РЕЦЕНЗИЯ

на диссертационную работу докторанта PhD Үсенова Ерболата Абуталипұлы на тему: **«Диагностика низкотемпературной комплексной плазмы при низких и атмосферных давлениях»**, представленной на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности «6D060400 – Физика».

Ознакомившись с диссертацией Үсенова Ерболата Абуталипұлы на тему: «**Диагностика низкотемпературной комплексной плазмы при низких и атмосферных давлениях**», представленной на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности «6D060400 – Физика», пришел к следующему заключению:

В диссертационной работе Усенова Е.А. выполнено экспериментальное исследование и диагностика параметров неравновесной комплексной плазмы при низких и атмосферных давлениях. Диссертантом разработаны и предложены новые методы диагностики газоразрядной плазмы сложного состава.

Диссертационная работа Үсенова Е.А. выполнена в соответствии с планами фундаментальной научно-исследовательской работы КН МОН РК «Грантовое финансирование научных исследовании» 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 AP05134280).

1. Актуальность темы исследования и ее связь с общенаучными и общегосударственными программами.

Исследования низкотемпературной плазма газовых разрядов на сегодняшний день очень актуальны ее широкого использования в науке и технике. Область приложении газоразрядной плазмы очень обширна, начиная от простых источников света и заканчивая высокотехнологичными установками плазменного травления и осаждения в микроэлектронике и нанотехнологиях. Как известно, неравновесная газоразрядная плазма является средой со сложным составом, и состоит как минимум из трех основных компонент: нейтральных атомов, ионов и электронов. При наличии в плазме так называемых "пылевых" частиц с размерами от несколько десятков нанометров до сотен микрометров и химический активных радикалов, отрицательных ионов и т.д. плазму можно называть комплексной средой. Комплексная плазма при низких и атмосферных давлениях активно используется для различных промышленных целей.

Самопроизвольный рост наночастиц в плазме, добавка малого количества пылевых частиц извне приводит к радикальному изменению свойств плазмы в целом. В частности, сильно меняются основные параметры плазмы, такие, как температура и концентрация заряженных частиц. Их значение определяют режимы горения разряда и возможности применения в конкретных технологических целях. Диагностика плазмы с целью контроля ее основных параметров для мониторинга технологических процессов, где используется

комплексная неравновесная газоразрядная плазма, является важной и актуальной задачей. Поэтому, диссертационная работа Үсенова Ерболата Абуталипұлы посвященная диагностике и определению параметров плазмы путем использования не только традиционных, но и разработанных новых альтернативных методов на данный момент является очень актуальной.

2. Научные результаты в рамках требований к диссертации (пп. 127 Правил присуждения ученых степеней)

Итогом работы Үсенова Е.А. по теме диссертации является ряд новых и вполне достоверных научных результатов. Отметим основные из них.

– экспериментально определен радиус свободной области от пылевых частиц вокруг электрического зонда. Установлена зависимость размеров этой области от приложенного к зонду потенциала, в частности, было выявлено, что с ростом потенциала зонда уменьшается размер области, свободной от пылевых частиц.

– определена температура электронов плазмы газового разряда в смесях инертных газов (гелий + аргон) в высокочастотном (ВЧ) разряде и измерено ее аксиальное распределение. Показано, что добавка малого количества аргона в основной газ – гелий, приводит к значительному уменьшению температуры электронов.

– проблема загрязнения поверхности зонда заряженными наночастицами в химической активной плазме решена с помощью применения «комплексной развертки» напряжения зонда и с помощью комбинации ионной бомбардировки с электронным нагревом. Представлены результаты зондовых измерений температуры, плотности электронов и потенциала плазмы в аргон – ацетиленовой плазме ассиметричного ВЧ разряда при частоте 13,56 МГц в присутствии наночастиц.

– проанализированы движения нейтральных и заряженных диамагнитных частиц плазменного кулоновского кристалла в магнитном поле пробкотронного типа в условиях микрогравитации. Получен эффект разрушения и «кулоновский взрыв» формируемых структур при больших значениях электрического поля. Определены распределение по скоростям и заряд разлетающихся частиц.

– измерены динамическая вольт-амперная характеристика диэлектрического барьерного разряда и спектры плазмы воздуха при различных конфигурациях электродов. Изучены оптические свойства и химический состав плазмы методом оптико-эмиссионной спектроскопии.

3. Степень обоснованности и достоверности каждого научного результата (научного положения), выводов и заключения соискателя, сформулированных в диссертации

В диссертационной работе используются классические хорошо и апробированные экспериментальные методы, такие как ленгмюровский зонд, осциллографирование тока и напряжения, оптико-эмиссионная спектроскопия, высокоскоростная фотосъемка. Результаты нового предложенного метода диагностики параметров буферной плазмы на основе изучения области, свободной от пылевых частиц вокруг зонда, сравниваются с результатами классического зондового метода и показывают хорошее согласие с ними. Результаты работы неоднократно докладывались на международных научных конференциях ближнего и дальнего зарубежья, активно обсуждались с коллегами на

семинарах и конференциях. Они опубликованы в профильных научных журналах с высоким рейтингом. Все это свидетельствует об обоснованности и достоверности полученных в диссертации результатов.

4. Степень новизны каждого научного результата (положения), вывода соискателя, сформулированных в диссертации

Результаты, полученные в диссертации Усеновым Е.А., являются новыми и заключаются в следующем:

- предлагается новый альтернативный метод определения параметров фоновой плазмы тлеющего разряда на основе измерения размеров области свободной от пылевых частиц в зависимости от потенциала зонда.
- впервые методом "комплексной" развертки приложенного напряжения электрического зонда определены температура, концентрация электронов и потенциал комплексной плазмы ассиметричного ВЧ разряда содержащей наночастицы. Показано, что благодаря данным, полученным с применением этого метода, может быть успешно решена проблема загрязнения собирающей части зондового наконечника.
- показано, что добавка малого количества аргона в основной газ - гелий, приводит к значительному уменьшению температуры электронов фоновой плазмы, в то время как наличие пылевой компоненты, наоборот, способствует росту электронной температуры
- в результате исследований структурных свойств плазменной струи определено, что видимая длина низкотемпературной плазменной струи при атмосферном давлении увеличивается с ростом потока газа в ланминарном режиме, но с переходом в турбулентный режим она сокращается.

5. Практическая и теоретическая значимость полученных результатов

Результаты диссертационной работы представляют ценность для физики и технологии низкотемпературной плазмы. Предложенные альтернативные методы диагностики могут быть использованы для определения параметров комплексной плазмы, где классические методы могут оказаться не пригодны. Полученные результаты по изучению поведения параметров плазмы при синтезе наночастиц в плазменной среде будут полезны для оптимизации данного процесса с целью улучшения его эффективности.

6. Замечания и предложения по диссертации:

В целом к диссертационной работе нет замечаний и нет желания их указывать – работа хорошая, интересная, сделан очень полный обзор по теме, приведенные результаты являются частью большого объема выполненных работ, изложены четко, ясно. Но все же укажем на следующие недочеты:

1. В тексте дисертации присутствуют незначительные грамматические и стилистические ошибки и опечатки, в частности, у соискателя проблема со знаками препинания – очень часто пропускаются запятые. Хотя это совершенно несущественно по сути, но для понимания текста запятые иногда очень существенны;

2. В списке использованных работ есть некоторые замечания по оформлению используемых источников;

3. Во главе 2.3 было бы целесообразно более детально описать способ определения размеров наночастиц в высокочастотном разряде, поскольку размер частиц является одним из ключевых параметров в пылевой плазме;

4. Во главе 3.1, где приведены результаты экспериментов по изучению структуры плазмы объемного диэлектрического разряда не приведены численные значения скорости потока воздуха;

5. На рисунках с геометрическими данными желательно всегда приводить масштабную линейку - шкалу

Перечисленные замечания не носят принципиального характера и не сказываются на общей концепции проведенных исследований, на значимость и новизны работы.

Считаю что данное направление работ следует поддерживать и в дальнейшем.

7. Соответствие содержания диссертации в рамках требований Правил присуждения ученых степеней

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа Үсенова Ерболата Абуталипұлы на тему «Диагностика низкотемпературной комплексной плазмы при низких и атмосферных давлениях», представленная на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности «6D060400 – Физика», соответствует требованиям «Правил присуждения ученых степеней», предъявляемым к работам такого рода, как по содержанию, так и по объему, а соискатель Үсенов Е.А. заслуживает присуждения искомой степени по указанной специальности.

Рецензент,
Ведущий научный сотрудник ИОФ РАН,
д. ф.-м. н. С.А. Майоров

Подпись С.А. Майорова заверяю

Вр.и.о. Ученого секретаря ИОФ РАН
д. ф.-м. н. В.В. Глушков
«13» мая 2019 г.