жидкость для меди. В результате проделанной работы определены оптимальные параметры термического синтеза однослойных и многослойных графеновых структур (температура синтеза, расход метана, расход водорода). На основании экспериментальных данных произведены расчеты характерных времен и масштабов диффузных процессов при зарождении и росте графеновых кристаллов. Исследована кинетика формирования зародышей новой фазы и роста графенового покрытия на медной поверхности. Определены основные теплофизические факторы (термическое расширение системы медь/графен/полимер, диффузия остаточного газа через полимер), приводящие к повреждению графеновых пленок и влияющие на изменение их сопротивления при переносе на полимер методом горячего прессования. Впервые экспериментально показано, что при отжиге медной фольги (Alfa Aesar 13382) толщиной 25 мкм происходит формирование кристаллических зерен с преимущественной ориентацией (001) к поверхности при размерах 50-200 мкм, и с ориентацией (111) при размере более 1000 мкм. Экспериментально показано, что при механическом разделении существенную роль играет ориентация зерен медной подложки, на которой сформирован графен. Результаты, представленные в диссертации, могут быть использованы в российских научных и образовательных организациях: ИТ СО РАН, ИТ УО РАН, ИТПМ СО РАН, СФУ, ТГУ, МГУ, МГТУ, МЭИ и др.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что в работе отработана методика получения проводящих прозрачных графен-полимерных композитов. Данные композиты

могут быть использованы в качестве гибких и прозрачных электродов и нагревателей, чувствительных элементов в различных сенсорах, а также в качестве термоакустических элементов.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что в работе использовались апробированные экспериментальные методики; надежность полученных данных подтверждается оценкой точности измерений, систематической поверкой средств измерения и измерительных приборов, сравнением с данными других исследователей и с расчетными зависимостями, воспроизводимостью результатов измерений.

Личный вклад состоял в подготовке и проведении всех представленных в диссертации экспериментов, обработке, анализе и интерпретации результатов. Теоретический анализ, подготовка статей для публикаций в рецензируемых журналах, докладов на конференциях были проведены в составе научного коллектива с непосредственным участием автора.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация Костогруда Ильи Алексеевича представляет собой научно-квалификационную работу, в которой содержится экспериментальное исследование процессов термического синтеза графена и создания на его основе полимер-графеновых пленок, имеющее существенное значение для более глубокого понимания явлений, протекающих при тепловых процессах и агрегатных изменениях в физических системах. Представленная диссертационная работа соответствует критериям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ № 842 от 29.04.2013.

На заседании 25 ноября 2020 года диссертационный совет принял решение присудить Костогруду Илье Алексеевичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

« 26 » ноября 2020 г.