

Министерство образования и науки Российской Федерации

УДК 537.52; 621.316.5; 629.7.03
ГРНТИ 29.27.49; 44.29.31; 45.53.43
Инв. № 266.10.02

УТВЕРЖДЕНО:
Исполнитель: Учреждение Российской академии наук Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН
От имени Руководителя организации _____/Ратахин Н.А./ М.П.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

о выполнении 2 этапа Государственного контракта
№ 14.740.11.0317 от 17 сентября 2010 г.

Исполнитель: Учреждение Российской академии наук Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН
Программа (мероприятие): Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.2.2 Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук.
Проект: Развитие диагностического комплекса на базе НОЦ «Сильноточная электроника» в ИСЭ СО РАН и проведение исследований по диагностике плазмы дуги в вакуумных сетевых вы-ключателях и плазмы лазерной абляции жидкометаллической мишени в лазерно-плазменных двигателях малых космических аппаратов
Руководитель проекта: _____/Батраков Александр Владимирович (подпись)

**Томск
2011 г.**

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

по Государственному контракту 14.740.11.0317 от 17 сентября 2010 на выполнение поисковых научно-исследовательских работ для государственных нужд

Организация-Исполнитель: Учреждение Российской академии наук Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН

Руководитель темы:

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

подпись, дата

Батраков А. В.

Исполнители темы:

кандидат физико-математических наук,
без ученого звания

подпись, дата

Попов С. А.

кандидат физико-математических наук,
доцент

подпись, дата

Нефёдцев Е. В.

без ученой степени, без ученого звания

подпись, дата

Прядко Е. Л.

без ученой степени, без ученого звания

подпись, дата

Зюлькова Л. А.

без ученой степени, без ученого звания

подпись, дата

Шнайдер А. В.

без ученой степени, без ученого звания

подпись, дата

Петров В. И.

без ученой степени, без ученого звания

подпись, дата

Разин А. В.

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

подпись, дата

Панченко А. Н.

кандидат физико-математических наук,
без ученого звания

подпись, дата

Тельминов А. Е.

без ученой степени, без ученого звания

подпись, дата

Шулёпов М. А.

без ученой степени, без ученого звания

подпись, дата

Сорокин Д. А.

Реферат

Отчет 94 с., 1 ч., 44 рис., 3 табл., 20 источн., 0 прил.

Диагностика низкотемпературной плазмы, вакуумная дуга, лазерная абляция, вакуумные сетевые выключатели, космические двигатели

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 2 этапу Государственного контракта № 14.740.11.0317 "Развитие диагностического комплекса на базе НОЦ «Сильноточная электроника» в ИСЭ СО РАН и проведение исследований по диагностике плазмы дуги в вакуумных сетевых выключателях и плазмы лазерной абляции жидкометаллической мишени в лазерно-плазменных двигателях малых космических аппаратов" (шифр "2010-1.2.2-230-009") от 17 сентября 2010 по направлению "Создание энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления тепла и электроэнергии" в рамках мероприятия 1.2.2 "Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук.", мероприятия 1.2 "Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук и кандидатов наук", направления 1 "Стимулирование закрепления молодежи в сфере науки, образования и высоких технологий." федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы.

В отчёте рассмотрена завершающая стадия модернизации экспериментального стенда по диагностике плазмы. Значительная часть работ, выполненных на данном этапе, посвящена разработке экспериментальных методик и их проверке при проведении предварительных экспериментов. Разработана методика многозондовой диагностики плазмы с возможностью регистрации динамики границы плазмы в условиях переходного восстанавливающегося напряжения при погасании дуги в вакуумных сетевых

выключателях. С целью получения данных по пространственной динамике плазмы одновременно используются пять зондов в комплексе с многоканальными цифровыми осциллографами и источниками питания. В качестве дополнительных, но при этом чрезвычайно информативных методов используется высокоскоростная камеры видеорегистрации изображений свечения плазмы HSFC Pro и энерго–масс–анализатора HIDEN EQP, способный измерять массовые спектры тяжелой компоненты плазмы, зарядовые состояния для каждой массы и распределения частиц по энергиям для каждого массового и зарядового состояния.

Для осуществления синхронных скоростных видеонаблюдений и осциллографирования сигналов был собран и проверен на предмет работоспособности оптический тракт регистрации изображений, согласованный с импульсными источниками питания разряда и осциллографами.

Аппаратура для регистрации последовательных изображений представляет собой систему 4-х независимых камер, способных регистрировать изображение объекта одновременно, но по четырём различным оптическим путям оптического тракта. Это даёт возможность регистрации спектрально-дифференцированных изображений, для реализации которой требуются узкополосные интерференционные светофильтры. Для практической реализации такой диагностики разработана методика, проверенная в предварительных экспериментах по визуализации анодного факела на трёх различных длинах волн, соответствующих эмиссионным линиям плазмы дуги. Были получены новые научные данные и подготовлена к печати одна дополнительная статья для научной периодики.

Была разработана методике по исследованию лазерной абляции жидкого металла. Кроме вопросов, связанных непосредственно с исследованием

физического явления лазерной абляции, методика подробно описывает подготовительный этап работы, а именно, изготовление жидкометаллической мишени, поскольку качество исполнения мишени имеет принципиальное значение для воспроизводимости процесса абляции при частотном режиме работы лазера, необходимом для проведения эксперимента с большим объёмом статистических данных. Кроме того, в методике описаны меры, необходимые для предотвращения запыления оптических компонентов (линзы и вакуумные окна) продуктами эрозии мишени при абляции.

Основным направлением использования лазерной абляции жидкометаллической мишени являются лазерно-плазменные двигатели малогабаритных космических аппаратов. Главной характеристикой двигателя является импульс отдачи, причем, как его величина, так и стабильность значения от импульса к импульсу. Для измерения импульса отдачи была разработана методика, основанная на баллистическом маятнике и учитывающая экспериментальные возможности лабораторного оборудования, доступного для выполнения задач проекта. Показано, что созданный в работе маятник при использовании скоростной камеры HSFC-Pro обеспечивает точность измерения малых значений импульс на уровне 1 нН·с, что является приемлемой величиной для потенциального технического использования жидкометаллической мишени.

Полученные результаты подготовлены к печати в виде двух журнальных статей, одна из которых посвящена регистрации ионизационно-рекомбинационного фронта в области анодного пятна вакуумной дуги, направленная и принята к печати в журнале «IEEE Transactions on Plasma Science», и другая, подготовленная к печати в «Журнал технической физике», рассматривает данное явление с привлечением модельных представлений.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	9
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ. РАЗВИТИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ПО ДИАГНОСТИКЕ ПЛАЗМЫ	12
2.1. Разработка методики и формирование стенда для исследования параметров плазмы и динамики расширяющегося прикатодного слоя после перехода тока вакуумной дуги через ноль в условиях возрастающего переходного напряжения на разрядном промежутке на основе пространственно распределенной системы одиночных ленгмюровских зондов с возможностью их перемещения. Экспериментальное определение чувствительности аппаратуры к минимальным концентрациям, доступным для регистрации	12
<i>2.1.1. Конфигурация экспериментального оборудования</i>	12
<i>2.1.2. Методика измерения основных параметров плазмы сильноточной вакуумной дуги в условиях модельного вакуумного выключателя</i>	19
<i>2.1.3. Экспериментальное определение предельно низких концентраций плазмы, регистрируемых с использованием системы одиночных ленгмюровских зондов и двойного зонда</i>	25
<i>2.1.4. Выводы к Разделу 2.1</i>	35
2.2. Формирование оптического тракта на экспериментальном стенде для проведения спектроскопических измерений и скоростной визуализации плазменных объектов	36
<i>2.2.1. Требования, предъявляемые к возможностям оптической системы, используемой в экспериментах</i>	36
<i>2.2.2. Характеристики оптического тракта</i>	36

2.3. Разработка методики и проведение предварительных экспериментов согласно ГОСТ Р 8.563-96 по скоростной визуализации дуги, в том числе в узком спектральном диапазоне (эмиссионная спектроскопия с визуализацией) с использованием 4-х канальной скоростной камеры с электронно-оптическим усилителем яркости HSFC-Pro и узкополосных интерференционных светофильтров диапазона пропускания света порядка 10 нм	40
<i>2.3.1. Методика синхронной с электрическими измерениями визуализации разрядного промежутка.....</i>	<i>40</i>
<i>2.3.2. Экспериментальная проверка оптической системы с регистрацией спектрально дифференцированных изображений вакуумной дуги</i>	<i>46</i>
2.4. Разработка методики экспериментов согласно ГОСТ Р 8.563-96 по лазерной абляции жидкометаллической мишени и подключение импульсного неодимового лазера к экспериментальному стенду	50
<i>2.4.1. Методика экспериментов по лазерной абляции жидкометаллической мишени и формированию абляционного плазменного факела</i>	<i>50</i>
<i>2.4.2. Подключение импульсного неодимового лазера к экспериментальному стенду и проверка системы фокусировки лазерного луча на мишень</i>	<i>61</i>
2.5. Разработка методики измерения механического импульса отдачи при абляции мишени на основе жидких металлов с различной геометрией.....	63
2.6. Подготовка статьи для опубликования в журнале из списка рекомендованных ВАК со ссылкой на проведение НИР в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы	68

2.6.1. Рукопись статьи по регистрации анодного факела в журнал «IEEE Transactions on Plasma Science»	68
2.6.2. Рукопись статьи по анализу анодного факела в «Журнал технической физики»	72
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	92
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	93

ВВЕДЕНИЕ

Настоящий отчёт посвящён выполнению второго этапа проекта: Развитие диагностического комплекса на базе НОЦ «Сильноточная электроника» в ИСЭ СО РАН и проведение исследований по диагностике плазмы дуги в вакуумных сетевых выключателях и плазмы лазерной абляции жидкометаллической мишени в лазерно-плазменных двигателях малых космических аппаратов», выполняемого в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.2.2 Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук». Целью данного этапа является развитие экспериментального комплекса по диагностике плазмы в плане методического обеспечения исследований, выполняемых в рамках проекта.

Завершение модернизации экспериментального стенда по диагностике плазмы рассмотрено в разделе 2.1 отчета. В этом же разделе приводится разработанная методика многозондовой диагностики плазмы с возможностью регистрации динамики границы плазмы в условиях переходного восстанавливающегося напряжения при погасании дуги в вакуумных сетевых выключателях. С целью получения данных по пространственной динамике плазмы одновременно используются пять зондов в комплексе с многоканальными цифровыми осциллографами и источниками питания. В качестве дополнительных, но при этом чрезвычайно информативных методов используется высокоскоростная камеры видеорегистрации изображений свечения плазмы HSFC Pro и энерго–масс–анализатора HIDEN EQP, способный измерять массовые спектры тяжелой компоненты плазмы, зарядовые состояния

для каждой массы и распределения частиц по энергиям для каждого массового и зарядового состояния.

Для осуществления синхронных скоростных видеонаблюдений и осциллографирования сигналов был собран и проверен на предмет работоспособности оптический тракт регистрации изображений, согласованный с импульсными источниками питания разряда и осциллографами. Данный сегмент работы по второму этапу представлен в разделе 2.2.

Аппаратура для регистрации последовательных изображений представляет собой систему 4-х независимых камер, способных регистрировать изображение объекта одновременно, но по четырём различным оптическим путям оптического тракта. Это даёт возможность регистрации спектрально-дифференцированных изображений, для реализации которой требуются узкополосные интерференционные светофильтры. Для практической реализации такой диагностики разработана методика, изложенная в разделе 2.3. Эта методика была проверена в предварительных экспериментах по визуализации анодного факела на трёх различных длинах волн, соответствующих эмиссионным линиям плазмы дуги. Были получены новые научные данные и подготовлена к печати одна дополнительная статья для научной периодики.

Раздел 2.4 посвящён разработанной методике по исследованию лазерной абляции жидкого металла. Кроме вопросов, связанных непосредственно с исследованием физического явления лазерной абляции, методика подробно описывает подготовительный этап работы, а именно, изготовление жидкометаллической мишени, поскольку качество исполнения мишени имеет принципиальное значение для воспроизводимости процесса абляции при частотном режиме работы лазера, необходимом для проведения эксперимента с

большим объёмом статистических данных. Кроме того, в методике описаны меры, необходимые для предотвращения запыления оптических компонентов (линзы и вакуумные окна) продуктами эрозии мишени при абляции.

Основным направлением использования лазерной абляции жидкометаллической мишени являются лазерно-плазменные двигатели малогабаритных космических аппаратов. Главной характеристикой двигателя является импульс отдачи, причем, как его величина, так и стабильность значения от импульса к импульсу. Для измерения импульса отдачи была разработана методика, представленная в разделе 2.5 и основанная на баллистическом маятнике и учитывающая экспериментальные возможности лабораторного оборудования, доступного для выполнения задач проекта. Показано, что созданный в работе маятник при использовании скоростной камеры HSFC-Pro обеспечивает точность измерения малых значений импульса на уровне 1 нН·с, что является приемлемой величиной для потенциального технического использования жидкометаллической мишени.

Последний раздел отчёта (раздел 2.6) содержит рукописи статей, одна из которых посвящена регистрации ионизационно-рекомбинационного фронта в области анодного пятна вакуумной дуги, направленную и принятую к печати в журнале «IEEE Transactions on Plasma Science», а другая, подготовленная к печати в «Журнал технической физике», рассматривает данное явление с привлечением модельных представлений. Обе статьи содержат ссылки на настоящий проект.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ. РАЗВИТИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ПО ДИАГНОСТИКЕ ПЛАЗМЫ

2.1. Разработка методики и формирование стенда для исследования параметров плазмы и динамики расширяющегося прикатодного слоя после перехода тока вакуумной дуги через ноль в условиях возрастающего переходного напряжения на разрядном промежутке на основе пространственно распределенной системы одиночных ленгмюровских зондов с возможностью их перемещения. Экспериментальное определение чувствительности аппаратуры к минимальным концентрациям, доступным для регистрации

2.1.1. Конфигурация экспериментального оборудования

Общее описание экспериментального стенда было дано в отчёте по первому этапу проекта в разделах, посвящённых подключению энергомассанализатора HIDEN EQP и сверхскоростной 4-х канальной камеры регистрации изображений HSFC Pro. Настоящий раздел посвящён описанию конструктивных особенностей стенда, реализующих режимы горения разряда, соответствующие сильноточной вакуумной дуге вакуумных сетевых выключателей, а также средств позиционирования и управления зондами.

2.1.1.1. Малый и большой экраны

Фотография верхнего (потенциального) электрода в сборе с коаксиальным экраном внешним диаметром 30 мм показана на рис. 1,а. Потенциальный электрод был экранирован экраном по всей длине, включая держатель электрода. Экран был изолирован от электрода с использованием основного и

дополнительного (вновь установленного) металлокерамических изоляторов. Благодаря этому стало возможным измерять отдельно ток на открытую часть электрода и ток экрана. Как показало тестирование экрана диаметром 30 мм, его использование целесообразно только в экспериментах с Cu-Cr электродами. Интенсивная эрозия медных электродов вызывала закорачивание верхнего электрода на экран (показано стрелкой на рис. 1,б), что делало последующее раздельное измерение составляющих последугового тока (РАС) невозможным. Однако осциллограммы РАС были достаточно воспроизводимыми от импульса к импульсу, и появление короткого замыкания в цепи экрана не считалось основанием для остановки текущего измерения. Для предотвращения подобного закорачивания малый экран диаметром 30 мм был заменен другим экраном диаметром 40 мм (рис. 1,в).

Фотография установленного большого экрана, охватывающего разрядный промежуток, приведена на рис. 1,г (вид сверху). Внутренний диаметр большого экрана был 96 мм, длина 95 мм. В экране имелись отверстия для ввода линейки зондов и для наблюдения. Большой экран мог находиться под высоким потенциалом благодаря использованию высоковольтного металлокерамического вакуумного ввода. Фотография собранной системы электродов со стороны смотрового окна приведена на рис. 1,д.

Цепи питания и измерения представлены на рис. 2. Малый экран был соединен с верхним (потенциальным) электродом через резистор $R_5 = 50 \text{ Ohm}$. Этот резистор служил для ограничения тока при коротком замыкании в цепи малого экрана, а также в случае возникновения на нем катодных пятен. В то же время при относительно небольшом РАС ($\sim 1 \text{ A}$) на экран разница потенциалов электрода и экрана могла составлять десятки вольт, что намного ниже TRV. Потенциал малого экрана и верхнего электрода относительно нижнего

заземленного электрода (т.е. падение потенциала на дуге и TRV) измерялся в диапазоне от вольт до киловольт с использованием делителя R_0 (44 кОм)/ R_1 (500 Ом)/ R_2 (25 Ом). Для измерения РАС в цепи электрода и экрана и суммарного тока служили предварительно калиброванные пояса Роговского G_2 , G_3 и G_1 . Пояса были экранированы от емкостных связей.

Большой экран мог быть либо изолированным (плавающим), либо находиться под потенциалом земли, либо под TRV (положение K_1 на рис. 2). При любом соединении большого экрана его потенциал измерялся в диапазоне от единиц вольт до киловольт с использованием делителя R_6 (52 кОм)/ R_7 (500 Ом)/ R_8 (25 Ом). Заземленный большой экран соединялся с землей через R_{10} (4 Ом). Потенциальный большой экран соединялся с верхним электродом R_9 (300 Ом). Использование резисторов было необходимо для подавления короткозамкнутых токов и катодных пятен. Ток большого экрана регистрировался поясом Роговского G_4 при потенциале TRV и поясом Роговского и шунтом R_{10} при потенциале земли.

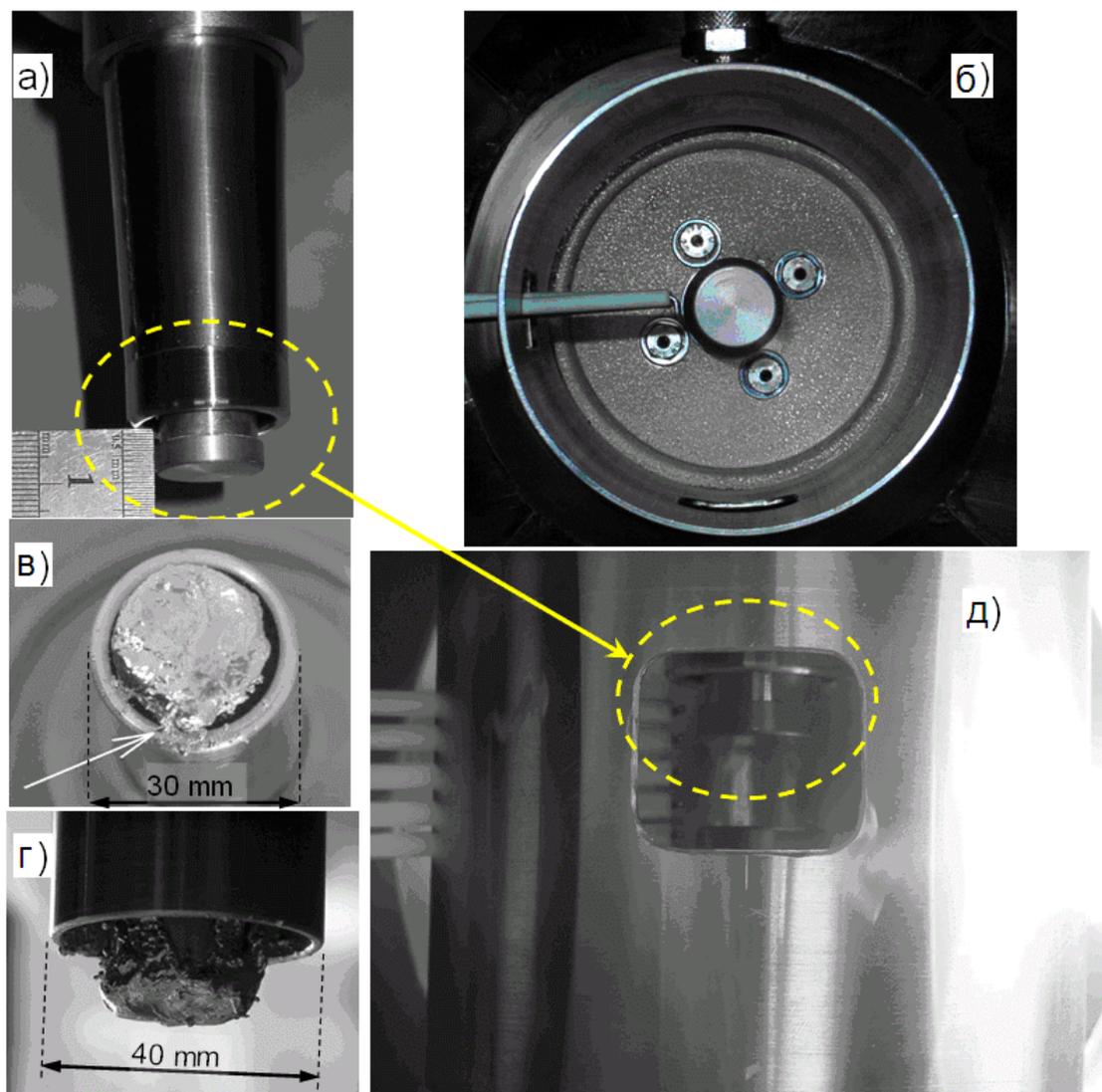


Рис. 1. Фотографии электродов и экранов: а – верхний электрод и малый экран диаметром 30 мм, б – тот же электрод и экран после проведения экспериментов и возникновения короткого замыкания, в – верхний электрод с малым экраном увеличенного диаметра, г – большой экран и зонды (вид сверху), д – электроды, экраны и зонды в сборе перед проведением экспериментов.

2.1.1.2. Зонды

Держатель зондов был модернизирован. Его фотография показана на рис. 3, а. Соединение проволок и керамических трубок было выполнено разъемным.

Благодаря этому замена деталей зондов и юстировка положения зондов существенно упростились. Азимутальное положение линейки зондов показано на рис. 1,д.

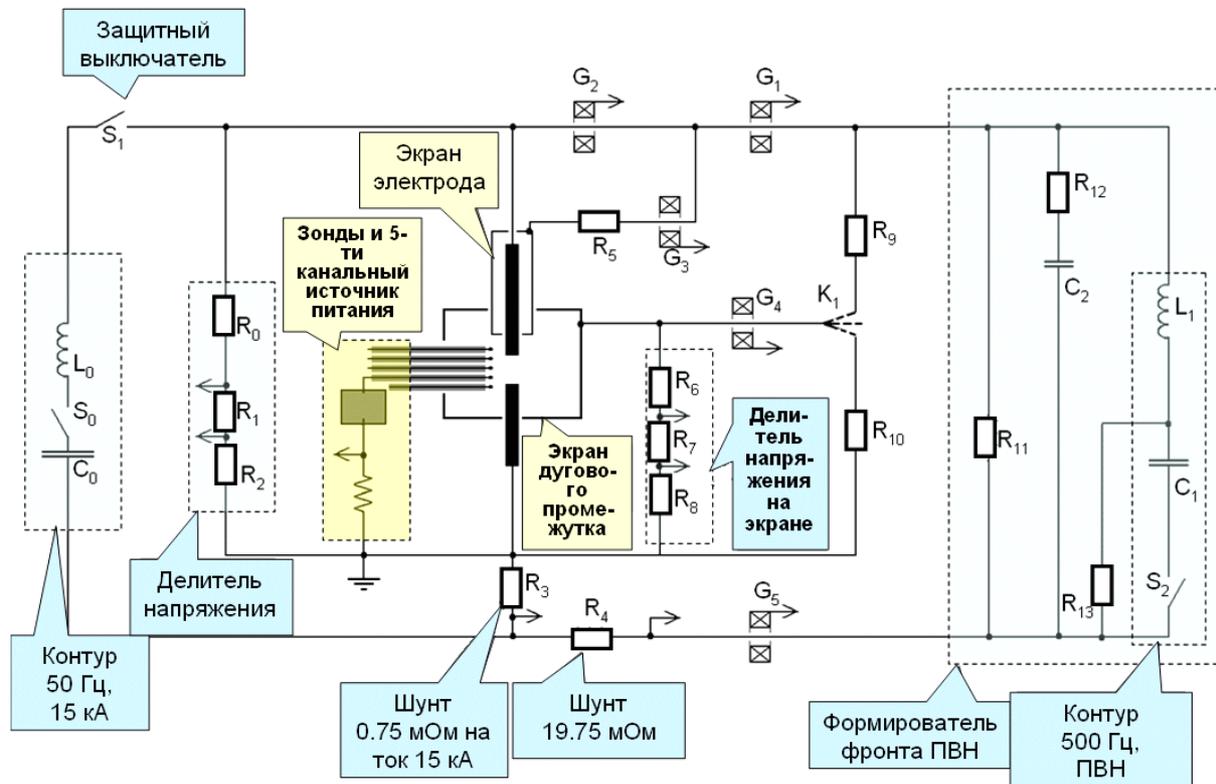
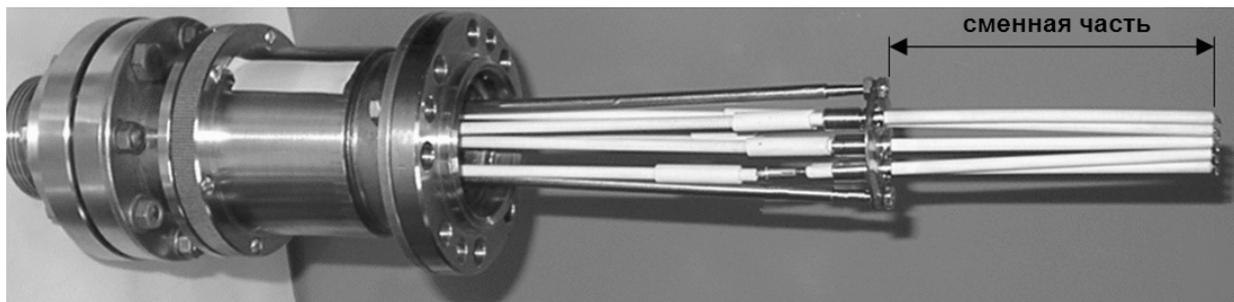


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема модернизированной установки.

Пять зондов были установлены в том же положении, что и в предыдущих экспериментах. Геометрия зондов описана в разделе 1.3.1.3 отчета №1, при этом размеры были следующими: $a = 5.1$ мм, $b = 2$ мм, $r_c = 0.6$ мм и $R = 2$ мм (рис. 3,б). Рассчитанная площадь поверхность каждого из зондов была 19 мм². Вертикальное расстояние между соседними зондами было установлено близким к 5 мм (Fig. 3,в).



a)

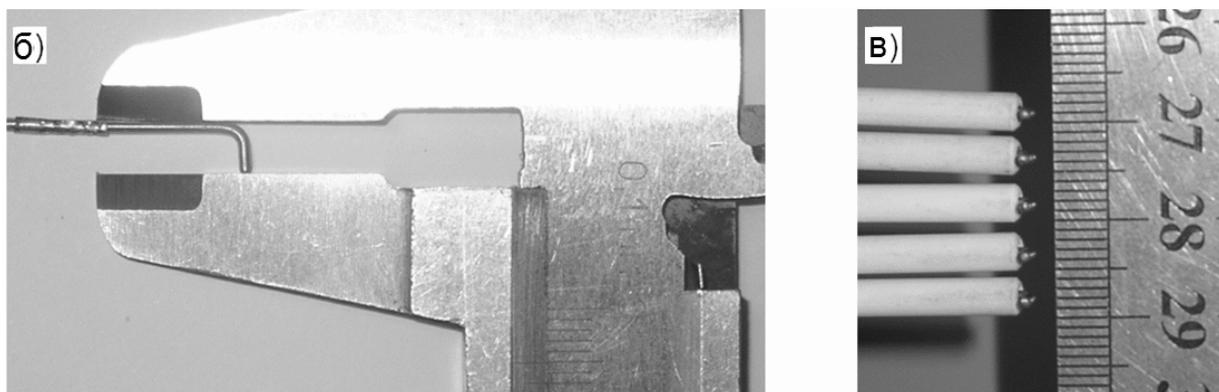


Рис. 3. Фотография узла зондов и отдельных его частей.

Положение зондов в камере представлено на рис. 1,д. Вертикальное и горизонтальное положение зондов измерялось по фотографиям индивидуально для каждого зонда. Перемещение в горизонтальном направлении достигалось с использованием манипулятора (рис. 4) с шагом 1.5 мм и отклонением в вертикальном направлении не более 0.1 мм.

Для подачи положительного напряжения на зонды и измерения зондового тока служил специально изготовленный блок питания зондов. Он имел 5 каналов, большую емкость накопительных конденсаторов и высокую устойчивость к наводкам и токовым перегрузкам. Импеданс генератора составлял 60 Ом, зарядное напряжение – до 200 В. Временные и амплитудные характеристики подаваемого на зонды напряжения были следующие: напряжение обычно составляло $20 \div 50$ В (при таком напряжении вероятность

возникновения пробоя между стенкой керамической трубки и поверхностью зонда была минимальна), и подавалось за $50\div 100$ мкс до нуля тока (за это время накопительные конденсаторы практически не разряжались).

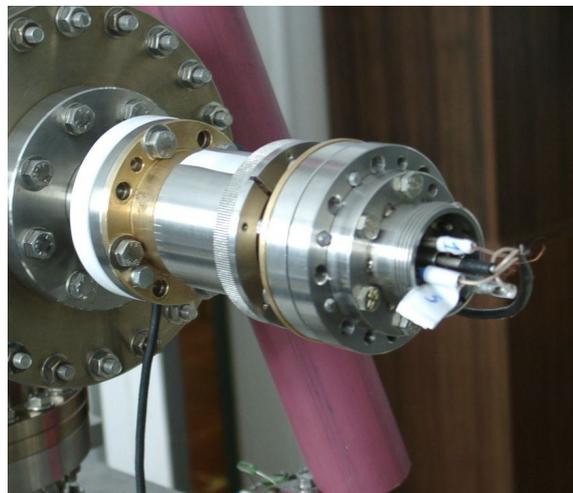
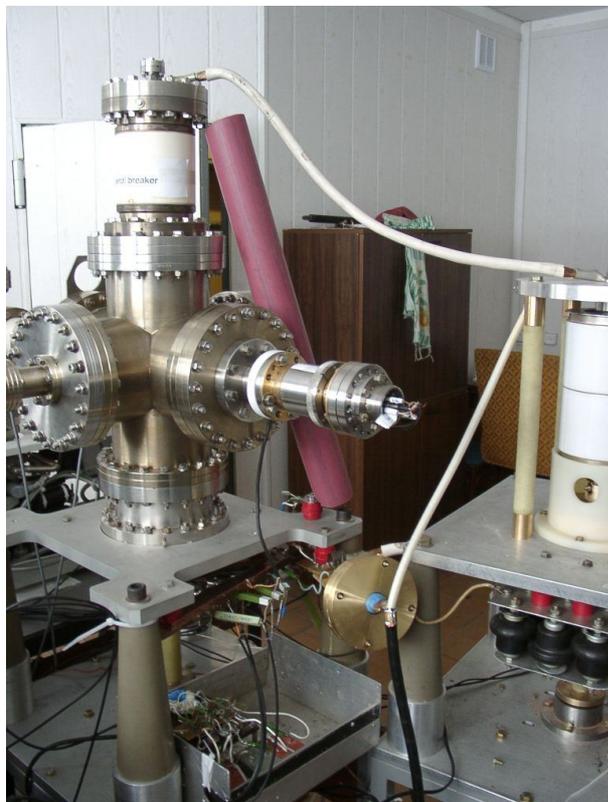


Рис. 4. Подключение манипулятора зондов к рабочей вакуумной камере.

2.1.1.3. Наблюдение за промежутком

Визуализации разрядного промежутка производилась с целью измерения положения зондов и фиксации положения анодного пятна. Оно производилось с использованием 4-канальной высокоскоростной 12-разрядной камеры с электронно-оптическим усилителем яркости. Обычно задержки и экспозиции каналов были следующие. Первый кадр (600 мкс до CZ, экспозиция 10 мкс) использовался для определения местоположения канала разряда и анодного пятна при горении дуги. Второй (10 мкс до CZ, экспозиция 50 мкс) и третий (40

мкс после CZ, экспозиция 50 мкс) кадры фиксировали процессы в окрестности CZ. Четвертый кадр (190 мкс после CZ, экспозиция 15 мкс) отображал информацию о местоположении канала разряда в случае возникновения пробоя. В части экспериментов использовалась однокадровая CCD камера. Она запускалась в момент инжекции тока генератора TRV (0.95 мс до CZ, экспозиция 100 мкс) для регистрации местоположения анодного пятна.

2.1.1.4. Вакуумная система

Эксперимент проводился при остаточном давлении $\sim 10^{-8} \div 10^{-7}$ мБар, достигаемом при использовании ионного насоса НМДО-0.1 со скоростью откачки 100 л/с. Экспериментальная камера предварительно обезгаживалась при температуре 100°C в течении 10 часов и откачке форвакуумным насосом производительностью 5 л/с до давления $\leq 10^{-3}$ мБар. Общий вид экспериментальной установки приведен на рис. 3.12 отчёта № 1.

2.1.2. Методика измерения основных параметров плазмы сильноточной вакуумной дуги в условиях модельного вакуумного выключателя

2.1.3.1. Общие положения

- 1.1. Данная методика предназначена для многоканальных зондовых измерений температуры и концентрации плазмы в диапазоне концентраций от 10^{11} до 10^{14} см⁻³ и с возможностью восстановления динамики плазменной границы согласно пункту 4.1 ТЗ настоящего контракта.
- 1.2. К работе с прибором допускается персонал, имеющий высшее физико-математическое или техническое образование, не ниже III группы допуска по электробезопасности и прошедший вводный практический курс в Лаборатории вакуумной электроники ИСЭ СО РАН.

1.3. При проведении измерений по данной Методике должны быть выполнены условия, предусмотренные ГОСТ Р 8.563-96 ГСИ «Методики выполнения измерений» и ГОСТ 8.207-76 ГСИ «Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений».

2.1.3.2. Краткое описание оборудования

2.1. Принципиальная схема электропитания одиночного зонда импульсным напряжением:

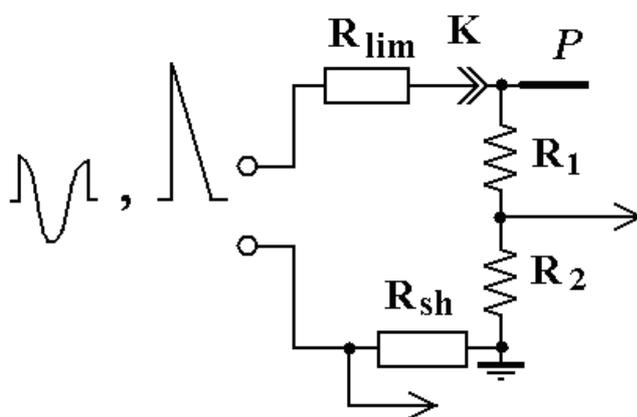


Рис. 5. , где P – зонд, K – разъём, R_{lim} – дугогасительный резистор, R_{sh} – шунт для измерения тока через зонд, R_1 , R_2 – резистивный делитель напряжения для измерения потенциала зонда.

2.2. Принципиальная схема электропитания двойного зонда:

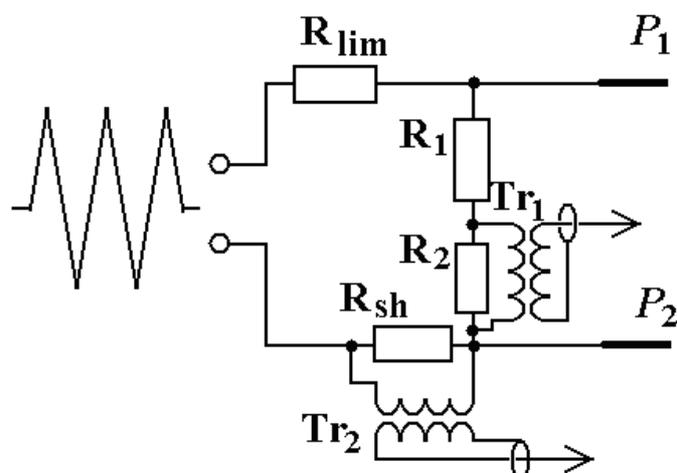


Рис. 6. , где P_1 , P_2 – плечи двойного зонда, R_{lim} – дугогасительный резистор, R_{sh} – шунт для измерения тока через зонд, R_1 , R_2 – резистивный делитель напряжения для измерения потенциала зонда, Tr_1 , Tr_2 – трансформаторы для гальванической отвязки измерительных трактов от плеч зонда.

Для регистрации потенциала зондов P относительно земли служит резистивный делитель R_1/R_2 (45 кОм/450 Ом) (при измерении потенциала изолированного зонда разъем K рассоединялся). При исследовании электронных токов насыщения на зонд к нему за некоторое время $t_s=50\div 100$ мкс до нуля тока путем коммутации тиристорного ключа S прикладывалось некоторое постоянное напряжение положительной полярности от конденсатора $C=10$ мкФ, предварительно заряженного до напряжения $V_{C0}=0\div 100$ В. Для регистрации тока на зонд служил шунт $R_{sh}=9.4-9.7$ Ом. Добавочное сопротивление $R_{lim} = 53\div 54$ Ом было необходимо для ограничения тока в цепи зонда, что обеспечивало лишь незначительный (20 %) разряд конденсатора. Т.о. полное сопротивление в цепи зондов R_p составляло $62\div 63$ Ом. Имелось 3 канала питания и регистрации тока зондов и 4 канала регистрации потенциалов.

2.3. Конструкция зондов:

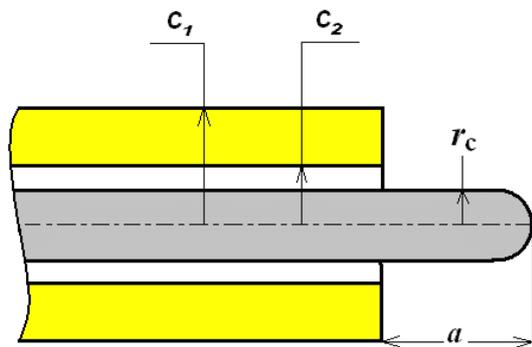


Рис. 7. Прямой цилиндрический зонд используется для диагностики относительно плотных плазменных потоков. Размеры: $a = 3$ мм, $r_c = 0.6$ мм, $C_1 = 2$ мм, $C_2 = 1$ мм.

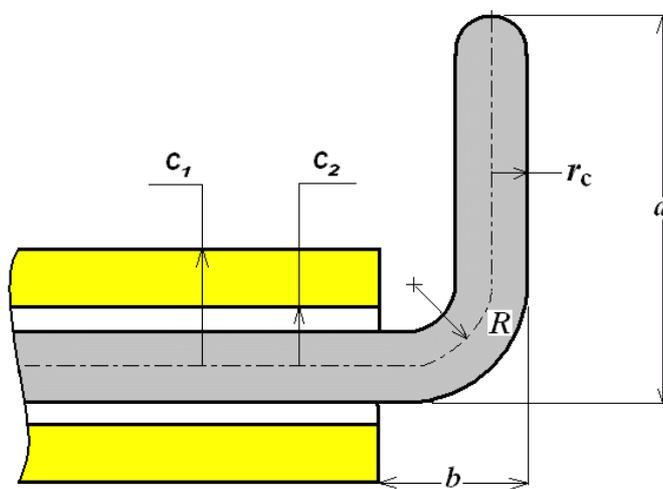


Рис. 8. Г-образный цилиндрический зонд для улучшения чувствительности зонда при диагностике разреженных плазменных потоков. Размеры: $a = 5.5$ мм, $b = 2.12 \div 2.4$ мм, $R = 1$ мм, $r_c = 0.6$ мм, $C_1 = 2$ мм, $C_2 = 1$ мм.

2.4. Конструкция сборки из 5-и зондов для многоканального анализа плазмы с возможностью регистрации динамики плазменного слоя:

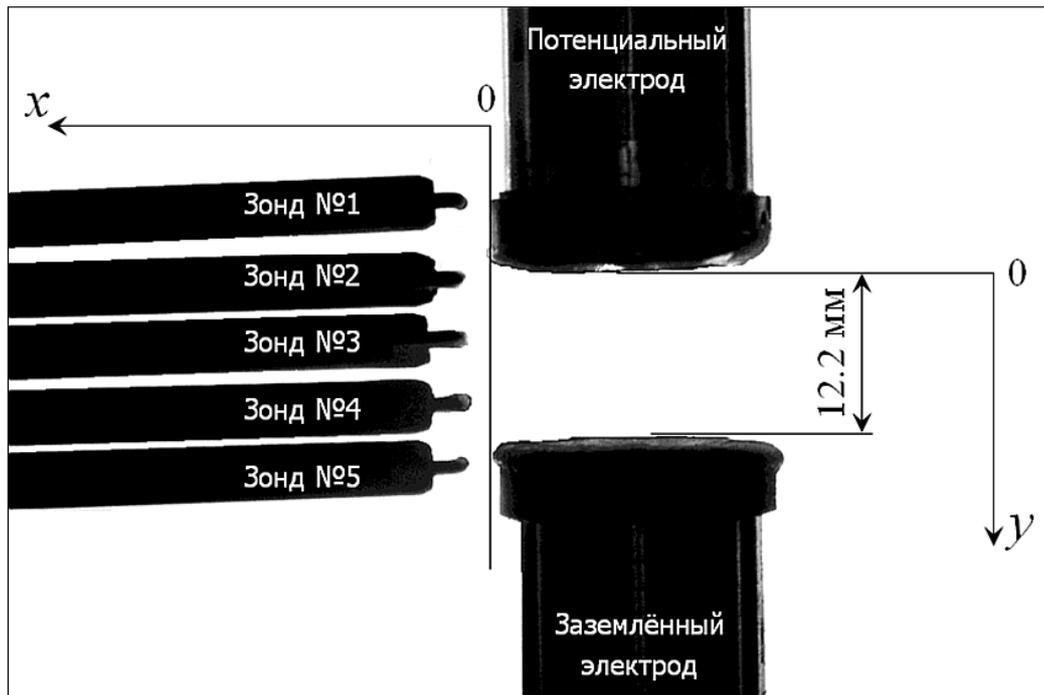


Рис. 9.

2.1.3.3. Проведение измерений

3.1. ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕМПЕРАТУРА плазмы измеряется в процессе вакуумной дуги производятся при горении сильноточной вакуумной дуги и после её обрыва методом зондовых характеристик одиночного и двойного зондов. В качестве двойного используются два одинаковых одиночных зонда с расстоянием между ними 4.5 мм (между центрами проволок). В двойном зонде используются прямые цилиндрические зонды. Площадь собирающей поверхности составляет 11 мм². Двойной зонд должен быть оторван от земли. Для регистрации тока и напряжения между зондами использовались гальванические развязки на основе малогабаритных импульсных трансформаторов. Система регистрации предварительно калибруется с использованием резисторов, соединяющих плечи двойного зонда между собой. Между плечами двойного зонда прикладывается переменное

напряжение треугольной формы частотой 160 кГц амплитудой до 100 В при импедансе генератора 50 Ом. Длительность цуга составляет 10 мс.

Измерения проводятся в различные моменты времени. По потенциалу зонда, при котором происходит переход к ветви насыщения, оценивается потенциал плазмы. Электронная температура при измерении одиночным зондом определяется по наклону переходного участка характеристики, линейного в полулогарифмических координатах, как

$$T_e = e k^{-1} \Delta V_p / \Delta \ln i_p, \quad (1)$$

где e – элементарный заряд, k – постоянная Больцмана, ΔV_p – приращение напряжения ВАХ зонда, $\Delta \ln i_p$ – приращение логарифма тока ВАХ зонда.

Электронная температура при измерении двойным зондом определяется путем фитинга двухзондовой характеристики

$$i_p(V) = i_{is} \cdot \text{th} \frac{e(V - \Delta V)}{2kT_e} \quad (2)$$

к экспериментальным данным (при подгонке kT_e определяет наклон кривой в переходной области, ионный ток насыщения i_{is} – амплитуду тока в ветвях ΔV - сдвиг по напряжению). При этом для уменьшения стат разброса анализировался не один, а несколько (5÷10) периодов из цуга (< 60 мкс) в течение которых амплитуда колебаний зондового тока не менялась существенно.

3.2. ЭЛЕКТРОННАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ вычисляется по электронному току насыщения, при этом для оценок “сверху” можно пренебрегать толщиной слоя вблизи зонда. Электронная концентрация плазмы в окрестности зонда

$$n_e(t) = \frac{4j_e(t)}{ev_{eT}}, \quad (3)$$

где

$$v_e = \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} \quad (4)$$

– тепловая скорость электронов,

$$j_e(t) = i_p(t) / S_e(t) \quad (5)$$

– плотность эмиссионного электронного тока из плазмы ($i_p(t)$ -тока на зонд, S_e -площадь эмиссионной границы квазинейтральной плазмы вокруг зонда).

Для упрощенной верхней оценки концентрации можно пренебречь толщиной слоя объемного заряда вокруг зонда и положить эмиссионную площадь равной площади зонда (коллектора)

$$S_e(t) = \text{const} = S_c = 2\pi r_c(l + r_c) \quad (6)$$

2.1.3.4. Отчетность

- 4.1. Данные измерений хранятся в ИСЭ СО РАН в виде электронных таблиц и используются для их последующей обработки или отчетности.
- 4.2. Срок хранения информации не менее 10 лет, если не оговорено иначе в документах на выполнение НИР (НИОКР), в рамках которых используется данная методика.

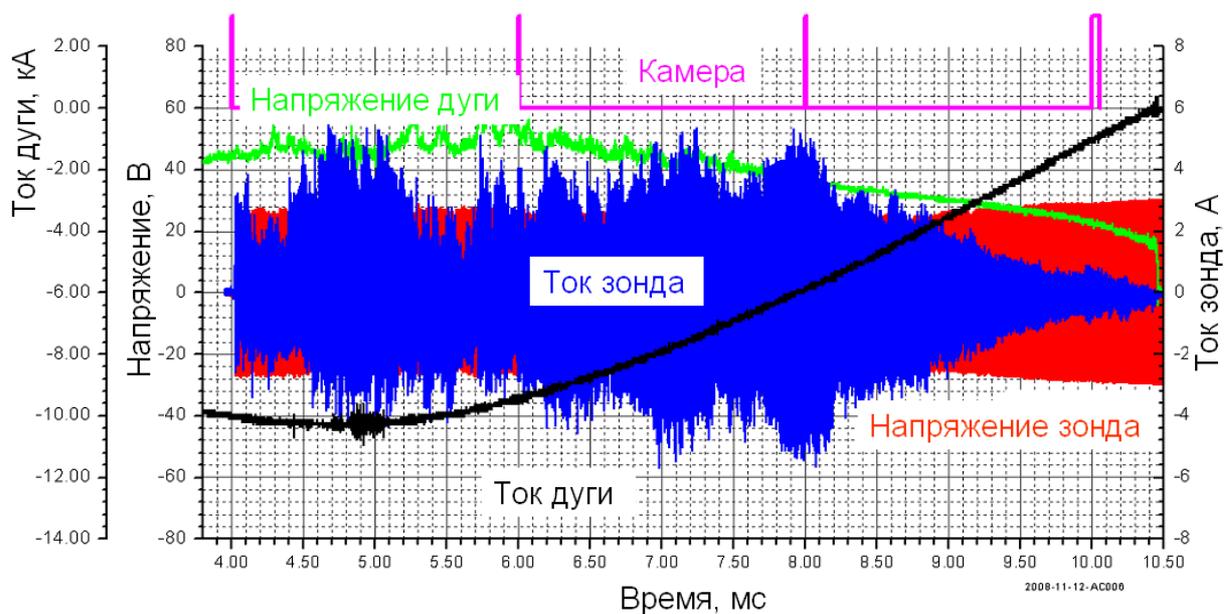
2.1.3. Экспериментальное определение предельно низких концентраций плазмы, регистрируемых с использованием системы одиночных ленгмюровских зондов и двойного зонда

2.1.4.1. Измерения концентрации плазмы с использованием двойного зонда

В качестве двойного зонда использовались 1-й и 2-й одиночные зонды из линейки. Техника питания и регистрации тока и напряжения двойного зонда были те же, что и в предыдущей работе. Частота переменного напряжения подаваемого на зонды была $100 \div 400$ кГц.

Набор осциллограмм тока и напряжения двойного зонда, фотографии разрядного промежутка, а также результаты обработки отдельных участков осциллограмм представлены на рис. 10 и 11.

Электронная температура плазмы была реконструирована путем подгонки ВАХ зонда выражением (2). Для уменьшения ошибки вычисления проводились по пяти–десяти периодам.



(а)

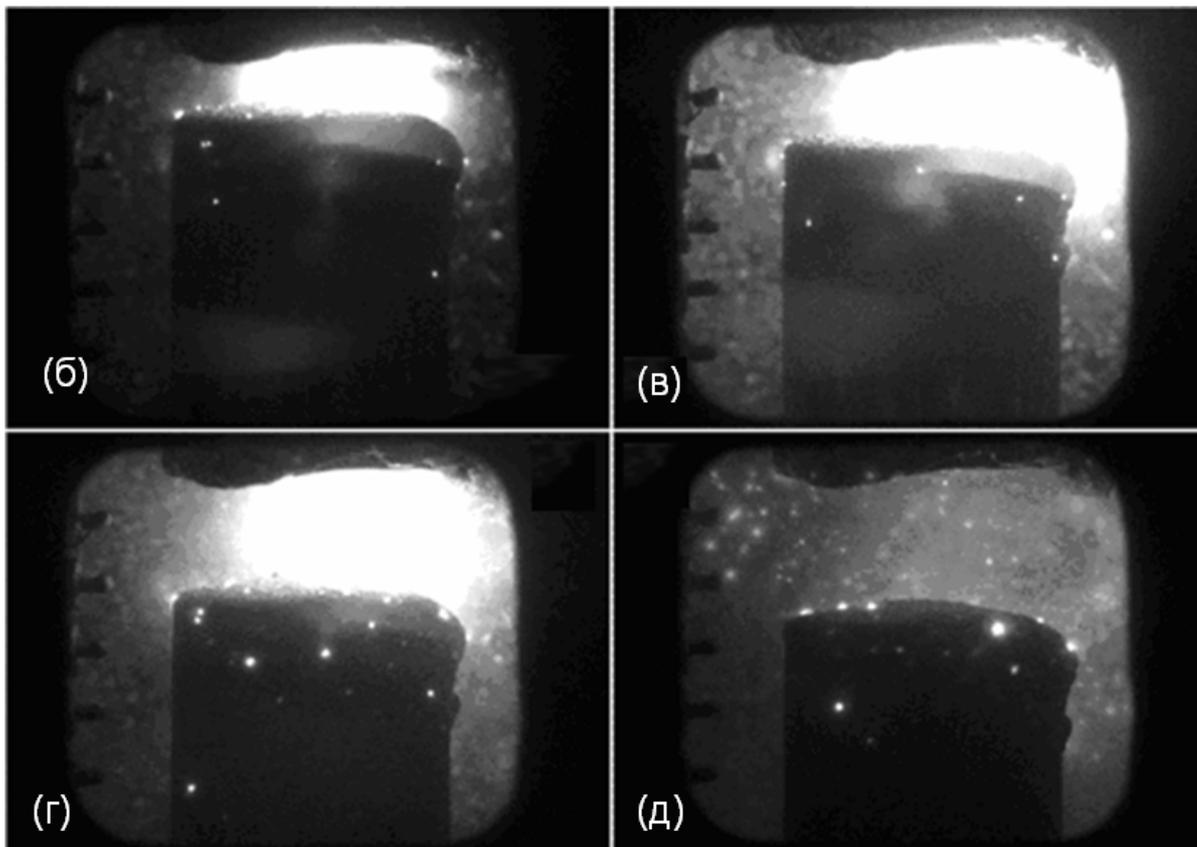
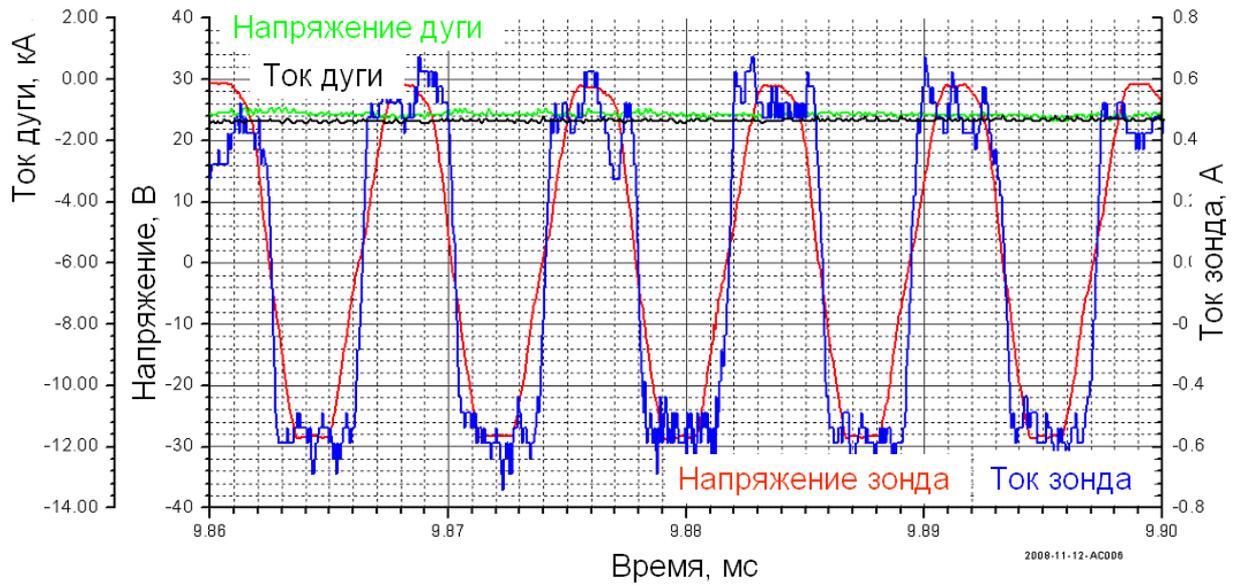
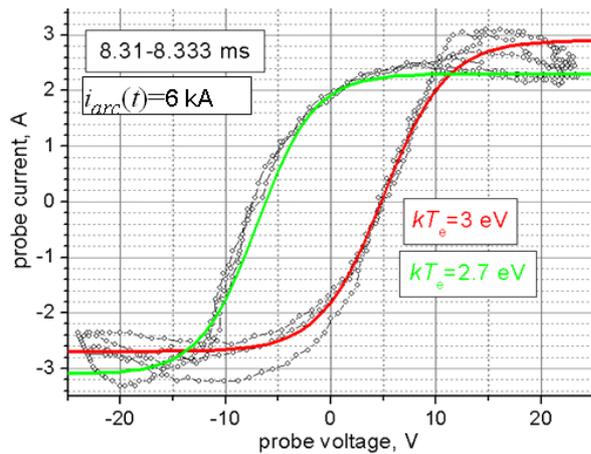


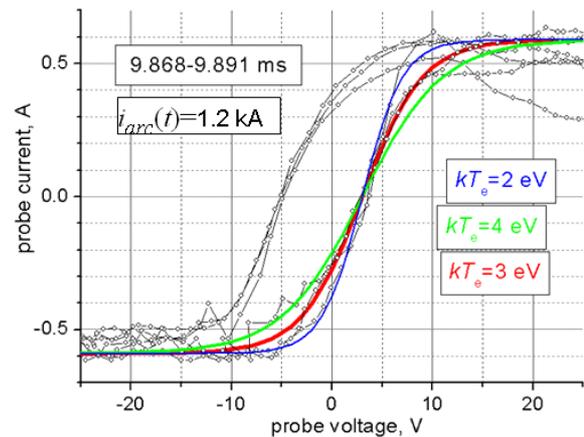
Рис. 10. (а) – набор осциллограмм напряжения и тока двойного зонда, напряжения и тока дуги и синхроимпульсов камеры (плечи зонда № 1 и 2), (б – д) – соответствующие изображения дугового промежутка.



(а)



(б)



(в)

Рис. 11. (а) – временное окно набора осциллограмм на рис. 10, (б, в) – измеренные ВАХ двойного зонда и вычисленные по формуле (2) для различных значений электронной температуры.

Измеренная таким образом электронная температура в плазме практически не зависела от частоты напряжения двойного зонда, амплитуды тока разряда и момента измерения и составила величину, близкую к 3 эВ. В предыдущих

измерениях, проводимых с Cu-Cr электродами, электронная температура, измеренная этим же методом, составляла обычно $1.7 \div 2.3$ эВ.

Для восстановления концентрации плазмы исходя из величины ионного тока насыщения необходимо знать функцию распределения ионов по скоростям. Данный вопрос не является тривиальным. С одной стороны, известно, что ионы в потоке плазмы, генерируемой катодным пятном на протяжении горения вакуумной дуги, имеют направленную компоненту скорости $v_d \sim 10^6$ см/с, намного превосходящую тепловые скорости и даже Бомовскую скорость ионов в окрестностях отрицательного зонда. В этом случае ток на зонд будет составлять величину

$$i_{is} = i_{dir} = S_{cs} e \langle Z \rangle n_i v_d = S_{cs} e n_e v_d, \quad (7)$$

где площадь собирающей поверхности зонда в плазменном потоке представляет собой площадь проекции зонда в направлении катода (нижнего электрода):

$$S_{cs} \approx 2 R a \approx 1.2 \times 5.1 \text{ mm}^2 \approx 6.1 \text{ mm}^2. \quad (8)$$

В этом случае электронная концентрация плазмы

$$n_e = i_{is} / (S_{cs} \cdot e v_d) \approx 1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \times i_{is} (\text{A}). \quad (9)$$

С другой стороны, необходимо учитывать взаимодействия потока ионов катодной плазмы с плотным нейтральным паром материала электродов в разрядном промежутке. В частности, в ряду ионно-атомных взаимодействий наибольшим сечением обладает процесс резонансной перезарядки. В результате таких взаимодействий в плазме появится значительная доля ионов с энергиями, характерными для паров (с Максвелловским распределением, $kT_i \leq 1$ эВ).

В этом случае ионный ток насыщения на отрицательный зонд и концентрация плазмы связаны между собой формулой Бома:

$$i_{is} = i_B = 0.4 S_{probe} e n_e (2kT_e/M_i)^{1/2}, \quad (10)$$

в которой собирающей поверхностью является полная поверхность зонда $S_{probe} \approx 19 \text{ см}^2$. Подставляя измеренную электронную температуру $kT_e = 3 \text{ eV}$, получаем для восстановления концентрации плазмы выражение

$$n_e = i_{is} / (0.4 S_{probe} e (2kT_e/M_i)^{1/2}) \approx 2.7 \times 10^{14} \text{ см}^{-3} \times i_{is} (\text{A}). \quad (11)$$

Как видим, данные оценки отличаются менее чем в 3 раза.

В реальности функция распределения ионов по скоростям в плазме представляет собой некоторую комбинацию рассмотренных крайних случаев, причем, доля низкоэнергетических ионов должна возрасти с ростом давления нейтральных паров и уменьшении тока катодных пятен. Задолго до нуля тока необходимо использовать для восстановления плотности плазмы скорее выражение (4), чем (6). Так, для конкретных коротких интервалов времени на рис. 11 плотность плазмы согласно выражению (4) составила величину $3 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (при токе дуги 6 кА, б), и $6 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (ток дуги 1.2 кА, в).

Характерные отрезки осциллограмм двойного зонда, включающие ноль тока, показаны на рис. 12. В момент нуля тока амплитуда сигнала тока двойного зонда была сравнима с шумом.

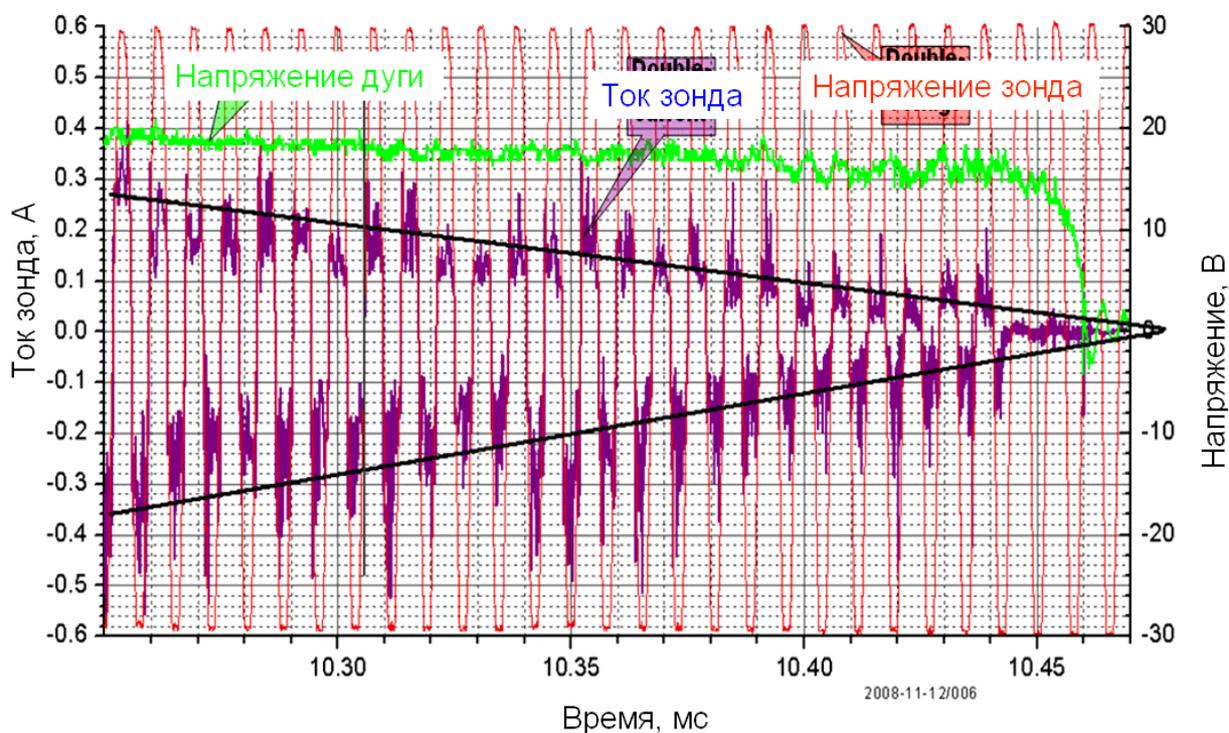


Рис. 12. Набор осциллограмм напряжения и тока двойного зонда вблизи перехода тока дуги через ноль, демонстрирующие предел измерений в виде срыва сигнала тока и необходимость использования экстраполяции при измерениях в нуле тока дуги.

В связи с этим измерение плотности плазмы по току двойного зонда было затруднительно. Часто за $10 \div 20$ мкс до нуля тока амплитуда зондового тока обрывалась скачкообразно в течение $2 \div 3$ мкс. Это может быть обусловлено двумя причинами. Наиболее простое объяснение такого скачка заключается в скачкообразном уменьшении плотности плазмы в окрестностях зондов. Второй причиной может оказаться резкое изменение функции распределения ионов по скоростям. Предположим, что момент начала срыва тока двойного зонда соответствует моменту гибели катодного пятна. До этого момента ионный ток насыщения на отрицательный зонд определяется в значительной степени ионным потоком, генерируемым катодным пятном, т.е. выражением (2). В течение $2 \div 3$ мкс происходит уход быстрых ионов из разрядного промежутка,

после чего ионный ток насыщения будет чисто Бомовским, т.е. определяться выражением (10). При одной и той же концентрации плазмы Бомовский поток ионов на зонд почти в 3 раза менее интенсивен по сравнению с потоком быстрых ионов, что и обуславливает резкое снижение тока.

Попытки экстраполяции уменьшения амплитуды ионного тока насыщения со временем в момент нуля тока также не позволили однозначно и надежно определить ионный ток в этот момент. Относительно надежно можно произвести лишь верхнюю оценку ионного тока насыщения ($0.01 \div 0.015$ А), на основании которой плотность плазмы может быть оценена как $< 3 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ при амплитуде тока дуги до 10 кА включительно. Существенно более аккуратные измерения плотности плазмы выполнены путем измерения электронного тока насыщения.

2.1.4.2. Измерения концентрации плазмы с использованием одиночного зонда

В отличие от измерений электронного тока насыщения, выполненных в рамках исследования динамики слоя, когда было актуально измерение времени срыва электронного тока на зонды после нуля тока, в данной экспериментальной серии было выполнено измерение электронного тока насыщения в более широком временном интервале, включая несколько десятков микросекунд до нуля тока. Поскольку электронные токи на зонд в этот период могут достигать нескольких ампер, импеданс генератора смещения потенциала зонда был уменьшен до 9 Ом. С целью уменьшения влияния отбираемого зондом тока на параметры разряда вблизи нуля тока, использовался лишь один зонд в линейке (№ 1), остальные были изолированы.

Электронная концентрация, как и ранее, восстанавливалась исходя из соотношения:

$$n_e(t) = \frac{4j_e(t)}{e\mathbf{v}_e}, \quad (12)$$

где

$$v_e = (8 e kT_e / \pi m_e) = 1.16 \times 10^8 \text{ см/с} -$$

тепловая скорость электронов при $kT_e = 3$ эВ, а плотность электронного тока насыщения из плазмы принимается равной плотности тока на поверхность зонда

$$j_e \cong j_{probe} = i_{probe} / S_{probe}$$

Данное приближение есть приближение тонкого призондового слоя объемного заряда. Как показал анализ, проделанный в рамках предыдущего контракта, данное приближение удовлетворительно выполняется в нашем случае при токах на зонд ≥ 0.1 А. С учетом данных предположений получаем простое соотношение для оценки плотности плазмы n_e :

$$n_e (\text{см}^{-3}) \cong 1.13 \times 10^{12} \cdot i_{probe} (\text{А}). \quad (13)$$

Типичный набор осциллограмм вместе с восстановленной по выражению (8) плотностью плазмы приведена на рис. 13. Цикл измерений проводился при наличии изолированного (плавающего) большого экрана. При наличии провала тока зонда, обусловленного всплеском напряжения горения дуги и потенциала плазмы непосредственно перед погасанием, ток зонда в момент нуля тока дуги определялся исходя из линейной интерполяции, как схематически показано на рис. 13 зеленой линией. Измерения проводились на двух расстояниях от разрядного промежутка: минимальном (3 мм) и на удалении 18 мм, а при токе дуги 12 кА дополнительно на расстоянии 4.5 мм. Набор экспериментальных данных приведен в Приложении 10. Средняя плотность плазмы на различных

расстояниях от разрядного промежутка при различных амплитудах тока дуги приведена в Табл. 1.

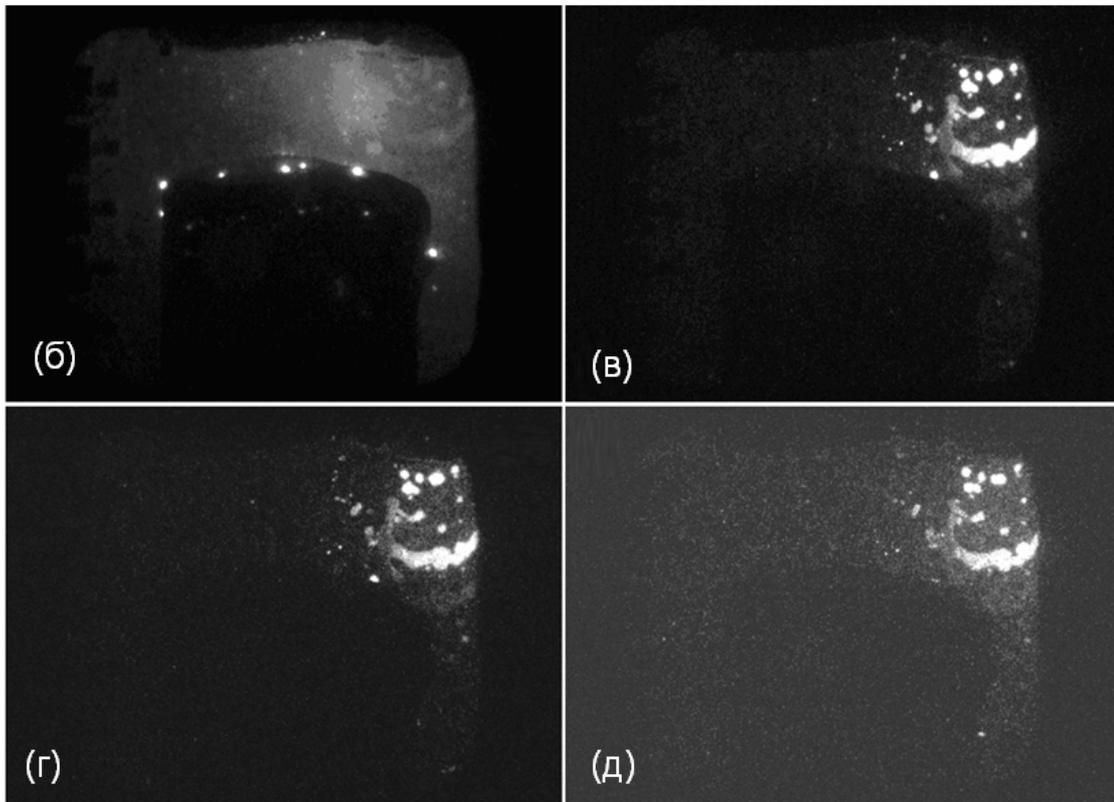
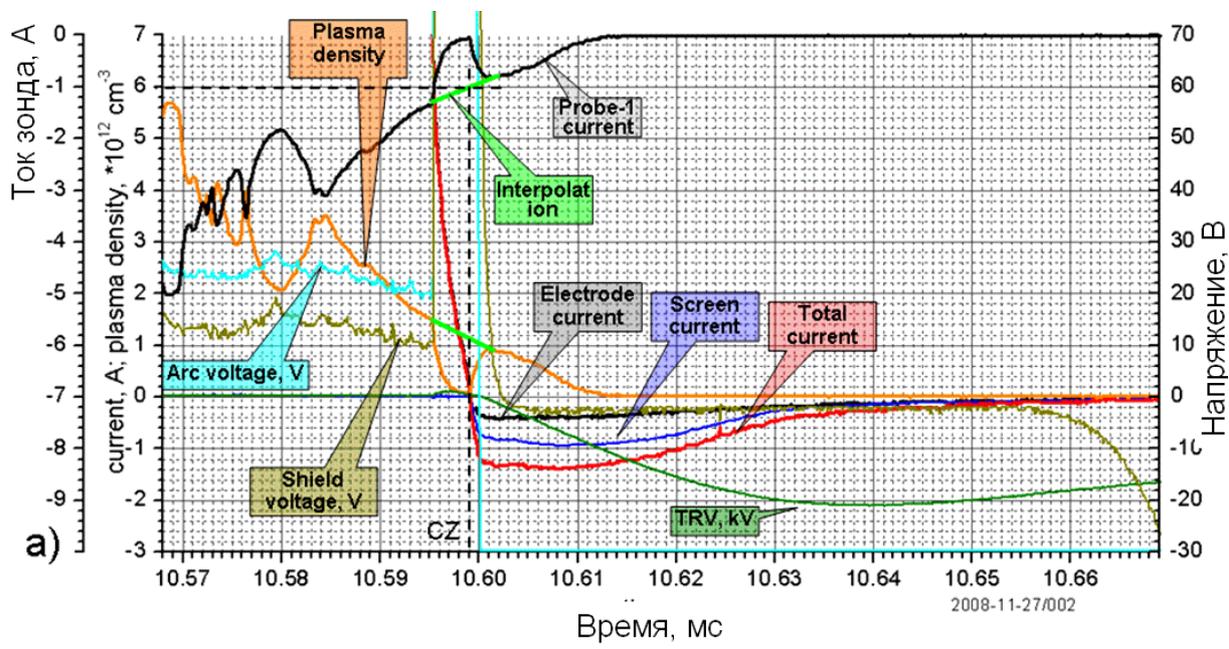


Рис. 13. Типичный набор экспериментальных данных при измерении электронного тока насыщения на зонд № 1, включая результат вычисления электронной концентрации согласно формуле (13). Ток дуги 8 кА в максимуме. Потенциал экрана плавающий. Моменты регистрации изображений те же, как и на рис. 10.

Таблица.1 Средняя плотность плазмы и стандартное отклонение на различных расстояниях от разрядного промежутка при различных амплитудах тока дуги. Вертикальное положение зонда относительно кромки верхнего электрода – 3.2 мм.

x, мм кА	3		4.5		18	
	$\langle n_e \rangle$	Δn_e	$\langle n_e \rangle$	Δn_e	$\langle n_e \rangle$	Δn_e
8	9.6 5E+11	2.3 3E+11			3.6 3E+11	2.2 5E+11
10	2.5 1E+12	1.5 5E+12			1.2 3E+12	5.3 0E+11
12	5.5 0E+12	3.5 4E+12	2.6 9E+12	2.8 3E+12	3.8 5E+11	2.1 2E+10

2.1.4. Выводы к Разделу 2.1

1. Выполнены работы по отладке системы позиционирования зондов и организации оптического наблюдения за разрядным промежутком
2. Разработана методика измерения концентрации и температуры плазмы методами одиночного и двойного ленгмюровского зонда.
3. Проведены зондовые измерения с целью определения минимальных значений концентрации плазмы, доступных для измерений. Показано, что минимальные значения электронной концентрации составляют 10^{11} см^{-3} .

2.2. Формирование оптического тракта на экспериментальном стенде для проведения спектроскопических измерений и скоростной визуализации плазменных объектов

2.2.1. Требования, предъявляемые к возможностям оптической системы, используемой в экспериментах

Необходимость формирования оптического тракта связана с важностью наблюдения за светящимся объектом, плазмой, характеризующимся высокой нестабильностью свечения. Кроме того, оптический тракт должен обеспечивать возможность использования излучения лазера на красителях с возможностью перестройки частоты генерации с целью подсветки плазмы и регистрации абсорбционных изображений на длинах волн, совпадающих с излучающими линиями исследуемой плазмы. С другой стороны, тракт должен обеспечивать регистрации серии экспериментов как в разные (последовательные) моменты времени, так и одновременно, но при экспозиции на различных длинах волн.

2.2.2. Характеристики оптического тракта

Основной составляющей оптической схемы является 4-х канальная сверхскоростная камера HSFC-Pro, адаптированная к задачам эксперимента. Общая оптическая схема установки представлена на рис. 14.

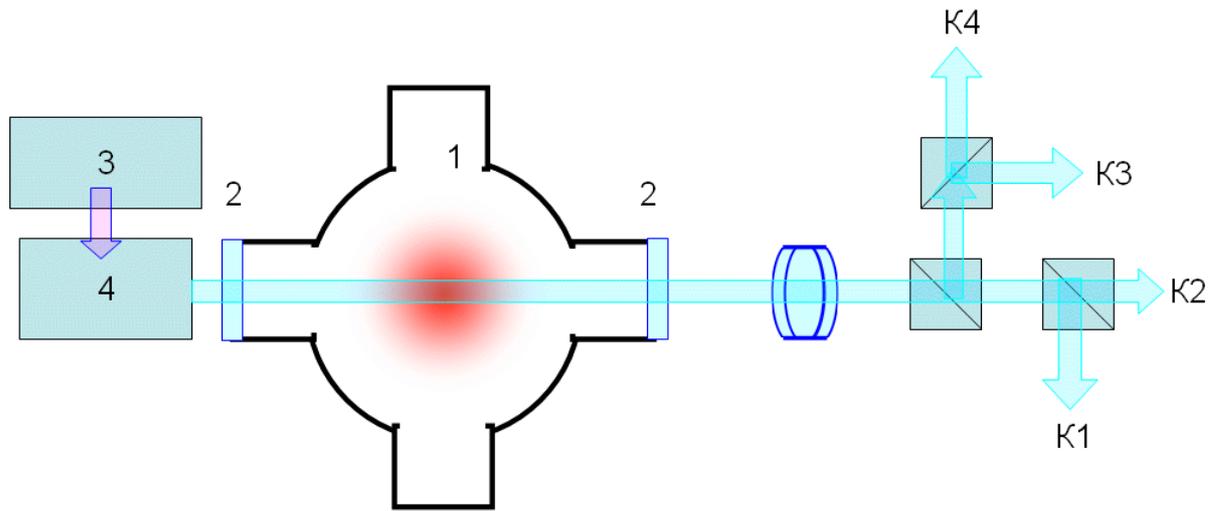


Рис. 14. Общая оптическая схема регистрации изображений и измерений параметров плазмы оптическими методами. 1 – вакуумная камера с плазменным объектом внутри, 2 – кварцевые окна, 3 – азотный лазер накачки, 4 – лазер на красителях, K1 ... K4 – независимые каналы, сформированные делительными кубиками, расположенными на оптическом пути после линзы.

Таким образом, луч света, являющийся собственным излучением плазмы или зондирующим лучом лазера, модифицированным взаимодействием с плазмой, попадает на входную оптику регистратора и делится на четыре эквивалентные реплики первичного луча, но ослабленные по интенсивности с коэффициентом $\frac{1}{4}$. Дальнейшее преобразование луча (лучей) представлено на рис. 15.

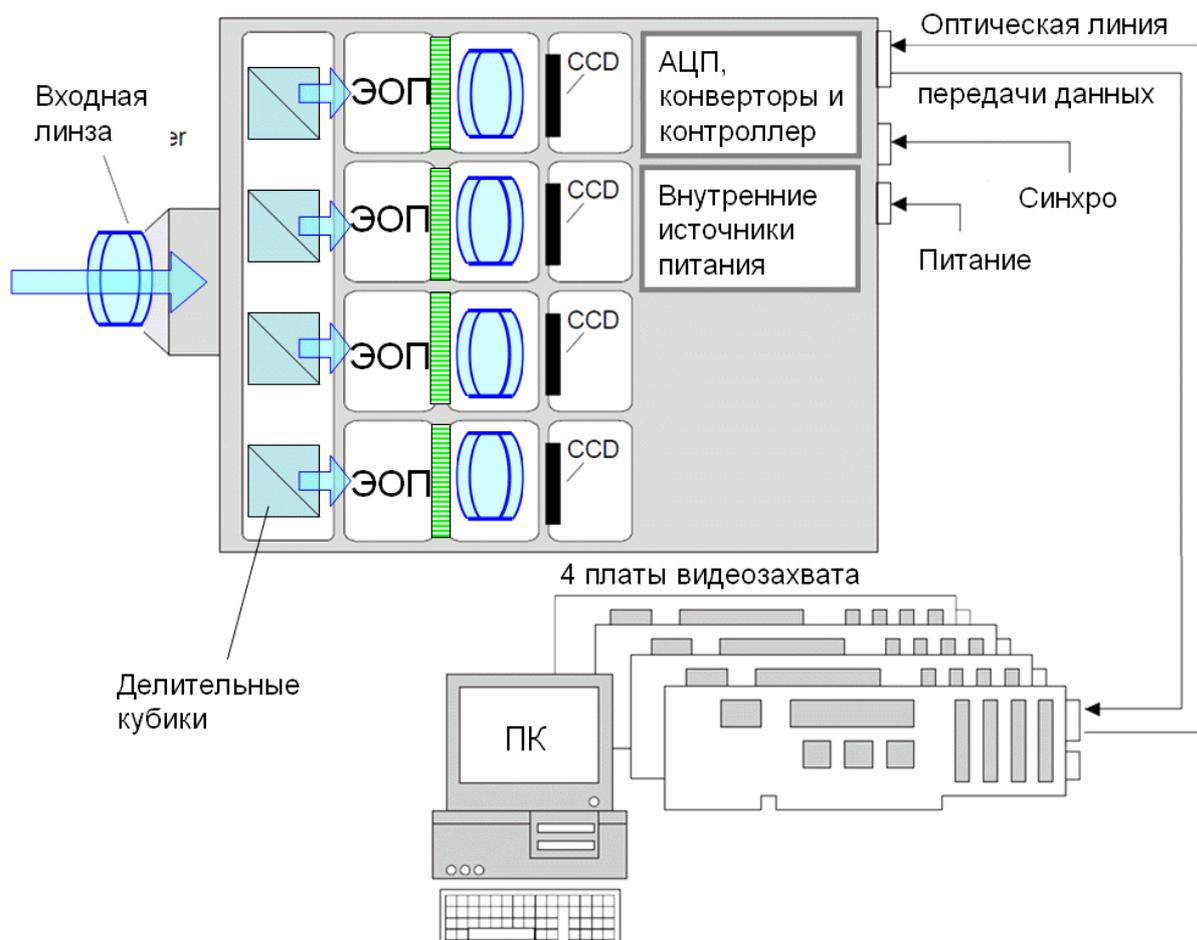


Рис. 15. Общая оптическая схема преобразования реплик луча в цифровые изображения в камере HSFC-Pro.

Каждая из четырёх реплик попадает в соответствующий канал камеры HSFC-Pro, состоящий из электронно-оптического преобразователя (ЭОП) на основе фотокатода (ФК), микроканальной пластины (МКП), и люминесцентного экрана (ЛЭ). ЭОП выполняет две функции – функцию электронного затвора с минимальным временем открытого состояния 3 нс, и функцию усилителя яркости с максимальным коэффициентом усиления 512. ЭОП формирует изображение на ЛЭ, которое проецируется оптикой на CCD, имеющую 12 разрядов при оцифровке изображения.

Конструкция камеры HSFC-Pro представлена на рис. 16.

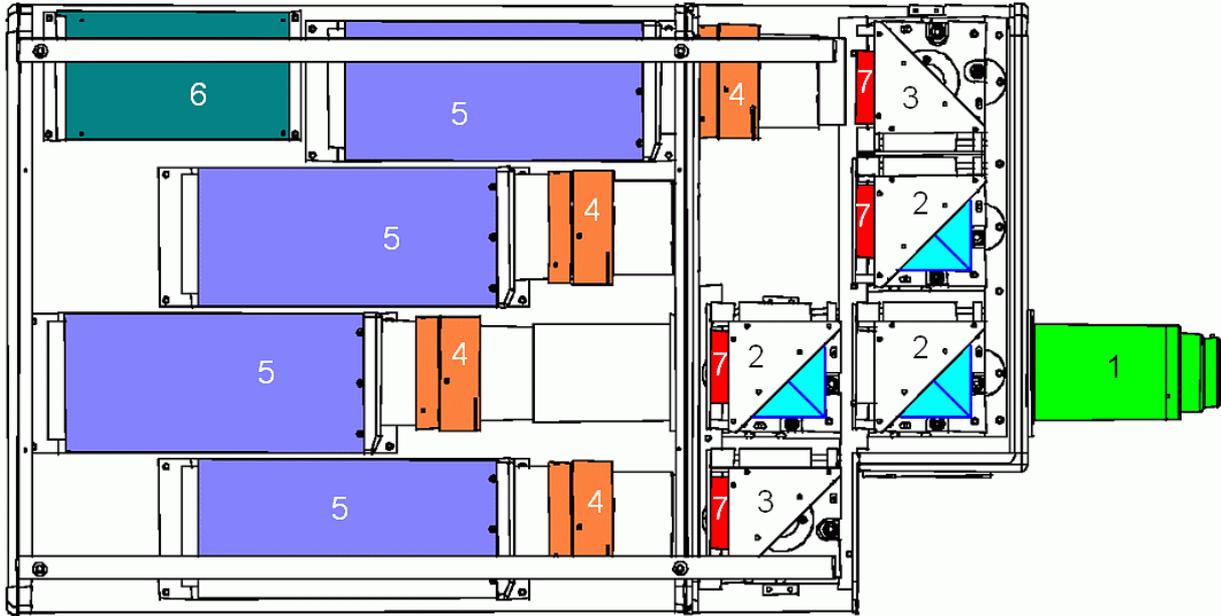


Рис. 16. Общая схема камеры HSFC-Pro. 1 – входная оптика, 2 – светоделительные кубики, 3 – зеркала, 4 – ЭОП, 5 – CCD с источниками митания, 6 – сетевой источник питания, 7 – интерференционные фильтры.

Принципиальным для обеспечения функциональных возможностей аппаратуры является элемент конструкции камеры 7, позволяющий устанавливать стандартные интерференционные фильтры для получения спектрально-дифференцированных изображений. С учётом 4-х каналов, данный измерительный комплекс позволяет одновременно получать изображения одного и того же плазменного объекта на 4-х длинах волн.

2.3. Разработка методики и проведение предварительных экспериментов согласно ГОСТ Р 8.563-96 по скоростной визуализации дуги, в том числе в узком спектральном диапазоне (эмиссионная спектроскопия с визуализацией) с использованием 4-х канальной скоростной камеры с электронно-оптическим усилителем яркости HSFC-Pro и узкополосных интерференционных светофильтров диапазона пропускания света порядка 10 нм

2.3.1. Методика синхронной с электрическими измерениями визуализации разрядного промежутка

2.3.1.1. Общие положения

1.4. Данная методика предназначена для проведения синхронных с изучаемым явлением наблюдений с использованием 4-х канальной сверхскоростной цифровой камеры HSFC-Pro.

1.5. К работе с прибором допускается персонал, имеющий высшее физико-математическое или техническое образование, не ниже III группы допуска по электробезопасности, изучивший полное описание на прибор и прошедший вводный практический курс в Лаборатории вакуумной электроники ИСЭ СО РАН.

1.6. При проведении измерений по данной Методике должны быть выполнены условия, предусмотренные техническим описанием на прибор, ГОСТ Р 8.563-96 ГСИ «Методики выполнения измерений» и ГОСТ 8.207-76 ГСИ

«Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений».

2.3.1.2. Краткое описание оборудования

- 2.1. Камеры HSFC-Pro имеет электрический и оптический входной тракт для запуска камеры и получения изображения. Предварительно камера взводится с использованием программного обеспечения.
- 2.2. Входной электрический запускающий тракт подразумевает для запуска TTL сигнал +5В с растущим фронтом, по которому и происходит запуск. Длительность фронта не должна превышать 20 нс. Входное сопротивление на землю запускающего тракта составляет 1 кОм.
- 2.3. Входной оптический запускающий тракт требует для запуска камеры импульсного светового длительностью не менее 10 нс и мощностью излучения не менее 1 мВт.
- 2.4. Время задержки начала регистрации изображения относительно середины фронта запускающего оптического или электрического импульса составляет 70 ± 5 нс.
- 2.5. Камера вырабатывает выходные синхроимпульсы, совпадающие по временному интервалу с интервалами открытого состояния ЭОП каналов с погрешностью, не превышающей 5нс. При длительности экспозиции кадра менее 20 нс выходной сигнал соответствующего канала устанавливается равным 100 нс. Выходной сигнал представляет собой TTL импульсы.

2.3.1.3. Проведение измерений

3.1. С использованием программного обеспечения перевести камеру в моду «Single Trigger Mode» с установкой следующего состояния:

Single Trigger Mode	< 20ns	≥ 20ns
max. pulse frequency	3,3 KHz	2 MHz
resulting minimum delay between two exposures	300µs	500ns

Del./Exp. Time

Delay: 000000 [ms]
000780 [ns]

Exposure: 000000 [ms]
000300 [ns]

Loops [1..256]: 1

Delay Time
0 ... 1000s
Steps see below!

Exposure Time
x ns ... 1000s (x = depending of the pulser)
Steps see below!

Рис. 17.

3.2. Установить времена экспозиций по каждому каналу в соответствии с протоколом:

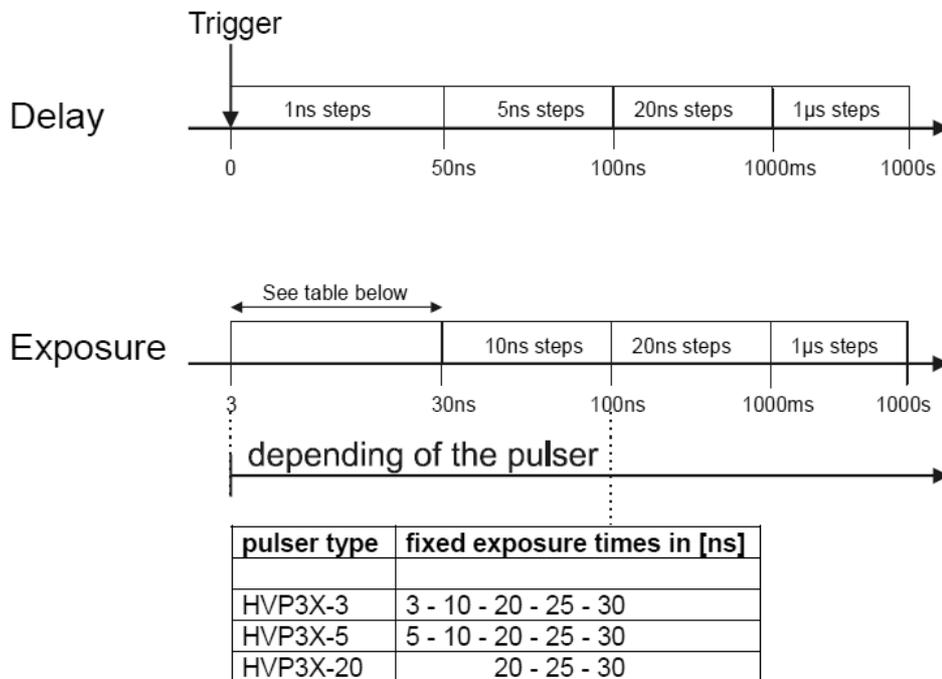


Рис. 18.

- 3.3. Ввести камеру.
- 3.4. Запустить исследуемый физический процесс, вырабатывающий требуемый синхроимпульс для запуска камеры.
- 3.5. После оцифровки зарегистрированные изображения появляются на мониторе компьютера. Каждое из изображений должно быть сохранено в виде отдельного файла в формате 8-разрядного BMP или 16-разрядного TIFF.

2.3.1.4. Проведение периодической калибровки камеры

При фотометрии изображений объектов принципиальное значение имеет калибровка камеры и светофильтров. В камере HSFC-Pro используется фотокатод S20, спектральная характеристика которого известна [2-55] (рис. 19) и используется для приведения регистрируемой интенсивности свечения к уровню, независящему от длины волны. Далее следует осуществить калибровку коэффициентов пропускания интерференционных светофильтров. С этой целью с использованием светофильтров и камеры регистрируется спектр излучения вольфрамовой спирали, накаливаемой до 2600 К. Измеренный спектр излучения вольфрамовой спирали, восстановленный с использованием спектральной чувствительности фотокатода камеры (см. рис. 20), может отличаться от рассчитанного по формуле Планка для спектральной плотности энергии равновесного излучения $u_{\lambda,T}$ с учётом спектрального коэффициента излучения вольфрама $\kappa_{\lambda,T}$ при температуре поверхности 2600 К [2-56]:

$$u_{\lambda,T} = \kappa_{\lambda, 2600\text{K}} \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}. \quad (14)$$

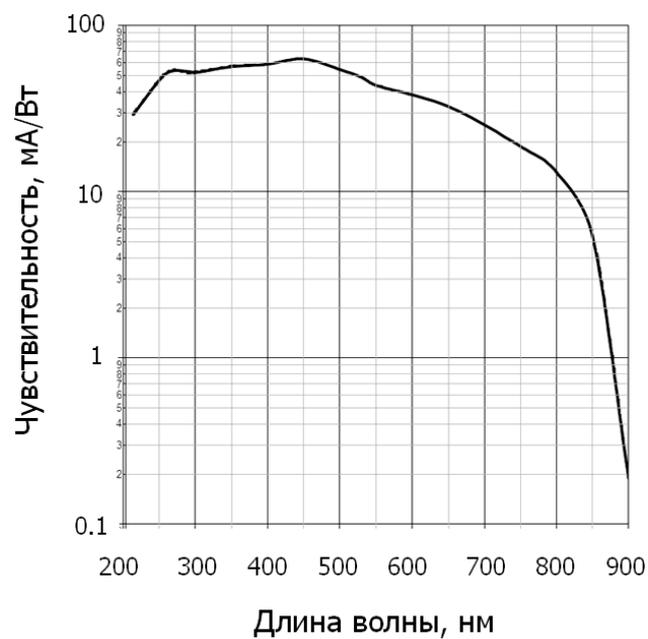


Рис. 19. Спектральная характеристика чувствительности фотокатода S20.

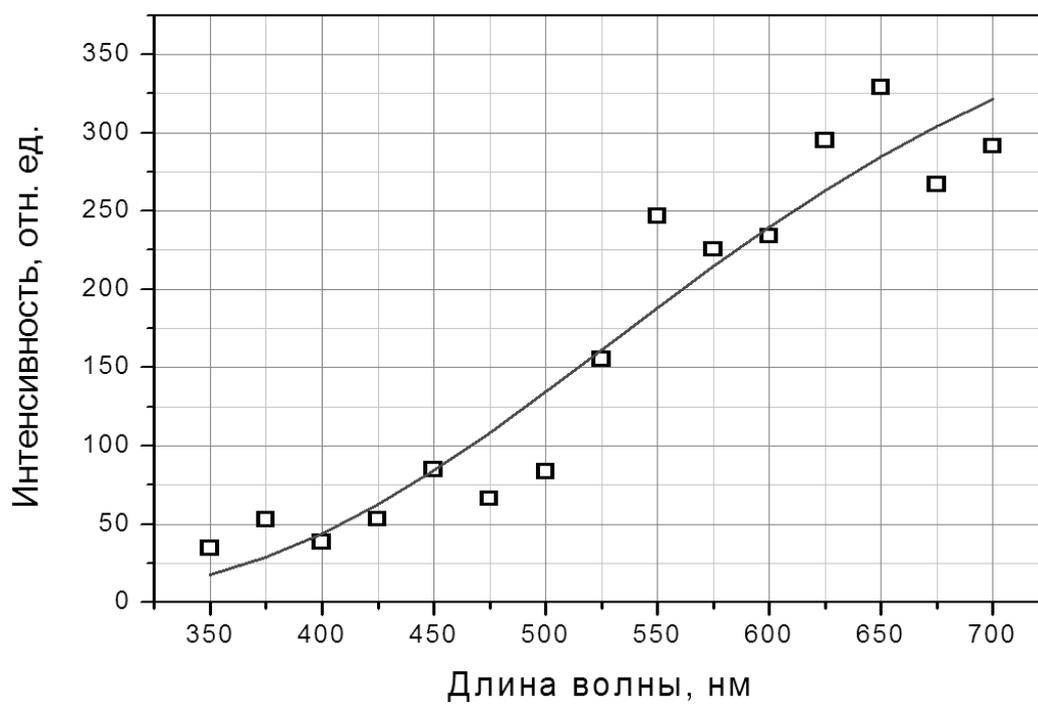


Рис. 20. Спектральная характеристика вольфрамовой спирали, измеренная (точки) и рассчитанная (линия) при температуре 2600 К.

Отличие измеренной спектральной характеристики вольфрамовой спирали от рассчитанной используется для калибровки пропускной способности светофильтров. После подгонки коэффициентов пропускания светофильтров измеренная и рассчитанная характеристики должны совпадать, что проверяется дополнительным измерением спектральной характеристики лампы накаливания.

Для фотометрии изображений использовалась программа Scion Image (Alpha 4.0.3.2, freeware). При обработке следует учитывать возможность того, что изображение перемещающегося объекта (трек на изображении) может оказаться вне фокальной плоскости объектива. С этой целью изображение трека должно быть интегрировано не по оси, а по некоторой задаваемой области, полностью включающей в себя трек (рис. 21,а). Такой же процедуре должны подвергаться и изображения неподвижных объектов (рис. 21,б). Каждое изображение содержит некоторый уровень засветки фона, поэтому перед интегрированием из каждого пиксела в области интегрирования следует вычесть значение, соответствующее среднему уровню фона.

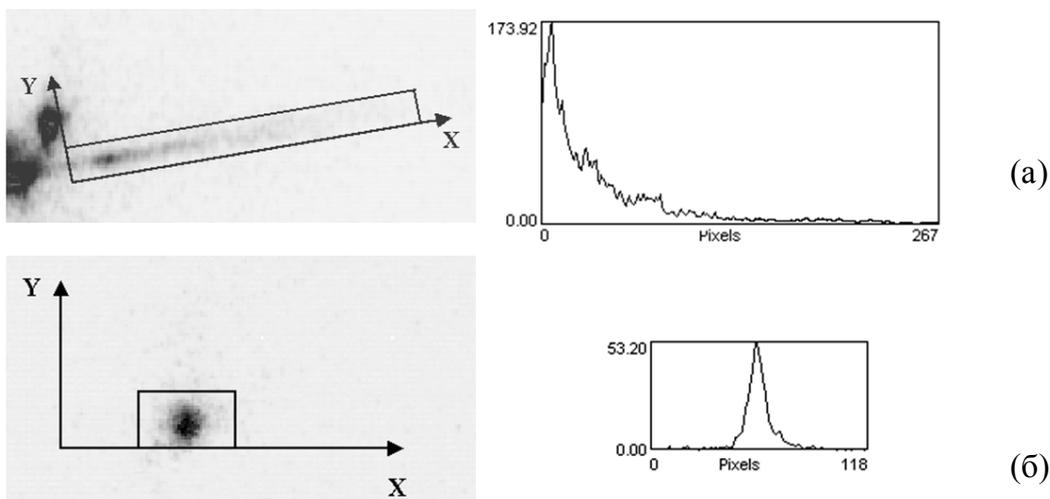


Рис. 21. Пример фотометрии капельного (а) и катодного (б) пятен. Изображения инвертированы.

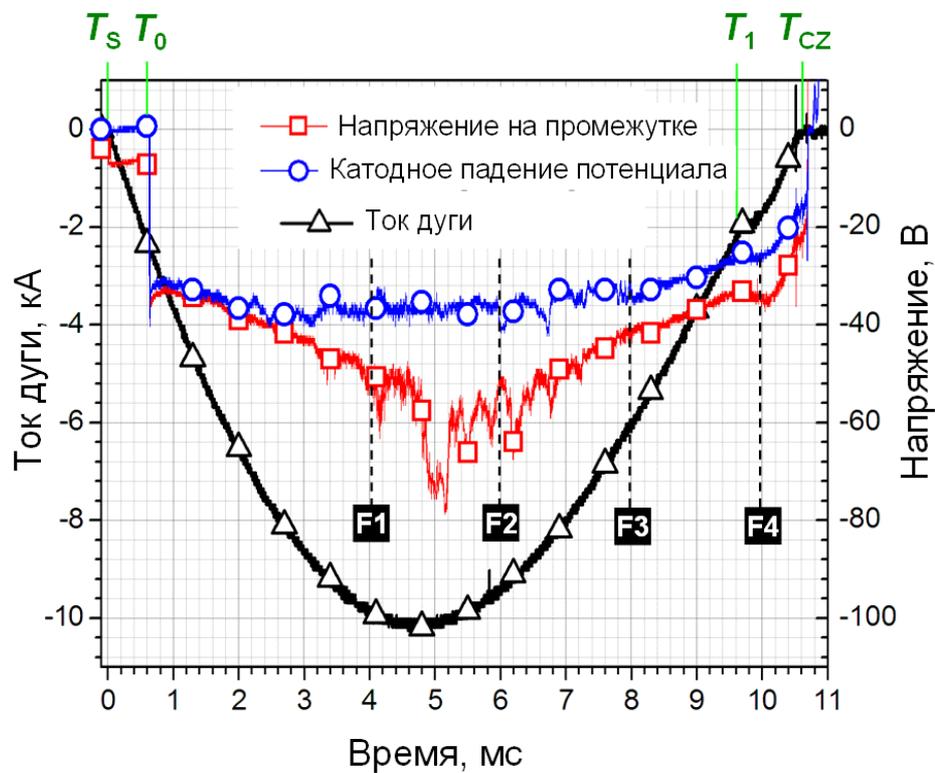
2.3.1.5. Отчетность

- 5.1. Данные измерений хранятся в ИСЭ СО РАН в виде электронных таблиц и используются для их последующей обработки или отчетности.
- 5.2. Срок хранения информации не менее 10 лет, если не оговорено иначе в документах на выполнение НИР (НИОКР), в рамках которых

2.3.2. Экспериментальная проверка оптической системы с регистрацией спектрально дифференцированных изображений вакуумной дуги

Вид дуги и её поведение в значительной степени зависит от материала электродов, и наши эксперименты не являются исключением. Горение дуги на медных электродах иллюстрируется на рис. 22. Протекание тока начинается в момент времени T_S , за которым следует момент времени T_O , соответствующий размыканию контакта и зажиганию дуги. С момента зажигания дуги на промежутке устанавливается падение напряжение, соответствующее катодному

падению потенциала, что свидетельствует о горении дуги в диффузной моде, несмотря на малую длину промежутка. В свою очередь, катодное падение потенциала определяет плавающий потенциал экрана. В определённый момент времени режим горения дуги трансформируется в моду с анодным пятном, что отражается на осциллограмме тока появлением шума большой амплитуды. Кроме того, падение на промежутке становится заметно выше катодного вплоть до момента нуля тока T_{CZ} , что является следствием интенсивного испарения электродного материала.



(a)

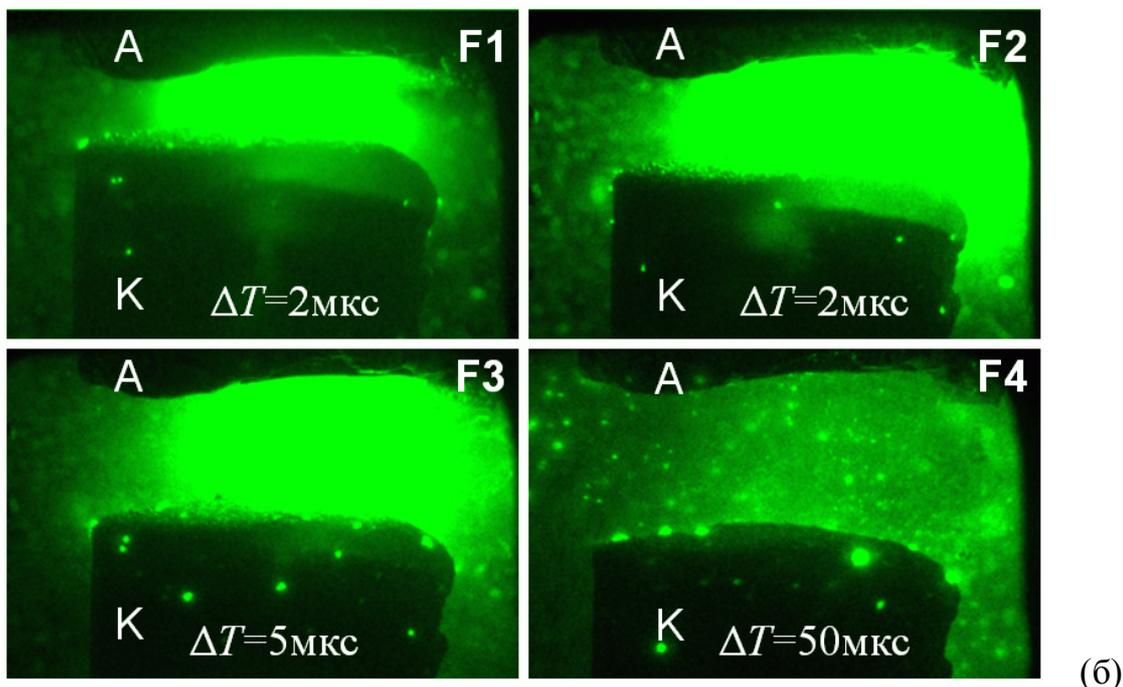


Рис. 22. Пример осциллограмм при горении дуги на медных электродах (а) и соответствующие изображения (б). T_S – начало импульса тока, T_O – начало горения дуги, T_I – момент инъекции 500-Гц контура ПВН, T_{CZ} – момент нуля тока, ΔT – время экспозиции. Моменты регистрации кадров отображены на осциллограммах.

Цифровые изображения на рис. 22,б, соответствующие осциллограммам на рис. 22,а, переэкспонированы настолько, что бо́льшая часть светлых областей превышает максимальный уровень градации оттенков серого цвета камеры. При меньшем времени экспозиции на изображениях (рис. 23) становятся различимыми отдельные светлые области, появление и форма которых носит нерегулярный характер.

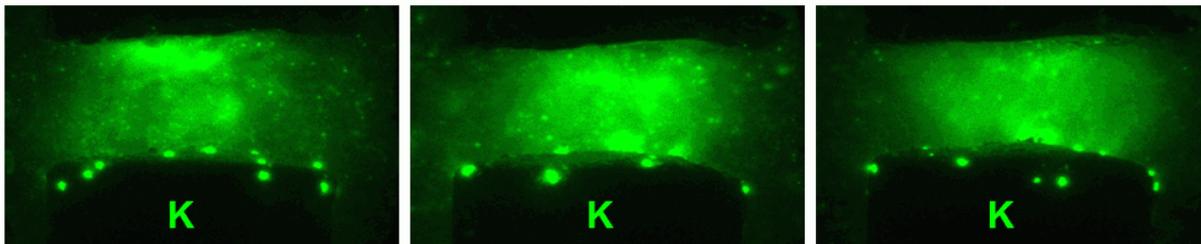


Рис. 23. Изображения дуги на медных электродах, полученные в разных актах горения дуги.

Анодный факел на медно-хромовых электродах наблюдался в виде отчётливой оболочки. В отличие от случая электродов медных, появление анодных факелов на медно-хромовых электродах носит регулярный характер от импульса к импульсу. Кроме того, их форма отличается воспроизводимостью. При регистрации спектрально-дифференцированных изображений удалось получить интересную информацию о процессах, происходящих в дуговом промежутке. Три различных интерференционных светофильтра, пропускающих свет только в узком диапазоне шириной порядка 10 нм, были выбраны на длины волн линий Cr I (рис. 24,а), Cu II (рис. 24,б) и Cr I и Cu II одновременно (рис. 24,в). Данные линии были выбраны исключительно по причине ограниченности набора светофильтров, в то время как линии Cu I и Cr II также присутствуют в дуге на медно-хромовых электродах. Изображения на рис. 24 показывают, что бóльшая часть света анодного факела излучается возбуждёнными нейтральными атомами. Оболочка анодного факела окружена диффузным гало, излучаемым ионами.

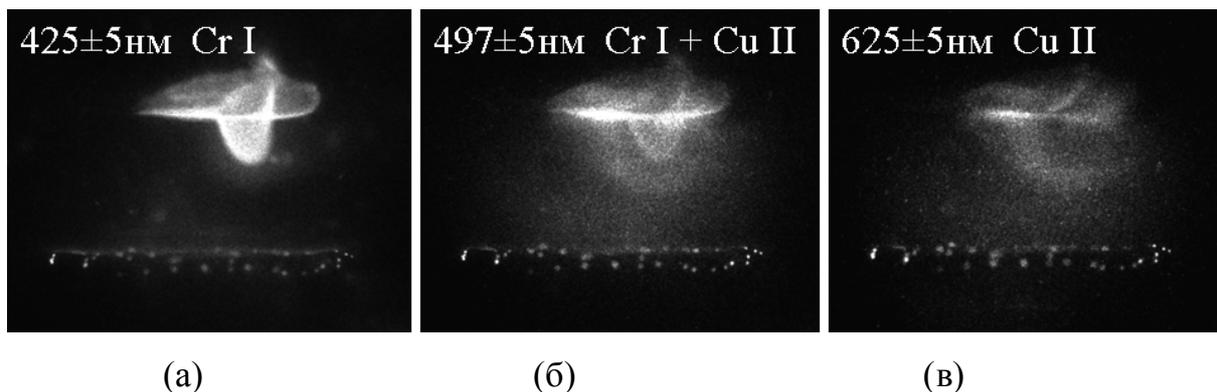


Рис. 24. Спектрально-дифференцированные изображения анодного факела на медно-хромовом аноде при горении сильноточной вакуумной дуги.

2.4. Разработка методики экспериментов согласно ГОСТ Р 8.563-96 по лазерной абляции жидкометаллической мишени и подключение импульсного неодимового лазера к экспериментальному стенду

2.4.1. Методика экспериментов по лазерной абляции жидкометаллической мишени и формированию абляционного плазменного факела

2.4.1.1. Общие положения

Настоящая методика предназначена для изготовления мишени лазерной абляции в исполнении лабораторного макета на основе жидкого галлий–индиевого сплава, используемого в качестве рабочего тела в мишенно–сопловом узле (МСУ) лазерно–плазменного двигателя (ЛПД), с автоматической подачей жидкометаллического рабочего тела за счёт капиллярных сил в область абляции.

2.4.1.2. Наименование и назначение объектов разработки

2.1. ЛПД представляет собой устройство, генерирующее направленный поток плазмы в вакуум, предназначенное для преобразования электромагнитной энергии лазерного излучения в механическую энергию плазменной струи и передачи импульса струи мишени, создавая при этом реактивную тягу.

2.2. МСУ является составной частью ЛПД, принимающей энергию лазерного излучения, поставляющей рабочее вещество в область абляции и формирующей направление вектора реактивной тяги.

2.3. Узел подачи жидкометаллического рабочего тела (УПР) является основной частью МСУ, обеспечивающей восстановление поверхности жидкого металла в области абляции.

2.4.1.3. Требования к условиям испытания и использования макета МСУ

3.1. Место испытания и использования

Испытание и использование макета МСУ проводится в лабораторных условиях.

3.2. Требования к средствам использования макета МСУ:

3.2.1. Перечень лабораторных средств, требуемых для использования макета МСУ, приведён в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Перечень лабораторных средств

Наименование, тип и марка	Кол-во	ГОСТ, ТУ или обозначение	Основные характеристики
Установка высоковакуумная, включающая: Вакуумную прогреваемую камеру с кварцевыми окнами и электрическими вводами,	1	ГОСТ 5197-85 ГОСТ 25197-82 ГОСТ Р 52715-2007 ГОСТ 26526-85	Предельный вакуум 10^{-6} Па. Предельный вакуум 10^{-6} Па, максимальная скорость откачки

Насос магниторазрядный охлаждаемый НМДО–025–1 Насос механический 2НВР–5Д	1 1	ГОСТ 25198-82 ГОСТ Р 52856-2007 ГОСТ 5.1300-72 ГОСТ 25663-83	250 л/с. Скорость откачки 5 /с.	
Лазер RL-1,0Q с системой позиционирования и фокусировки	1	Опытная разработка	Длина волны лазерного излучения, нм	1064
			Режим работы	Импульсный,
			Частота следования импульсов накачки, Гц	Не более 500
			Энергия импульса лазерного излучения (каждого в пачке), мкДж, не менее	250
Цифровой осциллограф Tektronix TDS–2024	2	IEEE Standard 488.1-1987, RS- 232-C	Количество каналов 4. Полоса пропускания входных каскадов - 200 МГц. Погрешность измерения 1% крайних значений диапазона.	
Цифровой мультиметр МУ-65	1	ГОСТ 9071-79	Класс точности 2	
Коаксиальные кабели РК-50-3 с разъёмами для соединения датчиков тока и напряжения с осциллографом	10	ГОСТ 11326.1-79	Длина кабелей – 9 м, волновое сопротивление – 50 Ом, разъёмы СР50-74ФВ.	
Весы лабораторные прецизионные ВЛР-20	1	ГОСТ 19491-74	2 класс точности, цена деления 5 мкг.	
Бязь отбеленная, кв. м.	1	ГОСТ 11680-76	Используется для протирки.	
Спирт изопропиловый, л.	3	ГОСТ 9805-84	хч или чда	
Галлий технический, г.	2	ГОСТ 12797-77	Используется для приготовления легкоплавкой эвтектики.	
Индий технический, г.	0.5	ГОСТ 10297-94	Используется для	

			приготовления легкоплавкой эвтектики.			
Пирометр с исчезающей нитью «Проминь М»	1	ТУ 25-7323.0004- 891800-2500	Температура, °С	Предел допускаемого значения		Диапазон измерения
				основной погрешности, °С	среднего квадратического отклонения случайной составляющей основной погрешности, °С	
			800	14	2,5	
			900-1400	12	2,0	
			1200-2000	20	5,0	I
			1800-2500	35	5,0	II
			3000	45	6,0	II
4000	80	12,0	II			
Прутки молибденовые (заготовка)	1	ГОСТ 17432-72	Используется для изготовления тигля.			
Проволока вольфрамовая марки ВА, диаметр 100 мкм, м	1	ГОСТ 18903-73	Используется для изготовления прямонакального термокатада.			
Объект-микрометр	1	ГОСТ 7513-55	Пределы измерения: 0 ÷ 1 мм, цена деления: ± 0.01 мм			
Светофильтры в комплекте	1	ГОСТ 24179-80	Используются для ослабления излучения лазера при юстировке			

3.2.2. Средства измерений, используемые при испытаниях, могут быть заменены другими, обеспечивающими требуемую точность измерений.

3.2.3 Требования к условиям проведения испытаний (состояние окружающей, искусственно создаваемой или моделируемой среды и т.п.)

Испытания должны проводиться в нормальных климатических условиях:

температура окружающего воздуха, °С	20±10
относительная влажность воздуха, %	от 45 до 80
атмосферное давление, мм рт. ст.	от 650 до 800

2.4.1.4. Методика изготовления макета МСУ

4.1. Общие требования к порядку изготовления макета МСУ.

4.1.1. Макет МСУ изготавливается из немагнитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т или её импортных аналогов согласно чертежам, приведённым в Приложении к Акту выполненных работ по изготовлению макета МСУ. Конструкция макета приведена на рисунке 25.

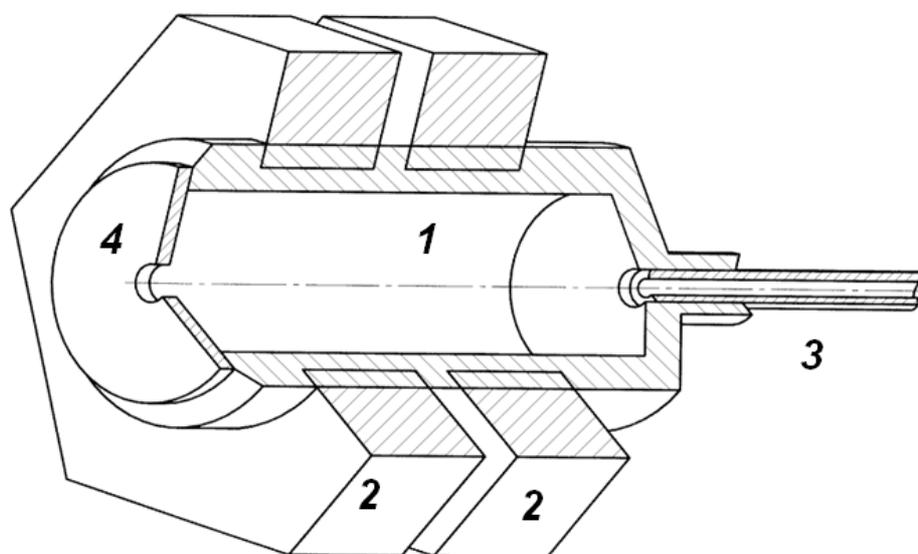


Рис. 25. Конструкция макета МСУ. 1 – корпус, 2 – гайка, 3 – капилляр, 4 – заглушка.

4.2. Порядок сборки макета МСУ

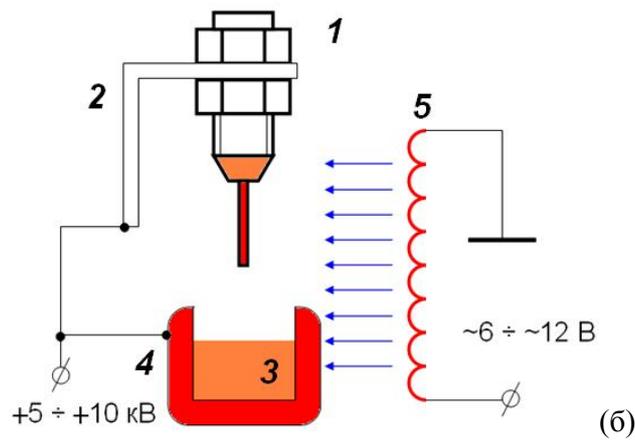
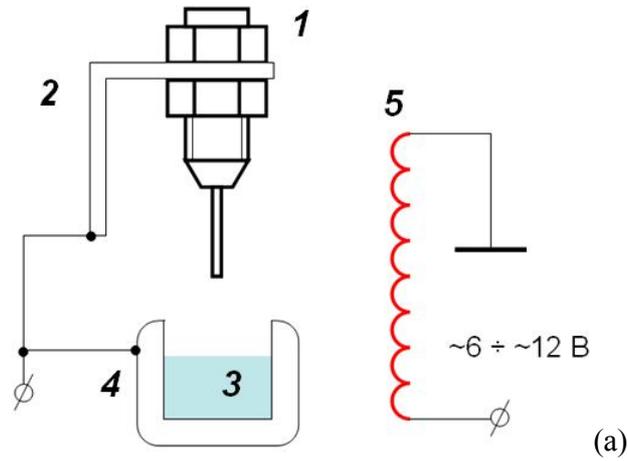
- 4.2.1. Изготовленные детали подвергаются очистке в ультразвуковой ванне с использованием петролейного эфира, затем изопропилового спирта, и просушиваются.
- 4.2.2. Капилляр *3* приваривается герметично к корпусу *1* с использованием лазерной или электроннолучевой сварки.
- 4.2.3. Заглушка *4* приваривается к корпусу *1* с использованием контактной сварки. В заглушке *4* предусмотрено технологическое отверстие, связанное с необходимостью многократных циклов вакуумирования и развакуумирования при использовании макета МСУ. В опытном образце МСУ и в промышленных МСУ данное отверстие не предусматривается, а заглушка *4* приваривается к корпусу *1* герметично.
- 4.2.4. Корпус *1* в сборе с капилляром *3* и заглушкой *4* крепится гайками *2* к кронштейну фланца вакуумной камеры для заполнения жидким металлом. Гайки *2* используются для крепления макета МСУ при его последующем использовании.
- 4.3. Приготовление галлий–индиевой эвтектики
- 4.3.1. 2 г галлия кладётся в чашку Петри, на галлий кладётся 0.5 г. индия и оставляется и выдерживается в течение несколько часов.
- 4.3.2. Спустя промежуток времени по пункту 4.3.1. эвтектика помещается в медицинский шприц путём её втягивания в него. Оставшийся нерастворённый индий может быть использован в последующем для приготовления новых порций эвтектики.
- 4.4. Заполнение макета МСУ эвтектикой, приготовленной по пункту 4.3. Порядок действий по заполнению представлен на рис. 4.2.
- 4.4.1. Макет МСУ в сборе *1* устанавливается на кронштейне *2* (рис. 26,а) внутри вакуумной камеры в фиксированном положении с использованием

керамического изолятора, способного длительно выдерживать постоянное высокое напряжение не ниже 10 кВ. Ниже макета МСУ 1 на подвижном фланце с электрическим вводом, способным длительно выдерживать постоянное высокое напряжение не ниже 10 кВ, располагается молибденовый тигель 4, заполненный галлий–индиевой эвтектикой 3. Промежуток между макетом МСУ 1 и тиглем 4 устанавливается равным порядка 1 мм. Макет МСУ 1 и тигель 4 соединяются электрически. Сбоку от макета МСУ 1 на расстоянии 5÷7 мм устанавливается спираль накаливания 5, являющая термокатодом, соединённая одним концом с вакуумной камерой, а другим с изолированным электрическим вводом.

4.4.2. Через термокатод 5 пропускается переменный или постоянный электрический ток, нагревающий его до температуры порядка 2200°С, достаточной для интенсивной термоэмиссии. Затем на макет МСУ 1 подаётся высокое постоянное напряжение положительной полярности, плавно повышающееся от 0 до значения, при котором и макет МСУ 1, и тигель 4 нагреваются до температуры 800±50°С (рис. 26,б). Температура контролируется дистанционно пирометром. Режимы работы термокатада и требуемое постоянное напряжение может быть предварительно оценено с использованием методик, приводимых в справочном издании [3].

4.4.3. Макет МСУ 1 и тигель 4 выдерживаются в нагретом состоянии по пункту 4.4.2 в течение 5 минут, затем тигель 4 поднимается так, чтобы капилляр погрузился в эвтектику 3 на глубину несколько миллиметров (рис. 26,в). Благодаря очистке внутренних поверхностей макета МСУ 1 эвтектика 3 поднимается по капилляру и залуживает внутреннюю поверхность корпуса макета МСУ 1. Затем высокое напряжение и питание термокатада 5 снимаются, и тигель 4 опускается вниз.

4.4.4. После остывания до комнатной температуры камера открывается, и макет МСУ *1* извлекается. Внутренняя полость корпуса макета МСУ *1* дозаполняется эвтектикой через технологическое отверстие в крышке.



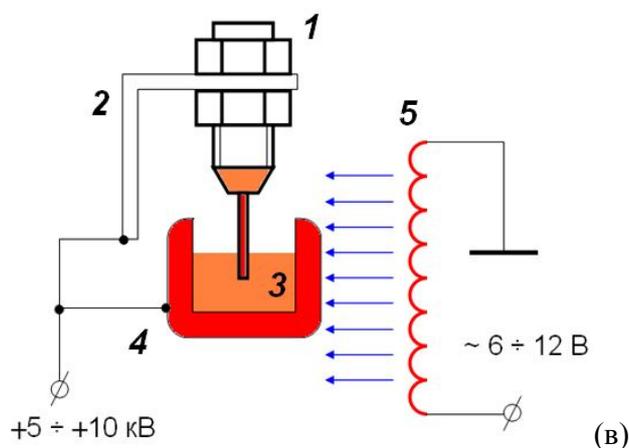


Рис. 25. Последовательность действий при заполнении макета МСУ эвтектикой. 1 – макет МСУ в сборе, 2 – кронштейн, 3 – эвтектика, 4 – молибденовый тигель, 5 – термокатод.

2.4.1.5. Методика испытания макета МСУ

5.1. Общие требования.

Испытания проводятся в условия высокого безмасляного вакуума при давлении остаточной атмосферы не выше $5 \cdot 10^{-5}$ Па.

5.2. Рекомендуемая оптическая схема для длительного использования макета МСУ.

При лазерной абляции образуется плазменный факел, бóльшая часть которого имеет направленную скорость. Однако малая доля плазмы распространяется изотропно в направлении, близком к тангенциальному к плоскости среза капилляра. Эта редкая плазма в процессе эксплуатации МСУ может создать напыление на поверхности линз, используемых для фокусировки лазерного излучения. Проблемы можно избежать путём использования зеркальной оптики, как это показано на рис. 27.

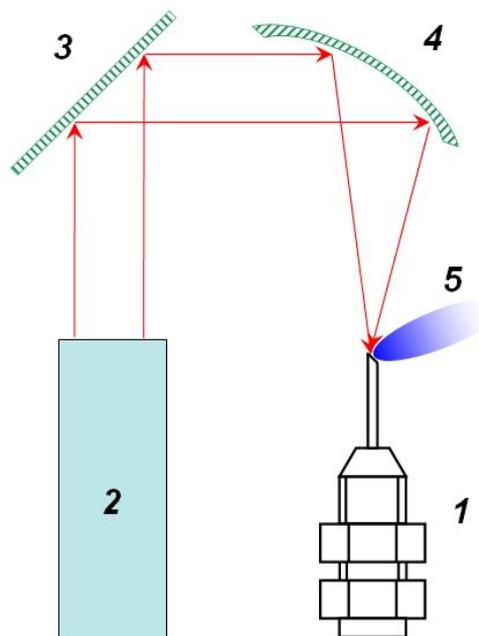


Рис. 27. Рекомендуемая оптическая схема. 1 – макет МСУ, 2 – лазер, 3 – плоское зеркало, 4 – вогнутое зеркало, 5 – абляционный плазменный факел.

5.3. Методика ресурсных испытаний.

5.3.1. Поскольку ресурсные испытания подразумевают длительное использование МСУ, использование фокусирующей линзы нецелесообразно из-за возможности запыления её поверхности, обращённой к макету МСУ. При расположении линзы за пределами вакуумной камеры запылению будет подвергаться окно вакуумной камеры. В связи с этим ресурсные испытания рекомендуется проводить с использованием зеркальной оптической схемы согласно пункту 4.2.

5.3.2. Ресурс рабочего тела МСУ, измеренный в ходе выполнения НИР, составляет величину порядка 10^9 имп./г при энергии лазерного излучения в импульсе равной 250 мкДж. В капилляре находится относительно небольшое количество рабочего тела (эвтектики), и его ресурс не превосходит $5 \cdot 10^6$ импульсов. Таким образом, минимальная длительность ресурсных

испытаний должна составлять $5 \cdot 10^6$ импульсов, поскольку основной целью испытаний является проверка беспрепятственного натекания жидкого металла в зону абляции.

5.3.3. Основным критерием работоспособности макета МСУ при ресурсных испытаниях является стабильность импульса ионного тока насыщения на удалённый коллектор. Схема измерений приведена на рис. 28. Сравнивается осциллограмма импульса ионного тока после 10^3 импульсов и после 10^6 импульсов. Отличие в осциллограммах не должно превышать диапазона отклонений осциллограмм от импульса к импульсу. Измерения проводятся с использованием аппаратного усреднения осциллограмм импульса ионного тока цифровым осциллографом.

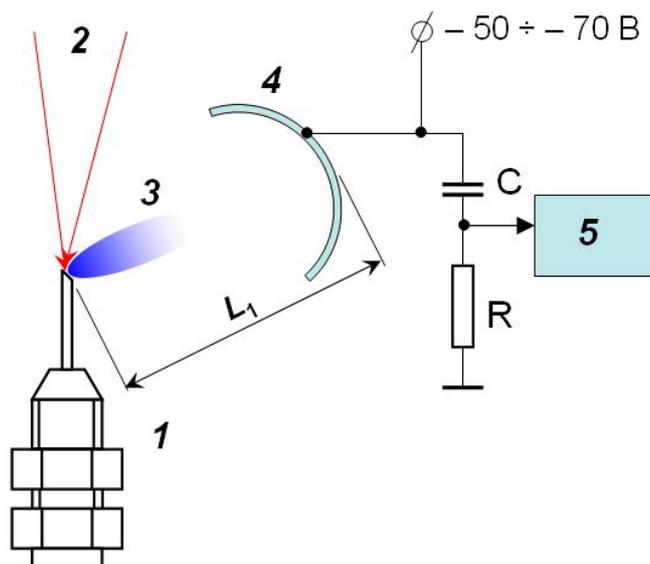


Рис. 28. Схема коллекторных измерений ионного тока насыщения плазменного факела. 1 – макет МСУ, 2 – лазерный луч, 3 – плазменный факел, 4 – коллектор, 5 – осциллограф, $C = 10 \text{ мкФ}$, $R = 1 \text{ кОм}$.

5.3.4. Во время ресурсных испытаний осуществляется измерение и контроль стабильности скорости истечения плазмы в факеле. Скорость истечения v определяется по формуле

$$v = \frac{L_1}{\tau}, \quad (5.1)$$

где L_1 – расстояние между срезом капилляра и коллектором, τ – время запаздывания максимума ионного тока относительно импульса лазерного излучения.

5.3.5. На основании ресурсных испытаний может быть измерен унос рабочего тела за импульс путём взвешивания макета МСУ до и после испытаний и деления разницы в массе на число импульсов.

2.4.1.6. Отчётность

6.1. Изготовление макета МСУ подтверждается актом о выполненных работах.

6.2. Результаты испытания макета МСУ подтверждаются актом о проведении испытаний.

6.3. Экспериментальные данные, полученные при испытаниях по пункту 5 настоящей методике, хранятся в ИСЭ СО РАН на бумажных электронных носителях и предоставляются по требованию Заказчика в виде бумажных и электронных копий.

2.4.2. Подключение импульсного неодимового лазера к экспериментальному стенду и проверка системы фокусировки лазерного луча на мишень

В ходе выполнения работ использовались два источника лазерного излучения. В основной части экспериментов использовался импульсный

твердотельный лазер с полупроводниковой накачкой RL-1,0Q, поставленный Заказчиком. Его основные параметры представлены в Таблице 3.

Таблица 3. Основные параметры лазера RL-1,0Q.

Наименование параметра	Норма	Данные испытаний
Длина волны лазерного излучения, нм	1064	-
Режим работы	Импульсный,	Соответствует
Частота следования импульсов накачки, Гц	Не более 500	10 - 500
Энергия импульса лазерного излучения (каждого в пачке), мкДж, не менее	250	280

На Рис. 30 приведена осциллограмма импульса излучения данного лазера. Длительность импульса излучения лазера RL-1,0Q по основанию составила около $t = 5,5$ нс при длительности на полувывсоте примерно $t_{1/2} = 2,75$ нс. В экспериментах лазер работал с частотой следования импульсов от 2 до 200 Гц при энергии излучения в отдельном импульсе $Q = 0,28$ мДж. Лазерное излучение фокусировалось на мишень кварцевой линзой с фокусным расстоянием $f = 5$ см. При этом параметры излучения на поверхности мишени были следующие. Фокальное пятно в фокусе линзы имело диаметр $d = 0,1$ мм. Отсюда легко рассчитать полную расходимость лазерного излучения $\alpha = d/f = 0,01/5 = 2 \times 10^{-3}$ Рад. Удельная энергия составила $Q_{уд} = Q/S = 2,8 \times 10^{-4} / 7,8 \times 10^{-5} = 3,6$ Дж/см², где $S = \pi d^2/4 = 3,14 \times 0,01/4 = 7,8 \times 10^{-5}$ см² площадь фокального

пятна. Пиковая мощность излучения на поверхности мишени для $t_{1/2} = 2,5$ нс $P_{пик} = 3,6/2,5 \times 10^{-9} = 1,45$ ГВт/см². Следует отметить, расходимость излучения поставленного Заказчиком лазера достаточно велика, и даже при использовании линзы с минимальным фокусным расстоянием диаметр не удавалось получить диаметр фокального пятна менее 0,1 мм. При этом при увеличении фокусного расстояния линзы до $f \geq 10$ см порог плазмообразования на поверхности мишени не достигался.

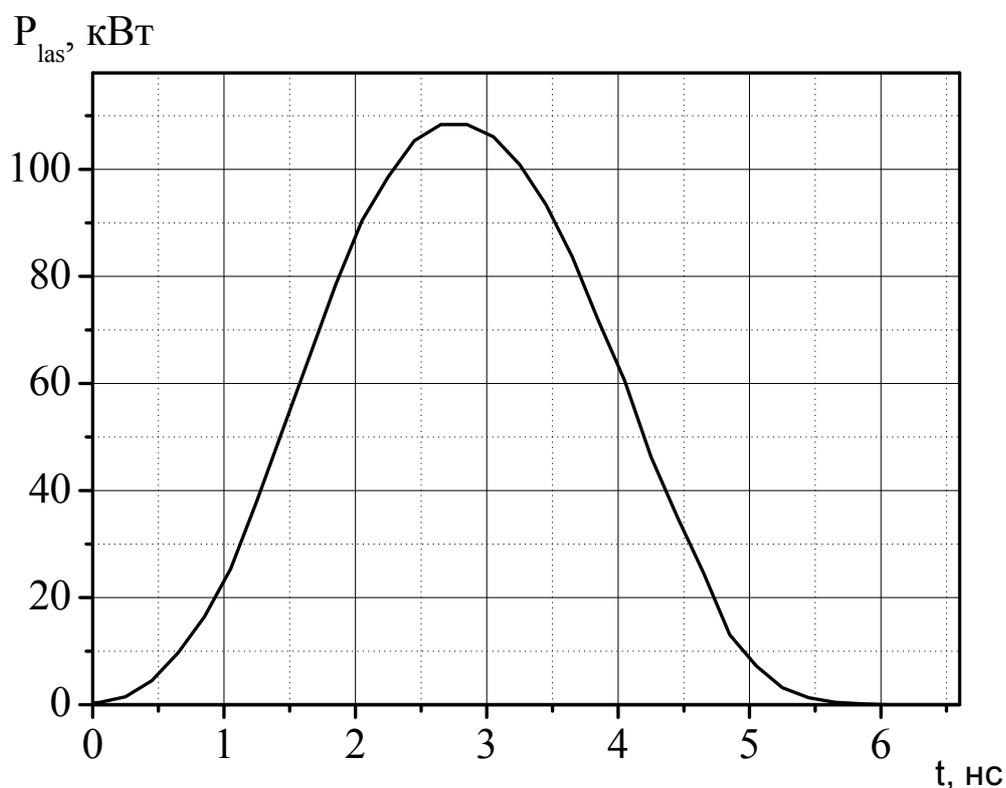


Рис. 30. Форма импульса излучения Nd - лазера RL-1,0Q.

2.5. Разработка методики измерения механического импульса отдачи при абляции мишени на основе жидких металлов с различной геометрией

2.5.1. Общие положения

1.7. Данная методика предназначена для измерения механического импульса отдачи в мишень при воздействии импульсного лазера в режиме абляции в вакууме.

1.8. К работе с оборудованием допускается персонал, имеющий высшее физико-математическое или техническое образование, не ниже III группы допуска по электробезопасности, изучивший полное описание на прибор и прошедший вводный практический курс в Лаборатории вакуумной электроники ИСЭ СО РАН.

При проведении измерений по данной Методике должны быть выполнены условия, предусмотренные техническим описанием на прибор, ГОСТ Р 8.563-96 ГСИ «Методики выполнения измерений» и ГОСТ 8.207-76 ГСИ «Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений».

2.5.2. Порядок проведения измерений

2.5.2.1. При выполнении исследований используются два метода определения передаваемого мишени импульса.

2.5.2.2. **Первый метод.** Проводятся прямые измерения импульса при помощи баллистического маятника. Методику и схему измерений иллюстрируют рис. 31 и 32 [09-1]. Мишень с массой m висит на тонкой нити длиной l , размер мишени много меньше длины нити, а вес мишени более чем на порядок превосходит вес нити. В данных условиях можно в расчетах передаваемого импульса пренебречь весом нити и размером мишени.

2.5.2.3. После воздействия лазерного излучения за счет давления плазмы эрозионного факела мишень приобретает импульс $P = mV$, отклоняется на угол α и перемещается в горизонтальном направлении на расстояние S . При этом $V = \sqrt{2gh}$.

Легко видеть, что

$$S = l \sin \alpha = \sqrt{l^2 - (l-h)^2} \quad \text{или} \quad h = l - \sqrt{(l^2 - S^2)}$$

откуда

$$V = \sqrt{2g(l - \sqrt{(l^2 - S^2)})}. \quad (14)$$

При малых смещениях h :

$$S \approx \sqrt{2lh} \quad \text{и} \quad P = mV = mS\sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (15)$$

Таким образом, измеряя отклонение мишени S легко рассчитать скорость мишени после лазерного воздействия и переданный импульс.

2.5.2.4. Схема измерений импульса, передаваемого жидкофазной мишени, приведена на Рис. 32. Мишень изготавливается из медной фольги толщиной 40 мкм и размером $5 \times 5 \text{ мм}^2$ с нанесенным на одной стороне жидким сплавом индия и галлия и подвешивается на нихромовой нити диаметром 10 мкм. Маятник помещается в трубе, из которой откачивается воздух до давления 10^{-2} Торр. В экспериментах используется два маятника с весом 8,860 мг и длиной 43,5 (№1) или 6,785 мг см и 44,3 см (№2). Нить маятника весит 0,3 мг, что не превышает 4% веса мишени. Вес нити в расчетах импульса не учитывается ввиду её малости. При проведении измерений определяется максимальное отклонение мишени после воздействия на нее лазерного импульса путем покадровой съемки процесса с помощью камеры HSFC-Pro.

2.5.2.5. Точность измерения импульса определяется в основном погрешностью измерения отклонения маятника. Пространственное разрешение объектива камеры позволяет измерять положение маятника с точностью $\Delta S = \pm 0,0145 \text{ мм}$. При определении импульса необходимо провести два измерения положения

маятника. Соответственно, точность измерения импульса составляла не хуже $\Delta P = \pm m(2\Delta S)(g/l)^{1/2} = 1,2 \times 10^{-9} \text{ Н} \times \text{с}$.

2.5.2.6. Второй метод. Передаваемый мишени импульс также рассчитывается по измеренным в ходе экспериментов выносу массы материала мишени m_g и средней скорости частиц плазмы эрозионного факела V_{cp} как

$$P_{расч} = m_g V_{cp}. \quad (16)$$

2.5.2.7. Использование второго метода является рекомендованным в случае большого расброса в измерениях при реализации первого метода.

2.5.3. Отчётность

Экспериментальные данные, полученные при испытаниях по пункту 5 настоящей методике, хранятся в ИСЭ СО РАН на бумажных электронных носителях и предоставляются по требованию Заказчика в виде бумажных и электронных копий.

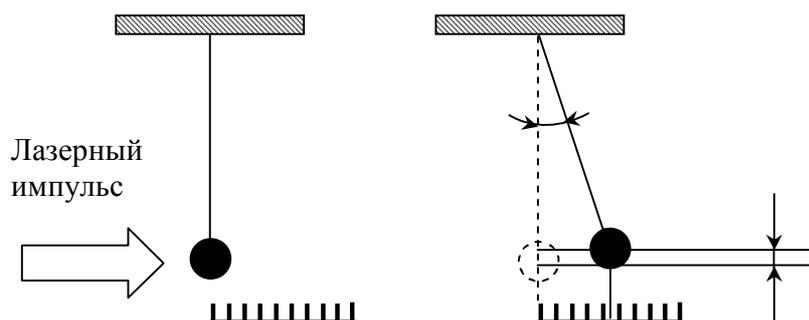


Рис. 31. Измерение импульса, передаваемого мишени при воздействии лазерным импульсом методом баллистического маятника; l , m – длина и вес маятника; α , S – угол отклонения и горизонтальное смещение маятника; h – высота подъема маятника.

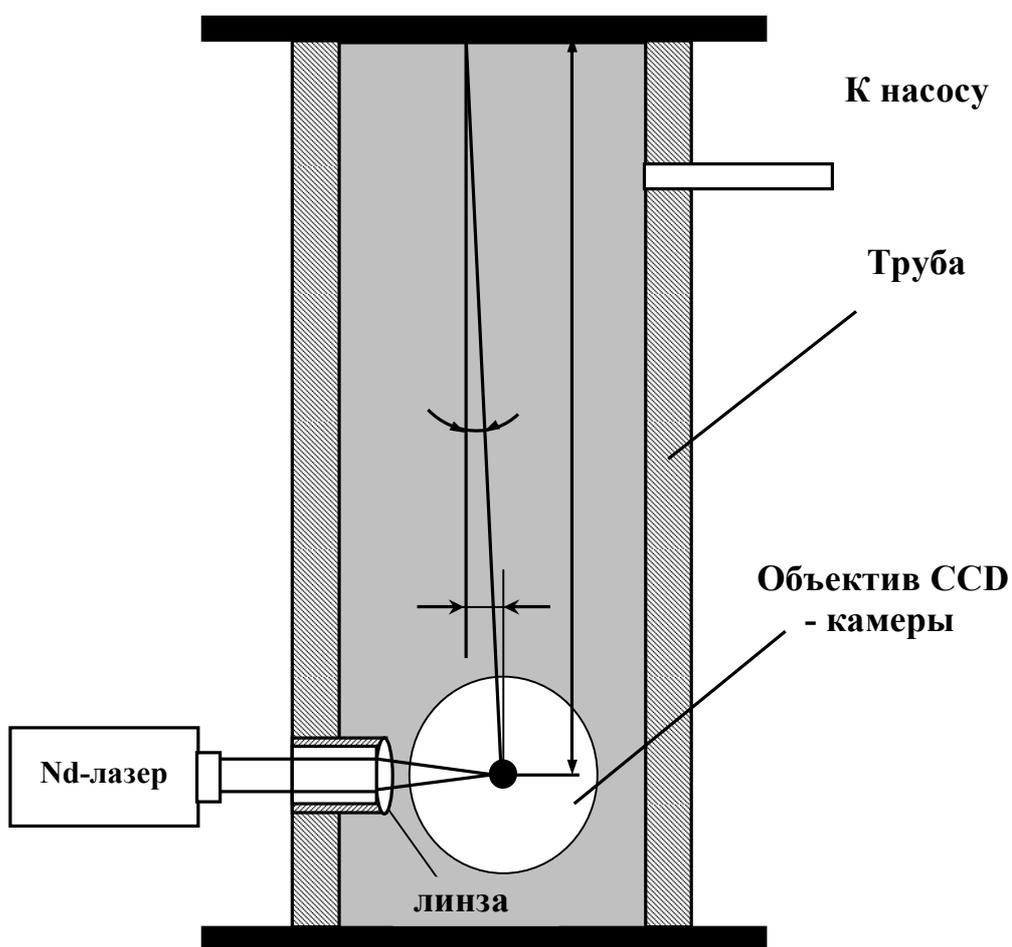


Рис. 32. Схема измерения импульса, передаваемого жидкофазной мишени при лазерной абляции. L - длина маятника, S - горизонтальное отклонение маятника, α - угол отклонения.

2.6. Подготовка статьи для опубликования в журнале из списка рекомендованных ВАК со ссылкой на проведение НИР в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы

2.6.1. Рукопись статьи по регистрации анодного факела в журнал «IEEE Transactions on Plasma Science»

Ionization-recombination Front in High-current Vacuum Arc

A. Schneider, S. Popov, G. Sandolache, A. Batrakov, S. Rowe

Manuscript received ** November 2010; revised ** ***** 2011.

A. Schneider, S. Popov, and A. Batrakov are with the Institute of High-Current Electronics SB RAS, Akademicheskoy Avenue 2/3, Tomsk 634055, Russia. Their participation in the work was supported in part by the RF Government Contract No. 14.740.11.0317.

G. Sandolache and S. Rowe are with Schneider Electric Centre de Recherche, 38 TEC, 38050 Grenoble Cedex 09, France.

Publisher Identifier S XXXX-XXXXXXX-X

***Abstract* - Stable plumes with a distinct and bright shell were observed at the anode of the high-current vacuum arc burning during 10 ms at current of up to 15 kA in peak. Spectrum-resolved imaging reveals the shell to be emitted mostly by neutral atoms. A shell is surrounded by a diffuse halo emitted by ions. The shell nature can be interpreted in terms of formation of the ionization-recombination front in the place of impact of cathode and anode plasmas.**

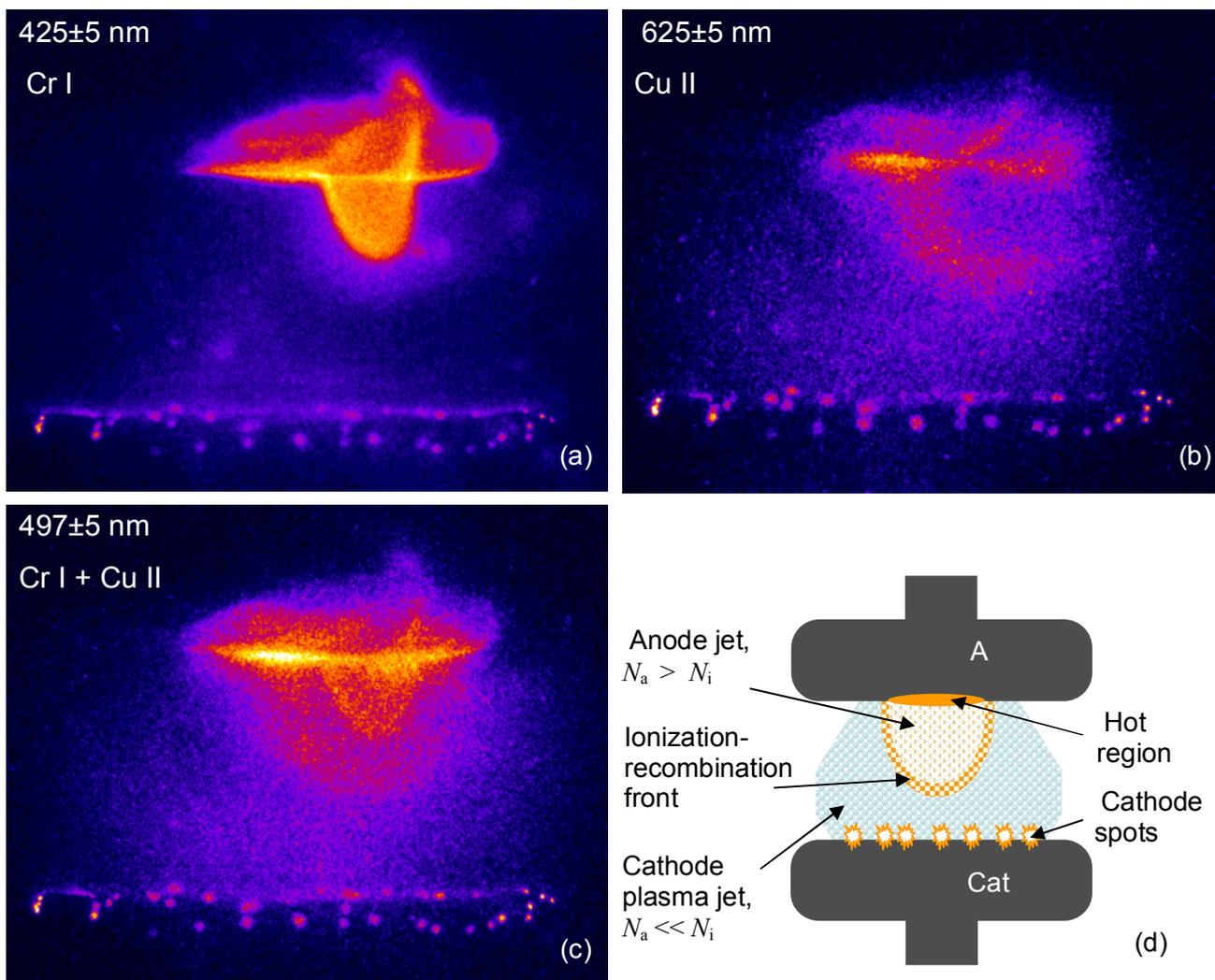


Рис. 33. Fig. 1. Spectrum-resolved images (a–c) of the same plasma shell, all at 0.5 ms before current zero (CZ), and (d) the model interpretation of the shell appearance.

The cathodic arc is a fundamental vacuum arc discharge mode, in which cathode spots supply sufficient plasma to maintain high conductivity in the vacuum gap. With increase in current, the cathode plasma heats increasingly the anode up to sufficient temperatures for surface evaporation and plasma formation. The anode becomes active in the footpoint arc mode followed by the anode spot mode [p1]. This distinction between arc modes has no precise margins, and additional arc modes are encountered when the arc is ignited by opening contacts under current, which occurs in vacuum circuit breakers [p2]. Under these circumstances, the question arises of how to categorize any new observation in terms of the currently defined modes. This concerns the recent observations of anode plumes [p3, p4] appearing at the anode of 10-ms high-current vacuum arcs.

Experiments were conducted in a baked-out vacuum chamber where the residual pressure below 10^{-7} mbar was maintained by an ion pump. An arc gap was formed by two identical electrodes of 2 cm in diameter. Electrodes were encompassed with an electrically floating shield. Electrodes were made of copper-chromium contact material that is used in vacuum circuit breakers. An arc discharge was initiated by opening the gap while current flows between the electrodes. The electrode separation speed was about 1 m/s. No external magnetic field was applied. A 4-channel, 12-bit, ICCD HSFC Pro camera by PCO AG was used to record a sequence of images in a single arc. The camera was equipped with a PC Micro-NIKKOR lens. A set of interference filters in the range of 350 nm to 1100 nm was used to select a spectral portion of about 10 nm in FWHM. Imaging was accompanied by recording of the voltage and current waveforms with Tektronix TDS 2000 series oscilloscopes [3]. The ICCD camera produced monitor pulses allowing synchronization of images with the voltage and current traces.

Images of the arc in gaps between copper-chromium electrodes often contained a plume (a couple of plumes sometimes) having a distinct and bright shell [p3, p4]. The plume size tended to grow as the arc current decreased. Accordingly the plume was most clearly observed in the last millisecond before

current zero [p3]. Possibly the plume dimensions are controlled by the balance between the cathode plasma jet becoming rarer with decrease in current and the anode jet whose high density is maintained due to the anode heat capacity. Plume dimensions are sensitive also to the gap voltage so as the plume tended to shrink with increasing voltage.

Crucial data casting light on the plume nature were obtained by spectrum-resolved imaging. Three different filters were chosen to select radiation of the Cr I and Cu II lines separately, and simultaneously. These lines were chosen for because of the availability of interference filters, and because these lines are present in the light coming from the arc gap. The images in Fig. 1,a–c, together with an inverse Abel transform of their intensity profiles [p3], suggest that the plume is comprised of three regions: an inner core, an intermediary shell, and an outer diffuse halo. The inner core is relatively dark. Most of light coming from the plume shell is radiated by neutrals, while the halo radiation is mostly from ions.

The facts could be tentatively explained in terms of a shock front [p5] formed in the discharge gap as a result of collision of the highly ionized cathode plasma jet with a velocity of 10^6 cm/s and the anode jet expanding with thermal velocity. Unlike assumptions of the paper [p5], we have to consider the anode jet to be ionized to a noticeably lesser degree than the surrounding plasma [p6, p7] Furthermore, the plume core plasma is expected to have a relatively low electron temperature due to collisions with vapor and hence lower excitation rate than the shell region. The result of the collision of the jets is in strong deceleration of the cathode jet down to its complete stoppage [p5]. As a result of deceleration, cathode and anode species exchange their charges intensively, which produces an almost static shell of excited neutrals and a flow of slow ions moving toward the cathode. The latter produces a halo. From this viewpoint, a plume can be considered as an ionization-recombination front. The plume structure is illustrated in Fig. 1,d. The plume shell thickness, L , is about 1 mm. Most likely, $L \approx \sigma^{-1}N_a^{-1}$ where σ is the resonant charge exchange cross-section (about 10^{-14} cm² [p8]) and N_a the vapour

density. The latter could be estimated to be about 10^{15} cm^{-3} corresponding to a pressure of about 10 Pa at the plume boundary.

2.6.2. Рукопись статьи по анализу анодного факела в «Журнал технической физики»

Анодный факел сильноточной вакуумной дуги

С.А. Попов¹, А.В. Шнайдер¹, А.В. Батраков¹, G. Sandolache², S.W. Rowe²,
А.Б. Марков¹, Л.А. Зюлькова¹

¹ Институт сильноточной электроники Сибирского отделения
Российской академии наук, пр. Академический, 2/3, Томск, 634055, Россия

² Schneider Electric Centre de Recherche, 38 TEC, 38050 Grenoble Cedex
09, France

E-mail: schneider@lve.hcei.tsc.ru

На аноде сильноточной вакуумной дуги длительностью 10 ms и амплитудным значением тока 15 kA зарегистрирован стабильный и яркий факел с отчётливо различимой яркой оболочкой. Факел примыкает к горячему пятну расплавленного металла на поверхности анода. Основной свет факела излучается нейтральными атомами. Оболочка факела окружена областью диффузного свечения, излучаемого ионами. Появление анодного факела является результатом взаимодействия катодного и ионного потока, в результате чего размеры факела имеют обратную зависимость от тока дуги, поэтому факел достаточно велик для наблюдения только в конце импульса тока. Анодный факел с яркой оболочкой является хорошо воспроизводимым объектом при горении дуги на медно-хромовых электродах. В случае медных электродов появление таких объектов носит случайный характер и привязано к длинным выступам жидкого металла с затруднённым теплоотводом и к крупным каплям, летящим в промежутке. Данный факт свидетельствует о том, что интенсивность испарения материала анода носит ключевой характер в появлении данных факелов с яркой оболочкой. Кроме того, интенсивность

испарения материала массивного и гладкого медно-хромового катода оказывается столь же велика, что и интенсивность испарения теплоизолированных выступов жидкой меди и медных капель в дуге на электродах из чистой меди.

ВВЕДЕНИЕ

Роль анода в горении вакуумной дуги становится заметной и затем значительной по мере роста плотности потока энергии на анод, приводящего к его нагреву и испарению. Переход разряда из режима катодной дуги в режим дуги с активным анодом, как и процесс последующего усиления роли анода в функционировании разряда, не является резко очерченным. Тем не менее, существуют характерные черты различных мод горения вакуумной дуги, что позволяет вводить их классификацию [5, 6] как функцию тока и длины промежутка. Выделяют моду интенсивной дуги без анодного пятна, дуги с анодным пятном и промежуточная мода нестабильных анодных пятен (footpoint arc). Для описания дуги в вакуумных сетевых выключателях, зажигаемой размыканием контактов с их последующим разведением и ростом тока в область единиц и десятков кА, используется более сложная классификация мод дуг [13]. В этой связи все вновь обнаруживаемые факты в физике сильноточной вакуумной дуги сталкиваются с вопросом модовой принадлежности таких фактов. Это в полной степени относится к недавним наблюдениям анодного факела [7, 8], возникающего в области анода сильноточной дуги в вакууме, горящей в течение 10 ms. Наблюдения были выполнены с использованием скоростных средств регистрации изображений. Подобные объекты наблюдались и ранее (например, [14, 15]), но длительное время экспозиции при получении изображений всегда приводило к их размытию и невозможности идентификации яркой оболочки. Данная статья посвящена более детальному экспериментальному исследованию анодного факела и анализу его характеристик.

МЕТОДИКА И ЭКСПЕРИМЕНТА

В основе эксперимента лежит синтетическая схема *Вайл–Добке*, которая имитирует работу вакуумной дугогасительной камеры (ВДК) вакуумного сетевого выключателя в электрической цепи с симметричным током короткого замыкания (рис. 34). Данная схема генерирует 50-Hz импульс тока амплитудой до 15 кА и длительностью 10 ms. За импульсом тока следует импульс переходного восстанавливающегося напряжения (ПВН) амплитудой до 41 кV и временем нарастания напряжения, регулируемым в пределах от 20 до 100 μ s. Форма фронта импульса ПВН также регулируется. Схема содержит калиброванные датчики для измерения тока дуги, напряжения на промежутке, ПВН и плавающего потенциала экрана, окружающего контакты.

Дуговой промежуток формировался двумя идентичными электродами диаметром 2 см, изготовленными из одинакового материала. Промежуток был окружён медным экраном внутренним диаметром 9.2 см, имитирующим экран промышленных ВДК. В качестве материала электродов использовалась либо чистая медь, либо медно-хромовый композиционный материал CuCr25, содержащий 25% хрома.

Дуговой разряд зажигался размыканием контактов, котрые раздвигались с постоянной скоростью 1 m/s. Внешние магнитные поля не создавались. Эксперименты проводились в условиях высокого вакуума с давлением остаточных газов не выше 10^{-5} Pa, поддерживаемого магниторазрядным насосом.

Высокоскоростная 4-х канальная 12-ти разрядная камера HSFC Pro, укомплектованная объективом PC Micro-NIKKOR, использовалась для регистрации серии последовательных изображений в течение акта горения дуги. Для регистрации спектрально-дифференцированных изображений использовался набор интерференционных светофильтров спектральной шириной пропускания порядка 10 nm на диапазон длин волн от 350 до 1100 nm с шагом 25 nm. Наблюдения велись через оптические кварцевые

окна вакуумной камеры.

Регистрация изображений сопровождалась осциллографией тока и напряжений. Для синхронизации осциллограмм и изображений использовались синхроимпульсы камеры. Сигналы регистрировались цифровыми осциллографами серии Tektronix TDS 2000.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Вид дуги и её поведение в значительной степени зависит от материала электродов, и наши эксперименты не являются исключением. Горение дуги на медных электродах проиллюстрировано на рис. 35. Протекание тока начинается в момент времени T_S , за которым следует момент времени T_O , соответствующий размыканию контакта и зажиганию дуги. С момента зажигания дуги на промежутке устанавливается падение напряжение, соответствующее катодному падению потенциала, что свидетельствует о горении дуги в диффузной моде, несмотря на малую длину промежутка. В свою очередь, катодное падение потенциала определяет плавающий потенциал экрана. В определённый момент времени режим горения дуги трансформируется в моду с анодным пятном, что отражается на осциллограмме напряжения появлением шума большой амплитуды. Кроме того, падение на промежутке становится заметно выше катодного вплоть до момента нуля тока T_{CZ} , что является следствием интенсивного испарения материала электрода.

Цифровые изображения на рис. 35,b, соответствующие осциллограммам на рис. 35,a, переэкспонированы настолько, что большая часть светлых областей превышает максимальный уровень градации оттенков серого цвета камеры. При меньшем времени экспозиции на изображениях становятся различимыми отдельные светлые области, появление и форма которых носит нерегулярный характер.

Горение дуги на медно-хромовых электродах показано на рис. 36. В

отличие от дуги на медных электродах, в данном случае напряжение на дуговом промежутке имеет меньшую амплитуду и бóльшую частоту шума. Это свидетельствует о большем числе катодных пятен и более частой смене их позиций в случае медно-хромового катода. Часто амплитуда шума спадала по мере роста тока, что отчётливо видно на примере (рис. 36). Такое изменение в характере падения напряжения на промежутке может свидетельствовать о существовании промежуточной моды нестабильных анодных пятен перед зажиганием стабильного анодного пятна [5].

Часто на изображениях дуги на медно-хромовых электродах наблюдался анодный факел (иногда два факела), имеющий отчётливую и яркую оболочку [7, 8]. Была замечена тенденция увеличения размеров факела с уменьшением тока дуги (рис. 37). Именно поэтому с целью достижения лучшего пространственного разрешения наблюдения за поведением факела были осуществлены преимущественно в конце импульса. Такая зависимость размеров факела от тока дуги свидетельствует о том, что появление яркой оболочки факела является результатом баланса между потоком катодной плазмы, становящимся менее плотным при меньшем токе, и потоком испаряющегося вещества анода, интенсивность которого не испытывает столь сильного затухания даже к концу импульса тока вследствие теплоёмкости анода [16].

Размеры анодного факела зависят также и от падения напряжения на промежутке. Синтетическая схема, используемая в экспериментах, производит небольшое отклонение в поведении тока в момент времени T_1 , когда происходит инжекция импульса тока 500-Гц контура, производящего импульс ПВН после перехода тока дуги через ноль. В ответ на отклонение тока напряжение на промежутке также испытывает некоторый подъём, в то время как увеличение катодного падения потенциала практически не наблюдается, что свидетельствует о том, что отклик на подъём тока испытывает падение напряжения на столбе плазмы. В ответ на подъём

напряжения на промежутке анодный факел сократился в размерах (рис. 38), чего не наблюдалось при отсутствии скачка напряжения на промежутке при таком же поведении тока (рис. 37). Этот факт не противоречит концепции того, что размеры и форма оболочки анодного факела контролируется балансом между катодными и анодными потоками.

Анодный факел с отчетливой оболочкой наблюдался также при горении дуги на медных электродах. Но, в отличие от случая медно-хромовых электродов, появление анодных факелов на медных электродах носит нерегулярный характер от импульса к импульсу. Кроме того, их форма также не отличается воспроизводимостью, поскольку анодные факелы в этом случае привязаны к жидкометаллическим выступам. Более того, данные объекты в дуге на медных электродах появляются только вокруг жидкометаллических выступов (рис. 39,а) или вокруг капель (рис. 39,б), летящих в промежутке. Этот факт говорит о том, что испарение материала анода играет ключевую роль в появлении ярких оболочек в области анода сильноточной вакуумной дуги.

При регистрации спектрально-дифференцированных изображений удалось получить интересную информацию о процессах, происходящих в дуговом промежутке. Три различных интерференционных светофильтра, пропускающих свет только в узком диапазоне шириной порядка 10 nm, были выбраны на длины волн линий Cr I (рис. 40,а), Cu II (рис. 40,б) и Cr I и Cu II одновременно (рис. 40,с). Данные линии были выбраны исключительно по причине ограниченности набора светофильтров, в то время как линии Cu I и Cr II также присутствуют в дуге на медно-хромовых электродах. Изображения на рис. 40 показывают, что бóльшая часть света анодного факела излучается возбужденными нейтральными атомами. Оболочка анодного факела окружена диффузным гало, излучаемым ионами. Появление подобного гало также наблюдается на спектрально-интегрированных изображениях анодного факела (рис. 39,а).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исходя из внешнего вида изучаемого объекта, можно предположить, что источник излучения анодных факелов сильноточной вакуумной дуги сосредоточен в довольно узкой оболочке, тогда как пространство внутри оболочки остаётся тёмным. Однако это утверждение требует проверки, заключающейся в обратном преобразовании Абея [17] интенсивности изображения при условии симметричности объекта относительно его оси. Кроме того, для корректности такой обработки изучаемый объект должен быть оптически тонким. Для проверки соответствия данному требованию были выполнены наблюдения теневых изображений анодного факела с использованием подсветки излучением лазера на красителе с перестраиваемой длиной волны генерации. Лазер настраивался на резонансную длину волны поглощения света атомами паров материала электродов подобно тому, как это успешно использовалось при диагностике плазмы катодного пятна [18]. Использование многоканальной камеры позволяло одновременно наблюдать собственное свечение анодного факела. Заметного поглощения лазерного излучения замечено не было (рис. 41), что доказывает малую оптическую толщину исследуемого объекта даже на резонансных линиях поглощения.

Пример обратного преобразования Абея исходного изображения на рис. 42,а представлен на рис. 42,б. Решение обратной задачи проводилось для цилиндрической области, выделенной прямоугольником на рис. 42,а, при этом для этой области вычислялось усреднённое плоское сечение, нормальное к оси объекта. Такая мера позволяла снизить влияние шума на результат интегрирования. После этого и с той же целью исходные данные аппроксимировались функцией Лоренца. Восстановленное распределение интенсивности свечения объекта по радиусу (рис. 42,б) явно указывает на то, что интенсивность свечения оболочки факела значительно интенсивнее свечения вещества внутри оболочки.

Таким образом, мы имеем в распоряжении следующие факты: 1) пространство внутри оболочки относительно тёмное, 2) излучение из оболочки эмитируется нейтральными атомами, 3) оболочка окружена внешним (по отношению к аноду) гало, излучение из которого эмитируется ионами. Данные факты могут быть интерпретированы с использованием модельных представлений [9]. Согласно [9] в результате столкновения катодной плазмы, распространяющейся со скоростью порядка 10^6 cm/s, с анодной плазмой, распространяющейся с меньшей скоростью, возможно формирование устойчивого ударного фронта в дуговом промежутке. При этом поток катодной плазмы может замедляться практически до полной его остановки. В отличие от [9], где оба потока рассматриваются как высокоионизованная плазма, мы полагаем, что анодная плазма имеет низкую степень ионизации. В этом случае при столкновении потоков и замедлении скорости их распространения возможно формирование ионизационно-рекомбинационного фронта (ИРФ), в котором основным механизмом ионизации нейтральной компоненты анодного потока является резонансная перезарядка ионов на атомах. В результате такой перезарядки и с учётом результатов [9] действительно возможно формирование оболочки из возбуждённых атомов, окружённой ионным гало. Структура такого фронта приведена на рис. 43. На основании наблюдений и с учётом концепции ИРФ можно сделать оценки средней концентрации паров в анодном факеле. Толщина оболочки (ИРФ), L , составляет 1 mm. С другой стороны, перезарядка осуществляется на длине $L \approx \sigma^{-1} N_a^{-1}$, где σ – сечение резонансной перезарядки (порядка 10^{-14} cm² [12]) и N_a – концентрация нейтральных атомов. В этом случае $N_a \approx 10^{15}$ cm⁻³, что соответствует давлению пара порядка 10 Pa. Данная оценка является вполне резонной для условий сильноточной вакуумной дуги [5, 6].

Для достижения режима формирования ИРФ анод должен испаряться настолько интенсивно, чтобы электронного потока, эмитированного

катодными пятнами, было недостаточно для ионизации паров в непосредственной близости от поверхности анода. Именно поэтому анодный факел с оболочкой формируется только вокруг теплоизолированных выступов в случае медного анода. С другой стороны, формирование подобного факела является частым событием в случае плоского медно-хромового анода при прочих равных условиях. Это означает, что тепловой режим поверхности массивного медно-хромового анода в дуге характеризуется таким же затруднённым теплоотводом, как и в случае теплоизолированного выступа на медном аноде. Причиной такого затруднённого уноса тепла может быть существование области на диаграмме состояний системы медь-хром [13], в которой жидкая медь и жидкий хром не образуют раствора. Это приводит к существованию большого числа чередующихся границ разделов двух жидкостей, создающих препятствие для отвода тепла. Подобная ситуация возникает в вакуумной дуге с накаливаемым анодом [12], где такой режим горения дуги целенаправленно используется для формирования потоков испарённого материала с предельно низкой концентрацией капель.

Кроме вышеуказанной причины интенсификации испарения, связанной с существованием областей несмешивающихся расплавов, скорость испарения поверхности электрода сама по себе сильно зависит от термодинамических характеристик материала, из которого он сделан. В частности, это относится к меди и хрому. Для оценки толщин испаренного и расплавленного слоев, численным интегрированием одномерного уравнения теплопроводности с поверхностным тепловым источником, было проведено моделирование температурных полей для электродов, изготовленных из меди и хрома. Процесс плавления моделировался с помощью метода эффективной теплоемкости, а процесс испарения учитывался в рамках модели теплового разрушения. Тыльная сторона мишени предполагалась теплоизолированной.

Более детально процедура решения уравнения теплопроводности описана в работе [20].

Результаты моделирования температурных полей представлены на рис. 44. Следует иметь в виду, что данное моделирование носит сугубо иллюстративный характер. Для поверхности меди характерна относительно большая глубина расплава и относительно малая толщина испарённого слоя. Хром испаряется значительно интенсивнее, чем медь. В результате значительная часть энергии уходит на его испарение, и глубина расплава на поверхности хрома значительно меньше, чем на меди.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. В сильноточной вакуумной дуге зарегистрирован анодный факел, имеющий яркую оболочку. Излучение из оболочки эмитируется нейтральными атомами. Излучение вещества внутри оболочки значительно слабее, чем в оболочке. Оболочка окружена диффузным гало, свет из которого излучается преимущественно ионами.
2. Появление анодного факела с яркой оболочкой зависит от интенсивности испарения материала анода. Для появления такого факела требуется высокая интенсивность испарения.
3. В условиях сильноточной вакуумной дуги на массивных медно-хромовых электродах реализуется тепловой режим, при котором скорость испарения материала анода достаточно высока для стабильного формирования анодного факела с яркой оболочкой. В случае медных электродах подобный режим реализуется только на жидкометаллических выступах с затруднённым отводом тепла и вокруг крупных капель, летящих в промежутке.
4. Высокая скорость испарения поверхности медно-хромового анода может быть связана с существованием диапазона на диаграмме состояния

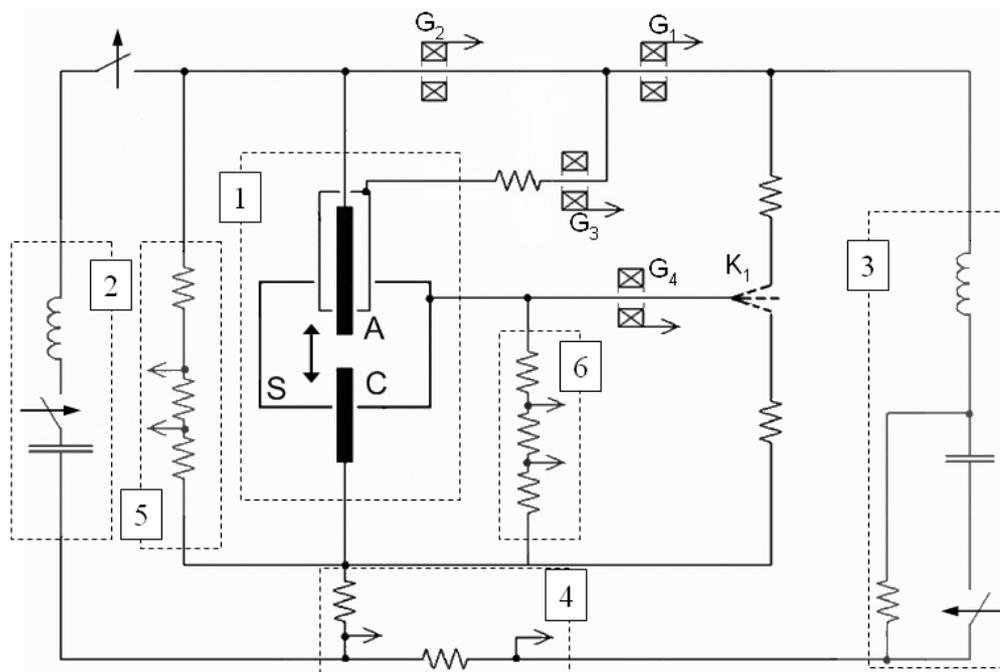
системы медь-хром, в котором жидкая медь и жидкий хром не образует раствора. Наличие множественных границ между несмешиваемыми жидкостями может быть причиной затруднённого отвода тепла.

5. В качестве механизма формирования оболочки анодного факела можно рассматривать ионизационно-рекомбинационный фронт, формируемый в результате столкновения потока высокоионизованной катодной плазмы с потоком испарённого материала анода, имеющего большую долю нейтральной компоненты.

Авторы выражают признательность профессору Д.И. Проскуровскому за интерес к работе и плодотворные дискуссии.

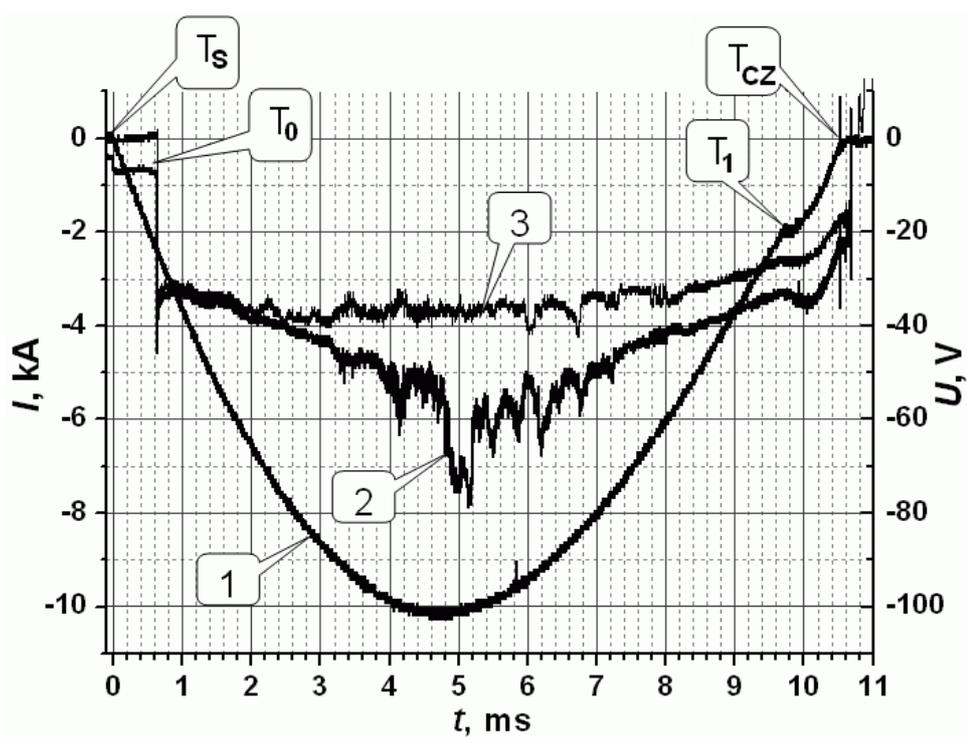
Часть работы, посвящённая оптической диагностике анодной плазмы, выполнена в рамках государственного контракта № 14.740.11.0317.

РИСУНКИ

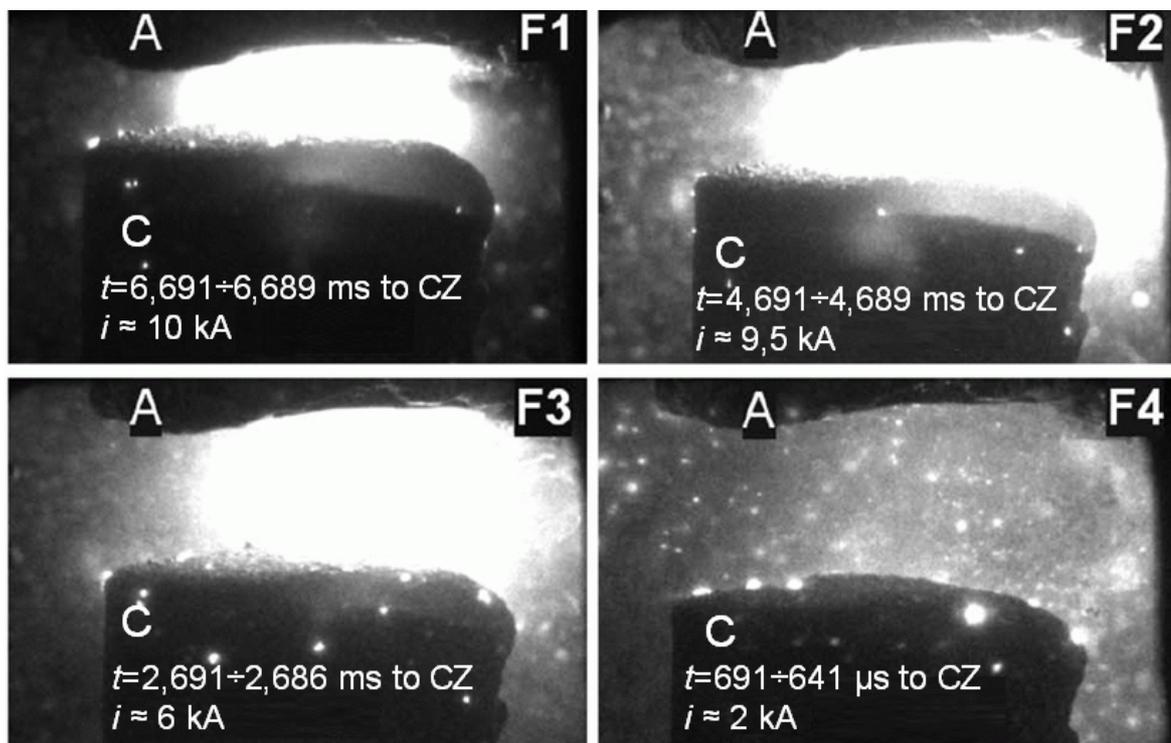


Попов, Шнайдер, Батраков, Sandolache, Rowe, Марков, Зюлькова.

Анодный факел сильноточной вакуумной дуги. **Рис. 34**



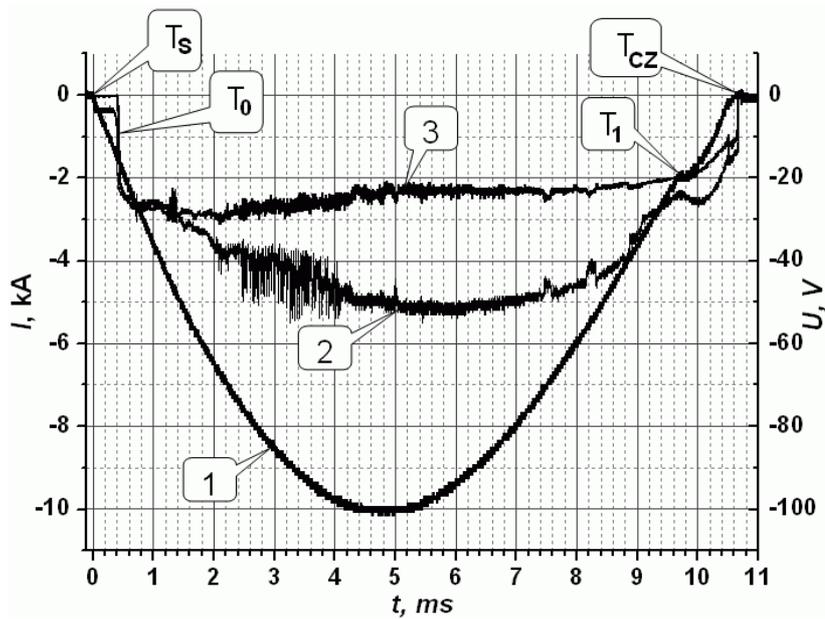
(a)



(b)

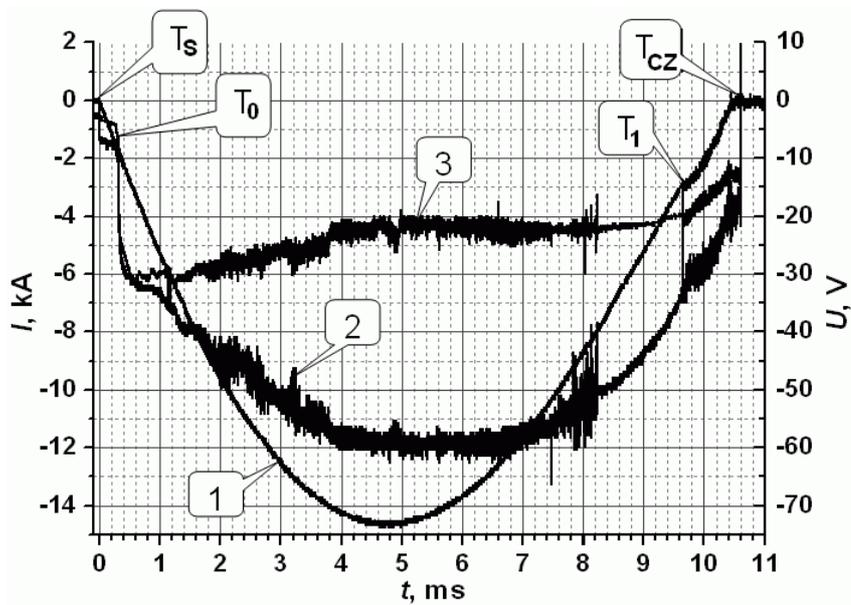
Попов, Шнайдер, Батраков, Sandolache, Rowe, Марков, Зюлькова.

Анодный факел сильноточной вакуумной дуги. **Рис. 35**

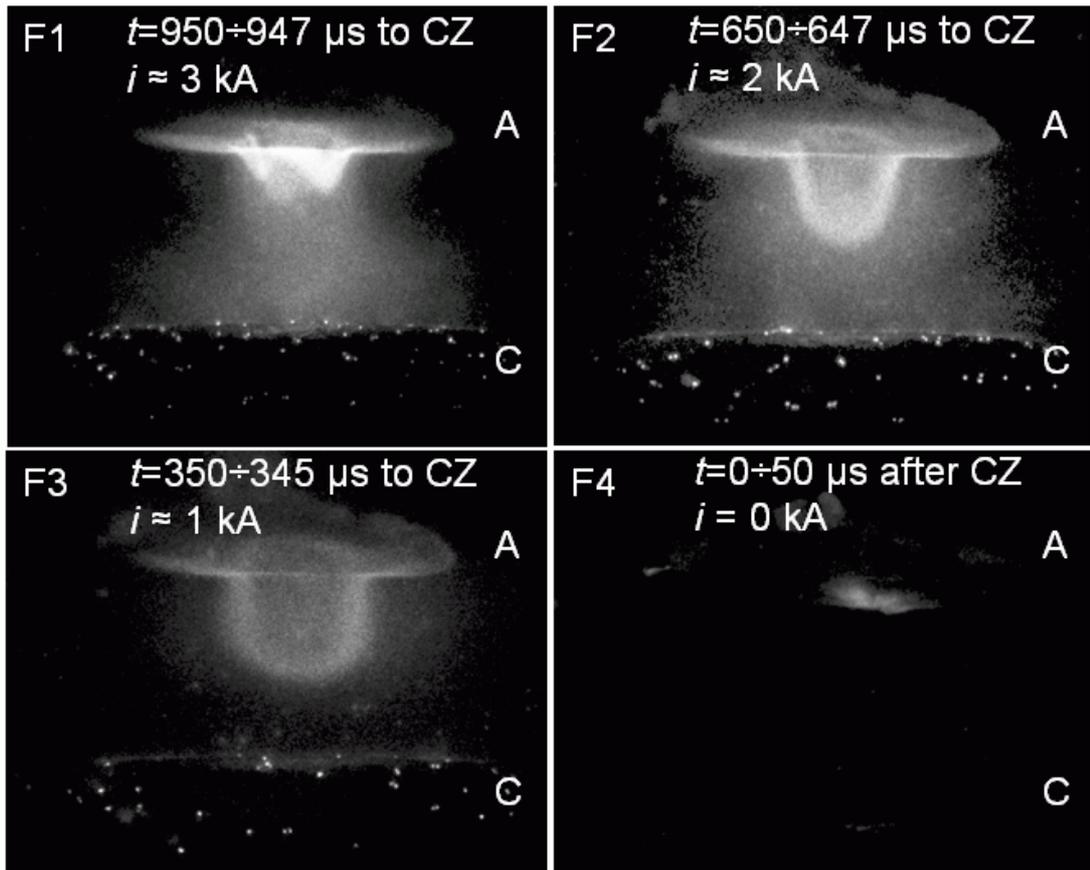


Попов, Шнайдер, Батраков, Sandolache, Rowe, Марков, Зюлькова.

Анодный факел сильноточной вакуумной дуги. **Рис. 36**



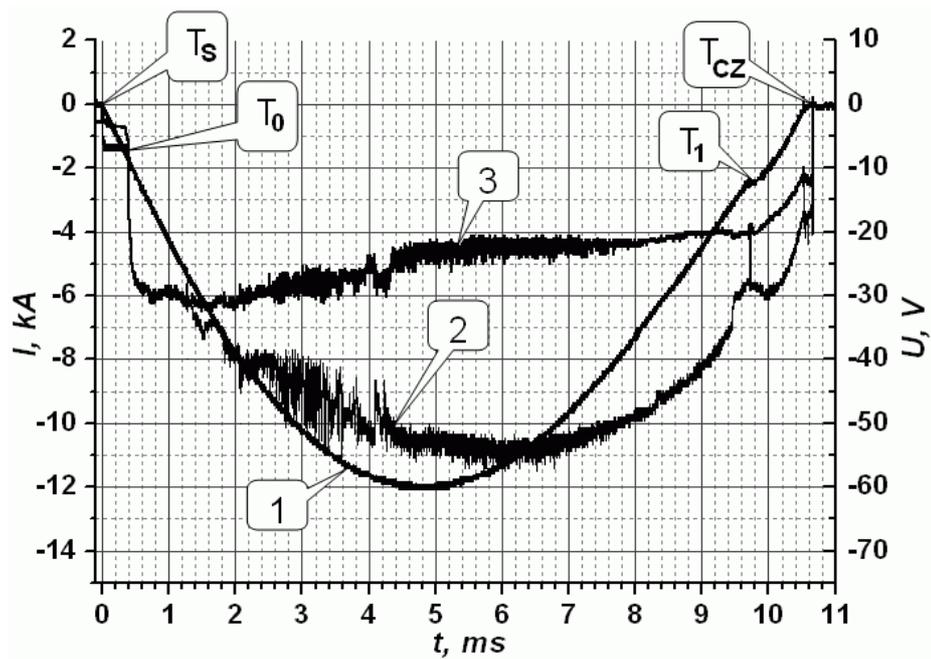
(a)



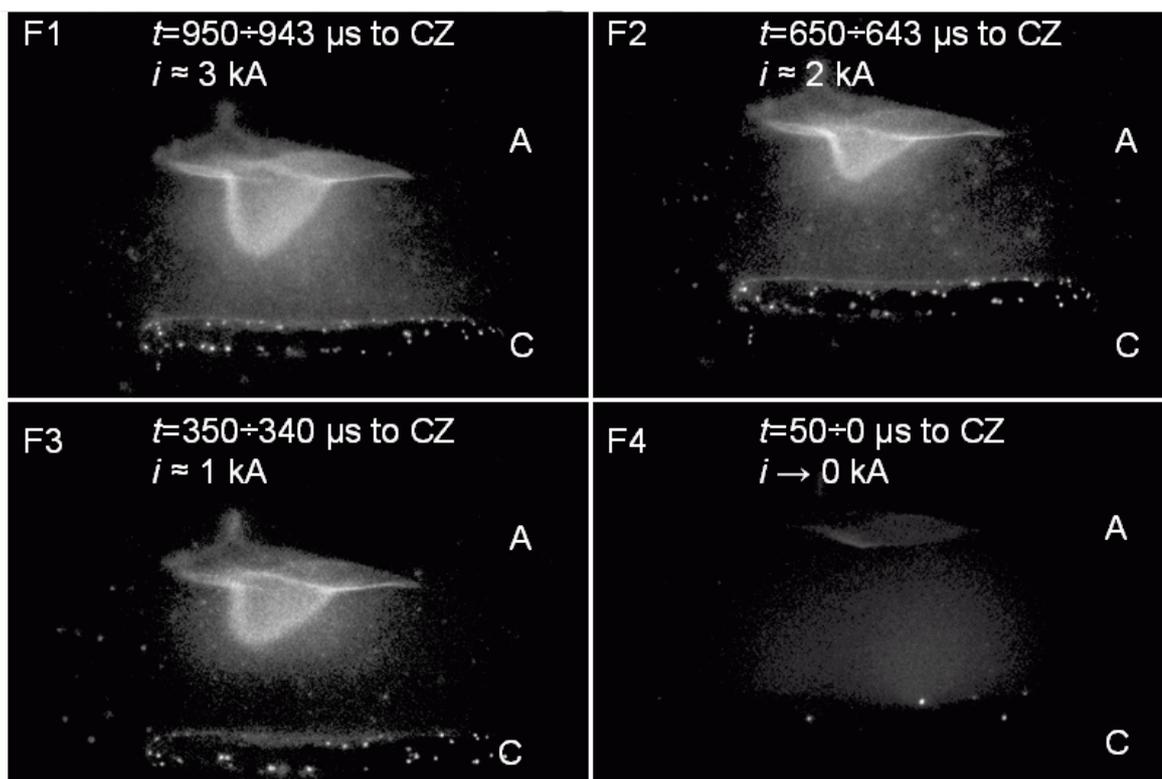
(b)

Попов, Шнайдер, Батраков, Sandolache, Rowe, Марков, Зюлькова.

Анодный факел сильноточной вакуумной дуги. **Рис. 37**



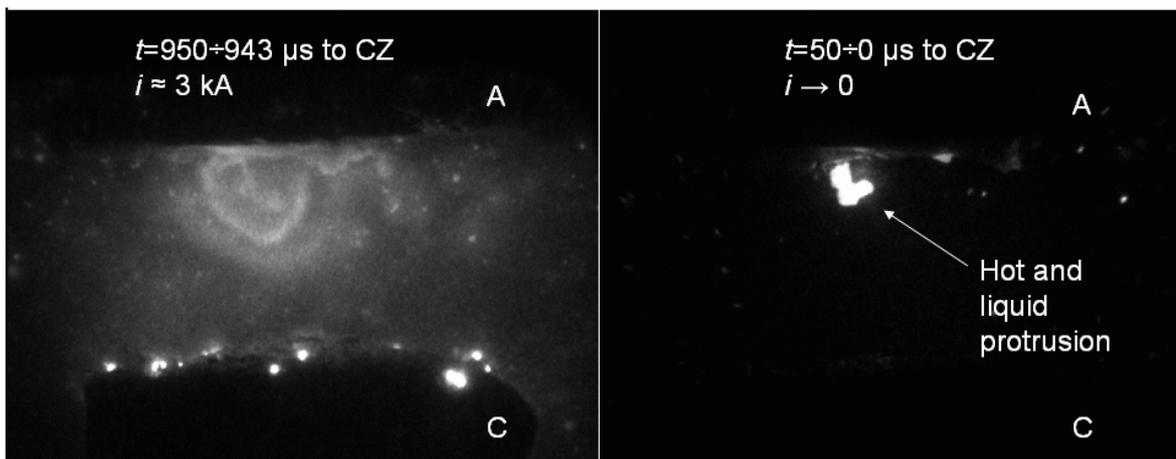
(a)



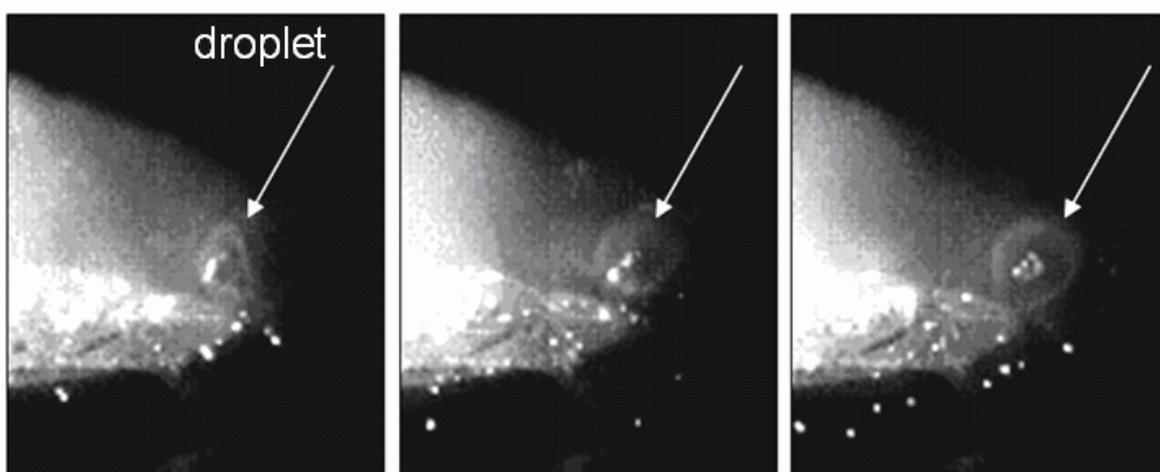
(b)

Попов, Шнайдер, Батраков, Sandolache, Rowe, Марков, Зюлькова.

Анодный факел сильноточной вакуумной дуги. **Рис. 38**



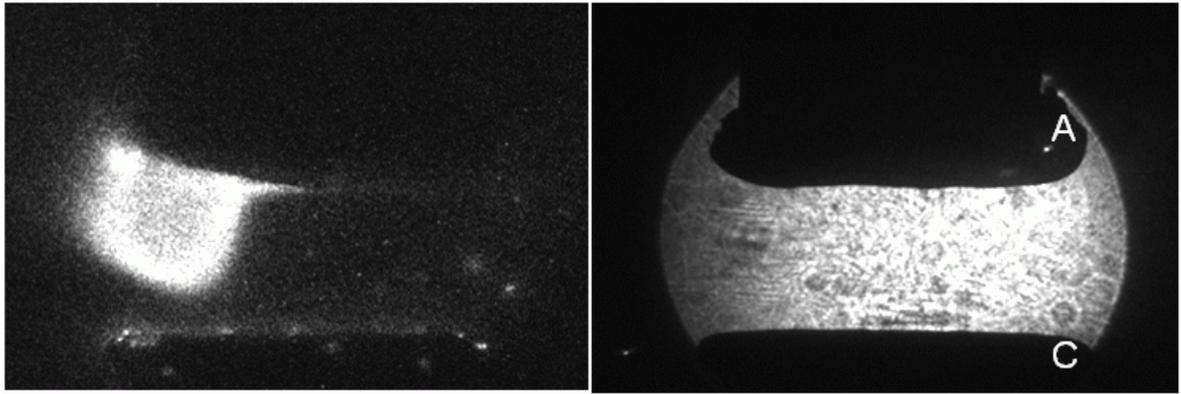
(a)



(b)

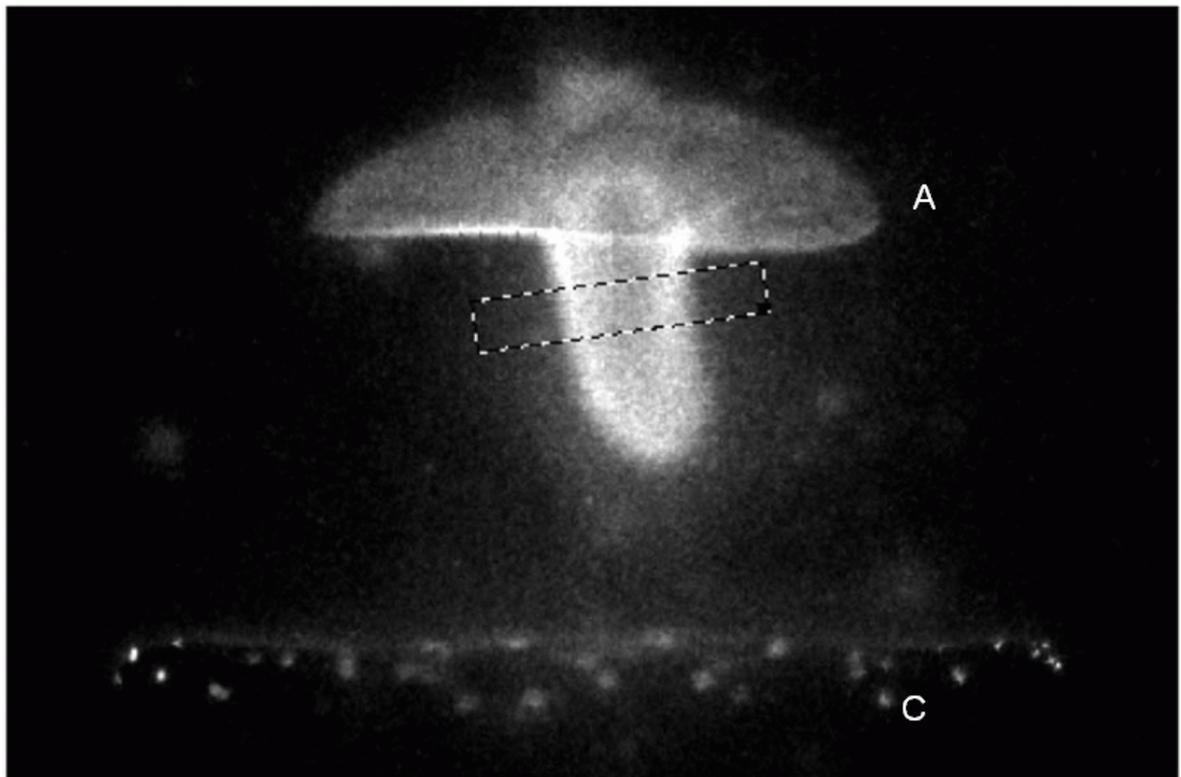
Попов, Шнайдер, Батраков, Sandolache, Rowe, Марков, Зюлькова.

Анодный факел сильноточной вакуумной дуги. **Рис. 39**

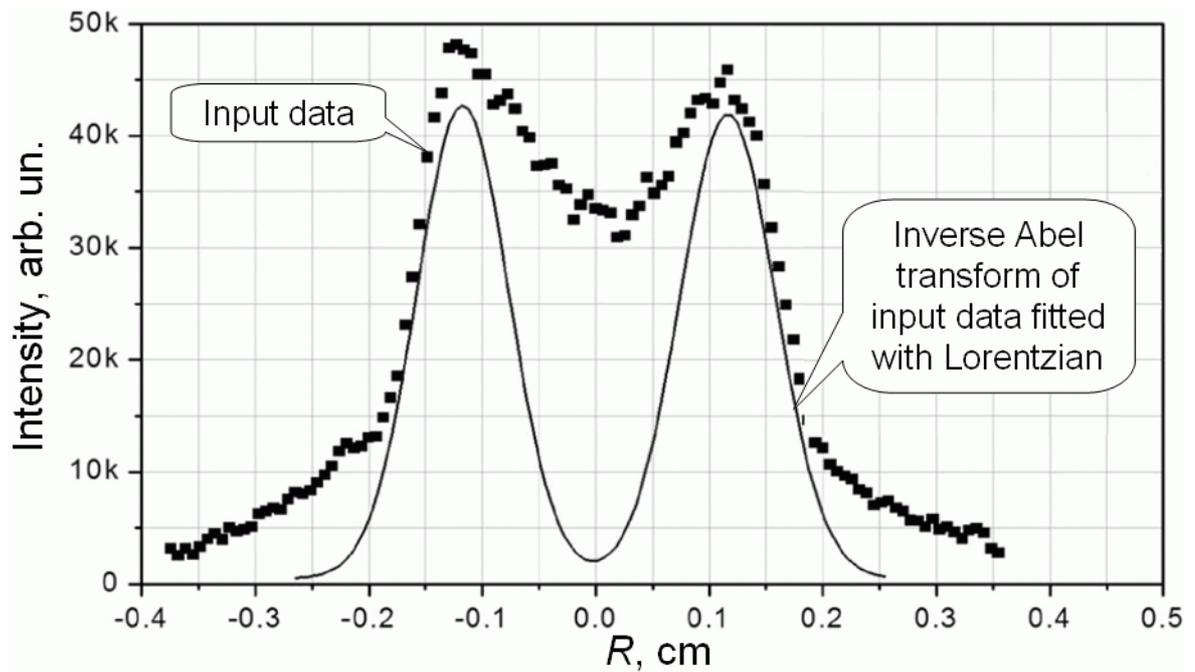


Попов, Шнайдер, Батраков, Sandolache, Rowe, Марков, Зюлькова.

Анодный факел сильноточной вакуумной дуги. **Рис. 41**



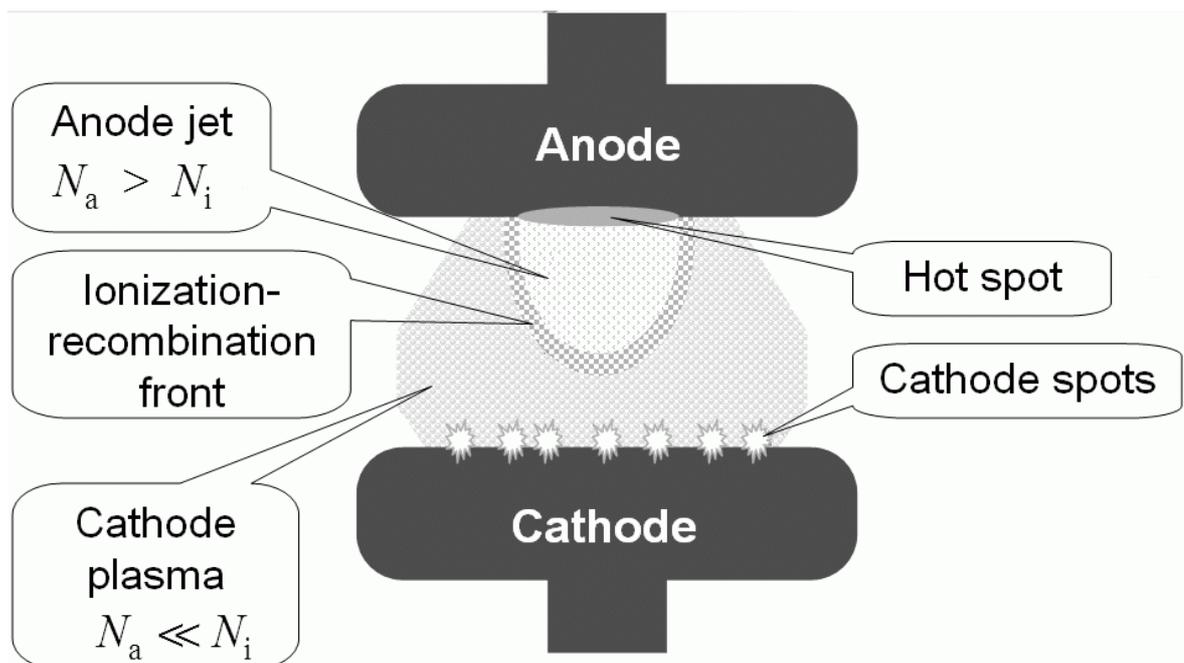
(a)



(b)

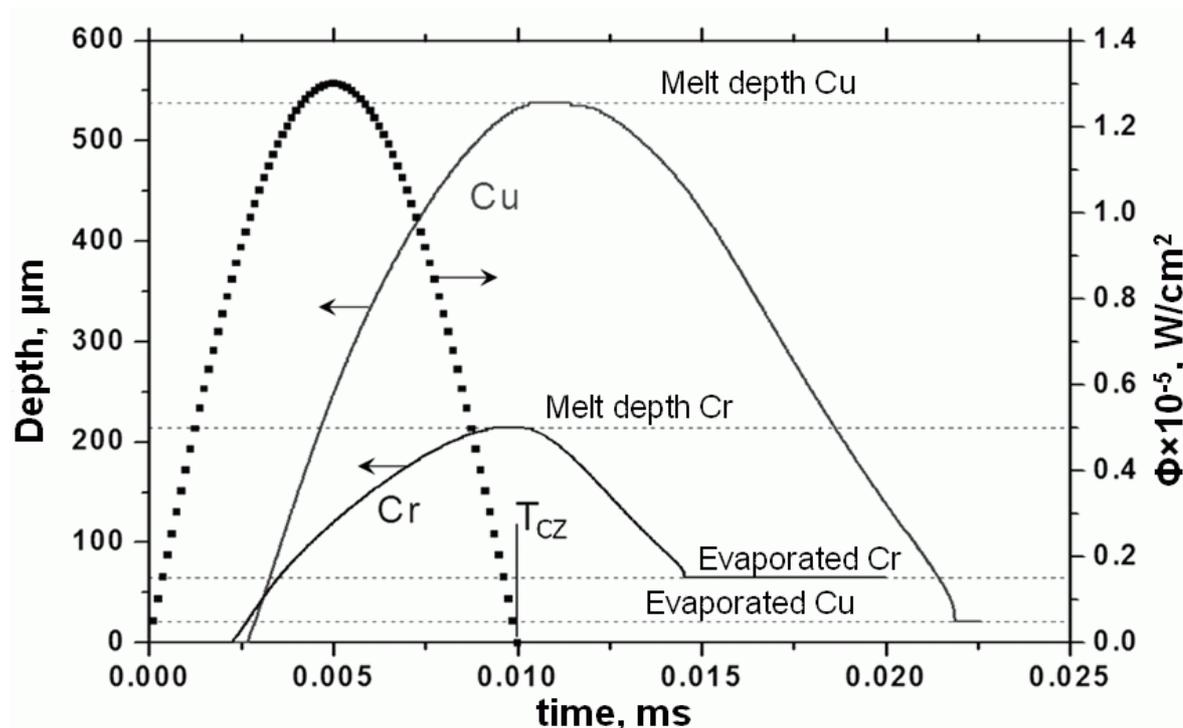
Попов, Шнайдер, Батраков, Sandolache, Rowe, Марков, Зюлькова.

Анодный факел сильноточной вакуумной дуги. **Рис. 42**



Попов, Шнайдер, Батраков, Sandolache, Rowe, Марков, Зюлькова.

Анодный факел сильноточной вакуумной дуги. **Рис. 43**



Попов, Шнайдер, Батраков, Sandolache, Rowe, Марков, Зюлькова.

Анодный факел сильноточной вакуумной дуги. **Рис. 44**

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 34 Схема экспериментальной установки. 1-вакуумная камера, 2- 50-Hz контур тока, 3- 500-Hz контур ПВН, 4- датчики тока, 5- датчик напряжения на промежутке, 6- датчик потенциала экрана, G_1 - пояса Роговского, А- анод, С- катод, S- экран.

Рис. 35 Пример осциллограмм при горении дуги на медных электродах (а) и соответствующие изображения (б). 1- ток дуги, 2- напряжение на промежутке, 3- плавающий потенциал, T_S - начало импульса тока, T_O - начало горения дуги, T_1 - момент инъекции 500-Hz контура ПВН, T_{CZ} - момент нуля тока.

Рис. 36 Пример осциллограмм при горении дуги на медно-хромовых электродах.

Рис. 37 Пример осциллограмм при горении дуги на медно-хромовых электродах (а) и соответствующие изображения (b).

Рис. 38 Пример осциллограмм при горении дуги на медно-хромовых электродах (а) и соответствующие изображения (b).

Рис. 39 Две различные серии последовательных изображений анодного факела над жидкометаллическим выступом (а) и светящаяся оболочка вокруг летящей в промежутке капли (b) в дуге на медных электродах.

Рис. 40 Одновременно зарегистрированные спектрально-дифференцированные изображения промежутка при горении дуги на медно-хромовых электродах, полученные за 500 μ s до момента нуля тока, что соответствует току разряда 1,5 kA.

Рис. 41 Зарегистрированные с интервалом 20 ns изображение собственного свечения плазменного факела (а) и теневое изображение на резонансной линии поглощения атомов меди (b) 425 nm при подсветке промежутка импульсным лазером длительностью 10 ns и длиной волны генерации, совпадающей с линией поглощения.

Рис. 42 Исходное изображение анодного факела (а) и вычисленное на его основе распределение интенсивности свечения вещества по радиусу (b).

Рис. 43 Модельное представление структуры анодного факела, где N_i - концентрация ионов и N_a - концентрация атомов.

Рис. 44 Динамика глубины зоны расплава для случаев электрода из чистой меди и чистого хрома при потоке энергии на поверхность, представленном пунктирной линией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения второго этапа работы были получены результаты:

1. Закончено формирование стенда по диагностике плазмы вакуумных сетевых выключателей и разработана методика многозондовой диагностики расширяющейся плазмы, позволяющие регистрировать как основные параметры плазмы – концентрация и температура, так и динамику плазменной границы.
2. Сформирован оптический тракт для регистрации 4-х последовательных либо одновременных изображений быстропротекающего процесса с синхронизацией наблюдений с регистрацией осциллограмм. Реализована функция системы, позволяющая производить регистрацию спектрально-дифференцированных изображений объекта на эмиссионных линиях атомов и ионов плазмы.
3. Разработана методика скоростной визуализацией дуги, в том числе в узком спектральном диапазоне, по 4-м каналам видеорегистрации.
4. Разработана методика подготовки абляционной жидкометаллической мишени и проведения экспериментов по лазерной абляции жидкого металла.
5. Разработана методика измерения механического импульса отдачи при лазерной абляции жидкометаллической мишени.
6. Подготовлены рукописи 2-х статей в журналы из списка, рекомендованных ВАК, одна из которых принята к печати.

Выполненные работы соответствуют требованиям Технического задания и Календарного плана государственного контракта от 17 сентября 2010 г. № 14.740.11.0317.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Brooks R.J., Howorth J.R., McGarry K., Powell J.R.* Experimental data on the reflection and transmission spectral response of photocathodes // *Proc. SPIE.* 2007. vol. 6660. pp. 13.1–13.9.
2. Физические величины. Справочник. Под. ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. – М.: Энергоиздат, 1991. – 1234 с.
3. Царев Б.М., Расчет и конструирование электронных ламп // М.: Энергия, 1967.
4. Савельев И.В. Курс общей физики Т.1. Механика. Молекулярная физика. - М.: Наука, 1982. - С. 74-105.
5. H.C. Miller, “Anode Phenomena”, in *Handbook of Vacuum Science and Technology. Fundamentals and Applications*, ed. by R.L. Boxman, Noyes Publications, 1995, pp. 308-366.
6. P.G. Slade, *The Vacuum Interrupter. Theory, Design, and Application.* NY: CRC Press, 2008, ch. 2.
7. A. Batrakov, A. Schneider, S. Rowe, G. Sandolache, A. Markov, and L. Zjulkova, “ Observation of an anode spot shell at the high-current vacuum arc”, in *Proc. 24th Int. Symp. Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Braunschweig, Germany*, pp. 351–354 (2010).
8. Y. Matsui, A. Sano, H. Komatsu, H. Satou, and H. Saito, “Vacuum Arc Phenomena under Various Axial Magnetic Field and Anode Melting”, in *Proc. 24th Int. Symp. Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Braunschweig, Germany*, pp. 324–327 (2010).
9. E. Gidalevich, S. Goldsmith, and R. L. Boxman, “Shock front formation at vacuum arc anodes”, *J. Appl. Phys.* 92, 4891–4896 (2002).
10. R. L. Boxman, “Interferometric measurement of electron and vapor densities in a high-current vacuum arc”, *J. Appl. Phys.* 45, 4835–4846 (1974).

11. J. H. Harris, "Electron density measurements in vacuum arcs at anode spot formation threshold", *J. Appl. Phys.* 50, 753–757 (1979).
12. B. M. Smirnov, *Reference Data on Atomic Physics and Atomic Processes*, Berlin: Springer–Verlag, 2008, p. 81.
13. Heberlein J., Gorman J. // *IEEE Trans. Plasma Sci.* Dec. 1980. vol. 8. no. 4. pp. 283–288.
14. Janiszewski J., Zalucki Z. // *Czechoslovak Journal of Physics.* 1996. vol. 46. No. 10. pp. 961–971.
15. Janiszewski J., Zalucki Z. // *Proc. 17th Int. Symp. Discharges and Electrical Insulation in Vacuum.* 1996. Berkley. USA. pp. 220–225.
16. Rich J.A., Prescott L.E., Cobine J.D. // *J. Appl. Phys.* 1971. vol. 42, No. 2, pp. 587–601.
17. Bracewell R. N. *The Fourier Transform and Its Applications.* McGraw-Hill. New York. 2000.
18. Batrakov A., Jüttner B., Popov S., Proskurovsky D., and Vogel N. // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 33(5), 1465 (2005).
19. Диаграммы состояния двойных металлических систем./ Справочник по ред. Н.П. Лякишева, М: Машиностроение, 1997, т. 2, С. 112-114.
20. Rotshtein V., Ivanov Yu., Markov A. Surface treatment of materials with low-energy, high-current electron beams. Chapter 6 in book *Materials surface processing by directed energy techniques*, ed. by Y. Pauleau, Elsevier, 2006, pp. 205-240.