



УТВЕРЖДАЮ

Врио директора ИПФ РАН,
академик РАН Г.Г. Денисов

« 08 » июля 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)

по диссертации Преображенского Евгения Игоревича «Разработка методов плазменной модификации графена и одностенных углеродных нанотрубок» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности: 1.3.9. Физика плазмы.

Работа выполнена в отделе физики плазмы (120) Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Научный руководитель – Водопьянов Александр Валентинович, заведующий отделом физики плазмы ИПФ РАН, доктор физико-математических наук, профессор.

В 2022 г. соискатель учёной степени окончил магистратуру в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского" по направлению подготовки 03.04.02. Физика.

Сроки обучения в аспирантуре Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»: с 1 сентября 2022 года по 31 августа 2026 года.

Свидетельство об окончании аспирантуры № 105200 00000045 от 08 июля 2026 года.

В период подготовки диссертации соискатель Преображенский Евгений Игоревич работал младшим научным сотрудником в отделе физики плазмы (120) Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Личное участие аспиранта в получении результатов, изложенных в диссертации

Автор принимал непосредственное участие в постановке целей и задач диссертационной работы. Им был проведен обзор и систематизация литературных данных по проблемам плазмохимической модификации углеродных наноматериалов, что позволило обосновать выбор оптимальных режимов обработки образцов. При участии автора был модернизирован экспериментальный стенд на базе ВЧ разряда низкого

давления. Им был выполнен цикл экспериментов по плазменной модификации графена и ОУНТ в аргон-водородной и азотной газовых средах. Были проведены исследования влияния параметров разряда (вкладываемой мощности, времени экспозиции, состава и давления газовой смеси), материала подложки, заземления образца и внешнего электрического смещения на конечные структурные и электрофизические свойства материалов. Автором была разработана и апробирована методика пространственно-селективной плазменной модификации графена с использованием металлических и диэлектрических масок различной геометрии, позволяющая формировать двумерные гетероструктуры «графен – модифицированный графен» с субмиллиметровым разрешением. На основе модели гамильтониана графена автором были рассчитаны частотные зависимости комплексной проводимости, дисперсионные характеристики поверхностных плазмонов, а также коэффициенты пропускания и отражения терагерцового и инфракрасного излучения монослоем. Автором разработана и численно реализована перколяционная модель эволюции электрического сопротивления графена в процессе плазменной модификации, описывающая рост сопротивления как функцию времени обработки, начальной плотности дефектов и скорости их радиального роста. Были получены аппроксимационные зависимости, позволяющие прогнозировать конечное сопротивление образца по известным параметрам процесса. Обработка данных, интерпретация результатов и формулировка выводов проведены совместно с научным руководителем. Публикации подготовлены автором лично или при его участии.

Научная новизна и основные результаты диссертационного исследования

1. Описаны закономерности влияния параметров установки индукционного ВЧ-разряда низкого давления на конечные свойства модифицированного графена. Результаты анализа комплекса независимых методик согласуются с образованием C–H связей в графене: КРС (рост $I(D)/I(G)$), РФЭС (увеличение доли sp^3 -компоненты), АСМ (рост шероховатости на ~ 0.11 нм), ИК-Фурье (полосы на 2850 и 2925 см^{-1}) и измерениями сопротивления (рост на порядок и более). С увеличением времени обработки отношение $I(D)/I(G)$ нелинейно растёт, достигая ~ 1 . Зависимость сопротивления от времени также имеет нелинейный характер. Увеличение мощности разряда при фиксированном времени приводит к росту степени модификации графена. Установлено, что в первом приближении конечные свойства образца определяются произведением мощности разряда на время обработки

2. Экспериментально продемонстрирована роль ионной компоненты плазмы в процессе модификации графена и ОУНТ в индукционном ВЧ-разряде низкого давления. Данный вывод основан на выявленной зависимости степени модификации от потенциала внешнего электрического смещения, а также роли заземления образцов и материала подложки.

3. Разработана и апробирована методика пространственно-селективной плазменной обработки графена с использованием масок. Пространственная локализация обработки подтверждена методами КРС, РФЭС, измерениями электросопротивления и СЭМ. Показано, что характерная ширина переходной области между модифицированными и немодифицированными участками составляет 0.1–0.3 мм и

определяется условиями плазменной обработки и зазором между маской и поверхностью графена.

4. Описаны закономерности влияния параметров плазменной обработки на свойства одностенных углеродных нанотрубок в водород-аргонной плазме низкого давления. Показано, что увеличение времени экспозиции, мощности разряда и доли водорода в плазмообразующей смеси сопровождается ростом относительных интенсивностей полос D и D+D', связанных с увеличением концентрации дефектов, включая образование C–H связей. Для заземлённых образцов увеличение времени обработки приводит к дальнейшему росту степени модификации вплоть до 30 минут, тогда как для незаземлённых образцов наблюдается насыщение после 2 минут экспозиции. Установлено, что плазменная модификация носит преимущественно поверхностный характер. Экспериментально продемонстрирована частичная обратимость модификации при термическом отжиге при 240 °C.

5. В рамках приближенной модели гамильтониана полностью гидрогенизированного графена рассчитаны частотные зависимости комплексной проводимости, коэффициентов отражения и пропускания, а также дисперсионные характеристики поверхностных плазмонов в терагерцовом и инфракрасном диапазонах. Установлена связь характерных особенностей электродинамических откликов с параметрами зонной структуры материала, что позволяет определять эти параметры по результатам измерений.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Представленные в диссертации результаты являются достоверными и обоснованными. Достоверность экспериментальных результатов обеспечена проведением исследований в контролируемых условиях с использованием калиброванного диагностического оборудования. Наблюдаемые изменения свойств графена и одностенных углеродных нанотрубок при плазменной обработке подтверждаются согласованными результатами независимых методов диагностики и качественно сохраняются при изменении параметров обработки. Выводы о структурных, морфологических и химических изменениях материалов основаны на согласованной интерпретации результатов, полученных методами спектроскопии комбинационного рассеяния, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, ИК-Фурье спектроскопии, атомно-силовой и сканирующей электронной микроскопии, а также измерений электросопротивления. Достоверность теоретических расчётов обеспечена использованием апробированных моделей и подтверждается согласованием полученных результатов с литературными и собственными экспериментальными данными. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях, представлены на всероссийских и международных конференциях.

Практическая и теоретическая значимость результатов исследования

Теоретическая значимость работы заключается в установлении закономерностей плазменной модификации графена и одностенных углеродных нанотрубок в индукционном ВЧ-разряде низкого давления, выявлении роли ионной компоненты

плазмы в процессах модификации углеродных наноматериалов, а также в развитии теоретических представлений об электродинамическом отклике гидрогенизированного графена в терагерцовом диапазоне частот. Разработанная перколяционная модель позволяет описывать изменение электросопротивления графена в процессе плазменной модификации.

Практическая значимость работы заключается в разработке и апробации метода контролируемой плазменной модификации графена и одностенных углеродных нанотрубок, позволяющего управлять их электрофизическими свойствами за счёт изменения параметров горения разряда и внешнего электрического смещения. Разработан и апробирован метод пространственно-селективной плазменной модификации графена, обеспечивающий формирование двумерных гетероструктур «графен - модифицированный графен» с субмиллиметровым пространственным разрешением. Полученные результаты теоретического анализа терагерцового и инфракрасного отклика гидрогенизированного графена могут быть использованы при разработке и диагностике устройств на основе двумерных углеродных материалов, а также для определения параметров зонной структуры по характеристикам электродинамического и плазмонного отклика.

Список работ, опубликованных в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук

1. Vodopyanov, A., Preobrazhensky, E., Nezhdanov, A., Zorina, M., Mashin, A., Yakimova, R., Gogova, D. A new plasma-based approach to hydrogen intercalation of graphene // Superlattices and Microstructures. 2021. Т. 160. С. 107066.
2. Preobrazhensky E. I., Oladyshkin I. V., Tokman M. D. Optical properties of graphane in infrared range // Phys. Scr. 2022. Т. 97, № 11. С. 115803.
3. Преображенский Е. И., Водопьянов А. В., Нежданов А. В. Исследование процесса гидрогенизации одностенных углеродных нанотрубок с помощью индукционно-связанной аргон-водородной плазмы // Журнал технической физики. 2023. Т. 93, № 7. С. 884.
4. Преображенский Е. И. и др. Влияние электрического поля на скорость гидрогенизации графена в индукционно-связанной плазме // Журнал технической физики. 2024. Т. 94, № 7. С. 1002.
5. Преображенский Е. И., Водопьянов А. В., Нежданов А. В. Пространственно-селективная модификация графена с использованием металлических масок в индуктивно-связанной Ar/H₂ плазме // Журнал технической физики. 2026. Принято к печати.

Ценность научных работ диссертанта отражается высоким уровнем публикаций в рецензируемых зарубежных и российских журналах. Материалы работы неоднократно представлялись на всероссийских и международных конференциях, а также обсуждались на научных семинарах.

Результаты, представленные в диссертационной работе, в полной мере изложены в работах, опубликованных соискателем ученой степени. Формулировки результатов изложены в соответствии с личным вкладом автора в каждую из опубликованных статей. Ссылки на источники заимствования материалов оформлены корректно.

Научная специальность, которой соответствует диссертация: 1.3.9. Физика плазмы.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

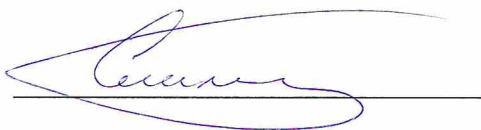
Диссертация соответствует критериям, установленным в соответствии с Федеральным законом Российской Федерации от 23 августа 1996 года № 127-ФЗ "О науке и государственной научно-технической политике".

Диссертация «Разработка методов плазменной модификации графена и одностенных углеродных нанотрубок» Преображенского Евгения Игоревича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности: 1.3.9. Физика плазмы.

Настоящее заключение составлено на основании решения Ученого совета отделения физики плазмы и электроники больших мощностей ИПФ РАН по проведению итоговой аттестации по программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности: 1.3.9. Физика плазмы.

Присутствовало на заседании 18 чел.

Результаты голосования: «за» — 18 чел., «против» — 0 чел., «воздержалось» — 0 чел.
протокол № 8 от « 25 » июня 2026 г.



Скалыга Вадим Александрович,
доктор физико-математических наук,
Председатель Ученого совета отделения физики
плазмы и электроники больших мощностей



Моченева Ольга Станиславовна,
кандидат физико-математических наук,
Учёный секретарь отделения физики плазмы и
электроники больших мощностей