

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу 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 номеру 1.3.9. в номенклатуре специальностей РФ).

Работа содержит результаты экспериментальных исследований особенностей процесса протекания электровзрыва вольфрамовой проволоки в вакуумном объеме. Данная тематика, несомненно, актуальна - электровзрыв проводника (ЭВП) 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 прикладном плане электровзрыв проволок применяется для создания источников интенсивного мягкого рентгеновского излучения и получения нанопорошков из материалов проволок. ЭВП относится к направлению физики низкотемпературной плазмы. Существенная часть диссертации связана с разработкой и практической реализацией ряда новых методов диагностики плазмы.

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** сформулированы основные цели и задачи исследований. Определены актуальность выбранной темы и научная новизна диссертации. Обоснована научная и практическая ценность работы, представлены защищаемые положения, перечислены основные публикации по теме.

Первая глава диссертации содержит обзор экспериментальных и теоретических работ, посвященных электрическому взрыву проводников. В ней подробно рассмотрены работы и сформулированы особенности поведения плазмы, возникающей при электрическом взрыве вольфрамовой проволоочки в вакууме. Отмечено, что ЭВП рассматривался как способ получения высокотемпературной плазмы и положил начало исследованиям, проводимым в Сухумском физико-техническом институте (СФТИ) группой под руководством И.Ф. Кварцхавы в пятидесятые годы прошлого века.

Вторая глава диссертации посвящена детальному описанию установки «Гелиос», используемых систем измерения параметров разряда, оценке индуктивности самой проволоочки и подводящих токопроводов. Подробно описаны процедуры калибровки оптических спектрометров. 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.

В третьей главе приводятся результаты измерения температуры продуктов электровзрыва металлических проводников. При электровзрыве вольфрамовых проволоочек спектр оптического излучения состоит из сплошной (планковской) и линейчатой части, форма планковского распределения излучения нагретого твердого тела сильно зависит от температуры. В главе представлен тщательный процесс калибровки метода пирометрии с учетом спектральной чувствительности спектрометра. Полученные в работе результаты трактуются объемным характером излучения плазменного образования - при электровзрыве проволоочка превращается в наночастицы, которые излучают со всего объема разрядной камеры.

Четвертая глава работы посвящена исследованию динамики оптического излучения, возникающего при электровзрыве. Наблюдаемое в эксперименте оптическое излучение во время ЭВП имеет сложную структуру и сопровождается тремя ярко выраженными пиками интенсивности. При этом третий пик, названный «световым эхом», возникает когда конденсаторная батарея уже полностью разряжена. В работе проанализированы особенности данного эффекта.

В заключении диссертации сформулированы основные выводы работы.

Несмотря на то, что интересное физическое явление электрического взрыва проводника изучается довольно давно, некоторые происходящие при этом процессы оставались (и частично остаются) не до конца исследованными, а их физические механизмы не до конца понятыми. Предполагается, что причиной образования плазмы на ранней стадии электровзрыва могут служить легкие примеси и газы, содержащиеся в приповерхностном слое проволоки. В связи с этим очень важно иметь технологию очистки поверхности вольфрамовых проволочек перед ЭВП. В работе была разработана технология очистки поверхности проволочек при подготовке к эксперименту.

В диссертации представлены результаты работ, выполненных на высоком уровне, с применением широкого набора современных диагностик, многие из которых предложены и введены в практику эксперимента лично диссертантом. Достоверность полученных результатов подтверждена использованием общепринятых диагностических методик и высокой статистической достоверностью результатов, что было обосновано в процессе их апробация при докладах на различных конференциях.

Из наиболее значительных результатов отметим следующие:

Впервые в эксперименте получен снимок распределения излучения линии водорода H_{α} в объеме разрядной камеры, для этого был использован интерференционный фильтр с полосой пропускания 7 нм, соответствующий

излучению этой линии. Свечение выходит из всего объема разрядной камеры, т.е. водород распределен по всему ее объему. Спектр излучения показывает, что сама линия H_{α} сильно уширена.

Новые спектральные методики дали возможность идентифицировать спектральные линии вольфрамовой плазмы, не известные (идентифицированные) ранее.

Важным результатом использования методики «спектрального пирометра» стала возможность измерения абсолютного потока оптического излучения во время ЭВП. Сравнивая отношения амплитуд спектра нагретой проволоки к спектру, полученному в момент электровзрыва, можно оценить мощность излучения. Измерения по описанной методике показали, что температура плазменного образования, возникающего в результате ЭВП, составляла $0,3 \div 0,6$ эВ, а зарегистрированная мощность излучения на $3 \div 5$ порядков превышала, ту величину, которую теоретически может излучать поверхность вольфрамовой проволоки при заданной температуре и диаметре исходя из формулы Планка.

При росте энерговклада в разряд в коротковолновой области спектра зарегистрирована надпланковская часть излучения, включающая линейчатый спектр (спектр излучения показывает, что линии принадлежат ионам вольфрама). Проведено моделирование изменения спектра при различных характерах роста температуры разряда, показано, что наиболее близко экспериментальным данным соответствует линейный рост температуры. В этом приближении максимальные температуры в разряде достигают значений $T \approx 5000$ К.

Проведены исследования в широком диапазоне толщин проводников, наблюдалось, что для проволок диаметром 30 мкм планковской составляющей спектра не наблюдалось как при «холодном», так и при «горячем старте» электровзрыва. Данное обстоятельство объясняется тем, если в результате ЭВП температура проволоки превышает температуру

кипения вольфрама, то планковского распределения непрерывного спектра может не наблюдаться.

По отношению интенсивности отдельных линий излучения вольфрама оценено значение электронной температуры плазмы. При больших энерговкладах в разряд на атом вольфрама температура электронов достигала 0,4 эВ. По профилю линии H_{α} удалось определить электронную плотность плазмы. Полуширина Штарковского профиля линии H_{α} слабо зависит от температуры, то плотность электронов плазмы можно с хорошей точностью определить без точного знания электронной температуры. При ЭВП электронная плотность достигала значений $N_e \sim 3 \div 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Исследованы особенности эффекта «светового эхо», свечение в момент которого резко неоднородно и носит объемный характер, спектр излучения представляет собой непрерывный планковский спектр.

В качестве замечаний по оформлению и содержанию диссертации стоит отметить следующее:

Проведенных экспериментов, очевидно, недостаточно для однозначной оценки роли различных экспериментальных факторов в исследуемых эффектах. Так, например, нет полных данных по поведению надпланковской части спектра при возрастании энерговклада. Формулировка положения 5, выносимого на защиту, неудачна, ибо указывает лишь на обнаружение результата, а не на завершённое исследование. То же можно отнести к явлению светового «эхо» - вспышки света после окончания тока в плазме.

Замечания по оформлению диссертации относятся, в основном, к рисункам, подписи, на которых зачастую выполнены на английском языке и требуют поиска соответствующих разъяснений в тексте. Часть рисунков расположены раньше по тексту, чем они упоминаются в работе. В тексте встречаются грамматические ошибки и опечатки, однако их число не чрезмерно.

Указанные недостатки, однако, не снижают общей положительной оценки диссертации. Диссертационная работа Чиковани Н. З. является

завершенным научно квалификационным трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне. Работа базируется на достаточном числе научных данных, экспериментах и расчетах, написана научным литературным языком, в объеме, соответствующем требованиям ВАК. Основные положения четко и ясно сформулированы. Полученные автором результаты достоверны, выводы обоснованы и адекватно отражают суть и результаты работы.

Автореферат правильно и всесторонне дает представление о проделанной работе, содержит в кратком виде всю необходимую информацию, характеризующую полученные в процессе исследования результаты, основные положения и выводы диссертации.

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

Представленная работа полностью удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Чиковани Н. З., безусловно, заслуживает присвоения 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 высшего и среднего образования РФ от 24 февраля 2021 №118).

Ананьев Сергей Станиславович
к. ф.-м. н., доцент кафедры
Общей физики и ядерного синтеза МЭИ

Подпись С.С. Ананьева подтверждаю



ЗАМЕСТИТЕЛЬ НАЧАЛЬНИКА
УПРАВЛЕНИЯ НА РАБОТЕ С ПЕРВЫМ
И.И. ПОЛЕВАЯ