

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук Заклецкого Захара Александровича
на тему: «Влияние плазмы на взаимодействие микроволнового излучения с
порошковыми засыпками металлических и диэлектрических микрочастиц»
по специальности 1.3.9 – физика плазмы

Ультрадисперсные системы, содержащие частицы (металлов, сплавов, оксидов металлов и т.д.) с размерами в субмикронном диапазоне, вот уже более полувека вызывают интерес, как у отечественных, так и у зарубежных исследователей: достигая определенного размера, частицы начинают проявлять уникальные механические, электрические, оптические, магнитные и каталитические свойства, которые не характерны для тех же частиц в макроразмерном масштабе. Ультрадисперсные системы находят всё более широкое применение в порошковой металлургии, в медицине, в производстве катализаторов, красителей смазочных материалов и т.д.

Одними из перспективных методов получения ультрадисперсных систем являются методы, основанные на применении различных типов электрического разряда. Из них, особое место занимает импульсный микроволновой разряд в гигагерцовом диапазоне атмосферного давления. **Актуальность диссертации** обусловлена поиском оптимальных параметров инициации и поддержания подобного типа разряда, который является потенциально интересным с точки зрения его применения для синтеза металлодиэлектрических частиц с размерами в субмикронном диапазоне.

Диссертация включает обширный экспериментальный материал, полученный автором, и состоит из Введения, четырех глав, Заключения и списка литературы. Перечень литературы насчитывает 65 источников и достаточно полно отражает имеющиеся публикации по исследованиям взаимодействия электромагнитного излучения с металлодиэлектрическими мишенями-инициаторами (мишени из диэлектрика с металлическими включениями). Полный объем диссертации составляет 87 страниц, 49 рисунков и 5 таблиц.

Во введении Автором аргументирована актуальность выбранной темы. Обозначены предмет и объект исследования. Обсуждается степень разработанности темы, практическая значимость работы, научная новизна и степень достоверности и обоснованности полученных результатов. Перечислены задачи, решенные в диссертации, и представлена структура диссертации.

В первой главе диссертации Автором выполнен аналитический обзор работ, посвященных современному состоянию основных направлений исследования физике подпороговых микроволновых разрядов, возникающих при взаимодействии микроволнового электромагнитного излучения высокой интенсивности (до 30 кВт/см² при длительности импульса излучения до нескольких миллисекунд) с металлодиэлектрическими мишенями-инициаторами и порошковыми засыпками металлических и диэлектрических частиц (PbO , CuO , Al , Si , SnO , $0.5 \times Ti + 0.5 \times Cu$, $0.5 \times SnO + 0.5 \times Al_2O_3$, $0.5 \times Si + 0.5 \times Al_2O_3$, $0.5 \times Al + 0.5 \times PbO$) в широком диапазоне давлений газовой фазы (от 10^{-4} Торр до 760 Торр). Показано, что подобного типа разряды: локализуются вблизи поверхности мишени; характеризуются нестационарным и пространственно – неоднородным распределением параметров; являются сложными объектами с точки зрения проблемы определения их параметров и, таким образом, малоизученными. На основе обзора, Автором сформулированы **цель** диссертационной работы и **задачи**, решенные в диссертации: определение параметров, характеризующих процесс получения ультрадисперсных систем на основе применения подпорогового микроволнового разряда в аргоне и воздухе при атмосферном давлении, возникающего при взаимодействии электромагнитного излучения высокой интенсивности в гигагерцовом диапазоне частот с порошковыми засыпками металлических частиц и частиц из оксидов металлов на диэлектрической мишени – инициаторе (с металлическими включениями или без).

Во второй главе диссертации приведено подробное описание усовершенствованной Автором экспериментальной установки для исследований инициации и распространения разряда, обусловленного взаимодействием электромагнитного излучения с порошковыми засыпками металлических и диэлектрических частиц (Ag / Al_2O_3) на кварцевых подложках. Источником излучения на длине волны 4 мм (на частоте 75.1 ГГц) является гиротрон. Длительность импульса и интенсивность излучения изменяются от десятков микросекунд до 8 мс и до 15 кВт/см², соответственно.

Особо следует отметить разнообразие средств измерений, используемых Автором в исследованиях. Заклецким З.А. разработана комплексная невозмущающая диагностика разряда с применением: методов сканирующей электронной и оптической спектроскопии; визуального метода. Автором создано оригинальное программное обеспечение для обработки оптических спектров испускания разряда.

Усовершенствование установки и разработка комплексной диагностики с соответствующим программным обеспечением позволили:

подтвердить **впервые** наблюдаемое явление пробоя вблизи поверхности металлических микровключений из серебра (Ag), образующихся на кварцевой подложке, и исследовать распространение разряда;

получить **новые сведения** о спектральном составе излучения разряда, о величине поступательной температуры (≤ 5500 K) и о значениях температур, соответствующих функциям распределения по электронно – колебательно – вращательным уровням энергии молекул циана ($T_v \approx 6800$ K) и температуры поверхности частиц ($T_s \approx 6800$ K) субмикронного размера;

выполнить оценки температуры ($T_e \approx 6800$ K) и концентрации ($N_e \approx 10^{14} - 10^{15}$ см⁻³) электронов в разряде.

Третья глава диссертации посвящена анализу частиц, образующихся при взаимодействии электромагнитного излучения с порошковыми засыпками алюминиевых (Al) и диэлектрических частиц (Al_2O_3) микронного размера на кварцевой подложке. Автором с помощью методов оптической и электронной микроскопии **впервые** обнаружено, что в результате такого взаимодействия происходит формирование ультрадисперсной системы: на подложке образуются алюминиевые частицы размером в нанодиапазоне с их включением в поверхностный слой диэлектрических частиц микронного размера.

Получены **новые сведения** о температуре поверхности микрочастиц (от 1700 K до 2400 K), образующихся в разряде (как объеме реактора, так и в поверхностном слое вблизи кварцевой подложки), а также о величине поступательной температуры (3000 - 3700 K) и значениях температур ($T_v \approx 3900$ K), соответствующих функциям распределения по электронно – колебательно – вращательным уровням энергии молекул оксида алюминия (AlO). Это позволило экспериментально подтвердить и теоретически обосновать **впервые** наблюдаемый процесс горения алюминиевых частиц.

Четвертая глава посвящена экспериментальным и теоретическим исследованиям влияния поглощения микроволнового излучения на пробой в порошках металлических частиц алюминия (Al) и частиц из оксида алюминия (Al_2O_3). Результаты исследований позволили уточнить условия, при которых наблюдается облегчение зажигания подпорогового микроволнового разряда.

В Заключение приведены основные результаты диссертации и положения, выносимые на защиту.

Таким образом, все полученные лично Автором диссертации основные результаты являются принципиально **новыми** и состоят в следующем:

обнаружен ряд явлений таких, как формирование ультрадисперсных систем, сгорание микрочастиц алюминия, пробой и распространение микроволнового разряда при взаимодействии электромагнитного излучения в гигагерцовом диапазоне высокой интенсивности с порошковыми засыпками металлических и диэлектрических частиц на поверхности металлодиэлектрических мишеней-инициаторов;

оценена концентрация электронов и измерены значения температуры, соответствующих распределению энергии по поступательным и внутренним степеням свободы газовых компонент в разряде, и температуры поверхности частиц;

показано, что при наличии разряда происходит выделение частиц из микровключений из серебра на поверхности металлодиэлектрической мишени-инициатора.

Совместное использование различных взаимодополняющих и независимых экспериментальных методов, сравнение полученных результатов с экспериментальными данными, полученными различными исследовательскими группами, позволяет сделать вывод о достоверности результатов, полученных Автором.

По материалам диссертационной работы Автором сделано 7 докладов на специализированных научных семинарах, всероссийских и международных конференциях. Результаты исследований опубликованы в 4 научных статьях в реферируемых зарубежных и отечественных изданиях, индексируемых базами Web of Science, Scopus и RSCI.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные Автором экспериментальные данные могут быть использованы для разработки моделей импульсного микроволнового разряда в гигагерцовом диапазоне атмосферного давления. Созданная в рамках диссертации экспериментальная база диагностики может быть использована в фундаментальных и прикладных исследованиях (например, электрических разрядов в жидкостях и газах, проводимых в ИНХС РАН и ЦАГИ), что повышает практическую ценность работы.

Исследования проведены Автором лично, либо при его участии. Результаты, полученные Автором, соответствуют областям исследования по специальности 1.3.9 – физика плазмы. Автореферат отражает содержание диссертации и позволяет составить достаточно полное представление о ней.

Работа выполнена на достаточно высоком научном уровне, однако имеются замечания и вопросы:

1.В диссертации (см. стр.19) отмечается, что «...рост сигнала фотодетектора может быть вызван началом интенсивного теплового и линейчатого излучения щелочных металлов вследствие нагрева частиц...». Как Автор объясняет присутствие линейчатого

спектра щелочных металлов в спектре испускания, обусловленного взаимодействием электромагнитного излучения с порошковой засыпкой ($0.5 \times Al + 0.5 \times Al_2O_3$) и диэлектрическим подложками (см. также стр.52 и 55)? Наиболее правдоподобное объяснение состоит в том, что излучение ионов щелочных металлов может быть связано с люминесценцией диэлектрических подложек (сделанных, в частности, из кварца), возникающих под действием ультрафиолетового излучения высокой интенсивности, которое, согласно Автору, невозможно обнаружить с помощью детекторов.

2. В диссертации не обсуждаются вопросы, касающиеся калибровочных характеристик оптической системы (спектрометр + световолокно): спектрального отклика, аппаратной функции и её полуширины. Данные характеристики используются Автором при моделировании спектров испускания.

2.1.Какой функцией аппроксимируется аппаратная функция спектрального прибора?

2.2.Какую величину принимает её полуширина?

2.3. Как определяется и учитывается при обработке спектров спектральный отклик оптической системы?

3.Исследуемый разряд является пространственно – неоднородным. Какое пространственное разрешение оптической системы при измерении спектров испускания разряда?

4. В работе имеются опечатки и замечания, касающиеся терминологии.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор Заклецкий Захар Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.