

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» на диссертационную работу Заклецкого Захара Александровича «Влияние плазмы на взаимодействие микроволнового излучения с порошковыми засыпками металлических и диэлектрических микрочастиц», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы

Диссертация посвящена экспериментальному исследованию плазмы микроволнового разряда, поддерживаемого излучением мощного гиротрона и ее взаимодействию с микрочастицами металлов и диэлектриков в воздушной среде.

Предмет исследования – взаимодействие плазмы, возбуждаемой 75 ГГц микроволновым излучением с плотностью мощности 10 кВт/см^2 и порошковых засыпки частиц серебра, алюминия и оксида алюминия, на примере которого рассмотрены физико-химические процессы, инициируемые этим воздействием.

Исследования и анализ полученных в работе результатов позволили выделить общие закономерности инициирования и распространения плазмы микроволнового разряда при прохождении импульсного микроволнового излучения через слой микрочастиц металлов и диэлектриков. Для исследования были использованы методы оптической эмиссионной спектроскопии излучения двухатомных молекул, визуализация процессов с использованием высокоскоростных видеокамер, балансные измерения мощности, численное моделирование распространения излучения для выявления закономерностей между распределением поля микроволнового пучка в неоднородных средах и структурой плазменного разряда, аналитические оценки микроволнового нагрева частиц для определения

влияния плотности мощности излучения и длительности микроволнового импульса для определения возможности микроволнового пробоа в результате нагрева газовой среды вблизи частиц.

Поэтому как тему диссертации, так и представленные в ней результаты следует считать **важными и актуальными**.

Остановимся кратко на **общей характеристике** диссертации.

Во **введении** показана актуальность темы исследования, изложены цели и задачи работы, новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, перечислены положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов, приведена информация об апробации результатов, описан личный вклад автора.

В **первой главе** представлена общая информация и вводятся основные понятие о подпороговых микроволновых разрядах возникаемых при взаимодействии мощного импульсного излучения гиротрона с металлодиэлектрическими мишенями и порошковыми засыпками металлических и диэлектрических микрочастиц. В тексте подробно излагается путь развития данной тематики в рамках ряда оригинальных работ, проводимых в ОФП ИОФ РАН, приводится обоснования новизны данных исследований, научного задела и ставится ряд задач, часть которых рассмотрена в рамках диссертационной работы. На основании обзора литературы формируется **цель работы и формулируются задачи исследования** – исследование инициирования и развития микроволнового разряда, возникающего при взаимодействии микроволнового излучения большой мощности (100-400 кВт) гигагерцового диапазона с порошковыми засыпками металлических и диэлектрических микрочастиц, а также его влияния на происходящие физико-химические процессы.

Для достижения поставленной цели решались **следующие задачи**:

Исследование процесса взаимодействия импульсного микроволнового излучения с порошковыми засыпками металлических и диэлектрических частиц в воздушной атмосфере при нормальных условиях.

Исследование условий, влияющих на инициирование микроволнового разряда на поверхности металлодиэлектрических мишеней и порошковых засыпок металлических и диэлектрических частиц, при воздействии на них импульсным миллиметровым излучением гиротрона.

Определение параметров, влияющих на реакции синтеза, возникающих при взаимодействии микроволнового излучения с порошковыми засыпками металлических и диэлектрических частиц.

Во **второй главе** представлены результаты исследования микроволнового разряда, инициированного вблизи поверхности кварцевой

подложки с внедренными в ее поверхность частицами серебра. Подробно рассмотрен процесс микроволнового пробоя, скорость распространения и структура плазмы микроволнового разряда в воздухе атмосферного давления. Определен спектральный состав плазмы разряда и проведена оценка газокинетической температуры двухатомных молекул и плотности электронов в плазме при поддержании плазмы импульсным микроволновым излучением со средней плотностью мощности 10 кВт/см^2 . Проведено сравнение полученных параметров плазмы с литературными данными по микроволновым подпороговым разрядам различной плотности мощности возбуждаемых в газовой среде с давлением от нескольких до сотен Торр.

В третьей главе представлены результаты исследования взаимодействия плазмы микроволнового разряда, поддерживаемой излучением импульсного гиротрона с плотностью мощности 10 кВт/см^2 с порошковой засыпкой микрочастиц алюминия и оксида алюминия при массовой концентрации металла 1:5 и общей массе смеси в 1.5 гр., которая находится в воздушной среде при атмосферном давлении. Было показано, что наличие данной порошковой смеси оказывает влияние на спектральный состав плазмы. Подробно описана динамика развития плазмы разряда в порошковой смеси с указанием характерных времён нахождения микрочастиц в слое плазмы. Определены характерные температуры микрочастиц в плазменном слое, а также подробно описан процесс воспламенения частиц алюминия при их попадании в окислительную воздушную среду, приведены оценки температуры и времени горения. Также приводятся результаты микроскопии микрочастиц после взаимодействия с микроволновым излучением гиротрона.

В четвертой главе представлены результаты исследования поглощения микроволнового излучения гиротрона на частоте 75 ГГц на микрочастицах алюминия для оценки влияния микроволнового нагрева на микроволновой пробой в воздушной и аргоновой среде. Приводятся результаты численного моделирования распределения электромагнитных полей при прохождении гауссова микроволнового пучка через слой порошка микрочастиц оксида алюминия для объяснения влияния дифракции микроволнового излучения на структуру плазмы микроволнового разряда. С помощью аналитических решений Ми рассеяния микроволнового излучения на сферических частицах найдена оптимальная модель для описания эксперимента по нагреву микрочастиц с линейным размером от 1 до 500 мкм 75 ГГц излучением. Было показано, что вклад микроволнового нагрева на протяжении всей длительности генерации микроволнового излучения в экспериментах, приведённых в диссертационной работе мал по сравнению с

плазменным нагревом. Также установлено, что за времена микроволнового пробоя в воздушной и аргоновой среде микроволновым нагревом частиц, а следовательно и изменением газовой среды вблизи них можно пренебречь.

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы.

Научная новизна работы заключается в том, что:

1. Впервые экспериментально продемонстрирован процесс инициирования и распространения микроволнового разряда на поверхности металлодиэлектрических мишеней.
2. Впервые определено значение колебательной и вращательной температуры газовых компонент и электронная плотность плазмы микроволнового разряда гигагерцового диапазона инициированного на поверхности металлодиэлектрической мишени
3. Экспериментально показано, что при инициировании и поддержании плазмы микроволнового разряда происходит испарение металлической фазы серебра с поверхности металлодиэлектрической мишени
4. С помощью решения Ми для двухслойных сферических частиц оценён вклад микроволнового нагрева на образование плазмы микроволнового разряда.
5. Получена зависимость температуры поверхности микронных частиц в порошковой засыпке от времени при инициировании плазмы микроволнового разряда и его поддержании на протяжении 6 мс с помощью микроволнового излучения интенсивностью 10 кВт/см² в воздушной атмосфере.
6. Впервые с помощью методов оптической и электронной микроскопии после экспериментальной серии по образованию плазмы микроволнового разряда в порошковых засыпках в воздушной среде показано наличие продуктов сгорания микрочастиц алюминия.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

представленные в диссертационной работе результаты направлены на разработку и создание новых методов обработки поверхности твёрдых тел, получения сложных металлодиэлектрических частиц связанных с физико-химическими процессами взаимодействия микроволнового излучения гигагерцового диапазона и плазмой инициированного с помощью данного излучения подпорогового микроволнового разряда. Полученные результаты имеют возможность быть использованы для разработки технологического процесса, направленного на замещение текущих химическими методами требующих дорогостоящих и токсичных прекурсоров на физические методы, использующие только электроэнергию. Также в получении результатов важную роль играет развитие электроники высоких мощностей, а именно

Достоверность полученных результатов обусловлена применением апробированных методик измерения оптических спектров и их анализа, измерения баланса мощности в разряде и анализа структуры металлических и металлодиэлектрических частиц с помощью сканирующего электронного микроскопа.

Апробация результатов.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 4 статьях в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК, также входящих в международные базы данных WoS и Scopus. Результаты работы докладывались на семи всероссийских и международных конференциях, а также на научных семинарах ИОФ РАН, Физфака МГУ им. М.В. Ломоносова и др.

В качестве достоинств диссертации следует отметить, что в работе исследуется уникальный объект – разряд, возникающий при взаимодействии мощного излучения с порошком. Для описания разряда автор исследовал широкий круг различных процессов – инициацию разряда, распространение разряда вдоль поверхности с порошком, нагрев порошки СВЧ излучением. Обнаружено воспламенение порошка алюминия в разряде. Для анализа процессов автор применил широкий круг диагностических методик, а для анализа взаимодействия электромагнитного поля с порошком использовалась математическая модель, учитывающая многослойную структуру частиц.

По работе можно сделать следующие замечания.

1. Говоря о структуре диссертации, следовало бы описание экспериментальной установки выделить как отдельную главу.

2. Во введении отсутствуют какие-либо ссылки на литературу. В то же время в автореферате, начало которого практически совпадает с соответствующим разделом автореферата, такие ссылки есть. Подпороговый микроволновый разряд в течение многих лет исследовался в МРТИ (к.В.Ходатаев, Л.П.Грачев и другие). В этих работах исследовались пороги разряда при различных частотах, пространственные структуры и параметры плазмы разряда. К сожалению, эта группа работ в диссертации не упоминается.

3. Пространственная структура подпорогового разряда зависит от соотношения частоты поля и частоты столкновений в газе и от плотности электронов. Этот вопрос в диссертации также не обсуждается, так же как и развитие перегретой неустойчивости, которая существенно изменяет пространственное распределение плазмы при развитии подпорогового разряда.

4. В первой главе (обзор литературы) все графические изображения также приводятся без указания ссылок на оригинальные научные работы.

5. Во второй главе приводятся параметры плазмы микроволнового разряда (температура газа и плотность электронов) без указания их пространственного распределения или причины, почему данное исследование не было проведено. Ввиду пространственной неоднородности разряда связанного с перераспределением энергии микроволнового излучения из-за дифракции излучения на микрочастицах и конструктивных элементах разрядной камеры данное исследование было бы полезно выполнить в дальнейшем.

6. В третьей главе отсутствует анализ влияния микроволнового излучения на процесс горения частиц алюминия, а также отсутствует информация о параметрах плазмы микроволнового разряда, которые могут быть существенно отличны от случая с внедрёнными частицами серебра.

7. В четвертой главе в явном виде не обсуждена возможность перехода от температуры микрочастиц при микроволновом нагреве за время задержки микроволнового пробоя к температуре и давлению газовой среды, при которой происходит изменение пробойной напряжённости поля для облегчения пробоя.

8. Работа содержит большое количество опечаток, например «фотодектор» вместо «фотодетектор (стр. 28), что затрудняет чтение работы

Сделанные замечания несколько не умаляют проделанной автором большой экспериментальной работы и полученных им результатов.

Заключение по диссертации о соответствии ее требованиям

Тема диссертации Заклецкого З.А. важна и актуальна. Работу следует отнести к научной специальности 1.3.9. Физика плазмы.

В процессе исследований в рамках диссертационной работы автором экспериментально **решена задача** исследования процессов в микроволнового разряда в воздушной среде содержащей металлические и диэлектрические частицы, При анализе результатов учитывалось взаимодействие всех компонент разряда, что имеет большое значение для развития физики низкотемпературной плазмы.

Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы широким кругом специалистов, занимающихся изучением микроволновых разрядов, взаимодействием плазмы с твёрдыми телами, технологическими приложениями плазмы. В работе представлено решение ряда актуальных задач, которые могут использоваться для дальнейшего развития теоретических моделей.

Результаты работы целесообразно использовать в Институте космических исследований РАН, Объединённом институте высоких температур РАН, Физическом институте им. П.Н. Лебедева, Институте общей физики им. А.М. Прохорова, Институте прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова и других научных организациях, проводящих исследования в области низкотемпературной и микроволновой плазмы.

Результаты диссертационной работы хорошо известны специалистам, докладывались на 7 российских и международных конференциях, опубликованы в 4 статьях в высокорейтинговых отечественных журналах. Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации. Личный вклад Заклецкого З.А. явно обозначен и не вызывает сомнений.

Все перечисленные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей значимости диссертационной работы. 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., (ред.18.03.2023г.) а ее автор Заклецкий Захар Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы

Доклад соискателя был заслушан и одобрен на семинаре «Физика плазмы» кафедры физической электроники физического факультета МГУ 26 ноября 2024 (протокол №2024-6). Решением семинара было поручено подготовить отзыв на представленную работу профессору кафедры физической электроники, д.ф.-м.н. С.А. Двинину.