

ОТЗЫВ

официального оппонента
о диссертационной работе Чернова Валерия Валерьевича
«Исследование плазмохимического синтеза тонких алмазных пленок
в плазме, поддерживаемой пересекающимися пучками непрерывного
СВЧ излучения миллиметрового диапазона длин волн»,
представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.08 – физика плазмы

Диссертационная работа В.В. Чернова посвящена экспериментальному и теоретическому изучению свободно локализованного непрерывного СВЧ разряда, поддерживаемого двумя пересекающимися пучками излучения миллиметрового диапазона длин волн в многокомпонентной газовой среде, и применению такого разряда для плазмохимического осаждения тонких алмазных пленок. Технология плазмохимического осаждения из СВЧ разряда, рассматриваемого в диссертации, обладает рядом достоинств, недоступных для традиционно используемых реакторов, позволяя расширить возможности создания новых углеродных материалов с заданными свойствами, важными для различных приложений. В частности, современные исследования указывают на перспективность использования алмазных покрытий металлических катодов для увеличения плотности их тока и снижения порогов эмиссии. На определении оптимальных условий устойчивого поддержания непрерывного СВЧ разряда для получения образцов тонких алмазных пленок с заданными свойствами на подложках из различных материалов и сосредоточено главное внимание в данной работе. Основное преимущество рассматриваемого в диссертации способа поддержания разряда заключается в возможности создания вблизи подложки плазменного слоя большой площади, обеспечивающего однородный поток на подложку радикалов, которые играют основную роль в процессе роста алмаза. Следует отметить, что технология плазмохимического осаждения с использованием СВЧ излучения начала активно развиваться относительно недавно, и многие фундаментальные и прикладные вопросы в этой области, включая различные аспекты создания новых материалов, остаются еще недостаточно изученными. Поэтому развитие соответствующих экспериментальных методик и построение адекватных теоретических моделей, позволяющих описать характеристики разряда в достаточно широком диапазоне значений параметров, являются, безусловно, актуальными задачами.

Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключение, трех приложений и списков цитированной литературы и публикаций автора по теме диссертации.

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, очерчен круг решаемых задач, сформулированы цели исследования, отмечена новизна полученных результатов, кратко изложено содержание работы, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан обзор литературы по вопросам, исследуемым в диссертации. В частности, обсуждается специфика плазмохимического осаждения тонких алмазных пленок в многокомпонентной газовой среде. Дано краткое описание основных типов плазмохимических реакторов, используемых для синтеза искусственных алмазных пленок. Обсуждаются условия поддержания непрерывного СВЧ разряда в различных условиях, механизмы роста алмаза в неравновесной плазме, а также существующие

теоретические представления в области выращивания нанокристаллических алмазных пленок. Приведены типичные характеристики таких пленок и указаны области их применения.

Вторая глава диссертации посвящена описанию экспериментов по осаждению тонких алмазных пленок в плазме непрерывного СВЧ разряда, поддерживаемого двумя пересекающимися волновыми пучками миллиметрового диапазона длин волн, а также методов диагностики и результатов измерений характеристик плазменного слоя в различных условиях. Здесь представлены параметры экспериментальной установки на основе гиротрона с частотой излучения 30 ГГц и характеристики генерируемых им волновых пучков, указаны условия поддержания СВЧ разряда. Детально обсуждаются используемые в работе методы диагностики плазмы. В частности, изложен метод оптической эмиссионной спектроскопии для исследования плазмы СВЧ разряда. Измерены температура газа в разряде по вращательной структуре перехода $d^3\Pi_g \rightarrow a^3\Pi_u$ радикала C_2 и концентрация электронов по влиянию хольцмарковских полей на профиль спектральной линии H_β серии Бальмера. Экспериментально определены зависимости характеристик СВЧ разряда от условий его поддержания и дана физическая интерпретация полученных результатов.

В третьей главе построена численная двумерная модель, описывающая стационарное состояние непрерывного СВЧ разряда в двух пересекающихся волновых пучках в многокомпонентной газовой смеси. Проведено сопоставление результатов численного моделирования и экспериментальных данных, полученных для аргон-водород-метановой смеси. Продемонстрировано совпадение измеренной структуры свечения линии H_α серии Бальмера и расчетной формы распределения концентрации электронов. Кроме того, отмечено хорошее согласие полученных экспериментально и методами численного моделирования пространственных распределений температуры газа и потока атомарного водорода на подложку. Предсказаны оптимальные для приложений характеристики СВЧ разряда, поддерживаемого в атмосфере водорода с малыми добавками метана. При помощи численной модели найдены характеристики СВЧ разряда в широком диапазоне значений параметров. В частности, определены оптимальные условия поддержания однородной плазмы в пересекающихся волновых пучках с различной частотой излучения в диапазоне 10-60 ГГц. Показано, что максимальный размер области однородности потока атомов водорода на подложку из разряда составляет порядка 10 длин волн СВЧ излучения. Обсуждаются условия, при которых применимы результаты двумерного численного моделирования, а также их практическая значимость для технологии плазмохимического синтеза алмаза.

Четвертая глава посвящена исследованию плазмохимического осаждения нанокристаллических алмазных пленок в реакторе нового типа на подложки из различных материалов. Для проведения данного исследования автором был разработан способ нанесения центров нуклеации алмаза на основе метода центрифугирования. В главе представлены результаты исследования осаждения нанокристаллических алмазных пленок на диэлектрические подложки в различных условиях, приведены свойства полученных пленок в зависимости от характеристик СВЧ разряда. Описаны исследования эмиссионных свойств молибденовых катодов с осажденными на них в различных условиях тонкими алмазными пленками. Экспериментально показано усиление эмиссионного тока с металлических катодов за счет их покрытия двухслойной алмазной пленкой с проводящим (легированным азотом) первым слоем и диэлектрическим вторым слоем.

В Заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В приложениях к диссертации обсуждается специфика описания газового разряда в многокомпонентной смеси, а также приводятся ссылки на работы, из которых взяты

необходимые для проведенных исследований кинетические и газодинамические коэффициенты. Сведения, представленные в приложениях, используются в третьей главе при построении численной модели непрерывного СВЧ разряда, поддерживаемого в поле двух волновых пучков миллиметрового диапазона длин волн.

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить, что она представляет собой вполне законченную научную работу, в которой получен ряд новых результатов, весьма важных в практическом плане. Последовательность в проведении экспериментальных исследований, согласованность их результатов с данными численного моделирования позволяют считать основные научные результаты диссертации обоснованными и достоверными. Все результаты диссертации имеют ясную физическую интерпретацию. Существенным достоинством работы является то, что полученные в ней результаты могут быть использованы при создании новых плазмохимических реакторов и развития технологии химического осаждения из газовой фазы. Результаты диссертации будут также весьма полезны для планирования будущих экспериментальных и теоретических исследований в указанных областях.

Личный вклад автора состоит в разработке нового метода предварительной подготовки подложек, модификации плазмохимического реактора и диагностических оптических систем, постановке и проведении лабораторных экспериментов, построении соответствующих численных моделей, проведении анализа и интерпретации полученных данных и не вызывает никаких сомнений.

Диссертация написана четким, ясным языком, хорошо оформлена, содержит достаточное количество иллюстраций, делающих изложение полученных результатов весьма наглядным.

Работа не свободна, однако, от недостатков:

1. Во второй главе диссертации указано значение абсолютной погрешности измерений концентрации электронов в разряде по профилю спектральной линии $H\beta$ серии Бальмера. Однако остается неясным, каким образом это значение было получено.
2. В конце второй главы (с. 60) утверждается, что в условиях экспериментов, описанных в работе, температура электронов в разряде остается постоянной при изменении таких параметров как давление, СВЧ мощность, содержание аргона в газовой смеси. При этом в тексте диссертации отсутствуют какие-либо данные, подтверждающие этот вывод.
3. В третьей главе при построении теоретической модели разряда неявно предполагается локальная зависимость температуры электронов от абсолютного значения приведенного эффективного электрического поля, что подразумевает пренебрежение вкладом электронной теплопроводности. Следовало бы оговорить используемые приближения в явном виде и подтвердить их какими-либо оценками.
4. При анализе уравнения баланса плотности электронов в третьей главе автор, учитывая амбиполярную диффузию, пренебрегает эффектом термодиффузии. Очевидно, что такое допущение нуждается в обосновании.

Отмеченные недостатки не могут влиять на общую положительную оценку диссертации В.В. Чернова, ее научной и практической значимости.

Основные результаты диссертации опубликованы в 7 статьях в международных и российских научных журналах из списка ВАК, 8 работах в трудах и сборниках тезисов докладов международных и российских научных конференций. Кроме того, на основе выполненных исследований получен один патент Российской Федерации. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, можно заключить, что диссертационная работа В.В. Чернова выполнена на актуальную тему, удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой электродинамики
Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского



А.В. Кудрин

Контактная информация:

Кудрин Александр Владимирович,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой электродинамики радиофизического факультета
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»,
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.
Тел.: +7(831)4623262, E-mail: kud@rf.unn.ru

Подпись доктора физ.-мат. наук, профессора
А.В. Кудрина заверяю:

Ученый секретарь Совета
Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского



Л.Ю. Черноморская