

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе и
инновациям ФГАОУ ВО НИ ТПУ



К.Т.Н., доцент

С.А. Байдали

“20” сентября 2017 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Балданова Баира Батоевича «Источники неравновесной аргоновой плазмы на основе слаботочных высоковольтных разрядов», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.04 – Физическая электроника

Диссертационная работа Б.Б. Балданова посвящена разработке плазменных источников для генерации объемной однородной неравновесной плазмы атмосферного давления на основе слаботочных высоковольтных разрядов, и их применению в новых технологиях.

Актуальность темы исследований обусловлена перспективами применения низкотемпературной неравновесной плазмы в различных областях науки и техники: медицина, биотехнология, нанотехнология, и в ряде смежных научных дисциплин. Одним из наиболее перспективных и бурно развивающихся направлений исследований является возможность использования низкотемпературной неравновесной плазмы в области медицины и биологии. Необходимо отметить, что интенсивные исследования по применению низкотемпературной плазмы в области здравоохранения начаты в конце 90-х гг. прошлого века в ряде развитых стран с традиционно сильными исследованиями в области физики России, Германии, США, Франции и др, привели к формированию нового научного направления – «плазменная медицина». Данное направление носит междисциплинарный характер и охватывает довольно широкий спектр различных областей деятельности человека, что привело к формированию ряда перспективных направлений в медицине, сельском хозяйстве, пищевой промышленности для которых использование низкотемпературной плазмы может стать прорывным методом, позволяющим достичь принципиально новых результатов.

Одной из основных физических задач в области плазменной медицины является выбор оптимального способа генерации плазмы, так и параметров плазмохимической обработки, при которых осуществляется безопасное и неразрушающее воздействие с высокой селективностью и воспроизводимостью результатов. В этой связи тематика представленной диссертационной работы, связанная с оригинальным подходом к разработке плазменных источников, на основе слаботочных форм высоковольтных разрядов с невысокой плотностью тока, позволяющая получить объемную низкотемпературную (холодную) неравновесную плазму при атмосферном давлении в больших объемах, является актуальной, как с научной, так и с практической точек зрения.

Структура и содержание работы.

Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов и списка литературы (объем 239 стр). Она содержит 4 таблицы и 115 рисунков. Список литературы включает 320 источников.

Во **Введении** рассмотрены актуальность, научная и практическая значимость работы, сформулированы цели исследования и положения, выносимые на защиту, приведена информация о новизне полученных результатов, личном вкладе автора, структуре и апробации работы.

В первой главе проведен критический анализ результатов экспериментальных и теоретических работ в области физики и техники импульсных разрядов в газах. Описаны основные принципиальные конструктивные решения, используемые в экспериментальных установках и приборах для генерации низкотемпературной неравновесной плазмы атмосферного давления, применительно к инаktivации микроорганизмов. Рассмотрены различные типы источников плазмы, применяемые для биомедицинских целей. Отмечено, что большую проблему представляет оценка результатов плазменной инаktivации микроорганизмов, полученных в различных экспериментальных условиях. Рассмотрено применение низкотемпературной «холодной» плазмы при атмосферном давлении как антибактериального агента с выделением признаков достоинства – отсутствие высокотоксических веществ пролонгированного действия, малая вероятность развития спонтанной устойчивости к низкотемпературной плазме у микроорганизмов.

Проведенный автором анализ литературных источников позволяет составить адекватное представление о современном состоянии проблемы, оценить ее актуальность и вклад диссертационной работы в развитие рассматриваемого научного направления. Из анализа литературы логично вытекают сформулированные автором цель и задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** излагаются результаты систематических исследований импульсно-периодического режима отрицательного коронного разряда постоянного напряжения в конфигурации электродов острие-плоскость. Установлено, что отрицательная корона в аргоне зажигается в импульсно-периодическом режиме при небольших значениях среднего тока короны и характеризуется обнаруженной установившейся последовательностью токовых импульсов, с длительностью, лежащей в миллисекундной области. Изучено влияние газодинамических и геометрических факторов на параметры (амплитуду, частоту следования) импульсов тока и токовую область существования импульсно-периодического режима отрицательной короны.

В **третьей главе** описаны результаты экспериментальных исследований перехода импульсно-периодического режима отрицательной короны в режим тлеющего разряда атмосферного давления. Использование специальных мер стабилизации разряда (газодинамический поток, большое балластное сопротивление) позволило реализовать непрерывный переход импульсно-периодического режима отрицательной короны к стационарному разряду без импульсов тока, идентифицируемого в литературе как новый вид разряда – тлеющий разряд атмосферного давления. Показано, что величина предельного тока перехода увеличивается с ростом межэлектродного расстояния и с уменьшением скорости прокачки газа через разрядный промежуток. Показано, что растекание тока на аноде отрицательной короны в аргоне характеризуется немонотонным радиальным распределением тока по аноду, при увеличении напряжения плотность тока на центральной части анода начинает увеличиваться резче линейного закона, а на периферийной части секции темп нарастания плотности тока резко снижается, что приводит к резкому сужению токового канала на аноде.

Четвертая глава посвящена разработке и созданию источника низкотемпературной неравновесной аргоновой плазмы на основе тлеющего разряда атмосферного давления в электродной системе многоострый катод - плоский анод. Разработан и создан источник однородной объемной аргоновой плазмы на основе тлеющего разряда атмосферного давления в электродной системе многоострый катод - плоский анод. В режиме тлеющего разряда атмосферного давления разряд наблюдается в виде однородных, самостоятельных разрядов, заполняющих большую часть разрядной области и перекрывающих все межэлектродное расстояние. Изучено влияние балластных сопротивлений R_b на коронирующих остриях на параметры разряда. Показано, что секционирование катода, наличие индивидуальных балластных сопротивлений на коронирующих остриях позволяет существенно расширить токовую область существования разряда и значительно увеличить предельный ток разряда.

Пятая глава посвящена разработке и созданию источника низкотемпературной (холодной) аргоновой плазмы на основе плазменных струй атмосферного давления. Изучены свойства высоковольтного искрового разряда в геометрии острие-плоскость при ограничении разрядного тока большим балластным сопротивлением (> 1 МОм). Показано, что характер протекания тока в тонком плазменном канале искрового разряда представляет собой установившийся режим регулярных импульсов тока. Разработан способ генерации низкотемпературной (холодной) неравновесной аргоновой плазмы, который базируется на использовании нестационарной формы горения диффузного разряда типа тлеющего, на который накладываются слаботочные искровые разряды. Данный тип разряда формируется в потоке газа в виде плазменных струй атмосферного давления. На основе реализованной формы разряда разработан и создан высокоэффективный портативный источник низкотемпературной неравновесной аргоновой плазмы PortPlaSter.

В **шестой главе** представлены результаты исследований бактерицидных свойств низкотемпературной (холодной) неравновесной аргоновой плазмы генерируемой слаботочными формами высоковольтных разрядов. Бактерицидная эффективность воздействия низкотемпературной (холодной) неравновесной аргоновой плазмы тлеющего разряда атмосферного давления исследовалась на бактериях природной ассоциации микроорганизмов. Изучение выживаемости бактерий в диффузной плазме источника прямого действия на основе тлеющего разряда атмосферного давления показало, что полная инактивация микроорганизмов наблюдается в секундном интервале обработки: как в импульсно-периодическом режиме работы генератора, так и в режиме тлеющего разряда атмосферного давления. Показана высокая антибактериальная эффективность источника неравновесной аргоновой плазмы генерируемой плазменными струями слаботочного искрового разряда. Воздействие плазменных струй слаботочного искрового разряда на микроорганизмы разных таксономических групп (*Escherichia coli*, *Bacillus subtilis*, мицелиальные грибы и дрожжи) в течение 4 мин приводит к полной инактивации микроорганизмов в области воздействия плазмы.

В **заключении** сформулированы основные результаты исследования и выводы.

Новизна сформулированных в работе научных положений и выводов

К наиболее значимым новым научным результатам может быть отнесено следующее:

1. Впервые реализован отрицательный коронный разряд постоянного напряжения в электроположительном газе – аргоне. Установлено, что протекание тока в разрядном

промежутке отрицательной короны в аргоне представляет собой установившийся режим регулярных импульсов тока с длительностью, лежащей в миллисекундном диапазоне.

2. Реализован непрерывный переход импульсно-периодического режима отрицательного коронного разряда в режим стационарного разряда – тлеющего разряда атмосферного давления.

3. Иницирован стационарный объемный тлеющий разряд атмосферного давления в атмосфере аргона в конфигурации электродов многоострый катод - плоский анод. Проведенные экспериментальные исследования продемонстрировали, что стационарная сильнонеравновесная плазма однородно заполняет весь межэлектродный промежуток.

4. Обнаружена нестационарная форма диффузного разряда – тлеющего разряда, на который накладываются слаботочные искровые разряды. Данный тип разряда формируется в потоке газа, в виде плазменных струй атмосферного давления.

5. Показана высокая эффективность бактерицидного действия источников низкотемпературной (холодной) неравновесной аргоновой плазмы на основе слаботочных форм высоковольтных разрядов атмосферного давления. Изучение выживаемости бактерий в неравновесной аргоновой плазме генерируемой разрядами показало, что полная инактивация микроорганизмов наблюдается в секундном интервале обработки.

Результаты и выводы, полученные диссертации Б.Б. Балданова, достаточно полно изложены в 58 печатных работах. Основные публикации – 32 статьи в рецензируемых журналах и периодических изданиях, включая 28 статей в журналах рекомендованных Высшей аттестационной комиссией для публикации материалов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук. Десять работ опубликовано без соавторов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Защищаемые положения и выводы, представленные в диссертационной работе Балданова Б.Б. обеспечены большим объемом экспериментальных данных, которые получены с использованием различных дублирующих друг друга методик, анализом применимости методик к объектам и условиям исследования, а также соответствием полученных результатов теоретическим представлениям и доступным из литературы экспериментальным данным, полученным другими авторами.

Практическая значимость

С практической точки зрения главным итогом диссертационной работы являются рекомендации по разработке, конструированию и созданию новых технологий стерилизации и обеззараживания с высокой эффективностью и малым временем обработки объектов. Разработанные плазменные установки позволяют масштабировать и интегрировать устройства стерилизации в различные промышленные и бытовые объекты

(стерилизатор медицинского назначения, сфера услуг, бытовые приборы, биотехнология, микроэлектроника, пищевая промышленность и т.д.). Низкотемпературный характер плазмы разряда позволяет стерилизовать любые термочувствительные материалы, широко используемые в различных областях науки и техники.

Научно-практическая значимость работы подтверждается и тем, что на разных этапах она поддерживалась и выполнялась в рамках проектов фундаментальных исследований СО РАН, государственного задания ФАНО России, междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН, заказных проектов Министерства образования и науки Российской Федерации, гранта Российского фонда фундаментальных исследований.

Оценка содержания и завершенности диссертации

Диссертация Б.Б. Балданова является завершенным научным исследованием, она изложена ясно, характеризуется логичностью построения и внутренним единством структуры. Диссертационная работа полностью соответствует паспорту специальности 01.04.04 – физическая электроника. Публикации и автореферат правильно передают содержание диссертации, ее основные результаты и выводы.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы в исследовательских, проектных и конструкторских организациях, работающих в области физики и применения низкотемпературной плазмы (ОИВТ, ФИ РАН, ИРЭ РАН, ИОФ РАН, ИСЭ СО РАН, ИНСХ РАН, МГУ, МГТУ и др.).

Замечания по диссертационной работе

По работе можно сделать следующие замечания:

1. При исследовании бактерицидных свойств источника аргоновой плазмы диссертантом не рассматривается влияние расхода аргона на площадь инактивации, несмотря на то, что как показано, варьирование других газодинамических параметров (таких как, расстояние от сопла генератора плазмы до обрабатываемой поверхности, диаметр сопла) оказывает значимый эффект.

2. При рассмотрении механизма инактивации бактерий в неравновесной аргоновой плазме (стр. 199) диссертант указывает лишь эффект травления поверхности клеток ионами и электронами, упуская на наш взгляд существенный вклад ультрафиолетового излучения.

3. В диссертации отсутствуют данные о влиянии низкотемпературной аргоновой плазмы атмосферного давления на предпосевную биоактивацию семян, при том, что к диссертации приложен соответствующий акт об использовании результатов диссертационной работы.

4. Имеются небольшие погрешности в оформлении работы, опечатки и неудачные выражения, например, на стр. 198 на рис. 6.14 отсутствуют размерные шкалы, на стр. 37 в последнем абзаце физически неверно указывается, что плазма «воспламеняется», на стр. 65 в подписи к рис. 2.11 неправильно указана единица измерения давления «Тор» вместо Торр и т.д.

Отмеченные недостатки не изменяют общего хорошего впечатления от рассматриваемой работы.

Заключение

Диссертация Балданова Б.Б. является научно-квалификационной работой, в которой получены результаты, совокупность которых можно квалифицировать как решение важной научной проблемы генерации объемной низкотемпературной (холодной) неравновесной плазмы при атмосферном давлении в больших объемах плазменными источниками на основе слаботочных высоковольтных разрядов, имеющая важное хозяйственное значение для развития плазменных технологий стерилизации и обеззараживания.

Диссертационная работа Балданова Баира Батовича соответствует критериям, установленным п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением правительства РФ от 24.09.13 №842 (ред. от 20.07. 2014), а ее автор заслуживает присвоения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Отзыв заслушан и обсужден на заседании научного семинара Лаборатории №1 ИФВТ ТПУ от 18.09.2017 г. протокол № 1. Присутствовало 12 чел.

Доктор технических наук по специальности 01.04.20 -
«Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника»
профессор, заведующий лабораторией №1 ИФВТ ТПУ
Ремнев Геннадий Ефимович
Раб. адрес: г. Томск, 634000, пр. Ленина 2а
remnev@tpu.ru, тел. 8 (3822) 41-91-58

Кандидат технических наук по специальности 01.04.07 –
«Физика конденсированного состояния»
инженер-исследователь лаборатории №1 ИФВТ ТПУ
Линник Степан Андреевич
Раб. адрес: г. Томск, 634000, пр. Ленина 2а
linniksa@tpu.ru, тел. 8 (3822) 701777 вн.н. 2526