

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени «доктор философии» (Ph.D.)
по специальности «6D060400 – Физика»

ҮСЕНОВ ЕРБОЛАТ АБУТАЛИПУҰЛЫ

ДИАГНОСТИКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КОМПЛЕКСНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ НИЗКИХ И АТМОСФЕРНЫХ ДАВЛЕНИЯХ

В диссертационной работе представлены результаты экспериментального исследования и диагностики структурных, кинетических и динамических свойств низкотемпературной комплексной плазмы газовых разрядов в условиях разреженного газа и при атмосферном давлении.

Актуальность темы

Плазма - это частично или полностью ионизованный газ, в котором плотности положительных и отрицательных зарядов практически одинаковы, а линейные размеры области, занимаемой им, значительно превосходят расстояние (так называемый дебаевский радиус), на котором электрическое поле отдельной заряженной частицы исчезает вследствие экранирования другими частицами.

Диагностика плазмы - совокупность методов и исследований целью которых является определение локальных, мгновенных или общих и усредненных значений основных ее параметров: формы и структуры, концентраций электронов, атомов и молекул, входящих в состав плазмообразующей среды в основном и различных возбужденных состояниях, средней кинетической энергии и температуры заряженных частиц, наличие и плотности химически активных веществ, радикалов и т.д.

Традиционно термин "комплексная плазма" используется как определение для обычной плазмы разреженных газов содержащей высокодисперсные заряженные частицы конденсированного состояния вещества с размером от нескольких сотен нанометров и до нескольких десятков микрометров. Также в литературе широко распространен термин "пылевая плазма" (dusty plasma). Однако в течение последних десятилетий область применения определения "комплексная плазма" существенно расширилась. Данный факт обусловлен развитием методов генерации и новыми исследованиями в области низкотемпературной плазмы атмосферного разряда. Разработка новых источников неравновесной, "холодной" плазмы как плазменные струи диэлектрического барьерного разряда, поверхностные разряды, микрозаряды и исследование их свойств применительно к медицине, агропромышленности, технологии новых материалов показывают, что плазма в таких видах газовых разрядов обладает сложным составом и является комплексной.

Комплексная плазма отличается от обычной плазмы наличием дополнительных составляющих компонентов плазмы (нано и микро частицы,

химический активные радикалы и ионы и т.д.) которые вводятся искусственно или генерируются самопроизвольно. Также плазму можно считать комплексной если она находится во взаимодействии с твердыми поверхностями. В данной диссертационной работе исследуются методы диагностики комплексной низкотемпературной плазмы как при низких давлениях так и в условиях атмосферного давления.

Присутствие пыли в плазме приводит к появлению нового плазменного параметра – заряд пылевой частицы, который зависит от размера макрочастицы и локальных параметров окружающей плазмы. Заряд пылевой частицы может быть очень большим. Например, в газоразрядной плазме низкого давления, отрицательный заряд пылевой частицы достигает 10^3 – 10^5 зарядов электрона для частицы микронных размеров. В следствие большой массы пылевых частиц и величины заряда, наличие пылевой компоненты сильно изменяет характерные пространственные и временные масштабы в плазме. Поэтому определение основных параметров и диагностика комплексной пылевой плазмы является наиболее **актуальной задачей** для понимания физических процессов и оптимизации технологических аспектов.

Комплексная плазма атмосферного давления, в том числе и диэлектрический барьерный разряд (ДБР) является все еще не полностью изученным и не теряет интерес со стороны мирового научного сообщества. Из-за наличия в составе различных метастабильных атомов, активных ионов и радикалов кислорода и азота, паров воды и из за постоянного взаимодействия с поверхностью материалов и живых клеток низкотемпературная атмосферная плазма является комплексной средой со сложным составом. Поэтому, на сегодняшний день, для глубокого понимания физико-химических процессов и для оптимизации технологических процессов одной из **актуальных** задач является исследование и диагностика плазмы сложного состава при атмосферном давлении.

Цель работы.

Основной целью работы является диагностика и исследование свойств низкотемпературной комплексной плазмы при низких и атмосферном давлениях и разработка новых методов на основе полученных данных.

Объектом исследования является низкотемпературная фоновая и комплексная плазма ВЧ разряда, тлеющего разряда, плазменный кулоновский кристалл и комплексная газоразрядная плазма ДБР.

Предмет исследования – температура и концентрация заряженных частиц в комплексной плазме, потенциал плазмы, напряжения самосмещения высокочастотного (ВЧ) разряда, размеры области свободной от пылевых частиц вокруг зонда, заряд пылинок, распределение частиц по скоростям, статическая и динамическая вольт-амперная характеристика, эмиссионные спектры разрядов, структура ДБР.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

– изучить процессы в призондовой области в присутствии пылевых частиц в низкотемпературной комплексной плазме тлеющего разряда и

определить параметры фоновой плазмы на основе измерения радиуса области свободной от пылевых частиц.

– исследовать температуру электронов комплексной плазмы в ВЧ разряде в смесях инертных газов и изучить влияние пылевой компоненты на параметры фоновой плазмы.

– адаптировать метод обычной зондовой диагностики для определения параметров комплексной плазмы с наноразмерными пылевыми частицами и изучить зависимость данных параметров от циклического процесса роста наночастиц в ассиметричном ВЧ разряде.

– изучить электрические, оптические и структурные свойства низкотемпературной плазмы ДБР, плазменной струи атмосферного давления (ПСАД) и определение режимов разряда и состава плазмы.

Положения, выносимые на защиту:

- экспериментальное измерение размеров области свободной от пылевых частиц вокруг зонда при уменьшении (по абсолютному значению) приложенного отрицательного потенциала на зонд относительно потенциала окружающей плазмы позволяет определить температуру и концентрацию электронов в комплексной плазме положительного столба тлеющего разряда;

- добавка малого количества аргона в основной газ гелий в соотношении 97% He + 3% Ar приводит к уменьшению температуры электронов фоновой плазмы, в то время как наличие пылевой компоненты способствует росту электронной температуры;

- циклический рост наночастиц в комплексной плазме ВЧ разряда приводит к уменьшению концентрации электронов и к существенному увеличению потенциала плазмы и температуры электронов;

- при равномерном увеличении объемного расхода плазмообразующих инертных газов как аргон и гелий в диапазоне 1 - 20 л/мин длина плазменной струи сокращается после достижения некоторого максимума, увеличение приложенного напряжения на электроды способствует увеличению длины струи, в то время как изменение частоты напряжения не имеет влияния.

Новизна работы. Новизна и оригинальность диссертационной работы заключаются в том, что в ней **впервые:**

- разработан метод определения основных параметров фоновой плазмы тлеющего разряда на основе измерения размеров области свободной от пылевых частиц в зависимости от потенциала зонда;

- методом "комплексной" развертки приложенного напряжения проведена зондовая диагностика и определены температура электронов и потенциал комплексной плазмы ассиметричного ВЧ разряда содержащей наночастицы;

- оценен заряд разлетающихся частиц в плазменном кулоновском кристалле в условиях микрогравитации;

- детально исследована зависимость структурных свойств плазменной струи и объемного диэлектрического барьерного разряда при атмосферном давлении от экспериментальных условий;

Теоретическая и практическая значимость исследования. Полученные в диссертационной работе результаты представляют ценность для развития

физики комплексной плазмы и физики низкотемпературной плазмы в целом. Они будут очень полезны для глубокого понимания механизмов образования самоорганизующихся структур из пылевых частиц в низкотемпературной плазме, для изучения процесса зарядки частиц, для детального исследования свойств плазмы при взаимодействии с поверхностью материалов, для разработки научно технологических основ обработки низкотемпературной плазмой различных материалов, биологических объектов и живых тканей.

Разработанные методы диагностики комплексной плазмы при низких давлениях могут быть полезны для определения параметров фоновой плазмы в лабораторных установках различных газовых разрядов, в установках газофазного осаждения и травления, в вакуумно-плазменных установках по очистке и активации поверхностей подложек в микроэлектронике и в установках для синтеза различных наноструктурированных материалов в плазменной среде.

Достоверность и обоснованность полученных результатов.

В диссертационной работе использовались известные и апробированные экспериментальные методы как ленгмюровский зонд, методы исследования электрических свойств плазмы (осциллографирование тока и напряжения, измерения напряжения самосмещения), и оптические методы диагностики (оптико-эмиссионная спектроскопия, высокоскоростная фотосъемка). Полученные результаты с помощью применения нового предложенного метода диагностики параметров буферной плазмы на основе изучения области свободной от пылевых частиц вокруг зонда хорошо согласуются с результатами классического зондового метода. Также, теоретический расчет размеров области свободной от пылевых частиц показывает хорошее согласие с экспериментом. Результаты по изучению поведения параметров плазмы в процессе роста наночастиц полученные методом "комплексной развертки" зондового напряжения коррелируют с результатами измерения напряжения самосмещения. Также достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждаются публикациями в журналах дальнего зарубежья с высоким импакт-фактором и в изданиях, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК, и в трудах международных научных конференций ближнего и дальнего зарубежья.

Личный вклад автора заключается в том, что весь объем диссертационной работы, выбор метода исследования, сборка, наладка и модернизация экспериментальных установок, проведение экспериментов и анализ полученных данных выполнены автором самостоятельно. Постановка задач и обсуждение результатов проводились совместно с научными руководителями.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 24 печатных работ: 5 в журналах из Перечня ККСОН МОН РК для опубликования основных результатов диссертации на соискание ученой степени PhD и 3 статьи в журналах дальнего зарубежья с импакт-фактором, входящих в международный информационный ресурс Web of Science (Clarivate Analytics,

США) и Scopus (Elsevier, Нидерланды); 15 работ в материалах Международных научных конференций и 1 патент РК.

Апробация диссертационной работы. Результаты, полученные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались:

– на 7-ой международной конференции по физике пылевой плазмы «ICPDP-2014» (2014, Нью-Дели, Индия);

– на 22-ой Еврофизической конференции по атомной и молекулярной физике ионизованных газов «ESCAMPIG-XXII» (2014, Грейфсвальд, Германия);

– на международной конференции по физике сильно-связанных кулоновских систем «SCCS-2014» (2014, Нью-Мехико, США);

– на международной конференции «Границы в низкотемпературной плазменной диагностике» «FLTPD-2015» (2015, Поркероль, Франция);

– на 14-ом международном семинаре по физике пылевой плазмы (2015, Аубурн, шт. Алабама, США);

– на 8-ой международной конференции по физике плазмы и плазменных приложений «PPPT-8» (2015, Минск, Беларусь);

– на 23-ей международной конференции по явлениям в ионизованных газах «ICPIG - 2015» (2015, Яссы, Румыния);

– на 15-ой международной конференции по физике неидеальной плазмы «PNP-15» (2015, Алматы);

– на международной конференции студентов и молодых ученых «ФАРАБИ ЭЛЕМИ» (2015, КазНУ им. аль-Фараби, Алматы);

– на 42-ой конференции Европейского физического общества по физике плазмы «EPS-XXXXII» (2015, Лиссабон, Португалия);

– на 9-ой международной научной конференции «Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование» (2016, Алматы);

– на 23-ей Еврофизической конференции по атомной и молекулярной физике ионизованных газов «ESCAMPIG-XXIII» (2016, Братислава, Словакия)

– на 24-ой международной конференции по явлениям в ионизованных газах «ICPIG» (2017, Ешторил, Португалия);

– на 8-ой международной конференции по физике пылевой плазмы «ICPDP-2017» (2017, Прага, Чехия);

– на международной конференции по физике сильно-связанных кулоновских систем «SCCS-2017» (2017, Киль, Германия);

– на 44-ой конференции Европейского физического общества по физике плазмы «EPS-XXXXIV» (2017, Белфаст, Ирландия);

– на 24-ой Еврофизической конференции по атомной и молекулярной физике ионизованных газов «ESCAMPIG-XXIV» (2018, Глазго, Шотландия, Великобритания);

– на 15-ом международном семинаре по физике пылевой плазмы (2015, Балтимор, Мэриленд, США);

– на Международном симпозиуме по физике плазмы и плазменным технологиям (2018, Прага, Чехия);

Связь темы диссертации с планами научных работ. Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами фундаментальной научно-исследовательской работы (НИР) КН МОН РК «Грантовое финансирование научных исследований» по темам:

– «Влияние процессов пылеобразования и свойств пристеночной плазмы с пылинками на режимы работы термоядерных энергетических реакторов» (2015-2017 гг., шифр 3112/ГФ4);

– «Исследование свойств и влияния холодной плазмы атмосферного давления на поверхности материалов» (2015-2017 гг., шифр 3220/ГФ4.);

– «Разработка научно-технологических основ повышения роста растений и урожайности зерновых культур с помощью обработки холодной плазмой атмосферного давления» (2018-2020 гг., ИРН АР05134280);

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 3 разделов, заключения и списка использованных источников из 136 наименований, содержит 124 страниц основного компьютерного текста, включая 78 рисунков и 1 таблицу.