

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель директора Центра
по науке

Ю.А. Дьякова



2023

ОТЗЫВ

Ведущей организации ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт») по диссертации Чиковани Натальи Зауровны «Исследование динамики электровзрыва вольфрамовых проводников в вакууме», представленной на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 - физика плазмы (соответствует шифру 1.3.9. в номенклатуре специальностей, по которым присуждаются ученые степени, утвержденной приказом Министерства науки и высшего образования РФ от 24 февраля 2021 №118)

Основной целью диссертационной работы Чиковани Натальи Зауровны «Исследование динамики электровзрыва вольфрамовых проводников в вакууме», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 - физика плазмы (соответствует шифру 1.3.9. в номенклатуре специальностей, по которым присуждаются ученые степени, утвержденной приказом Министерства науки и высшего образования РФ от 24 февраля 2021 №118), является изучение особенностей процесса протекания электровзрыва вольфрамовой проволоки в вакуумном объеме. Электрический взрыв проводников исследуется во многих лабораториях мира в течение нескольких последних десятилетий и относится к интенсивно развиваемому направлению физики низкотемпературной плазмы. Интерес к этому явлению обусловлен тем, что электровзрыв является привлекательным объектом, как для фундаментальных, так и прикладных исследований. С точки зрения фундаментальных исследований электровзрыв проводников интересен тем, что в веществе взрывающейся проволоки термодинамические параметры (температура и плотность) достигают экстремальных значений. Это обстоятельство позволяет изучать термодинамику фазовых переходов и поведение вещества вблизи критических точек состояния. В практическом

плане электровзрыв проволочек применяется для создания источников интенсивного мягкого рентгеновского излучения и получения нанопорошков из материалов проволочек. Электрический взрыв тонких вольфрамовых проводников в вакууме сопровождается развитием Рэлей-Тейлоровской неустойчивости в возникающей плазме, приводит к неоднородности сжатия вещества проволочки по ее длине и, как следствие, стратификации плазменного разряда.

Из результатов многочисленных исследований следует что, энерговклад в вольфрамовые проволочки распределяется неравномерно по толщине проволочки. Основной причиной, приводящей к неравномерному энерговкладу, является возникновение вблизи поверхности вольфрамовой проволочки низкоплотной плазмы, обладающей высокой проводимостью. Эта плазменная оболочка перехватывает значительную часть тока, тем самым уменьшая энерговклад в центральную область проволочки. Предполагается, что причиной образования плазмы на ранней стадии электровзрыва могут служить легкие примеси и газы, содержащиеся в приповерхностном слое проволочки. В связи с этим возникает вопрос предварительной подготовки проводников перед разрядом и целью диссертационной работы является отработка технологии подготовки к эксперименту, разработка диагностического комплекса, позволяющего контролировать параметры, образующейся низкотемпературной плазмы, поиск параметров, определяющих воспроизводимость электровзрыва проволочки, изучение природы возникновения второго пика оптического излучения, возникающего после окончания тока разряда.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем работы составляет 96 страниц, включая 46 рисунков, 3 таблицы и список цитируемой литературы из 80 источников.

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы и научная новизна диссертации, сформулированы основные цели и задачи исследований, доказана научная и практическая ценность работы, перечислены защищаемые положения, представлены основные публикации по теме. Достоверность результатов основана на использовании общепринятых диагностических методик и высокой статистической достоверности результатов, что было подтверждено в процессе их апробация при докладах на различных конференциях. Помимо этого, здесь же представлены публикации автора и его личный вклад в исследования.

В **первой главе** диссертации представлен обзор экспериментальных и теоретических работ, посвященных электрическому взрыву микропроводников. В обзоре подробно рассмотрены работы, касающиеся особенностей электрического взрыва вольфрамовой проволочки в вакууме. Автором диссертационной работы подчеркнуто, что

данные исследования имеют длительную историю в рамках работ, проводимых в Сухумском физико-техническом институте (СФТИ). Задачи настоящего исследования возникают как продолжение работ, выполненных группой под руководством И.Ф. Кварцхавы в пятидесятые годы прошлого века. В ходе экспериментов группы Кварцхавы динамика электровзрыва в различных средах (воздух, жидкость) исследовалась с помощью оптической теневой фотографии. Удалось установить, что энергия, поглощённая проволокой во время прохождения первого импульса тока в зависимости от материала проволоки, может как меньше, так и больше энергии необходимой для полного испарения проволоки. При электровзрыве проволоки в вакууме было показано, что продукты электровзрыва распространяются перпендикулярно поверхности проволоки вне зависимости от её формы. Отмечено возникновение слоистой структуры расширяющихся паров продуктов электровзрыва. Была предложена методика определения количества энергии, вложенной в проволоку.

Вторая глава диссертации посвящена описанию установки «Гелиос», используемых систем измерения параметров разряда, оценке индуктивности самой проволоки и подводящих токопроводов. Диагностическое оборудование в основном представлено оптическими системами, позволяющими получать изображения плазмы в различных диапазонах спектра и временных интервалах, а также спектрометрами, отличающимися спектральным разрешением и диапазонами регистрации. Необходимо отметить достаточно большое число оптических диагностик, которые работали при каждом выстреле и позволяли получать широкий набор оптических параметров разряда. Использование современных ПЗС-линеек и электронно-оптических усилителей позволили автору создать набор оптических методик, обладающих высокой чувствительностью и хорошим спектральным разрешением. Методики позволяли, как регистрировать спектр плазмы в момент электровзрыва, так и идентифицировать атомарный состав газа, возбуждая его во взрывной камере с помощью электрического разряда.

В процессе работ использовался широкий набор задержек, который давал возможность изучать особенности излучения плазмы не только во время протекания тока, но и во время второго пика свечения («световое эхо»), когда ток разряда отсутствовал.

Особый интерес представляет интегральный снимок (рис.13), полученный за интерференционным фильтром с полосой пропускания 7 нм и соответствующий излучению линии водорода H_{α} . Рисунок показывает, что свечение выходит из всего объема разрядной камеры, т.е. водород распределен по всему ее объему. Спектры излучения, приведенные здесь же, показывают, что сама линия H_{α} сильно уширена.

Разработка методики измерения температуры продуктов электровзрыва методом спектральной пирометрии является основным предметом **третьей главы** диссертации. Показано, что непрерывная часть спектра излучения продуктов электровзрыва при небольших уровнях энерговклада в проволочку имеет Планковский характер, что позволяет определить их температуру. В данной главе представлен тщательный процесс калибровки метода Планковской пирометрии с учетом спектральной чувствительности спектрометра. Калибровка проводилась на модельном объекте – нагретой вольфрамовой проволочке, расположенной в разрядной камере. Температура проволочки контролировалась по зависимости удельного сопротивления вольфрама от температуры. Калибровочные измерения показали, что температура, определенная по форме спектра, хорошо согласуется с расчетами температуры по удельному сопротивлению в пределах от 1000 до 2300 К.

При росте энерговклада в разряд в коротковолновой области спектра появляется надпланковская часть излучения, включающая линейчатый спектр. Спектр излучения показывает, что линии принадлежат ионам вольфрама. Автор интерпретирует ситуацию наличием в вольфрамовой плазме наночастиц самого вольфрама. При этом излучение наночастиц имеет непрерывный Планковский характер, а плазма ответственна за надпланковскую добавку в коротко волновой области спектра. Ситуация сильно осложняется не стационарностью температуры. Для учета этого эффекта было проведено моделирование изменения спектра при различных характерах роста температуры разряда. Рассматривались линейный и экспоненциальный рост температуры, моделирование показало, что линейный рост температуры наиболее близко соответствует экспериментальным данным. Поэтому в экспериментах при определении максимальной температуры из непрерывной части спектра использовалось линейное приближение для роста температуры. В этом приближении были измерены максимальные температуры в разряде, достигающие значений $T \approx 5000$ К.

Для проволочек диаметром 30 мкм планковской составляющей спектра не наблюдалось при холодном, так и при горячем старте электровзрыва. Если в результате электровзрыва температура проволочки превышает температуру кипения вольфрама, то планковского распределения непрерывного спектра не наблюдается. Таким образом, характер распределения интенсивности излучения зависит от уровня энерговклада на атом проволочки. Отсутствие планковской составляющей в распределении интенсивности излучения может объясняться тем обстоятельством, что при электровзрыве проволочек малых диаметров образующиеся наночастицы имеют размер порядка длины волны излучения и перестают излучать как черное тело.

В этой же главе обсуждается вопрос определения электронной температуры плазмы по отношению интенсивности отдельных линий излучения вольфрама. При больших энерговкладах в разряд на атом вольфрама температура электронов достигала 0,4 эВ. По профилю линии H_{α} удалось определить электронную плотность плазмы. Отмечено, так как полуширина Штарковского профиля линии H_{α} слабо зависит от температуры, то плотность электронов плазмы можно с хорошей точностью определить даже без точного знания электронной температуры. В экспериментах по электровзрыву вольфрамовых проволочек она достигала значений $N_e \sim 3 \div 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Четвертая глава работы посвящена исследованию динамики оптического излучения, возникающего при электровзрыве. Оптическое излучение во время ЭВП имеет сложную форму и характеризуется с тремя ярко выраженными пиками интенсивности. Первый пик (от 0 до 1 мкс) соответствует росту тока и основного энерговклада в проволочку, интенсивность излучения определяется сплошным спектром. Второй пик излучения (от 1 до 10 мкс) характеризуется преимущественно линейчатым спектром. Третий пик (от 10 до 300 мкс) характеризуется вспышкой света, возникающей примерно через 100-200 мкс от начала разряда. Основной особенностью пика, названного световым «эхом», отличающего его от максимумов интенсивности светового излучения в начальной стадии электровзрыва, является его позднее появление, когда конденсаторная батарея уже полностью разряжена. Спектр излучения этого пика представляет собой непрерывный планковский спектр.

В результате исследования светового «эхо» были получены следующие закономерности: вспышка света («эхо») возникает в момент, когда конденсаторная батарея полностью разряжена; световое «эхо» наблюдается только при перекрытой вакуумной откачке; световое «эхо» наблюдается при диаметре вольфрамовой проволоки более 100 мкм; при «горячем старте» максимум светового «эхо» сдвигается вправо по шкале времени; при уменьшении скорости ввода энергии также наблюдается запаздывание появления светового «эхо»; время появления светового «эхо» с хорошей точностью линейно зависит от диаметра разрядной камеры; свечение в момент светового «эхо» резко неоднородно и носит объемный характер.

В **заключении** диссертации сформулированы выводы диссертации, основные из которых заключаются в разработке технологий удаления поверхностных загрязнений вольфрамовых проводников и разрядной камеры; использование щелевой развертки, совмещенной с спектрографом УМ-2 позволило исследовать временную динамику спектров, а совмещение ЭОПа со спектрометром УМ-2 в режиме покадровой съемки позволило исследовать спектр «светового эхо»; использование методики «спектрального пирометра» позволило

экспериментально измерить температуру продуктов ЭВП по непрерывной составляющей спектра; исследование обнаруженного в синей области сплошного спектра непланковского характера показало, что с увеличением температуры его интенсивность увеличивается.

Актуальность диссертации заключается в том, что она нацелена на создание полной детальной физической модели такого многофакторного явления как электровзрыв проводников в вакууме. Высокие магнитные поля, возникающие в процессе взрыва проводников могут быть интересны при изучении отдельных ядерных реакций, при изучении поведения вещества вблизи критической точки и термодинамики фазовых переходов. С практической точки зрения эти процессы могут быть интересны при поиске параметров, которые могут влиять на дисперсность продуктов электровзрыва с целью получения наночастиц требуемого размера.

Научная новизна работы Чиковани состоит в разработке оригинальных диагностических методик, позволяющих более тщательно исследовать параметры низкотемпературной плазмы, образовавшейся при электровзрыве вольфрамовых проводников в вакууме. Новые методы исследования импульсной плазмы позволили получить оптический эмиссионный спектр излучения взрыва вольфрамовой проволоки, в частности были идентифицированы спектральные линии не определенные в ранних работах. По интенсивности спектральных линий была оценена электронная температура плазмы, которая составила $\sim 5000\text{K}$. По полуширине спектральных линий была оценена плотность электронов в плазме. Впервые для определения температуры продуктов ЭВП была применена методика «спектрального пирометра», с помощью данной методики по экспериментально регистрируемой форме планковского спектра удалось измерить температуру взрывающегося проводника в процессе нагрева плазмы.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанные технологии подготовки эксперимента позволяют существенно улучшить воспроизводимость динамики протекания электровзрыва в вакууме. С помощью разработанных новых диагностических методик стало возможным более тщательное исследование параметров низкотемпературной плазмы, образовавшейся при электровзрыве вольфрамовых проводников в вакууме. Изучено явление световое «эхо» - вспышка света после окончания тока в плазме.

Достоверность полученных результатов определяется: использованием современной технической и диагностической базы в экспериментальных исследованиях; согласием экспериментальных результатов с теоретическими представлениями и с известными результатами других авторов; согласием результатов, полученных спектрометрическими оптическими методами с данными электротехнических диагностик. Достоверность

результатов измерений обеспечивалась тщательными многократными калибровками и тестированиями на эталонных образцах, а также высокой статистке измерений и хорошей повторяемости результатов.

Замечания и рекомендации

Работа в целом производит хорошее впечатление, при этом она не лишена некоторых недостатков.

В частности, во второй главе диссертации представлен спектр излучения (Рис.12 б) и оценено, что 10% в излучении спектрального диапазона в районе линии H_{α} составляет свечение водорода. При этом на интегральном снимке, полученным за интерференционным фильтром (Рис.13) свечение водорода приходит со всего объема камеры, а свечение проволоочки (отвечающее за непрерывную часть спектра) из узкой области изображения. Трудно представить, что соотношение интенсивностей составляет 1:10. Неплохо было бы привести эти данные для одного опыта.

В третьей главе диссертации показано наличие надпланковской части непрерывного излучения в коротковолновой области спектра, изучено ее поведение в виновских координатах, тем не менее в работе не высказано даже предположение с чем связано это излучение.

В четвертой главе работы показана картина распределения излучения по объему камеры в пик светового «эхо», но неоднородность свечения никак не объясняется.

Диссертация так же не лишена чисто оформительских замечаний, в частности, не хорошо воспринимается наличие на рисунках надписей на английском языке, некоторые рисунки расположены раньше, чем они упоминаются в работе; имеются в тексте и чисто орфографические ошибки и опечатки.

В целом диссертационная работа Чиковани Натальи Зауровны «Исследование динамики электровзрыва вольфрамовых проводников в вакууме» является завершенным научно квалификационным трудом, выполненным автором на высоком научном уровне. Работа базируется на достаточном числе научных данных, экспериментах и расчетах, написана научным литературным языком, основные положения четко и ясно сформулированы. Полученные автором результаты достоверны, выводы обоснованы и адекватно отражают суть и результаты работы.

По теме диссертации опубликовано 5 научных работ, которые в полной мере отражают содержание и результаты работы. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа Чиковани Натальи Зауровны «Исследование динамики электровзрыва вольфрамовых проводников в вакууме» отвечает паспорту специальности

01.04.08 – физика плазмы (соответствует шифру 1.3.9. в номенклатуре специальностей, по которым присуждаются ученые степени, утвержденной приказом Министерства науки и высшего образования РФ от 24 февраля 2021 №118), соответствует требованиям установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 №842 в действующей редакции, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а соискатель Чиковани Наталья Зауровна заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы (соответствует шифру 1.3.9. в номенклатуре специальностей, по которым присуждаются ученые степени, утвержденной приказом Министерства науки и высшего образования РФ от 24 февраля 2021 №118).

Отзыв на диссертацию подготовлен на основании обсуждения диссертации на заседании НТС Отделения плазменных технологий Курчатовского комплекса ядерных транспортных энергетических технологий, протокол № 9 от 08.09.2023, присутствовало 23 членов НТС из общего числа 27.

Отзыв составили

Руководитель Отделения плазменных технологий
Курчатовского комплекса ядерных транспортных
Энергетических технологий, к.ф.-м.н.



С.В. Коробцев

Заместитель руководителя Отделения плазменных технологий
Курчатовского комплекса ядерных транспортных
Энергетических технологий, к.ф.-м.н.



Е.Д. Казаков

Подписи Коробцева С.В. и Казакова Е.Д. подтверждаю

и.о. главного учёного секретаря
НИЦ «Курчатовский институт»



А.С. Чагрин