

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. № 266.10.03

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 3 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 выключателях 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

Яковлев Е.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

Шулепов М. А.

без ученой степени, без ученого звания

подпись, дата

Романченко И.В.

Реферат

Отчет 132 с., 1 ч., 62 рис., 107 табл., 12 источн., 0 прил.

Диагностика низкотемпературной плазмы, вакуумная дуга, вакуумные сетевые выключатели

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 3 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 рассмотрены результаты исследований по динамике плазменной границы при обрыве сильноточной вакуумной дуги переменного тока в результате перехода тока дуги через ноль. Основным процессом, происходящим в разрядном промежутке после нуля тока дуги, является восстановление вакуумной изоляции за счёт расширения катодного слоя плазмы в условиях растущего переходного восстанавливающегося напряжения. В катодном слое возникает электрическое поле, измерение которого неосуществимо прямыми измерениями, но которое можно

вычислить, зная скорость движения плазменной границы, измерение которой и является основной задачей данного этапа проекта.

Поскольку поведение плазмы подвержено многим случайным процессам, все измеряемые величины имеют большой разброс, носящий случайный характер. В этой связи все величины, а именно, электронная температура, электронная концентрация, положение плазменной границы в различные моменты времени, измерялись путём проведения статистических экспериментов с большим числом однотипных измерений и последующей обработки результатов измерений в соответствии с ГОСТ 8.207-76. В качестве метода измерений на предыдущем этапе выполнения проекта был выбран метод двойного зонда Ленгмюра, способного измерять электронную температуру и концентрацию плазмы, и одиночного зонда Ленгмюра в режиме электронной ветви тока насыщения для измерения концентрации разреженной плазмы, ожидаемой в условиях перехода тока дуги через ноль. Для снижения разброса измеряемых величин зондовые эксперименты сопровождалось наблюдением за промежутком с использованием скоростной камеры HSFC-Pro, что позволяло определять положение источников плазмы и исключать те измерения, которые соответствовали зажиганию дуги вдали от оси разрядного промежутка. Для выявления возможных закономерностей поведения плазменной границы в условиях промышленно используемой вакуумной коммутационной аппаратуры эксперименты проводились для варьируемых в широких пределах амплитуде тока разряда 6-15 кА и скорости нарастания переходного восстанавливающегося напряжения 0.4-2 кВ/мкс.

В результате выполнения экспериментов были построены двумерные диаграммы положения плазменной границы во времени, а также диаграммы распределения концентрации плазмы в окрестности разрядного промежутка в момент перехода тока дуги через ноль. На основе анализа данных диаграмм установлено, что скорость расширения катодного слоя падает с ростом тока

дуги. В условиях переходного восстанавливающегося напряжения эта скорость растёт, но не успевает вырасти настолько, чтобы компенсировать полностью замедление границы при росте концентрации плазмы с увеличением тока дуги. Как результат баланса процессов электрическое поле под плазмой, вычисляемое как отношение скорости роста напряжения к скорости расширения слоя, растёт как с ростом тока дуги, так и с ростом скорости роста переходного восстанавливающегося напряжения после обрыва дуги при переходе тока через ноль.

Вычисленные на основании измерений значения средней напряжённости электрического поля в восстанавливающемся после обрыва дуги вакуумном промежутке по порядку величины близки к 10 кВ/см. При таких полях пробой по механизму пробоя высоковакуумных промежутков с холодными электродами происходить не может. Но эти поля достаточно велики для инициирования роста конуса Тейлора на жидкометаллических выступах, усиливающих поле, и имеющихся в избытке на расплавленной поверхности электродов после нуля тока дуги. Рост конуса Тейлора неминуемо завершается взрывом вершины в конечной стадии роста из-за интенсивной автоэлектронной эмиссии и инициированием пробоя восстанавливающегося изолирующего промежутка.

Другим, альтернативным механизмом пробоя восстанавливающегося промежутка является механизм пробоя газонаполненного промежутка низкого давления газа. Применительно к рассматриваемой системе, условия изоляции после нуля тока дуги соответствуют минимуму кривой Пашена, что связано с относительно высоким давлением паров металла, достигающим 10 Па и даже выше.

Полученные результаты исследования позволят лучше понимать процессы, происходящие в вакуумных сетевых выключателях после прерывания токов короткого замыкания сети, и более целенаправленно искать пути по подавлению пробоев после выключения тока.

При выполнении данного этапа проекта выполнена учебно-методическая работа, заключающаяся в подготовке к изданию учебного пособия по курсу «электрическая изоляция и разряд в вакууме» для подготовки магистрантов по программе «Физическая электроника» направления 210100 «Электроника и микроэлектроника» в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Национальном исследовательском Томском политехническом университете.

СОДЕРЖАНИЕ

Сокращения и обозначения	9
Введение	9
Основная часть. ПРОВЕДЕНИЕ СЕРИИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ДИНАМИКЕ ПЛАЗМЕННОЙ ГРАНИЦЫ ПРИ ОБРЫВЕ СИЛЬНОТОЧНОЙ ВАКУУМНОЙ ДУГИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	12
3.1. Проведение серии статистических экспериментов согласно ГОСТ 8.207-76 по исследованию параметров плазмы сильноточного вакуумно-дугового разряда до нуля тока с визуализацией разрядной области, в том числе в узких спектральных диапазонах, проводимые при различной амплитуде тока разряда, как с электродами из CuCr (основного материала серийных вакуумных выключателей), так и с модельными медными электродами.....	12
3.1.1. Общие требования к проведению измерений	12
3.1.2. Визуализация разрядного промежутка.....	15
3.1.3. Результаты измерения электронной температуры плазмы вакуумной дуги в промежутке с электродами из меди медно-хромового композиционного материала	21
3.1.3. Выводы по разделу 3.1	29
3.2. Проведение серии статистических экспериментов согласно ГОСТ 8.207-76 по исследованию параметров плазмы и динамики расширяющегося прикатодного слоя после перехода тока через ноль, в условиях возрастающего переходного напряжения на разрядном промежутке с визуализацией разрядной области, в том числе в узких спектральных диапазонах при изменяемых в широких пределах параметрах электрической цепи - амплитуде тока разряда 6-15 кА,	

скорости изменения тока вблизи перехода через ноль 1.5-3.5 А/мкс, и скорости нарастания переходного напряжения 0.4-2 кВ/мкс. Анализ влияния параметров разряда на возникновение пробоя и его причины и механизмы.....	30
3.2.1. Результаты экспериментов по динамике катодного слоя в нуле тока дуги с электродами из меди.....	30
3.2.2. Результаты экспериментов по динамике катодного слоя в нуле тока дуги с электродами из контактного материала $Cu_{0.75}Cr_{0.25}$	47
3.2.3. Анализ процесса восстановления вакуумного промежутка после перехода тока дуги через ноль.....	104
3.2.4. Выводы к разделу 3.2	109
3.3. Написание учебного пособия «Физические основы электрической изоляции и разряда в вакууме» для подготовки магистрантов по программе «Физическая электроника» направления 210100 «Электроника и микроэлектроника» в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Национальном исследовательском Томском политехническом университете.....	110
3.3.1. Автореферат учебного пособия «Физические основы электрической изоляции и разряда в вакууме».....	110
3.3.2. Рабочая программа курса «Электрическая изоляция и разряд в вакууме».....	114
Заключение	130
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	131

СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

В отчёте использованы следующие сокращения:

ВАХ – вольтамперная характеристика.

НТ – ноль тока.

ПДТ – последуговой ток.

ПВН – переходное восстанавливающееся напряжение.

СКО – среднеквадратическое отклонение.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящий отчёт посвящён выполнению третьего 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 проведение статистических экспериментов по исследованию динамики плазменной границы катодного слоя после обрыва дуги в результате перехода тока разряда через ноль. Данная работа имеет отношение к проблеме пробоя вакуумных выключателей переменного тока среднего класса напряжений после прерывания токов короткого замыкания. В этой связи условия экспериментов были максимально приближены к реальным условиям вакуумных сетевых

выключателей. Варьируемые параметры токов дуги и скорости роста ПВН соответствовали условиям короткого замыкания в реальных распределительных сетях без перекоса фаз.

Отчёт состоит из трёх разделов. Первый раздел посвящён диагностике плазмы вакуумной дуги в процессе её горения, как в максимуме тока, так и вблизи нуля тока. Исследуемыми параметрами являлись концентрация плазмы и электронная температура плазмы. Данные измерения не являются оригинальными и проводились с целью использования результатов измерений при анализе оригинальных экспериментальных данных, полученных во второй части данного этапа выполнения проекта.

Второй раздел отчёта по выполнению третьего этапа проекта посвящён описанию результатов измерений положения плазменной границы после нуля тока в различные моменты времени при различных параметрах разрядной цепи. Поскольку поведение плазмы подвержено многим случайным процессам, все измеряемые величины имеют большой разброс, носящий случайный характер. В этой связи все величины, а именно, электронная температура, электронная концентрация, положение плазменной границы в различные моменты времени, измерялись путём проведения статистических экспериментов с большим числом однотипных измерений и последующей обработки результатов измерений в соответствии с ГОСТ 8.207-76. В качестве метода измерений на предыдущем этапе выполнения проекта был выбран метод двойного зонда Ленгмюра, способного измерять электронную температуру и концентрацию плазмы, и одиночного зонда Ленгмюра в режиме электронной ветви тока насыщения для измерения концентрации разреженной плазмы, ожидаемой в условиях перехода тока дуги через ноль. Для снижения разброса измеряемых величин зондовые эксперименты сопровождалось наблюдением за промежутком с использованием скоростной камеры HSFC-Pro, что позволяло определять положение источников плазмы и исключать те измерения, которые соответствовали зажиганию дуги вдали

от оси разрядного промежутка. В результате выполнения экспериментов были построены двумерные диаграммы положения плазменной границы во времени, а также диаграммы распределения концентрации плазмы в окрестности разрядного промежутка в момент перехода тока дуги через ноль и проведён анализ полученных данных на предмет выявления возможных механизмов пробоя.

Третий раздел отчёта посвящён описанию учебного пособия «Физические основы электрической изоляции и разряда в вакууме», подготовленного к изданию в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Национальном исследовательском Томском политехническом университете в качестве учебно-методического сопровождения дисциплины «Электрическая изоляция и разряд в вакууме», читаемого магистрантам ТПУ по направлению 210100 «Электроника и микроэлектроника».

В завершение отчёта анализируются возможные механизмы пробоя, ожидаемые в восстанавливающемся изолирующем промежутке вакуумного выключателя после нуля тока дуги.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ. ПРОВЕДЕНИЕ СЕРИИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ДИНАМИКЕ ПЛАЗМЕННОЙ ГРАНИЦЫ ПРИ ОБРЫВЕ СИЛЬНОТОЧНОЙ ВАКУУМНОЙ ДУГИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

3.1. Проведение серии статистических экспериментов согласно ГОСТ 8.207-76 по исследованию параметров плазмы сильноточного вакуумно-дугового разряда до нуля тока с визуализацией разрядной области, в том числе в узких спектральных диапазонах, проводимые при различной амплитуде тока разряда, как с электродами из CuCr (основного материала серийных вакуумных выключателей), так и с модельными медными электродами

3.1.1. Общие требования к проведению измерений

Целью настоящих измерений является определение температуры и концентрации плазмы методом одиночного и двойного зонда. Поскольку значения данных параметров плазмы зависят от случайных факторов, связанных с состоянием электродов и неустойчивостями в плазме, измерения должны проводиться в соответствии со стандартной процедурой статистических измерений.

Измерения проводились в следующей последовательности операций:

- (а) Проверка схемы измерения и аппаратуры на исключение систематических погрешностей, связанных с изменением температурного режима задающих генераторов управления синтетической схемой, источников питания зондов и контуров синтетической схемы, осциллографов.
- (б) Кроме систематических погрешностей, перечисленных выше, в настоящем эксперименте возможны случайные погрешности, связанные со

случайным характером положения дугового канала в пределах вакуумного промежутка и с возможным дрожанием зондов. Для исключения данной погрешности в экспериментах одновременно с зондовыми измерениями осуществлялась визуализация промежутка и положения зондов. При восстановлении динамики плазменной границы расстояния между дуговым каналом и зондами измерялось по цифровым изображениям для каждого акта горения дуги.

вычислить среднее арифметическое исправленных результатов наблюдений, принимаемое за результат измерения;

(в) Вычисление средних величин и среднеквадратичных отклонений. Для каждой серии экспериментов (набор входных параметров: амплитудное значение тока дуги, время наблюдения относительно точки перехода тока дуги через ноль, положения зондов) проверялось соответствие набора выборок нормальному распределению с уровнем значимости 5% и доверительной вероятности 95%.

Среднеквадратическое отклонение $\sigma(\tilde{A})$ результата измерения оценивалось по формуле

$$\sigma(\tilde{A}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{A})^2}{n(n-1)}}, \quad (1)$$

где x_i – i -й результат наблюдения; \tilde{A} – результат измерения (среднее арифметическое исправленных результатов наблюдений); n – число результатов наблюдений. Доверительные границы ε случайной погрешности результата измерения находят по формуле

$$\varepsilon = \pm t S(\tilde{A}), \quad (2)$$

где t – коэффициент Стьюдента. При выполнении измерений проверялось выполнение условия, что систематическая погрешность Θ не превосходит

уровня $0,8\sigma$. Суммарное среднеквадратическое отклонение результата измерения вычислялось по формуле

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\Theta_i^2}{3} + \sigma^2(\tilde{A})}. \quad (3)$$

Поскольку число результатов наблюдений в настоящих экспериментах $n < 50$, нормальность их распределения проверялась по двум критериям.

Согласно критерию №1 вычислялось отношение \tilde{d}

$$\tilde{d} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \tilde{A}|}{nS^*}, \quad (4)$$

где S^* вычисляется по формуле:

$$S^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{A})^2}{n}}. \quad (5)$$

Результаты наблюдений группы можно считать распределенными нормально по критерию №1, если

$$d_{1-q_1/2} < \tilde{d} \leq d_{q_1/2}, \quad (6)$$

где квантили распределения $d_{1-q_1/2}$ и $d_{q_1/2}$ приведены в таблице 1 по n .

Согласно критерию № 2 полагалось, что результаты наблюдений принадлежат нормальному распределению, если не более m разностей $|x_i - \tilde{A}|$ превзошли значение $z_{P/2} S$, где S – оценка среднеквадратического отклонения, вычисляемая по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{A})^2}{n-1}}, \quad (7)$$

где $z_{P/2}$ – верхняя квантиль распределения нормированной функции Лапласа, отвечающая вероятности $P/2$. Значения P определялись из табл. 2 по числу результатов наблюдений n . В случае, если хотя бы один из критериев не соблюдается, полагалось, что распределение результатов наблюдений группы не соответствует нормальному и подлежит анализу на выяснение причин несоответствия, их устранению и повторному воспроизведению.

Таблица 1. Параметры уравнения (6) для различного числа выборок.

n	$d_{q_1/2}$	$d_{1-q_1/2}$
	Уровень значимости 5%	Доверительная вероятность 95%
3	0,93427	0,7785
5	0,92496	0,78324
7	0,91658	0,78763
10	0,90555	0,79359
12	0,89911	0,79719
15	0,89063	0,80208
20	0,87916	0,80905
25	0,87034	0,81478

Таблица 2. Значения P для вычисления $z_{P/2}$.

n	m	Уровень значимости 5%
3-7	1	0,94
7-9	1	0,95
10	1	0,96
11-14	1	0,97
15-20	1	0,98
21-22	2	0,96
23	2	0,96
24-27	2	0,97
28-32	2	0,97

3.1.2. Визуализация разрядного промежутка

Одной из случайных ошибок, возникающих при диагностике плазмы вакуумной дуги, является случайный характер локализации возбуждения дугового канала и его возможного перемещения в процессе горения дуги. Для исключения погрешности измерений, связанной с таким поведением дуги, регистрировались изображения с высоким временным разрешением разрядного промежутка. Изображения регистрировались 4-х канальной

сверхскоростной (3 нс минимальная экспозиция) 12-разрядной камерой HSFC-Pro. Камера укомплектовывалась узкополосными интерференционными фильтрами для регистрации спектрально дифференцированных изображений. Данная мера в ряде случаев позволяла более точно определять положение анодного пятна. Серия изображений для различных длин волн приведена на рисунке 1. Анодные факелы, наблюдаемые при горении дуги на медно-хромовых электродах, излучают практически весь свет тонкой оболочкой, тогда как внутри оболочек пространство выглядит практически тёмным. Для оценки соотношения интенсивности свечения оболочки и пространства внутри было выполнено обратное преобразование Абеля исходных изображений. Пример такого преобразования для изображения серии Sp3 на линии 425 нм приведён на рисунке 2. В нашем случае использование изображения лишь в одной плоскости проекции является обоснованным, т.к. анализировались объекты, форма которых близка к осесимметричной.

Восстановленная интенсивность свечения вблизи оси объекта падает практически до нуля. Таким образом, можно утверждать, что пространство внутри факела является тёмным, а факел представляет собой светящуюся оболочку. Основной свет оболочки эмитируется нейтральными атомами.

Оболочка окружена диффузным свечением, эмитируемым ионами. Такие оболочки, появляющиеся в сильноточной дуге, могут иметь отношение к ударному фронту, возможное появление которого в вакуумной дуге предсказано теоретически [1]. Согласно модели, фронт формируется в результате столкновения потока катодной и анодной плазмы, при этом анодная плазма является полностью ионизованной. В результате столкновения потоки плазмы практически полностью останавливаются, формируя стабильный фронт.

В отличие от модели [1], наши результаты указывают на то, что анодная плазма является слабоионизованной. В этом случае при столкновении

потоков плазмы и замедления скорости её распространения должен начаться интенсивный процесс перезарядки ионов, эмитированных катодными пятнами, и нейтралов, испарённых с анода. В результате такой перезарядки может образовываться практически неподвижный слой возбуждённых нейтралов и медленно движущийся от анода к катоду слой возбуждённых ионов (рис. 3).

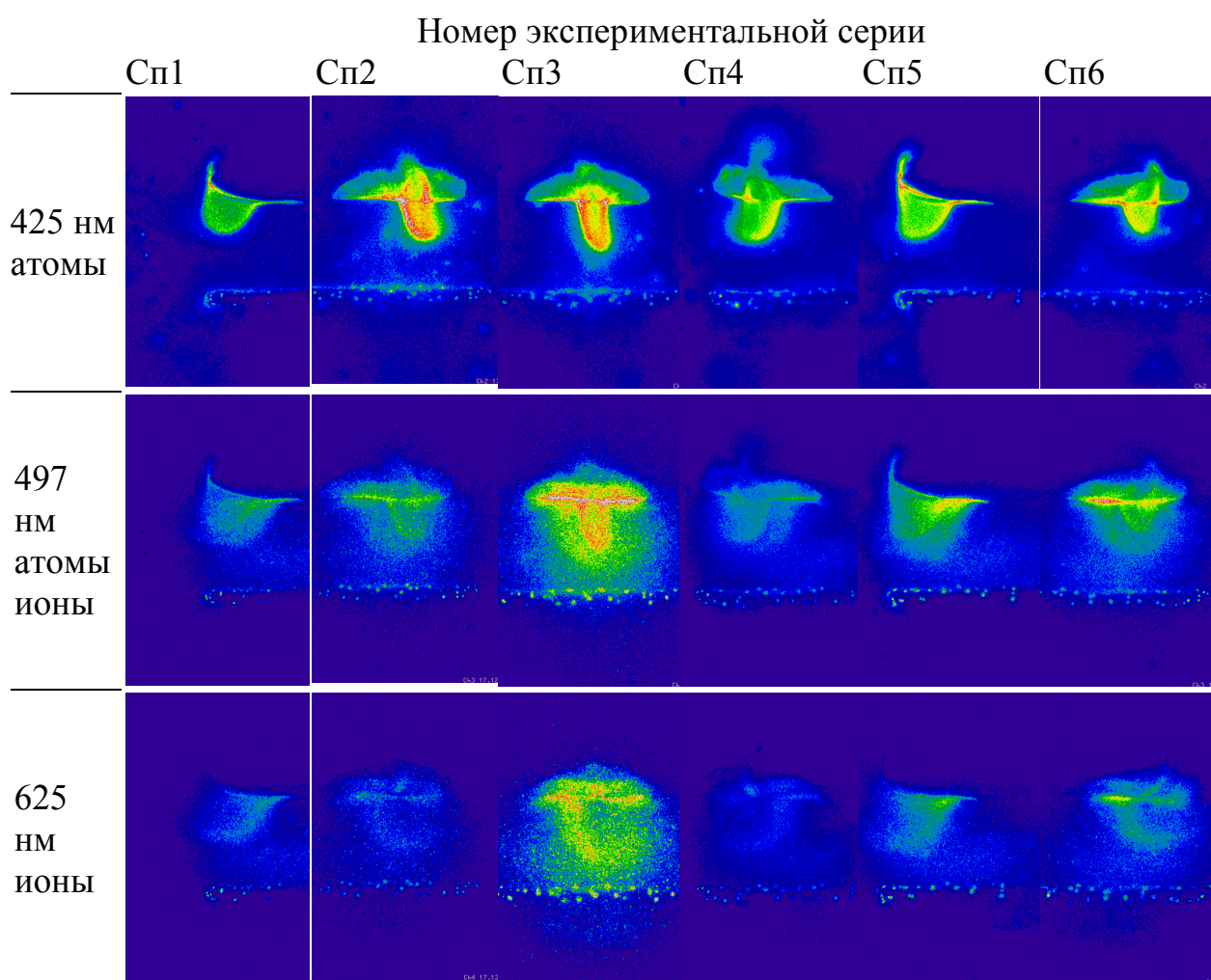


Рис. 1. Спектрально-дифференцированные изображения серии из 6-ти наблюдения с целью идентификации компонент плазмы анодного пятна. Анод сверху. Межэлектродный промежуток 1 см. Амплитудное значение тока 10 кА. Время наблюдения 0.95 мс от начала импульса тока.

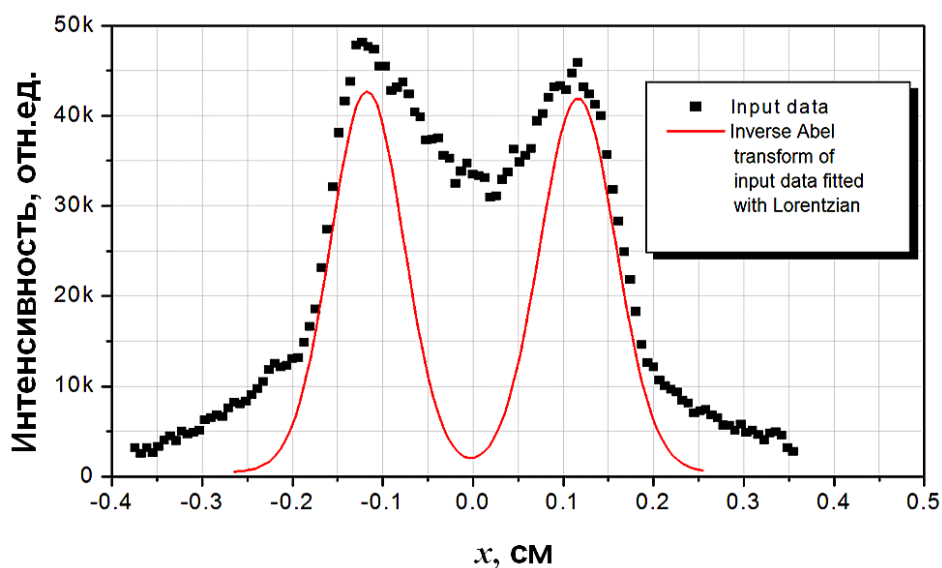


Рис. 2. Результат восстановления профиля интенсивности свечения факела, изображение которого приведено на рис.унке 1 для серии СПЗ на линии 425 нм.

Эти рассуждения полностью соответствуют результатам наших наблюдений, что даёт основание считать их адекватно описывающими действительность. В отличие от модели [1], более точным является определение наблюдаемых светящихся оболочек как ионизационно-рекомбинационных фронтов. Обычно оболочки имеют толщину, L , порядка 1 мм. Можно полагать, что $L \approx \sigma^{-1} N_a^{-1}$, где σ – сечение резонансной перезарядки ионов и атомов ($\sim 10^{-14} \text{ см}^{-2}$ [2]) и N_a – концентрация нейтральных атомов. В этом случае N_a может быть оценена равной 10^{15} см^{-3} , что соответствует давлению порядка 10 Па в области границы факела. Данная оценка является вполне резонной для сильноточной вакуумной дуги [3].

В случае электродов из чистой меди характер анодного пятна изменялся, становясь менее регулярным. Плазменные оболочки наблюдались исключительно вокруг жидкометаллических выступов или летящих капель (рис. 4), т.е. вокруг сильно перегретого металла. Данный факт свидетельствует о том, что в условиях вакуумной дуги тепловой режим на гладких электродах из CuCr аналогичен тепловому режиму перегретых

жидких медных выступов. Этот факт может быть объяснён существованием двух жидкостей – меди и хрома, которые не перемешиваются, и за счёт существования границ раздела реализуется режим затруднённого теплоотвода.

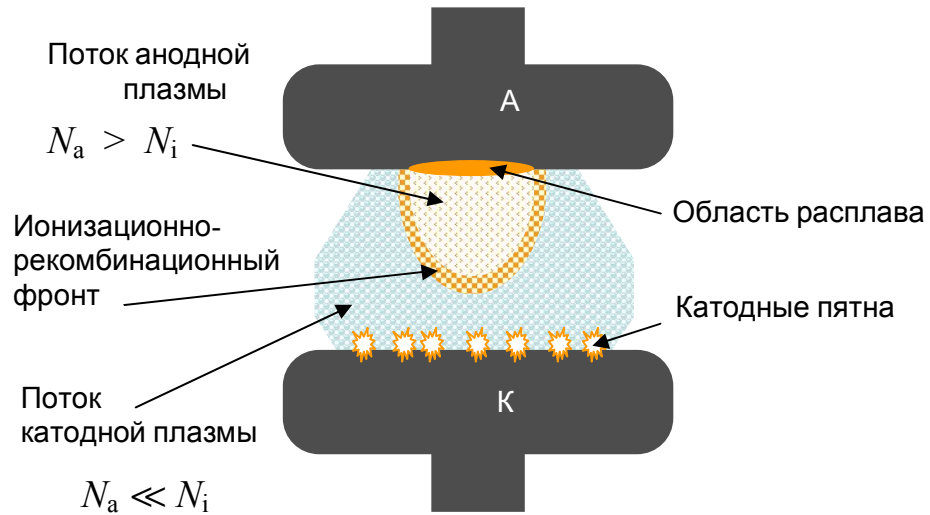


Рис. 3. Модельное представление структуры наблюдаемых объектов. N_i – концентрация ионов, N_a – концентрация атомов.

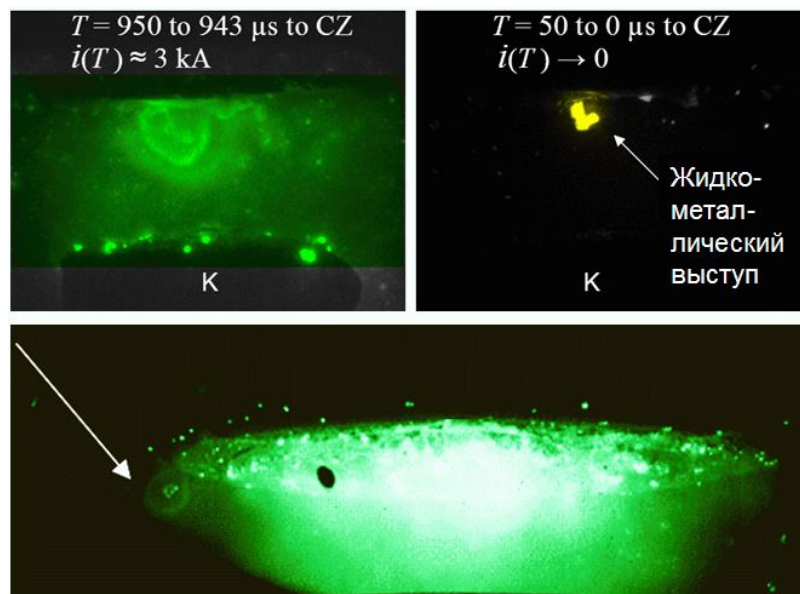


Рис. 4. Две различные серии последовательных изображений анодного факела над жидкометаллическим выступом (вверху) и светящаяся оболочка вокруг летящей в промежутке капли (внизу) в дуге на медных электродах.

Для достижения режима формирования анодного факела 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 [4], 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 [5], где такой режим горения дуги целенаправленно используется для формирования потоков испарённого материала с предельно низкой концентрацией капель.

Другим, не менее важным, назначением регистрации изображений промежутка являлось наблюдение за положением зондов и отсутствием или наличием катодного пятна на зонде(ах) и экране. Результаты измерений для актов горения дуги, при которых возникало катодное пятно в любом другом месте, кроме катодного электрода контактного промежутка, не включались в статистику.

Кроме контроля за достоверностью данных, наблюдения использовались для регистрации точного положения анодного пятна относительно зондов (рис. 5). В последующем анализе динамики плазменной границы

учитывалось расстояние между фактическим положением анодного пятна и зондами.

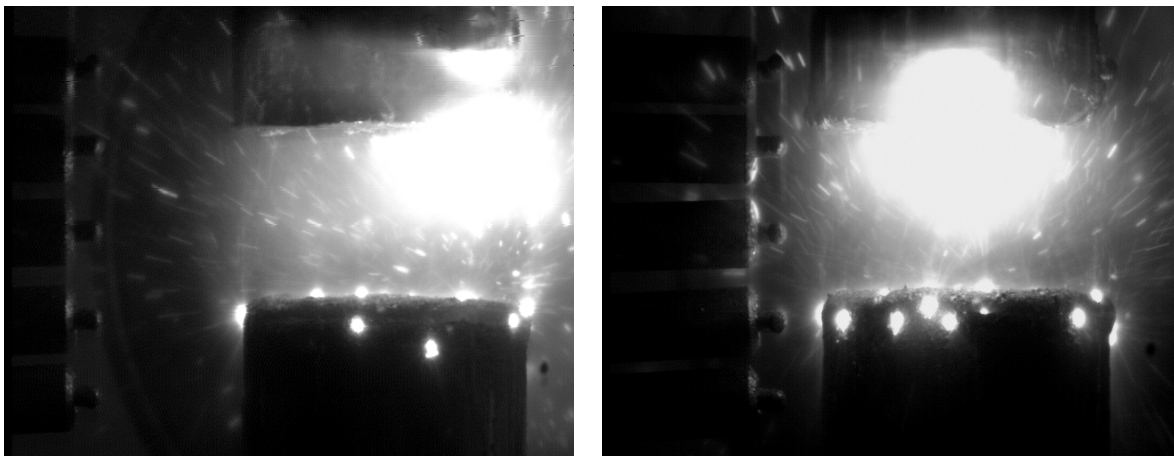


Рис. 5. Изображения различных актов горения дуги с идентичными параметрами разряда и осциллограммами тока и напряжений, отличающиеся местом положения анодного пятна.

3.1.3. Результаты измерения электронной температуры плазмы вакуумной дуги в промежутке с электродами из меди медно-хромового композиционного материала

В качестве двойного зонда использовались 1-й и 2-й одиночные зонды из линейки зондов. Техника питания и регистрации тока и напряжения описана в отчёте по второму этапу настоящего проекта. Частота переменного напряжения подаваемого на зонды была 100÷400 кГц.

Набор осциллограмм тока и напряжения двойного зонда, фотографии разрядного промежутка, а также результаты обработки отдельных участков осциллограмм представлены на рис. 6 и 7.

Как и ранее, электронная температура плазмы была реконструирована путем подгонки ВАХ зонда выражением:

$$i_p(V) = i_{is} \operatorname{th} \frac{e(V - \Delta V)}{2kT_e} \quad (8)$$

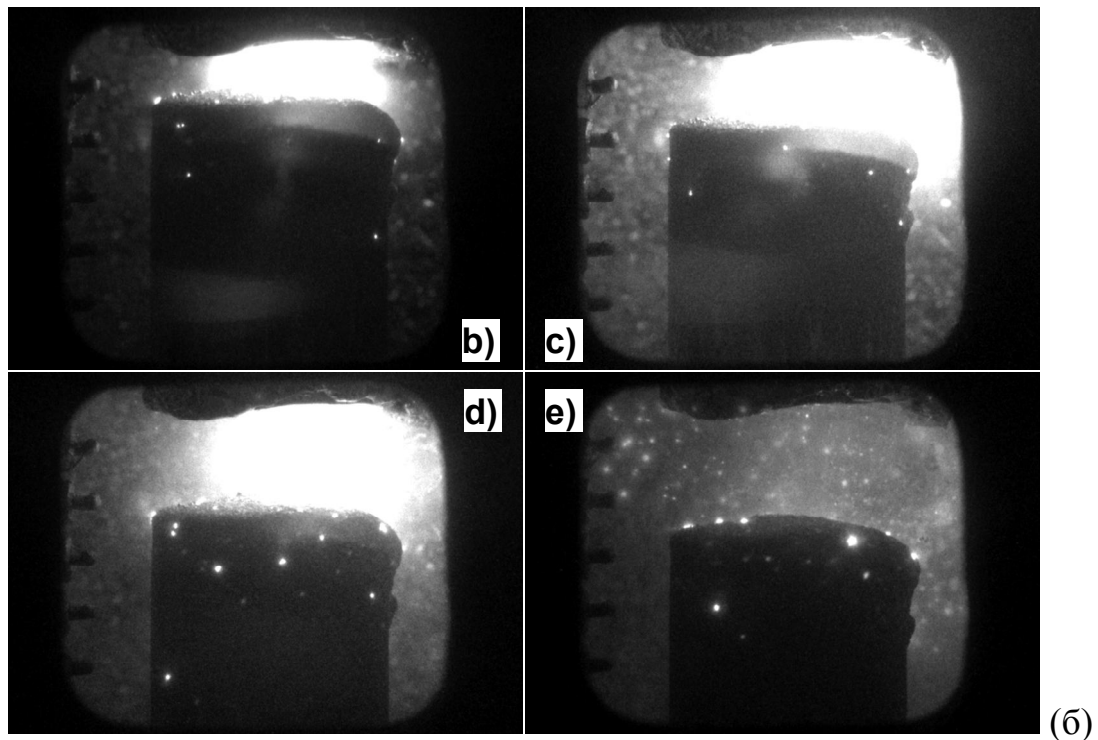
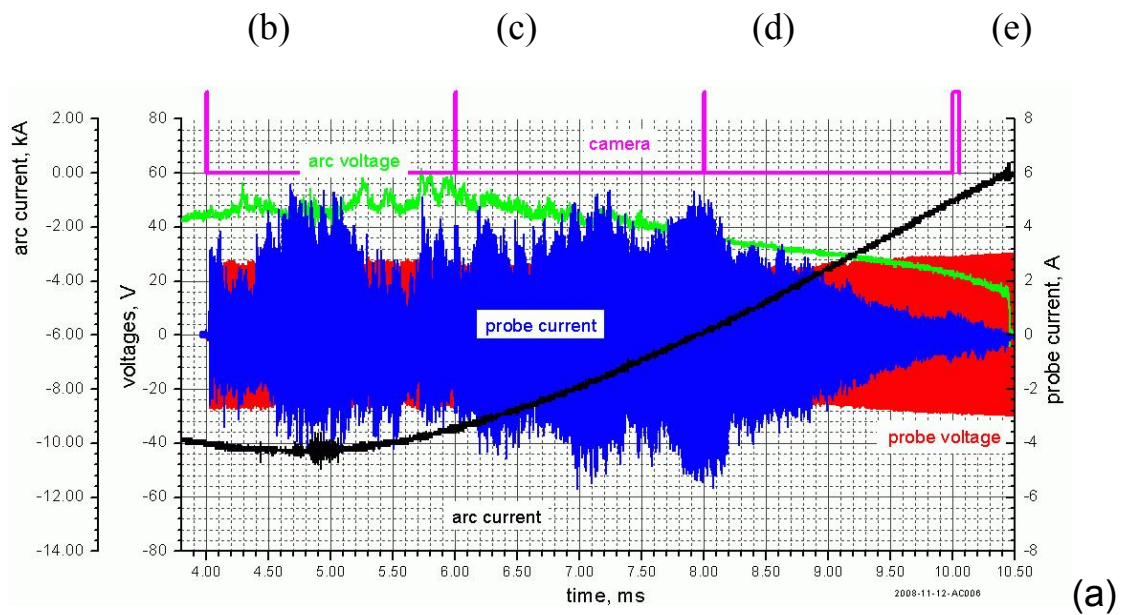


Рис. 6. Набор осциллограмм сигналов (а), включая ток и напряжения зонда и синхроимпульсы камеры, соответствующие кадрам (б).

где T_e – электронная температура плазмы, определяющая наклон кривой в переходной области, i_{es} – ионный ток насыщения, V – напряжение и ΔV – разница в потенциалах плазмы в окрестности зондов. Для уменьшения ошибки вычисления проводились по десяти периодам.

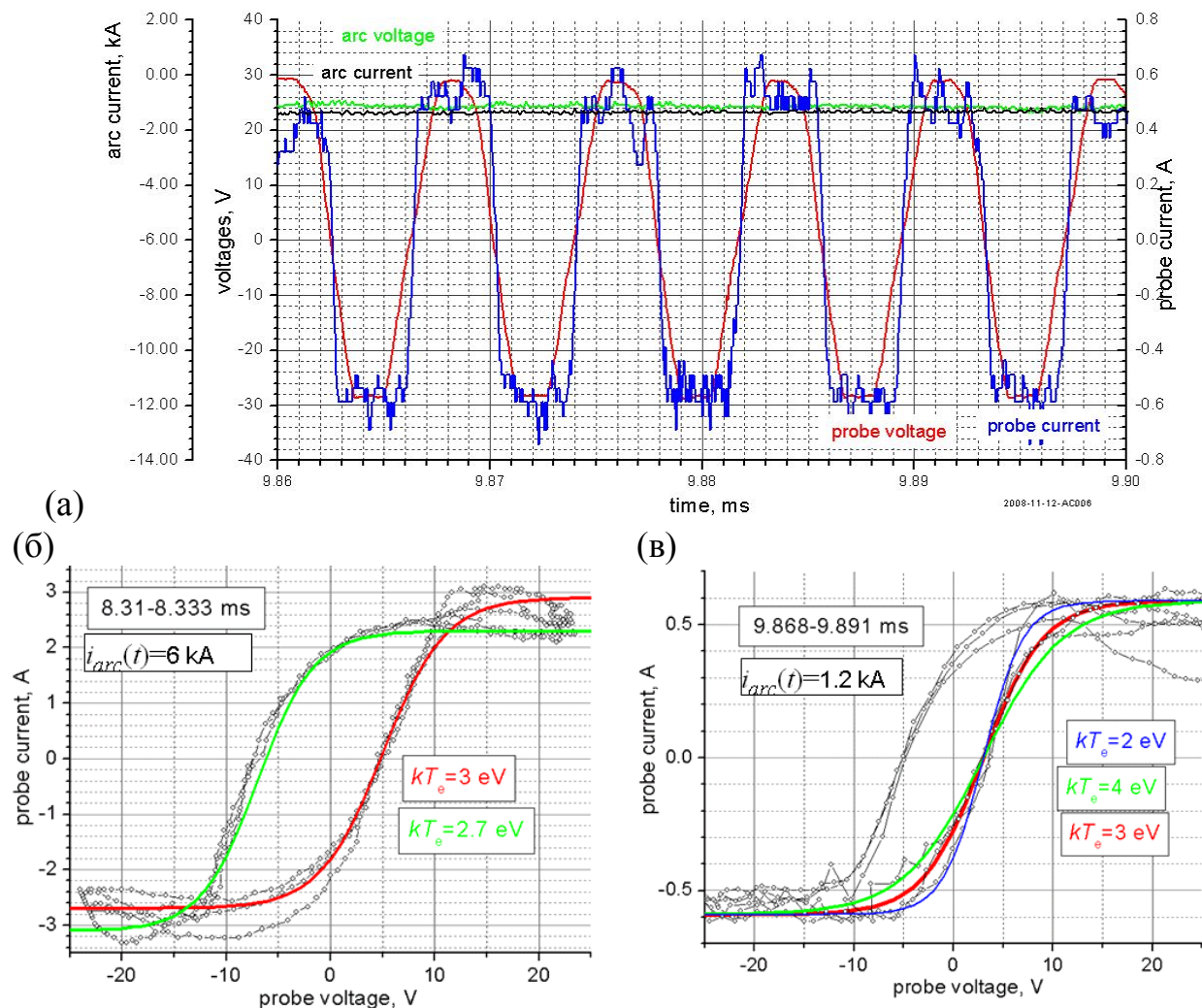


Рис. 7. Фрагмент набора осциллограмм (а), представленного на рис. 6, и вольтамперные характеристики зонда (б, в), полученные из обработки различных участков, подобных изображённому на рис. 7,а. Сплошные цветные линии соответствуют аппроксимации ВАХ выражением (8) для различных значений i_{is} , T_e , и ΔV .

Измеренная таким образом электронная температура в плазме практически не зависела от частоты напряжения двойного зонда, амплитуды тока разряда и момента измерения и составила величину $3 \pm 0,42 \text{ эВ}$ для дуги на медных электродах. Электронная температура составила $2.1 \pm 0,34 \text{ эВ}$ для дуги на электродах из контактного материала $\text{Cu}_{0,75}\text{Cr}_{0,25}$. Результат для меди, полученный в настоящей работе, отличается от опубликованного для катодной дуги в вакууме значения $3,5 \text{ эВ}$ [6] электронной температуры. Различие объясняется тем, что, отличие от реферативного источника,

измерения делались при высокой температуре катода, характерной для сильноточной дуги.

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

$$i_{is} = i_{dir} = S_{cs} e \langle Z \rangle n_i v_d = S_{cs} e n_e v_d, \quad (9)$$

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

$$S_{cs} \approx 2 R a \approx 1.2 \times 5.1 \text{ mm}^2 \approx 6.1 \text{ mm}^2. \quad (10)$$

В этом случае электронная концентрация плазмы

$$n_e = i_{is} / (S_{cs} \cdot e v_d) \approx 1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \times i_{is} (\text{A}). \quad (11)$$

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, $kT_i \leq 1$ eV). В этом случае ионный ток насыщения на отрицательный зонд и концентрация плазмы связаны между собой формулой Бома:

$$i_{is} = i_B = 0.4 S_{зонд} e n_e (2kT_e / M_i)^{1/2}, \quad (12)$$

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

$$n_e = i_{\text{is}} / (0.4 S_{\text{зонд}} e (2kT_e/M_i)^{1/2}) \approx 2.7 \times 10^{14} \text{ см}^{-3} \times i_{\text{is}} (\text{A}). \quad (13)$$

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 возрастать с ростом давления нейтральных паров и уменьшении тока катодных пятен. Задолго до нуля тока необходимо использовать для восстановления плотности плазмы скорее выражение (11), чем (13). Так, для конкретных коротких интервалов времени на рис. 7 плотность плазмы согласно выражению (11) составила величину $3 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (при токе дуги 6 кА, рис. 7,б), и $6 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (ток дуги 1.2 кА, рис. 7,в). Характерные отрезки осциллограмм двойного зонда, включающие ноль тока, показаны на рис. 8. В момент нуля тока амплитуда сигнала тока двойного зонда была сравнима с шумом.

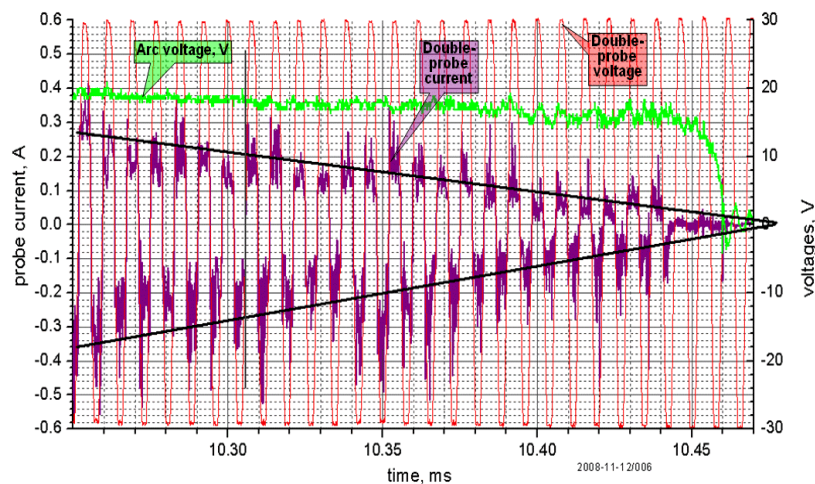


Рис. 8. Набор осциллограмм двойного зонда вблизи точки перехода тока дуги через ноль. Амплитуда тока дуги 10 кА. Сплошные прямые линии являются экстраполяцией амплитуды сигнала тока в область нуля тока.

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 (9). 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 (12). 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 $< 3 \times 10^{12}$ см⁻³ при амплитуде тока дуги до 10 кА включительно. Существенно более аккуратные измерения плотности плазмы выполнены путем измерения электронного тока насыщения.

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:

$$n_e(t) = \frac{4j_e(t)}{ev_e}, \quad (14)$$

где $v_e = (8 e kT_e / \pi m_e) = 1.16 \times 10^8$ см/с – тепловая скорость электронов при $kT_e = 3$ эВ, а плотность электронного тока насыщения из плазмы принимается равной плотности тока на поверхность зонда $j_e \cong j_{\text{зонд}} = i_{\text{зонд}}/S_{\text{зонд}}$.

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 :

$$n_e (\text{см}^{-3}) \cong 1.13 \times 10^{12} \cdot i_{\text{зонд}} (\text{А}). \quad (15)$$

Типичный набор осциллограмм вместе с восстановленной по выражению (15) плотностью плазмы приведены на рис. 9. 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. 20 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 М10. Средняя плотность плазмы на различных расстояниях от разрядного промежутка при различных амплитудах тока дуги приведена в таблице 3.

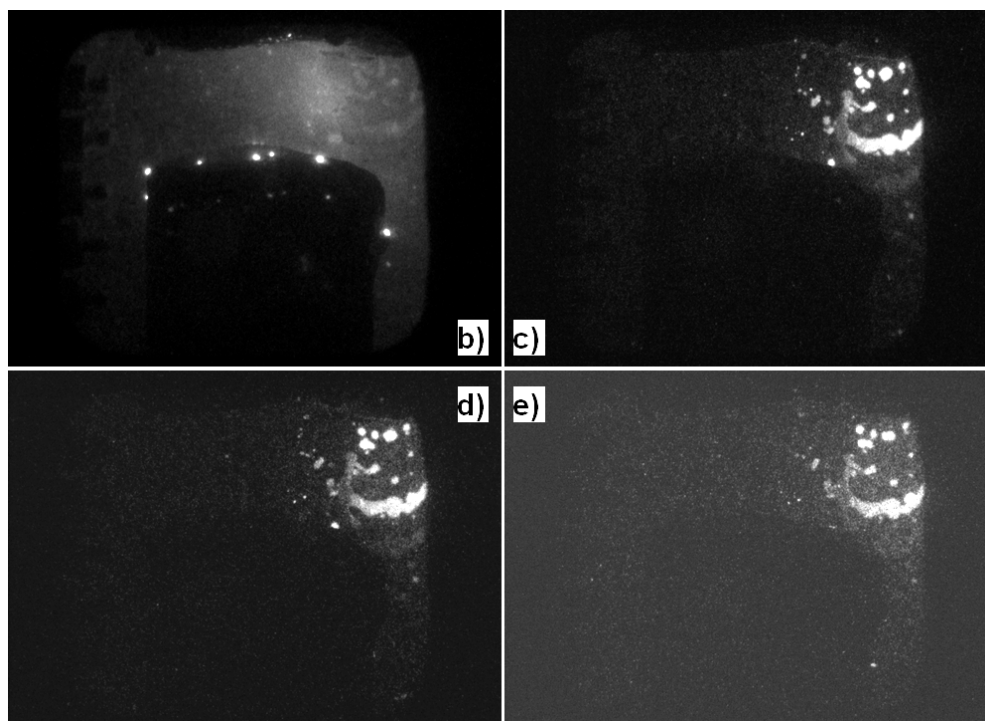
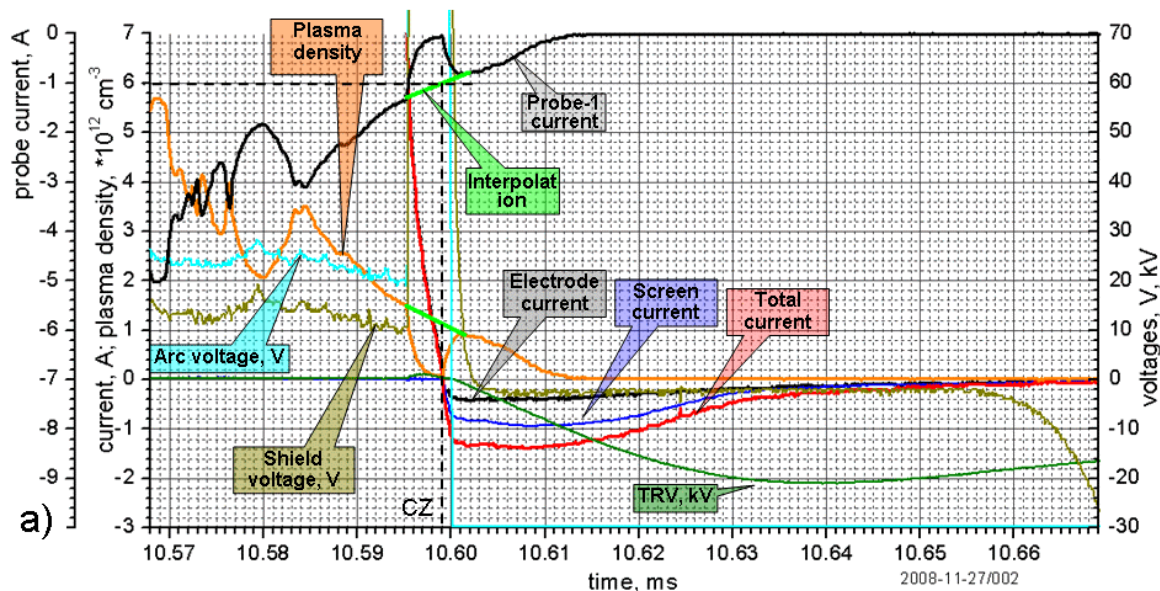


Рис. 9. Набор осциллограмм зонда №1 и результат обработки ВАХ зонда с использованием (15). Амплитуда тока дуги 8 кА. Времена регистрации изображений совпадает с рис. 6.

Таблица. 3. 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.

Ток дуги, кА	x, мм	3		4.5		18	
		$\tilde{n}_e, \text{см}^{-3}$	$\sigma(\tilde{n}_e), \text{см}^{-3}$	$\tilde{n}_e, \text{см}^{-3}$	$\sigma(\tilde{n}_e), \text{см}^{-3}$	$\tilde{n}_e, \text{см}^{-3}$	$\sigma(\tilde{n}_e), \text{см}^{-3}$
8		9.65E+11	2.33E+11			3.63E+11	2.25E+11
10		2.51E+12	1.55E+12			1.23E+12	5.30E+11
12		5.50E+12	3.54E+12	2.69E+12	2.83E+12	3.85E+11	2.12E+10

Полученные значения \tilde{n}_e с учётом расстояния до источника плазмы хорошо согласуются с выводами из взрывоэмиссионной модели вакуумного разряда [7], что свидетельствует о том, что основным источником плазмы в настоящих экспериментах являются катодные пятна вакуумной дуги.

3.1.3. Выводы по разделу 3.1

- 1.1. Выполнены эксперименты в соответствии с методикой, предназначенной 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. Измеренные значения температуры зависят от материала электродов и не зависят от параметров разряда и составляют $3 \pm 0,42$ эВ для меди и $2,1 \pm 0,34$ эВ для контактного материала $\text{Cu}_{0,75}\text{Cr}_{0,25}$, что несколько ниже, чем в случае катодной дуги. Различие объясняется охлаждением взрывоэмиссионной плазмы потоком анодной плазмы.

1.3. Измеренные значения концентрации плазмы находятся в соответствии со взрывоэмиссионной моделью вакуумного разряда, что свидетельствует о том, что основным источником плазмы являются катодные пятна.

3.2. Проведение серии статистических экспериментов согласно ГОСТ 8.207-76 по исследованию параметров плазмы и динамики расширяющегося прикатодного слоя после перехода тока через ноль, в условиях возрастающего переходного напряжения на разрядном промежутке с визуализацией разрядной области, в том числе в узких спектральных диапазонах при изменяемых в широких пределах параметрах электрической цепи - амплитуде тока разряда 6-15 кА, скорости изменения тока вблизи перехода через ноль 1.5-3.5 А/мкс, и скорости нарастания переходного напряжения 0.4-2 кВ/мкс. Анализ влияния параметров разряда на возникновение пробоя и его причины и механизмы

3.2.1. Результаты экспериментов по динамике катодного слоя в нуле тока дуги с электродами из меди

3.2.1.1. Общие условия экспериментов

Типичный набор осциллограмм токов и напряжений представлен на рис. 10. Момент начала размыкания электродов был установлен с задержкой 0.5 мс от начала тока 50-Гц контура. Скорость размыкания была настроена так, чтобы к моменту нуля тока зазор составлял 10 мм. Фактически начало размыкания контактов менялось от импульса к импульсу в интервале 0.3÷0.8 мс, что, по-видимому, было связано с изменениями геометрии электродов от импульса к импульсу. Набор осциллограмм для каждого

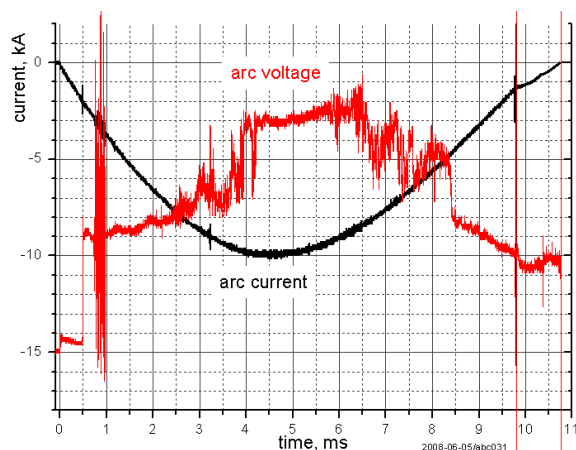
измерения сохранялся в виде массива полной длины (125 тыс. точек на канал). Период оцифровки составлял 100 нс. Детально анализировались участки осциллограмм вблизи нуля тока.

В данной серии экспериментов следующие условия были общими:

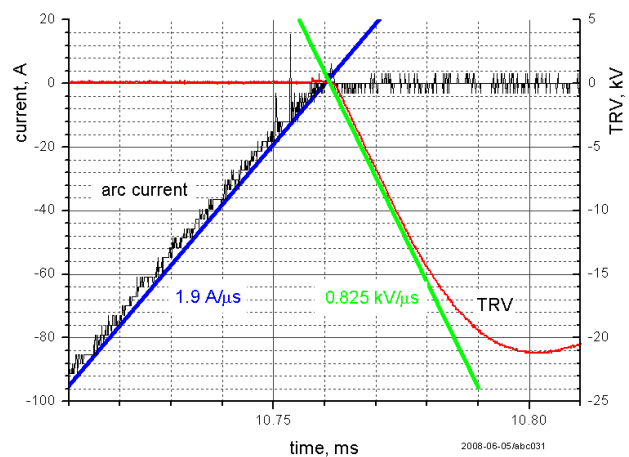
- длительность инжектируемого импульса тока 500-Гц контура – 0.95 мс;
- скорость падения тока при переходе через ноль – 1.9 А/мкс;
- скорость роста ПВН – 0.82 кВ/мкс поддерживаемая квазипостоянной в пределах $0.8 \div 0.85$ кВ/мкс от нуля тока и вплоть до 15 мкс.

Данные условия были реализованы при параметрах 500-Гц контура: $C_1=12$ мкФ, $L_1=8.34$ мГн, $R_{12}=200$ Ом, $C_2=27$ нФ, $V_{ch}=17$ кВ.

Два медных электрода диаметром 20 мм образовывали исследуемый промежуток. Система координат, используемая при анализе, показана на рис. 11.

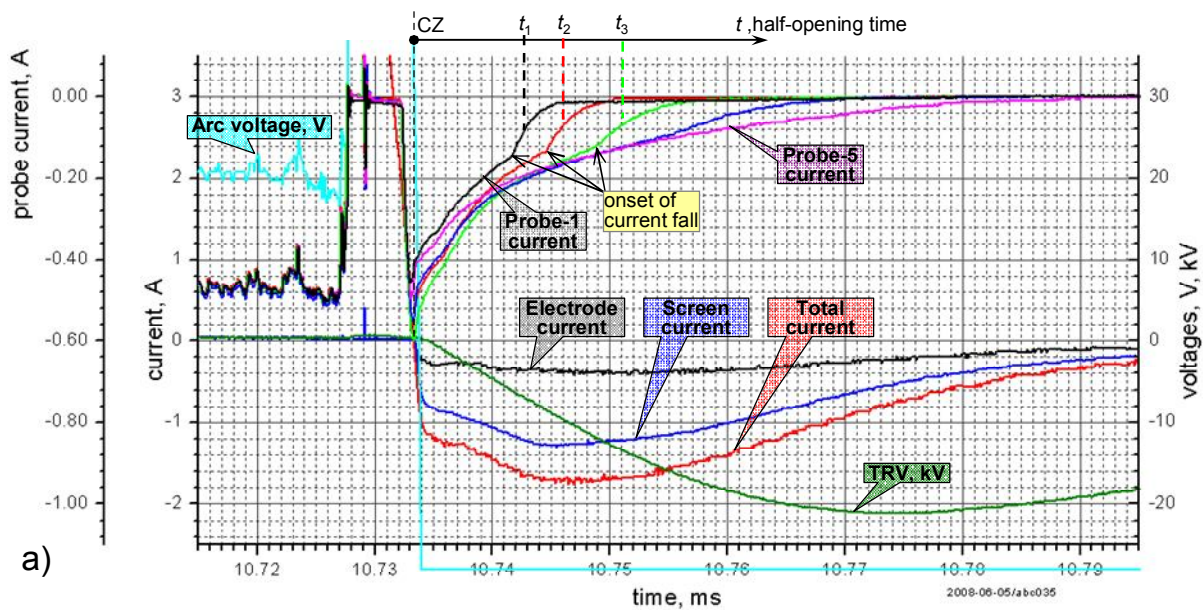


(а)

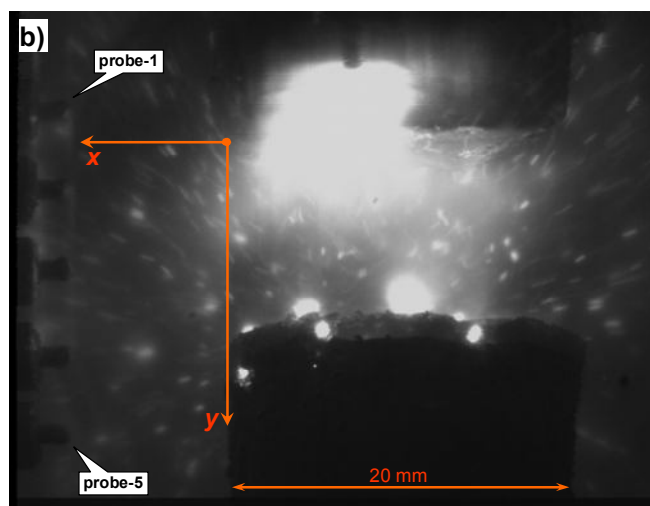


(б)

Рис. 10. Типичные осциллограммы, общие для экспериментов при амплитуде тока дуги 10 кА.



a)



б)

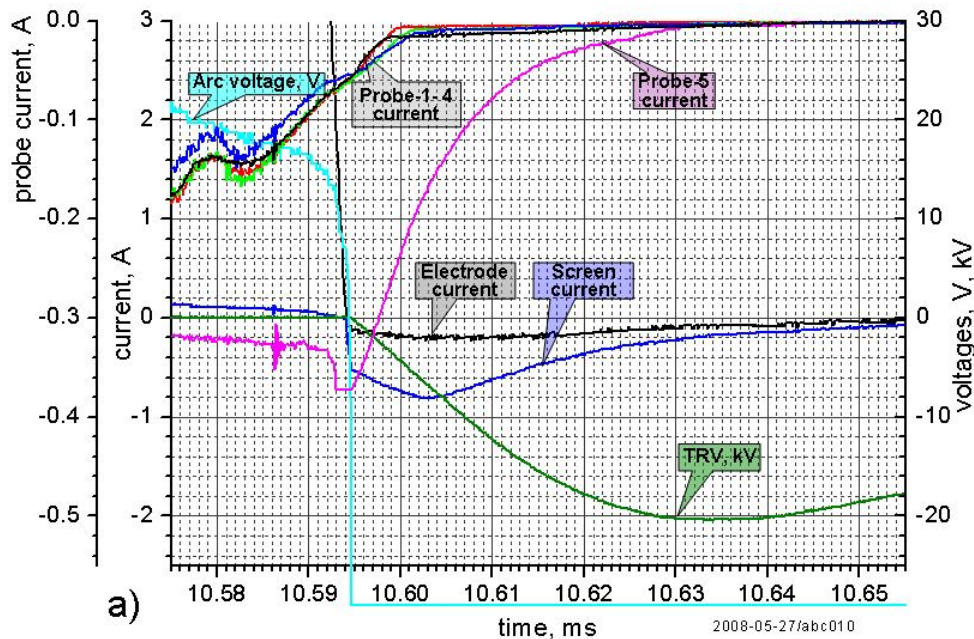
Рис. 11. Набор осциллограмм процесса (а) вблизи нуля тока дуги и соответствующее изображение (б), полученное за 950 мкс до нуля тока. Дуга без экрана с током 10 кА в амплитуде. Питание зондов +35 В.

3.2.1.2. Результаты экспериментов по динамике слоя без экрана вокруг промежутка

На рис. 11 представлен типичный набор осциллограмм и соответствующее изображение разрядного промежутка при амплитудном значении тока 10 кА, соответствующие случаю отсутствия большого экрана. Следует отметить, что здесь и далее была произведена коррекция электродного тока и общего ПДТ, которая заключалась в вычитании тока

через делитель напряжения. Амплитуда общего ПДТ была $1.4 \div 1.8$ А. Как правило, доля ПДТ, приходящаяся на открытую поверхность электрода, была в $3 \div 4$ раза меньше по сравнению с током на малый экран (примерно $0.3 \div 0.4$ А на электрод и $1.2 \div 1.4$ А на малый экран).

Нестабильность ПДТ от измерения к измерению усиливалась с увеличением амплитуды тока. При амплитуде тока 8 кА амплитуда ПДТ была близка к 1 А (примерно 0.2 А на электрод, 0.8 А – на малый экран, см. рис. 12). При амплитуде тока 12 кА амплитуда ПДТ составляла обычно более 1.8 А ($0.35 \div 0.6$ А на электрод, 1.4 А и более – на малый экран, см. два типичных случая на рис. 13). Прослеживалась корреляция между яркостью канала разряда на фотографиях и величиной ПДТ. При ПДТ на электрод выше 0.5 А вероятность пробоя после НТ резко увеличивалась.



(б)

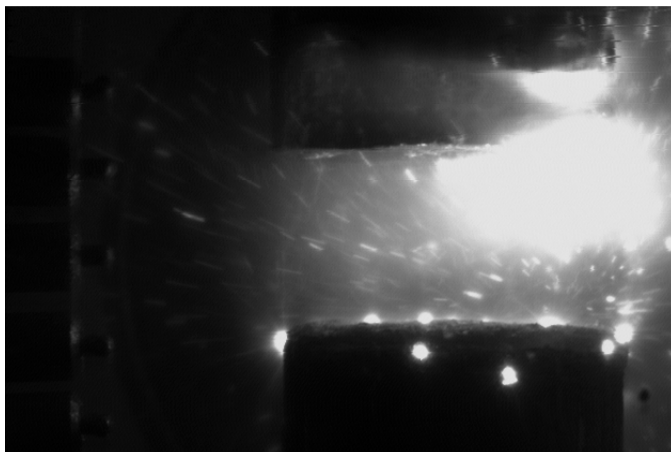
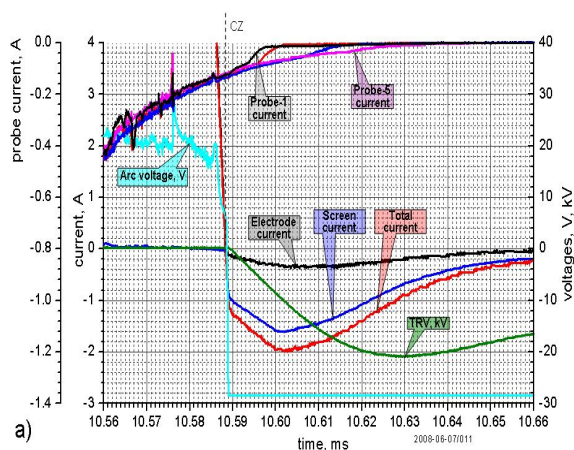
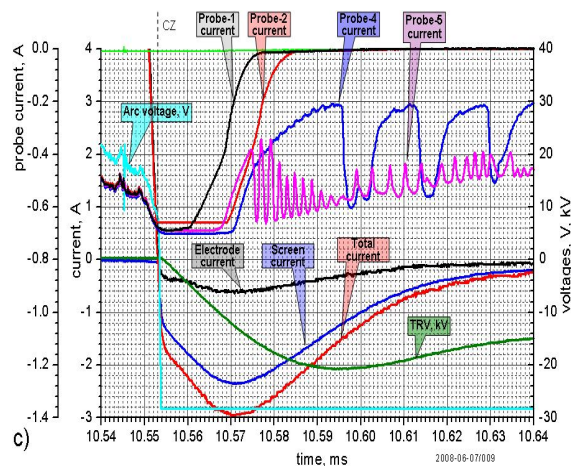


Рис. 12. Набор осциллограмм процесса (а) вблизи нуля тока дуги и соответствующее изображение (б), полученное за 950 мкс до нуля тока. Дуга без экрана с током 10 кА в амплитуде. Питание зондов +30 В кс.

Времена обрыва зондового тока измерялись так же, как в предыдущей работе. Обрывом тока считался момент спада тока до значения, соответствующего половине тока, характерного для начала его срыва, как проиллюстрировано на рис. 11,а. Следует отметить, что в отличие от случая Cu-Cr электродов, момент начала спада тока был выражен значительно слабее. Особенно это касается зондов 4 и 5. В связи с этим надежность измерения времен обрыва тока на эти зонды была несколько хуже.



(а)



(б)

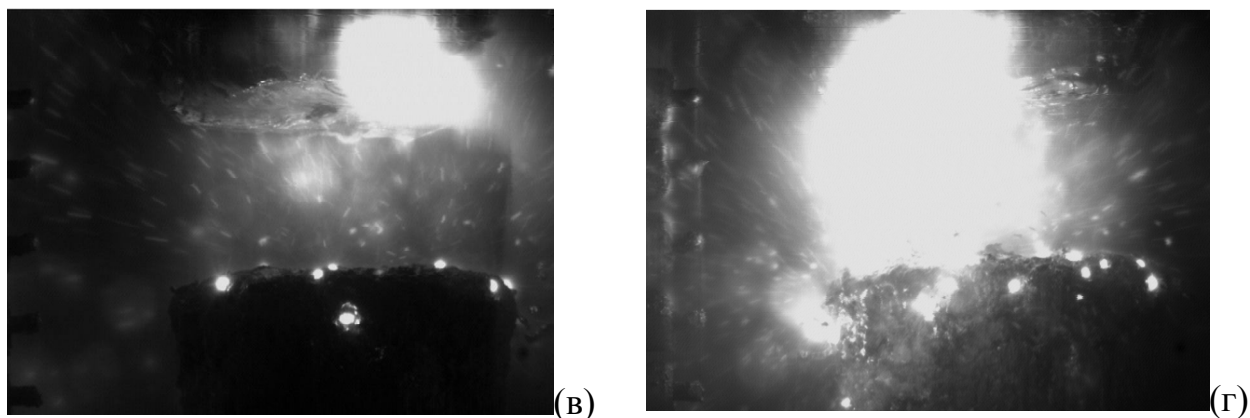


Рис. 13. Набор осциллограмм процесса (а, в) вблизи нуля тока дуги и соответствующее изображение (б, г), полученное за 950 мкс до нуля тока. Дуга без экрана с током 12 кА в амплитуде. Питание зондов +45 В.

Амплитуды ПДТ (и соответствующие значения концентрации плазмы) проявляют высокую степень нестабильности от импульса к импульсу. Иногда токи на зонды падали в значительной степени до НТ, при этом токи на все зонды падали одинаковым образом. Это означает, что концентрация плазмы столь низка, что зонды уже не ведут себя как одиночные. Вероятность таких падений концентрации плазмы увеличивается с увеличением x координаты. Такие измерения были исключены из статистики.

При проведении экспериментов при амплитуде тока дуги 8 кА произошло закорачивание зонда 5 на землю (пример на рис. 14), что проявило себя в виде аномально большого тока в цепи зонда. В дальнейшем данный зонд не использовался в эксперименте вплоть до открытия камеры и обслуживания зондов. Если закорачивание зонда происходило не напротив промежутка, то измерения продолжались.

Аномально большой ток в цепи зондов иногда наблюдался вследствие случайных пробоев между зондом и металлизированной поверхностью керамической трубки (см. рис. 13,в, зонды 4 и 5). Вероятность таких пробоев повышалась с ростом тока дуги и в тех случаях, когда канал разряда локализован на стороне электродов, обращенной к зондам. Одной из

наиболее вероятных причин таких пробоев могут быть попадания капель. Если в измерении возникал аномальный ток в цепи зондов, расположенных напротив промежутка, то такое измерение не участвовало в статистике.

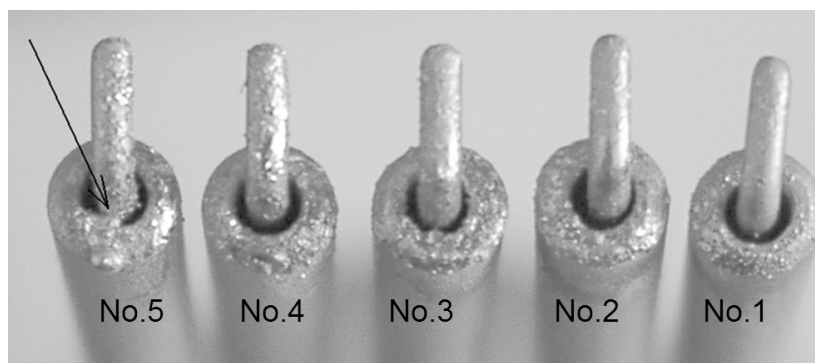


Рис. 14. Зонды после проведения измерений. Зонд №5 признан вышедшим из строя ввиду короткого замыкания между электродом и экраном (отмечено стрелкой).

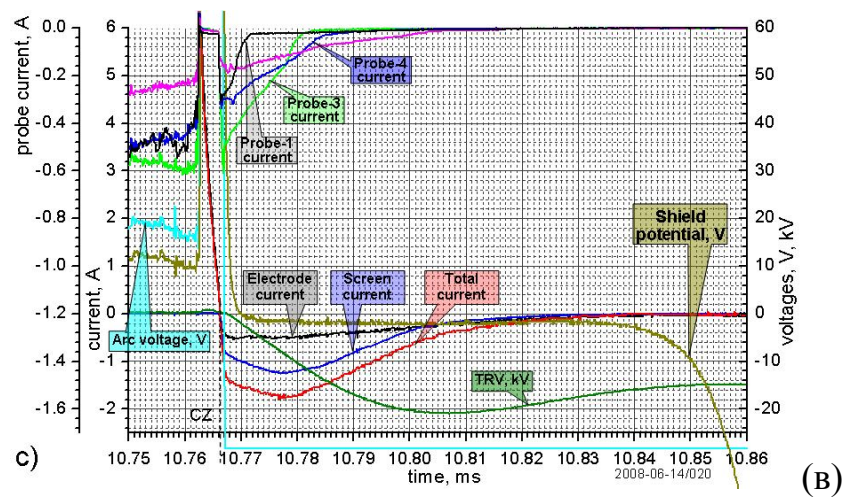
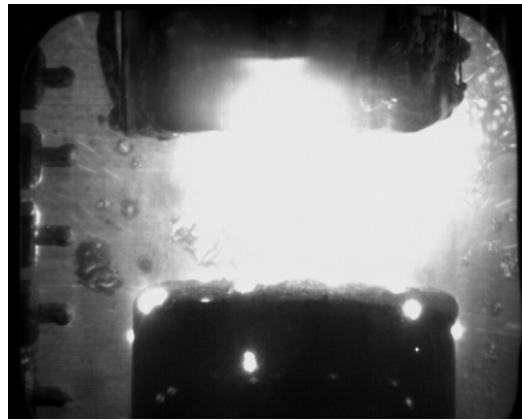
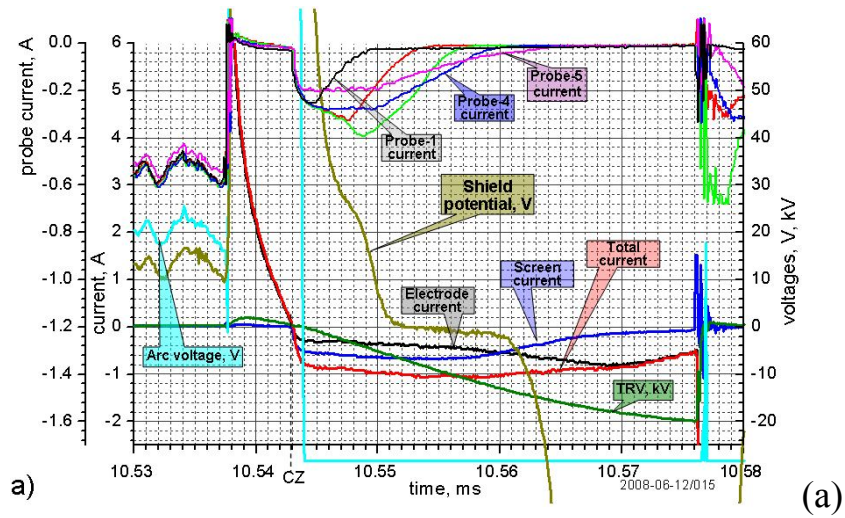
Величина зондовых токов сильно зависела от положения горячего пятна на верхнем электроде (см. рис. 13,а,б и 13,в,г). В связи с этим положение канала разряда перед НТ заносилось в таблицу результатов. Кроме того, наблюдалась корреляция величины зондовых токов и ПДТ (это видно на том же рисунке).

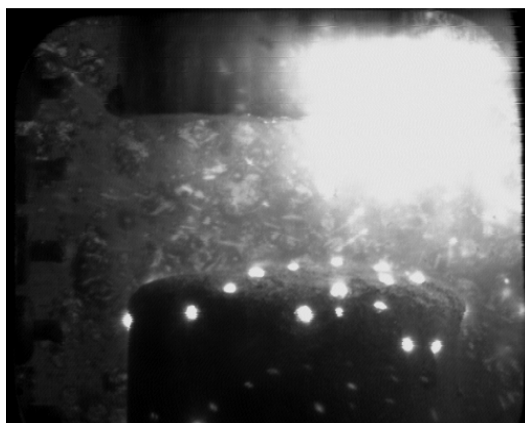
Исходные данные, используемые для восстановления динамики слоя, и графики изолиний времени полуоткрытия зондов приведены в Приложении М1 для амплитуды тока дуги 8 кА, 2 для 10 кА и 3 для 12 кА.

3.2.1.3. Результаты экспериментов по динамике слоя с экраном, находящимся под плавающим потенциалом

При наличии большого экрана под плавающим потенциалом потенциал экрана измеряется резистивным делителем. Сопротивление делителя было достаточно велико для выполнения условия плавания в плазме после НТ. При этом постоянная времени делителя была не хуже 200 нс. Типичные

наборы осциллограмм с соответствующими изображениями представлены на рис. 15 для амплитуды тока дуги 8 (а, б) и 10 кА (в, г).





(г)

Рис. 15. Набор осциллограмм (а, в) вблизи нуля тока и соответствующие им изображения (б, г), полученные за 950 мкс до нуля тока дуги с экраном под плавающим потенциалом. Амплитуда тока дуги 8 кА (а, б) и 10 кА (в, г). Питание зондов +50 В.

В течение горения дуги потенциал экрана следует за напряжением горения дуги, оставаясь на $6 \div 12$ В ниже напряжения горения дуги. В процессе всплеска напряжения горения дуги перед обрывом тока потенциал экрана также испытывает всплеск. Такое поведение отражает потенциал плавления в плазме дуги. При переходе напряжения дуги через ноль потенциал экрана снижается до величины $-(2 \div 4)$ В с некоторым запаздыванием (обычно $1 \div 5$ мкс). Это запаздывание существенно превышает аппаратное время делителя и коррелирует с изменениями зондового тока. Через некоторое время после прекращения зондового тока потенциал экрана резко снижется, становясь ниже -80 В. По предварительным наблюдениям данное время тем меньше, чем выше ПДТ в цепи электрода. По-видимому, причиной резкого снижения является эмиссия высокоэнергетических электронов ПВН катодом.

Каких либо ярко выраженных особенностей ПДТ при наличии плавающего экрана по сравнению с его отсутствием не наблюдалось. Типичные величины ПДТ и их длительность были приблизительно те же. Критическим для развития обратного пробоя был уровень ПДТ в цепи ПВН

катода $0.5 \div 0.6$ А (случай развития пробоя, нетипичный для амплитуды тока дуги 8 кА, можно видеть на рис. 15,а,б).

При токе 12 кА стабильно от импульса к импульсу происходил обратный пробой за времена, при которых токи зондов не успевали оборваться. Поэтому времена полуоткрытия зондов не определены для этого случая. Пример поведения ПДТ при этом приведен на рис. 16.

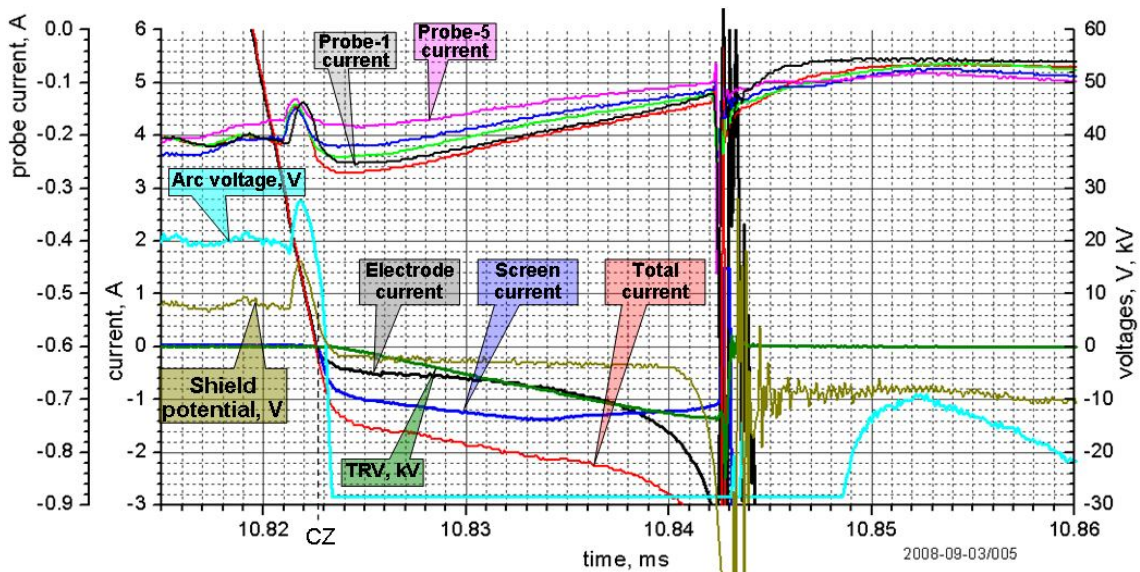


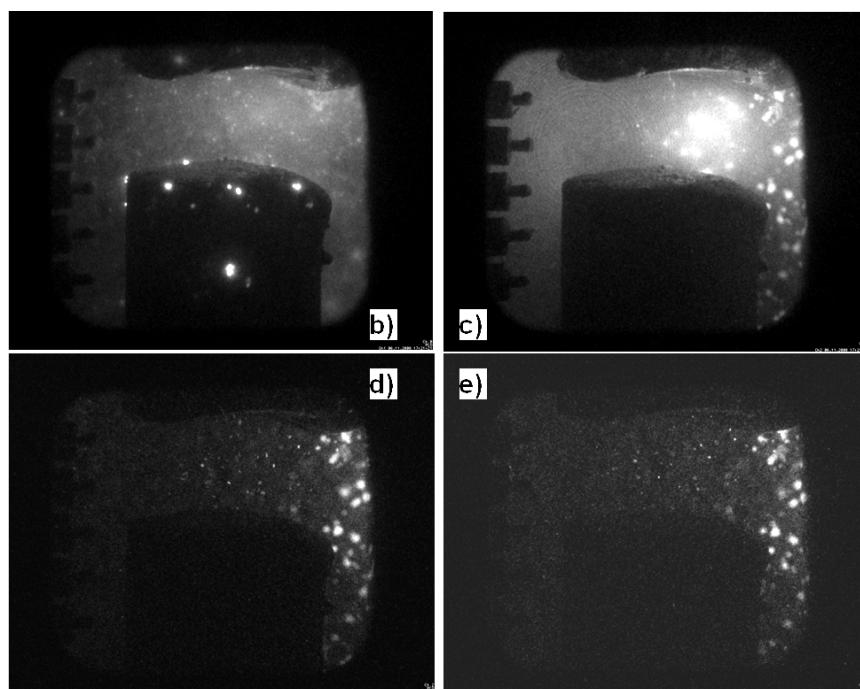
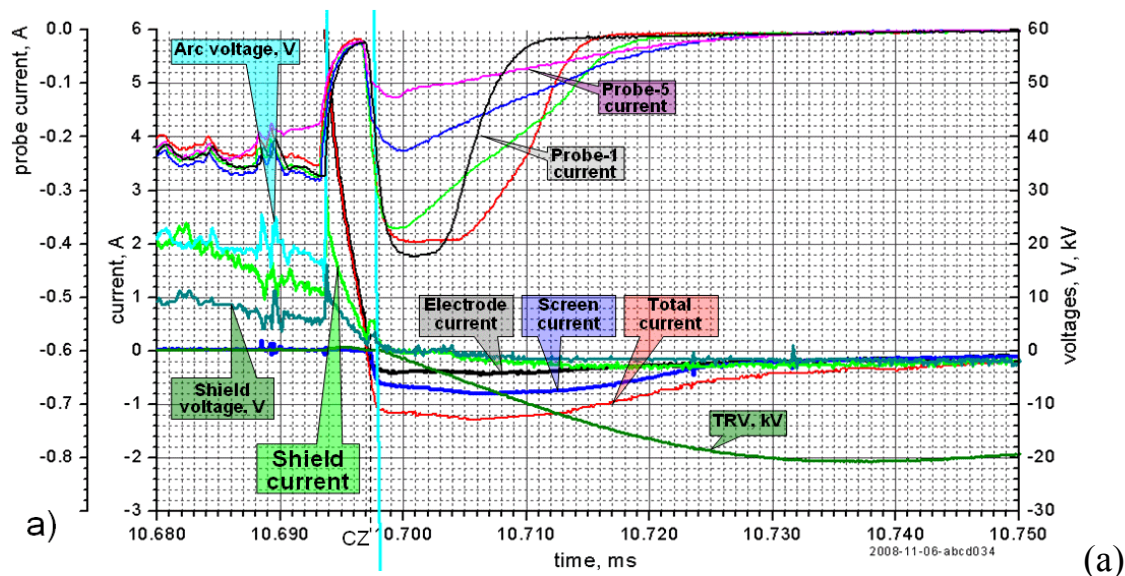
Рис. 16. Набор осциллограмм вблизи НТ при плавающем потенциале экрана. Ток дуги 12 кА в амплитуде. Питание зондов +20 В.

Исходные данные, используемые для восстановления динамики слоя, и графики изолиний времени полуоткрытия зондов приведены в Приложении М4 для амплитуды тока дуги 8 кА и 5 для 10 кА.

3.2.1.4. Результаты экспериментов по динамике слоя с экраном, находящимся под потенциалом земли

В данной экспериментальной серии большой экран был соединен с заземленным нижним электродом через резистор $R_{10} = 4$ Ом. В этих условиях измерение потенциала этого электрода, т.е. падения напряжения на резисторе, несло информацию о токе на большой экран. Наборы

осциллограмм, включая потенциал большого экрана и ток, измеренный поясом Роговского G4, приведены на рис. 17 для случая амплитуды тока дуги 10 кА и на рис. 18 для 8 кА. На этих же рисунках приведены четырехкадровые серии фотографий разрядного промежутка в различные моменты времени (здесь и далее использовалась 4-канальная камера).



(б)

Рис. 17. Набор осциллограмм вблизи НТ (а) при заземлённом экране. Амплитуда тока дуги 10 кА, питание зондов +30 В, и изображения (б), полученные за 600 мкс до НТ (б), 10 мкс до НТ (с), 40 мкс после НТ (д) и 190 мкс после НТ (е).

Общий ПДТ в цепи верхних электродов составлял обычно $1.1 \div 2$ А ($0.4 \div 0.7$ А на электрод, $0.6 \div 1.2$ А на малый экран) при амплитуде тока дуги 10 кА, и $0.9 \div 1.4$ А ($0.2 \div 0.5$ А на электрод, $0.7 \div 0.9$ А на малый экран) при амплитуде дугового тока 8 кА. По сравнению со случаями других потенциалов большого экрана в данном случае несколько увеличилось отношение ток электрода к току на малый экран до величины $1/2 \div 1/3$. Причем, произошло это в большей степени за счет уменьшения тока на малый экран.

Ток в цепи большого экрана был относительно невелик, что легко объясняется удаленностью его от промежутка и, главным образом, наличием ограничивающего резистора в его цепи. Необходимо отметить особенность в поведении тока в цепи большого экрана на этапе непосредственно перед НТ, в период положительного (прямого всплеска напряжения). На этом отрезке ток большого экрана составляет до $40 \div 50\%$ по отношению к току дуги (см. рис.17.). Данная величина в несколько раз превосходит известную долю ионного тока в токе дуги (10 %), измеренную Кимблином [8]. Столь высокие ионные токи на большой экран означают, что в период всплеска напряжения происходит соответствующий всплеск потенциала плазмы и интенсивная эрозия плазмы на границе с поверхностью большого экрана (и, разумеется, с поверхностью нижнего электрода).

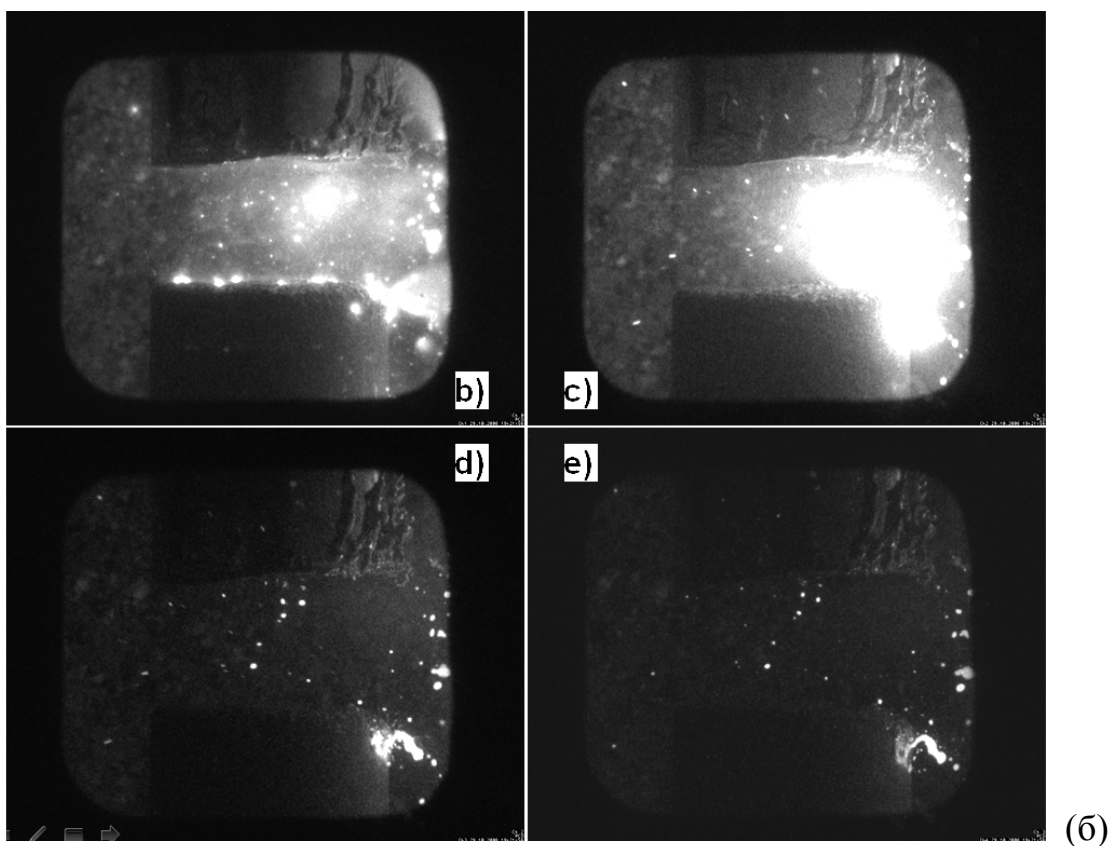
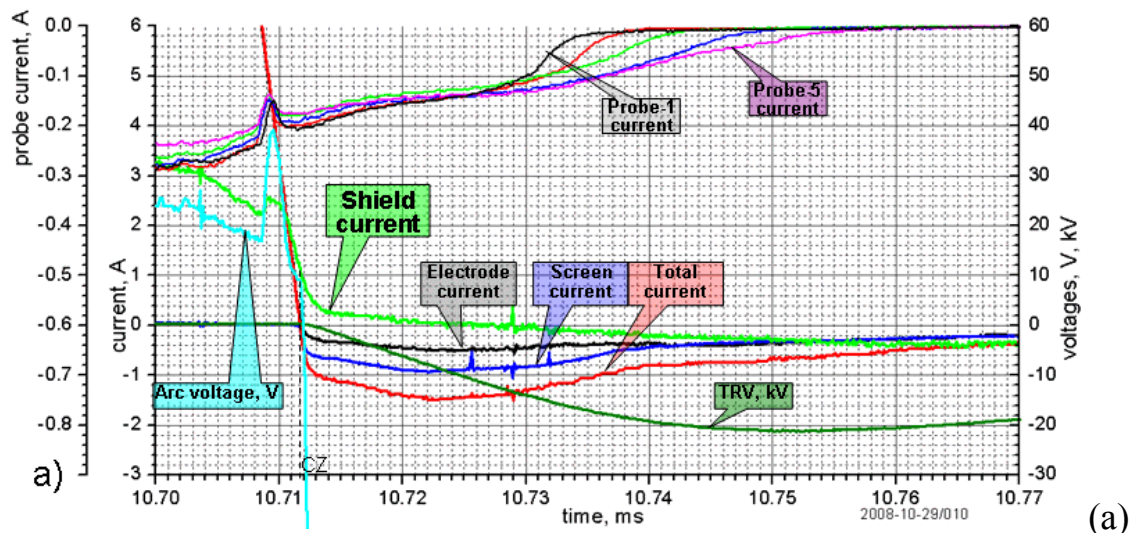
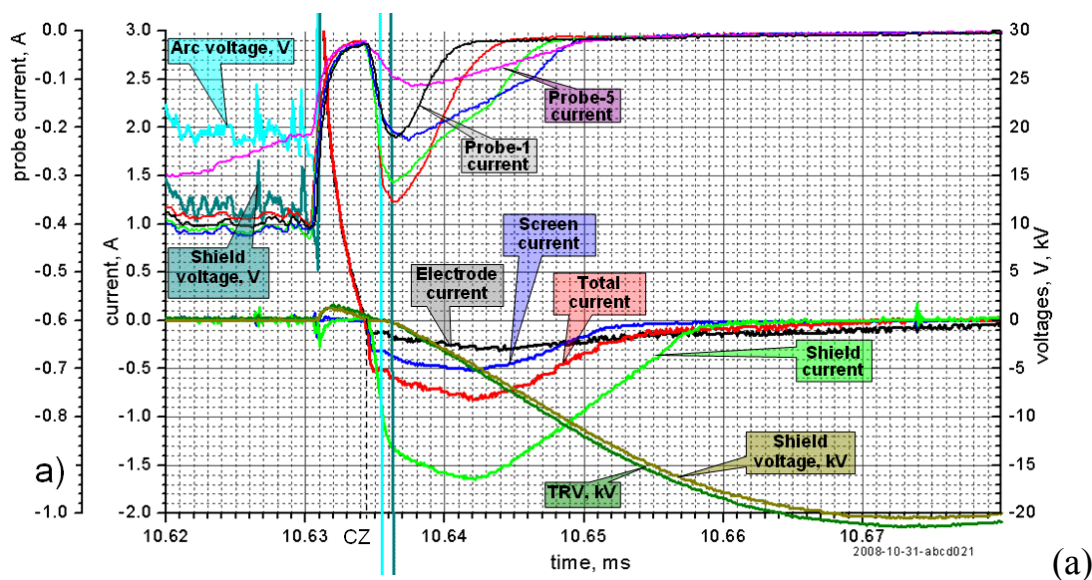


Рис. 18. Набор осциллограмм вблизи НТ (а) при заземлённом экране. Амплитуда тока дуги 8 кА, питание зондов +40 В, и изображения (б), полученные за 600 мкс до НТ (б), 10 мкс до НТ (с), 40 мкс после НТ (д) и 190 мкс после НТ (е).

Исходные данные, используемые для восстановления динамики слоя, и графики изолиний времени полуоткрытия зондов приведены в Приложении М6 для амплитуды тока дуги 8 кА и М7 для 10 кА.

3.2.1.5. Результаты экспериментов по динамике слоя с экраном, находящимся под ПВН потенциалом

В данной экспериментальной серии большой экран был соединен с потенциальным выходом формирователя ПВН через резистор $R_9 = 300 \text{ Ом}$. Измерялся потенциал большого экрана как на стадии горения дуги в диапазоне $-60 \div +60$, так и диапазоне киловольт, и ток на большой экран вблизи НТ. Наборы осциллограмм и фотографий приведены на рис. 19 и 20 для случая амплитуды тока дуги 8 кА, и на рис. 21 для случая амплитуды тока дуги 10 кА.



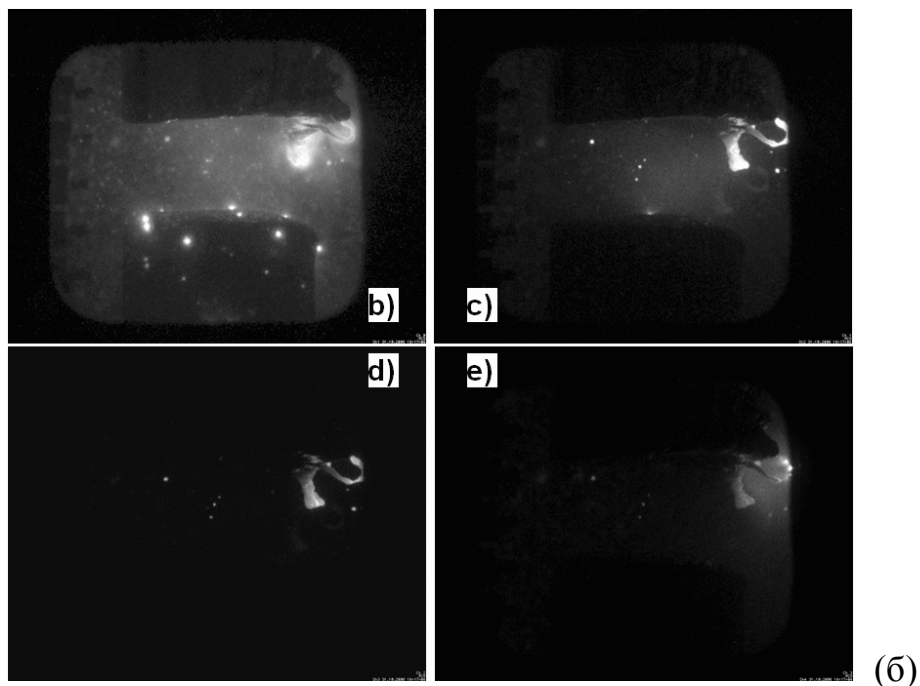


Рис. 19. Набор осциллограмм вблизи НТ (а) при экране под ПВН. Амплитуда тока дуги 8 кА, питание зондов +40 В, и изображения (б), полученные за 600 мкс до НТ (б), 10 мкс до НТ (с), 40 мкс после НТ 40 мкс после НТ (d) и 190 мкс после НТ (e).

ПДТ токи на верхний электрод и малый экран остались практически на прежнем уровне ($0.3 \div 0.4$ А на электрод и $0.5 \div 0.6$ А на малый экран при амплитуде тока дуги 8 кА, $0.3 \div 0.5$ А на электрод и $0.6 \div 1$ А на малый экран при амплитуде тока дуги 10 кА). ПДТ ток на большой экран составлял $1.5 \div 3$ А при амплитуде тока дуги 8 кА и мог превышать 5 А при амплитуде дугового тока 10 кА.

Исходные данные, используемые для восстановления динамики слоя, и графики изолиний времени полуоткрытия зондов приведены в Приложении М8 для амплитуды тока дуги 8 кА и М9 для 10 кА.

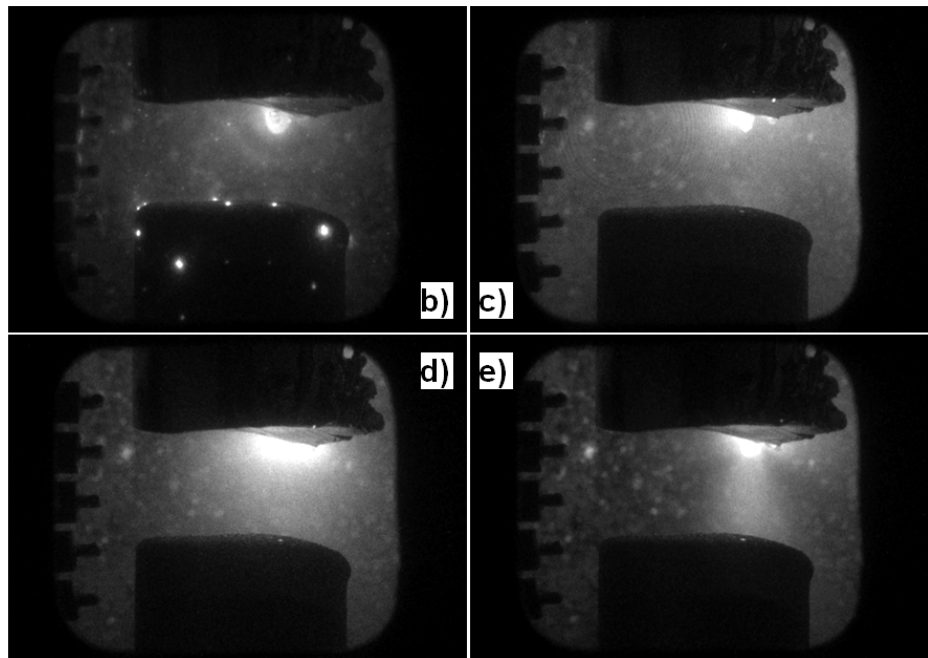
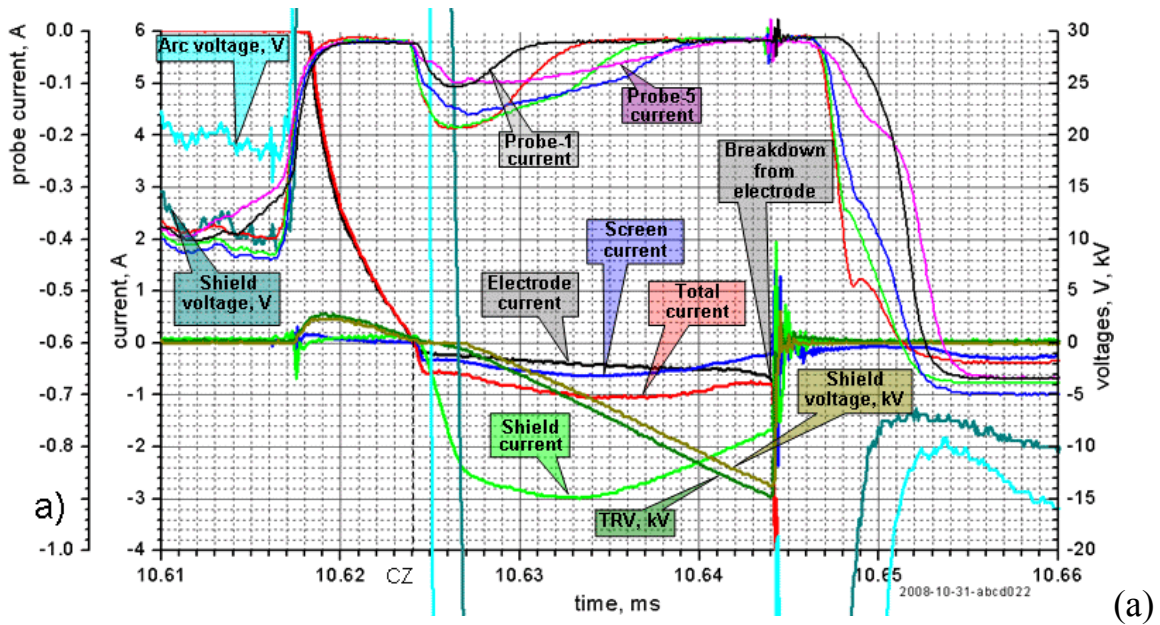


Рис. 20. Набор осциллограмм вблизи НТ (а) при экране под ПВН. Амплитуда тока дуги 8 кА, питание зондов +40 В, и изображения (б), полученные за 600 мкс до НТ (б), 10 мкс до НТ (с), 40 мкс после НТ (д) и 190 мкс после НТ (е).

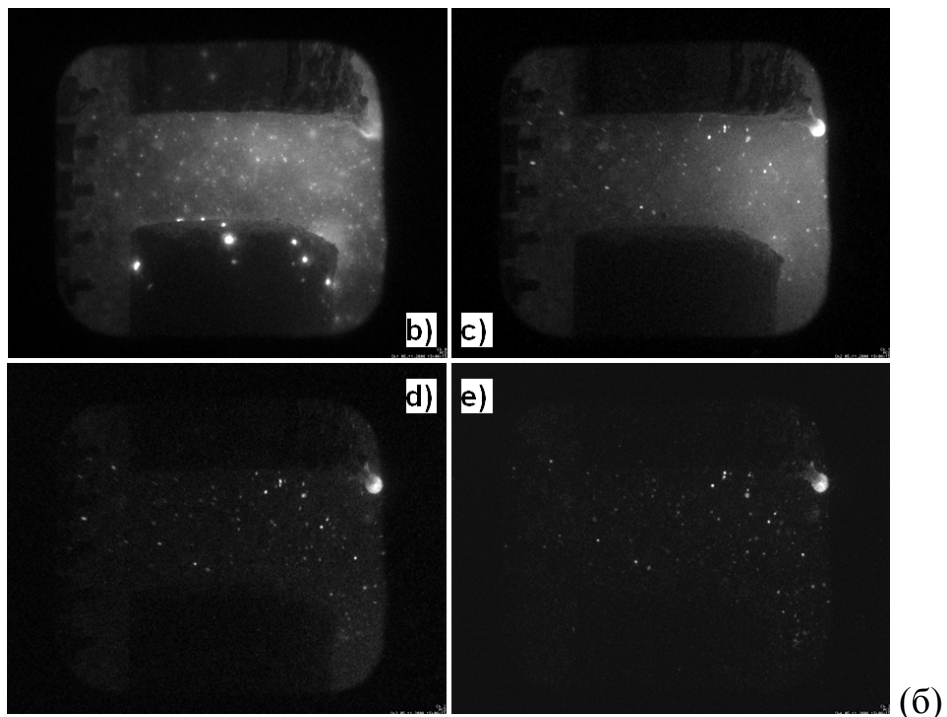
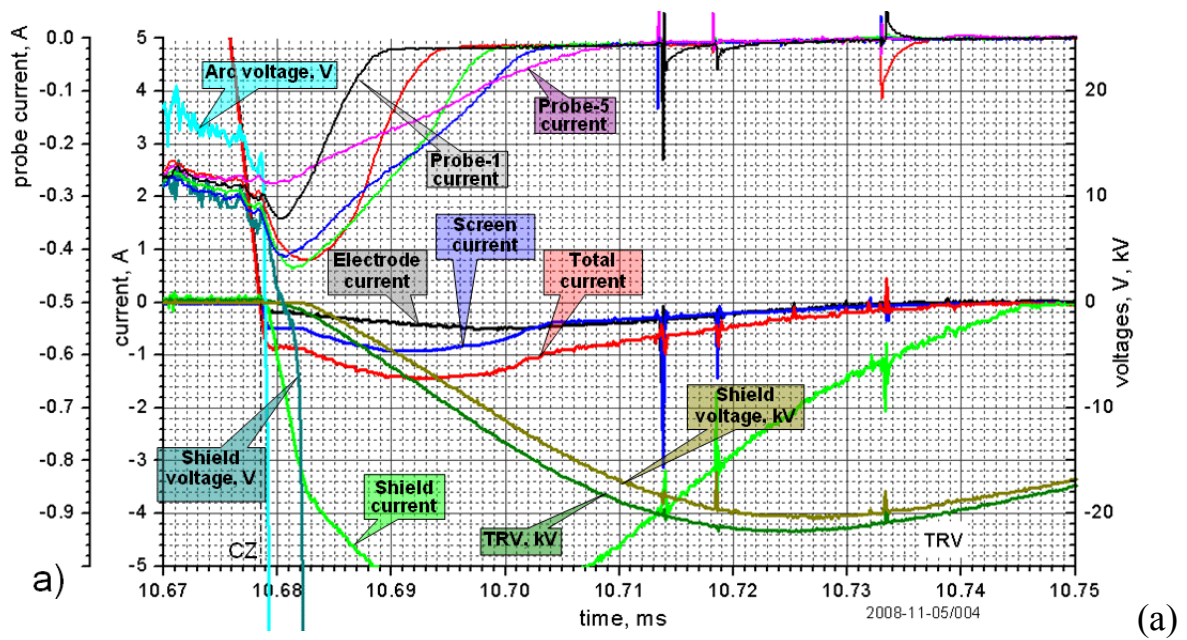


Рис. 21. Набор осциллограмм вблизи НТ (а) при экране под ПВН. Амплитуда тока дуги 10 кА, питание зондов +30 В, и изображения (б), полученные за 600 мкс до НТ (б), 10 мкс до НТ (с), 40 мкс после НТ (д) и 190 мкс после НТ (е).

3.2.2. Результаты экспериментов по динамике катодного слоя в нуле тока дуги с электродами из контактного материала $Cu_{0.75}Cr_{0.25}$

3.2.2.1. Общие условия экспериментов

В данной серии экспериментов устанавливались следующие параметры экспериментальной установки:

1. Неизменная скорость падения тока дуги вблизи момента НТ $1,93 \pm 0,2$ А/мкс.
2. Скорость роста ПВН 1,0 кВ/мкс при диаметре охранного экрана катода 30 мм и 0,4 кВ/мкс при диаметре охранного экрана катода 40 мм.

В целом параметры установки, использовавшиеся в сериях экспериментов с 1 кВ/мкс и 0,4 кВ/мкс, были подобны. Малые электроды из $Cu_{0.75}Cr_{0.25}$ использовались диаметром 20 мм. Также вокруг контактного промежутка использовался цилиндрический экран высотой 95 и внутренним диаметром 96 мм.

Основное различие экспериментальных серий заключалось в различной скорости нарастания ПВН. Различные скорости нарастания достигались изменением параметров элементов и соединений в электрической схеме 500 Гц генератора импульсных напряжений. Скорость нарастания ПВН в 1 кВ/мкс достигалась при $L_1=8,3$ мГн, $C_2=21$ нФ, $R_{12}=520$ Ом. Типичный набор осциллограмм тока и напряжения для этого случая приведен на рис. 22. Реализация скорости нарастания ПВН в 0,4 кВ/мкс описана в разделе 3.2.1. Типичный набор соответствующих осциллограмм приведен на рис. 23.

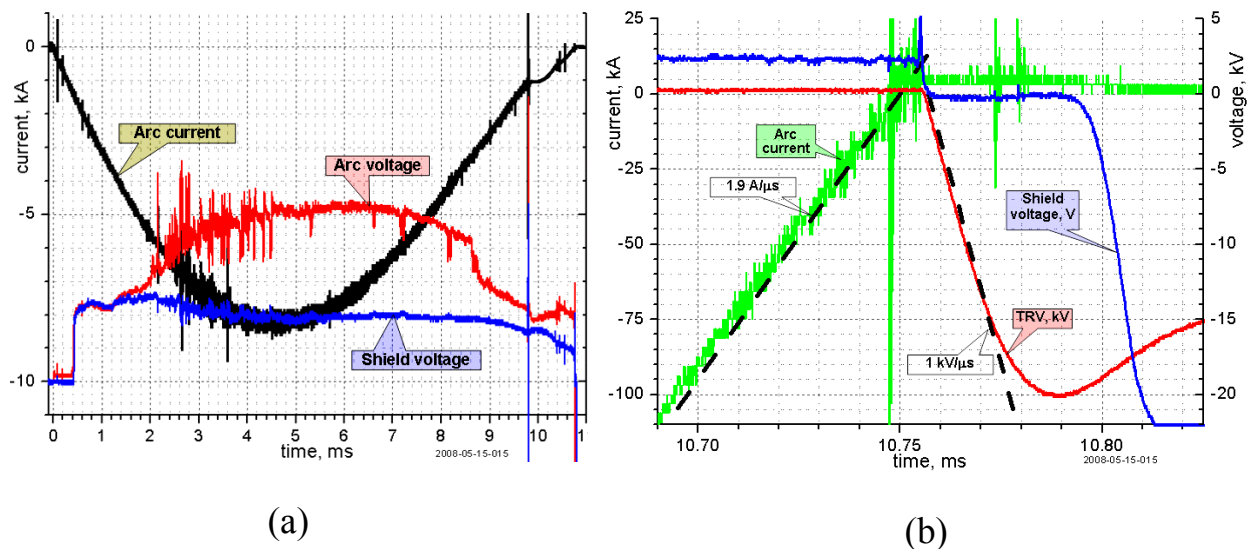


Рис. 22. Набор осциллограмм для дуги с экраном под плавающим потенциалом в течение горения дуги (а) и вблизи НТ (б) при скорости роста ПВН 1 кВ/мкс.

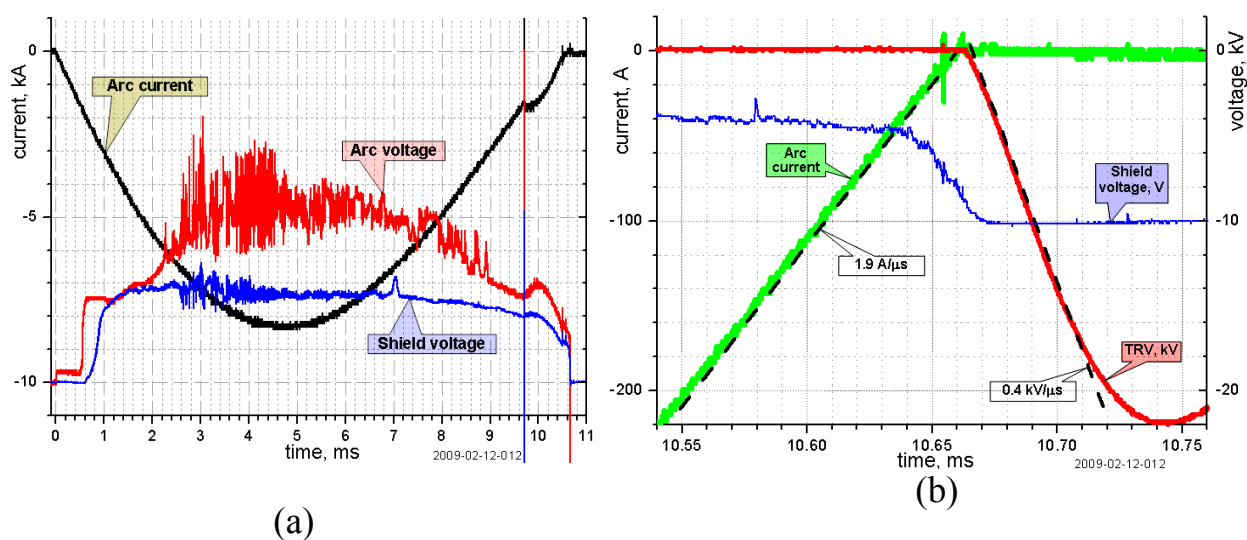


Рис. 23. Набор осциллограмм для дуги с экраном под потенциалом земли (через 4,25 Ом) в течение горения дуги (а) и вблизи НТ (б) при скорости роста ПВН 0,4 кВ/мкс.

Принимая во внимание опасность короткого замыкания электрода зонда на экран зонда, конструкция зондов была изменена, как показано на рис. 24. При этом собирающая площадь зонда подбиралась таким образом, чтобы оставаться без изменения относительно собирающей площади зонда в

предыдущих экспериментальных серия. Зонды новой конструкции действительно оказались более устойчивыми к забрызгиванию каплями жидкого металла при горении дуги.

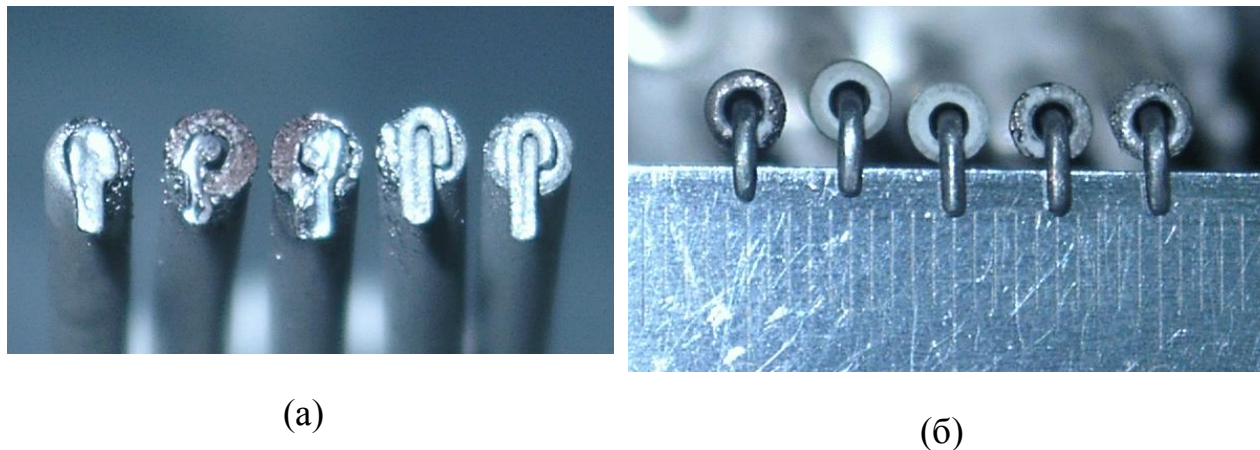


Рис. 24. Фотографии зондов модифицированной конструкции (а) после эксперимента и предыдущей конструкции (б) в исходном состоянии.

3.2.2.2. Динамика катодного слоя при скорости роста ПВН 1 кВ/мкс и незаземлённом экране

Данные экспериментальные серии выполнялись при амплитуде тока дуги 8 кА. Типичные осциллограммы вблизи НТ и экрана под плавающим потенциалом представлены на рис. 25 и для экрана под потенциалом ПВН на рис. 26. ПДТ имели небольшой разброс по амплитуде и длительности от импульса к импульсу. Уровни ПДТ составляли $0,17 \div 0,2$ А в цепи контактного электрода и $0,4 \div 0,5$ А на охранном экране катода. Измеренный общий ПДТ составлял $0,55 \div 0,65$ А. Значения ПДТ практически не зависели от способа включения общего экрана.

Потенциал экрана при его включении в цепь в режиме плавления приходил в момент НТ к уровню, близкому к нулевому, и оставался таким на протяжении $30 \div 50$ мкс. Затем потенциал экрана уходил в отрицательную область ниже $-80 \div -100$ В, и затем отрицательный потенциал экрана плавно

снижался по модулю с временным декрементом порядка 1 мс, составляя спустя 2 мс после НТ величину $-10 \div -50$ В.

Токи зондов имели обрыв, выраженный более резко по сравнению с таковым при использовании медных электродов. Обработанные данные по динамике катодного слоя представлены в Приложении МХ1 для экрана под плавающим потенциалом и в Приложении МХ2 для экрана под потенциалом ПВН. Заметим, что хотя распределения были получены с использованием измерений в 6-ти горизонтальных позициях зондов, максимальная горизонтальная позиция составляла лишь 24 мм, что не позволило выявить движение плазменной границы со стороны экрана при его подключении к источнику ПВН.

Фотографии разрядного промежутка имели сложную структуру свечения анодного пятна в период $950 \div 850$ мкс до НТ. Данное явление подробно обсуждалось в разделе 3.1 настоящего отчёта.

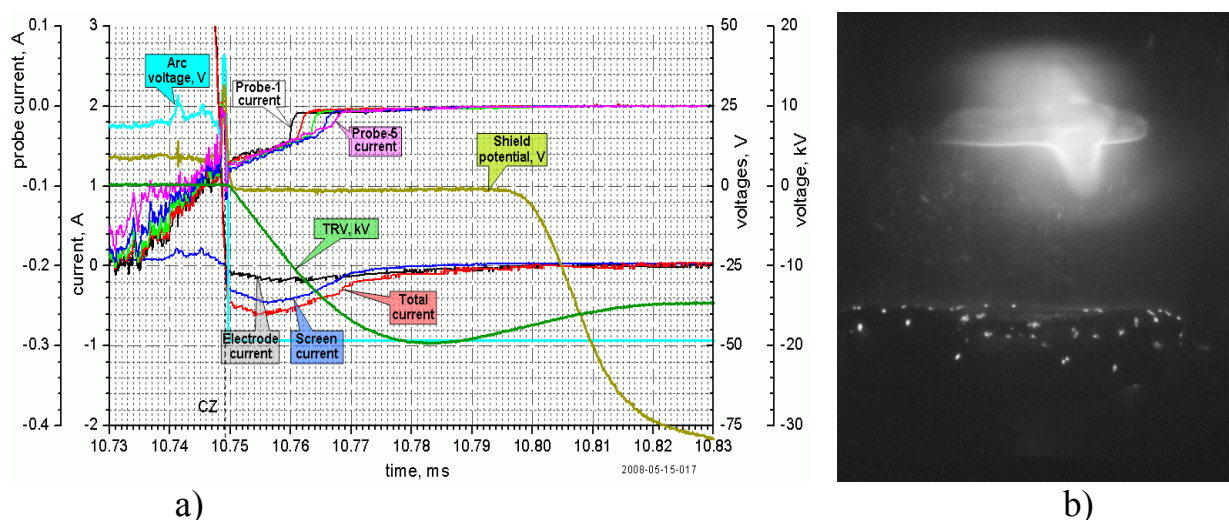


Рис. 25. Набор осциллограмм для дуги (8 кА) с экраном под плавающим потенциалом вблизи НТ (а) и фотография разрядного промежутка (б) в момент 950 мкс до НТ. Расстояние до зондов 24,19 мм.

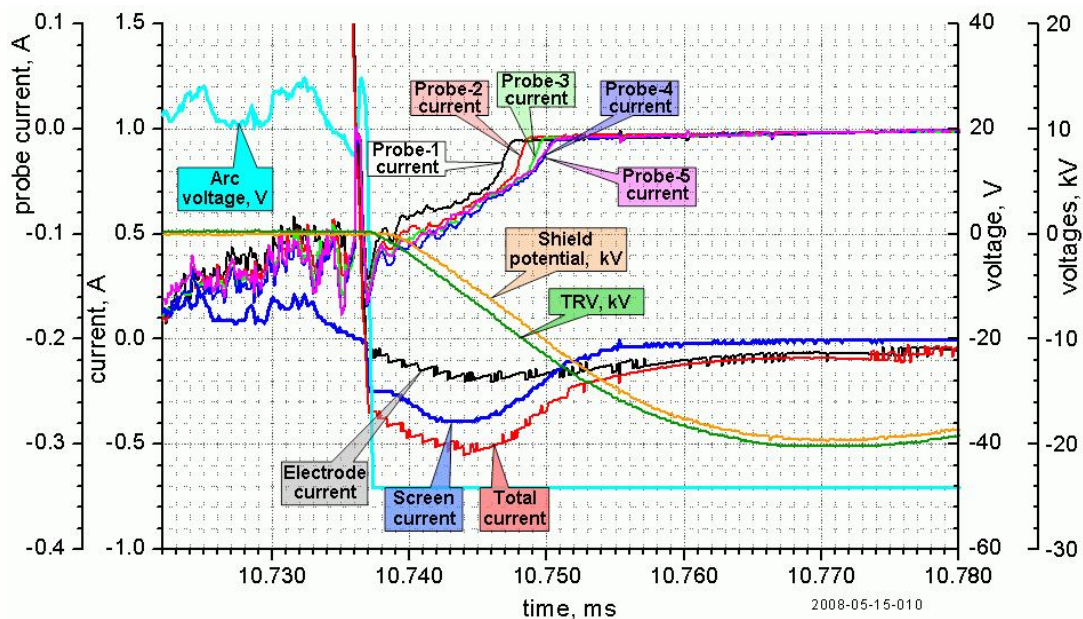


Рис. 26. Набор осциллограмм для дуги (10 кА) с экраном под плавающим потенциалом вблизи НТ. Расстояние до зондов 24,19 мм.

3.2.2.3. Динамика катодного слоя при скорости роста ПВН 0,4 кВ/мкс и экране под потенциалом ПВН

Осциллограммы напряжения дуги и потенциала экрана в течение дуги приведены на рис. 27 для случаев различных амплитуд токов. При различных подключениях экрана (ПВН через 75 Ом, заземление через 4,25 Ом) потенциал экрана близок к плавающему на протяжении сильноточной стадии горения дуги. С ростом амплитуды тока дуги с 8 до 15 кА напряжение горения дуги возрастает не более чем на 5 В (с 50 до 55 В). Потенциал экрана также практически не меняется.

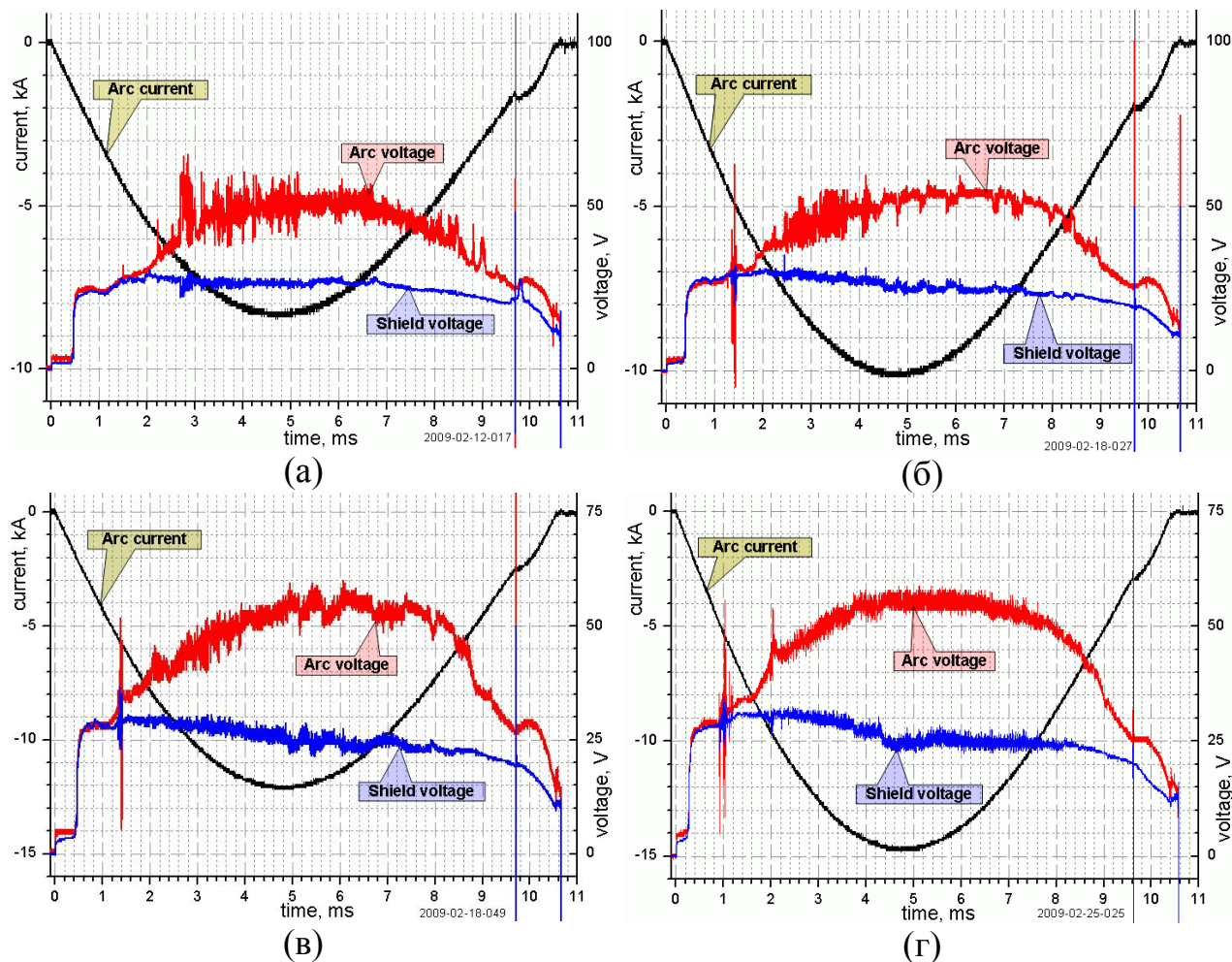


Рис. 27. Наборы осциллограмм при горении дуги при различных амплитудных значениях тока и экране, подключенном к источнику ПВН через 75 Ом.

Наборы осциллограмм вблизи НТ представлены на рисунках 28, 29, 30 для токов дуги амплитудой 10, 12 и 15 кА соответственно. На этих же рисунках представлены 4-кадровые серии фотографий для иллюстрации динамики свечения в разрядном промежутке.

Осциллограммы ПДТ имели небольшой разброс от импульса к импульсу. Амплитуды ПДТ, усредненные по всем импульсам серий с токами 8÷15 кА представлены в таблице 4. Уровни ПДТ даже для наиболее сильноточных режимов были заметно ниже того, что наблюдалось в случае с медными электродами. Кроме того, оказалось, что с ростом амплитуда тока разряда с 8 до 15 кА, только ПДТ на охранный экран катода растет приблизительно

линейно с током дуги, а вот уровни ПДТ на контактный электрод и экран практически не увеличиваются.

Таблица 4. Амплитудные значения ПДТ, усреднённые по числу импульсов дуги для всех положений зондов.

Ток дуги, кА	8	10	12	15
ПДТ на катод, А	0,198	0,202	0,204	0,197
Среднеквадратичное отклонение, А	0,016	0,006	0,008	0,013
ПДТ на охранный экран, А	0,213	0,282 0,029	0,357	0,404
Среднеквадратичное отклонение, А	0,035		0,037	0,033
ПДТ на экран, А	1,1843	1,447	1,888	1,853
Среднеквадратичное отклонение, А	0,144	0,129	0,190	0,194

Еще одним отличием поведения ПДТ от такового с медными электродами явилось отсутствие каких либо особенностей на осциллограммах ПДТ, даже при наличии обратного пробоя промежутка. Не было замечено ни спонтанного возрастания ПДТ, подобного тем, которые часто предшествуют пробую при использовании медных электродов. Зондовые токи имели явно выраженные обрывы. Результаты обработки данных представлены в Приложении МХ4 для тока амплитудой 8 кА, МХ6 для 10 кА, МХ7 для 12 кА и МХ9 для 15 кА.

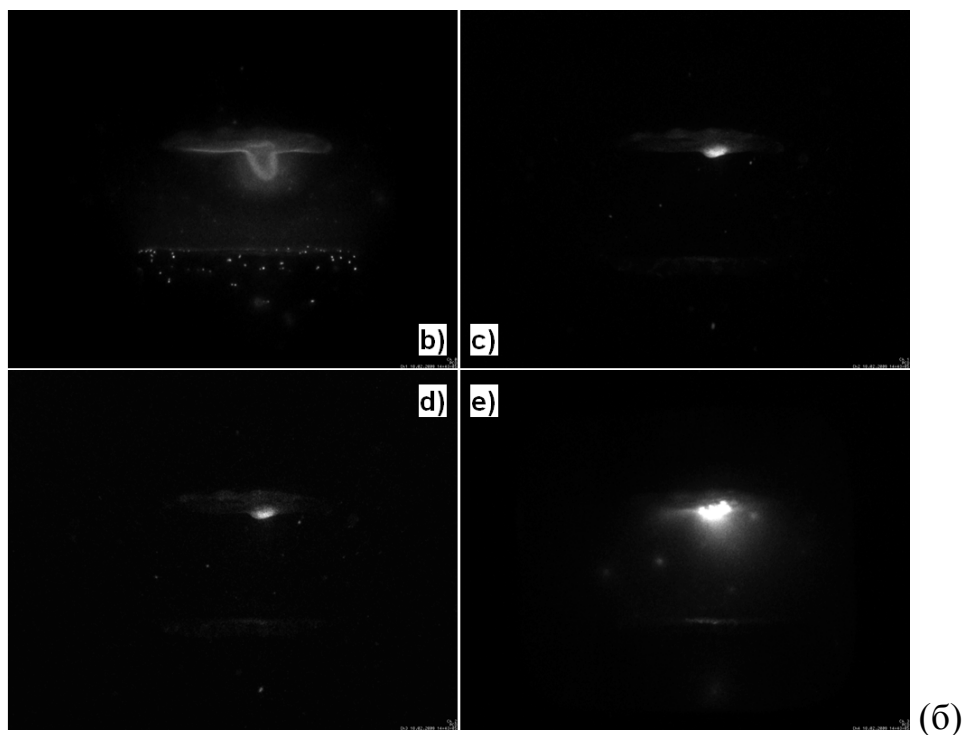
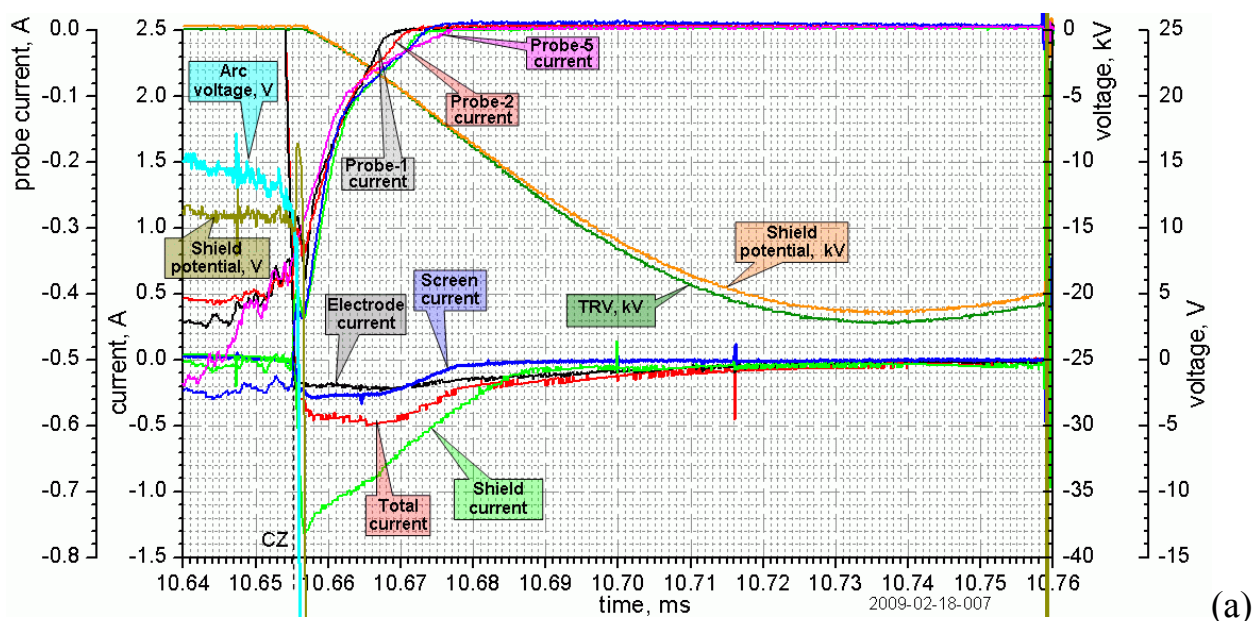


Рис. 28. Набор осциллограмм вблизи НТ (а) в случае экрана под потенциалом ПВН. Ток дуги 10 кА, питание зондов +40 В, положение зондов 10 мм, изображения (б) получены в моменты 605 мкс до НТ (б), за 5 мкс до НТ (с), 45 мкс после НТ (д) и 195 мкс после НТ (е).

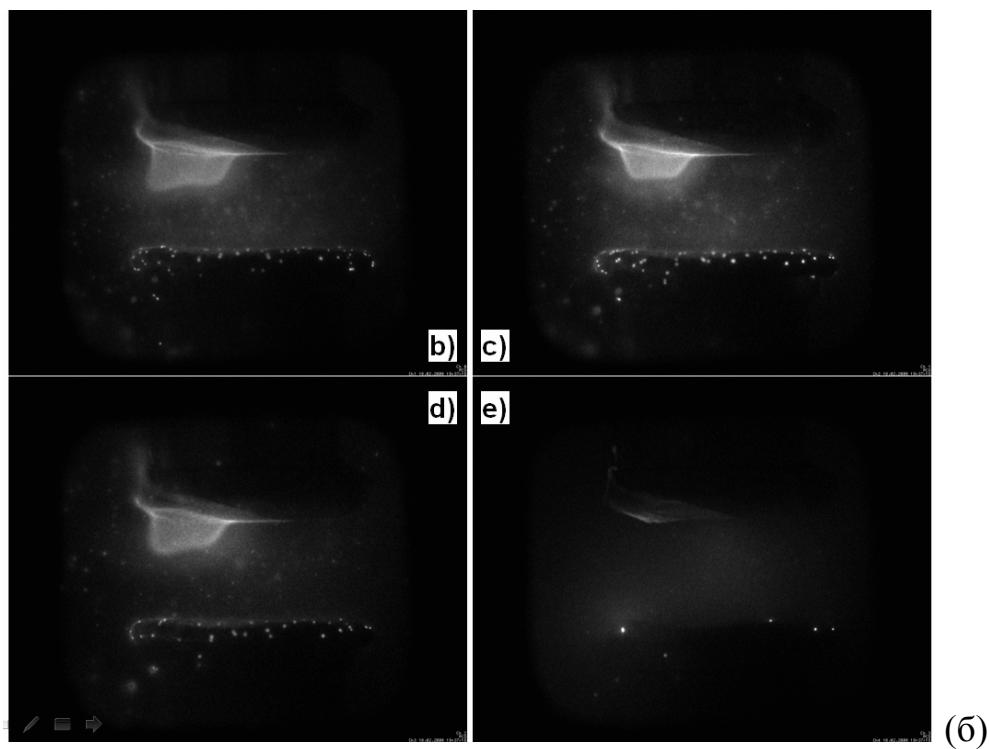
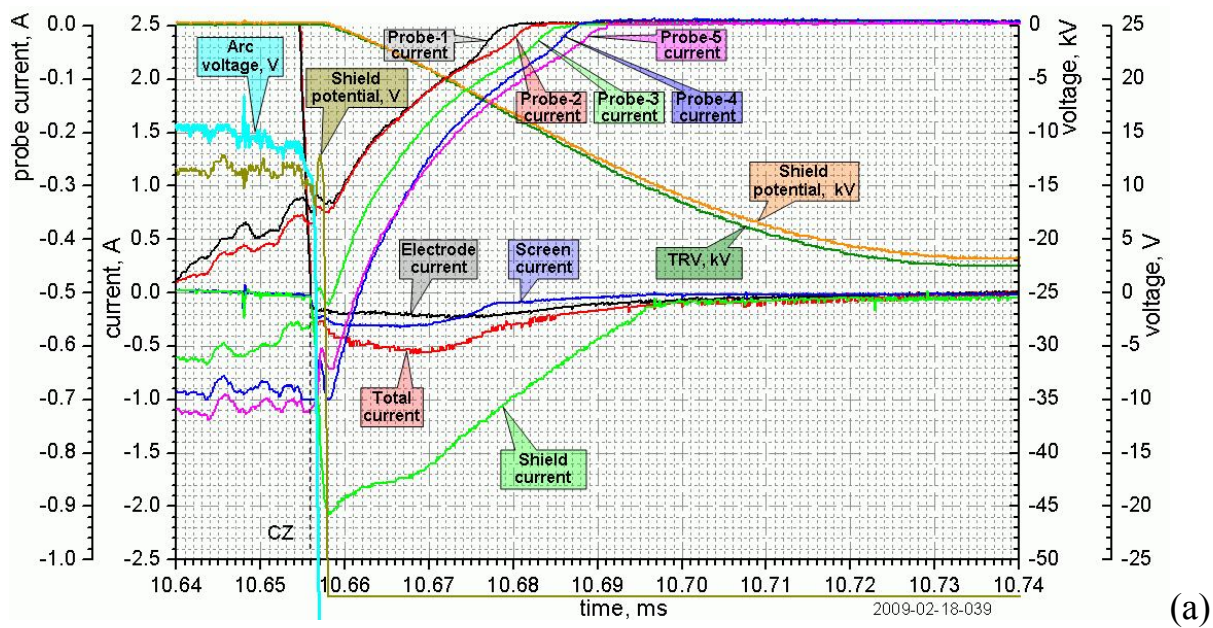


Рис. 29. Набор осциллограмм вблизи НТ (а) в случае экрана под потенциалом ПВН. Ток дуги 12 кА, питание зондов +40 В, положение зондов 17,5 мм, изображения (б) получены в моменты 605 мкс до НТ (б), за 5 мкс до НТ (с), 45 мкс после НТ (д) и 195 мкс после НТ (е).

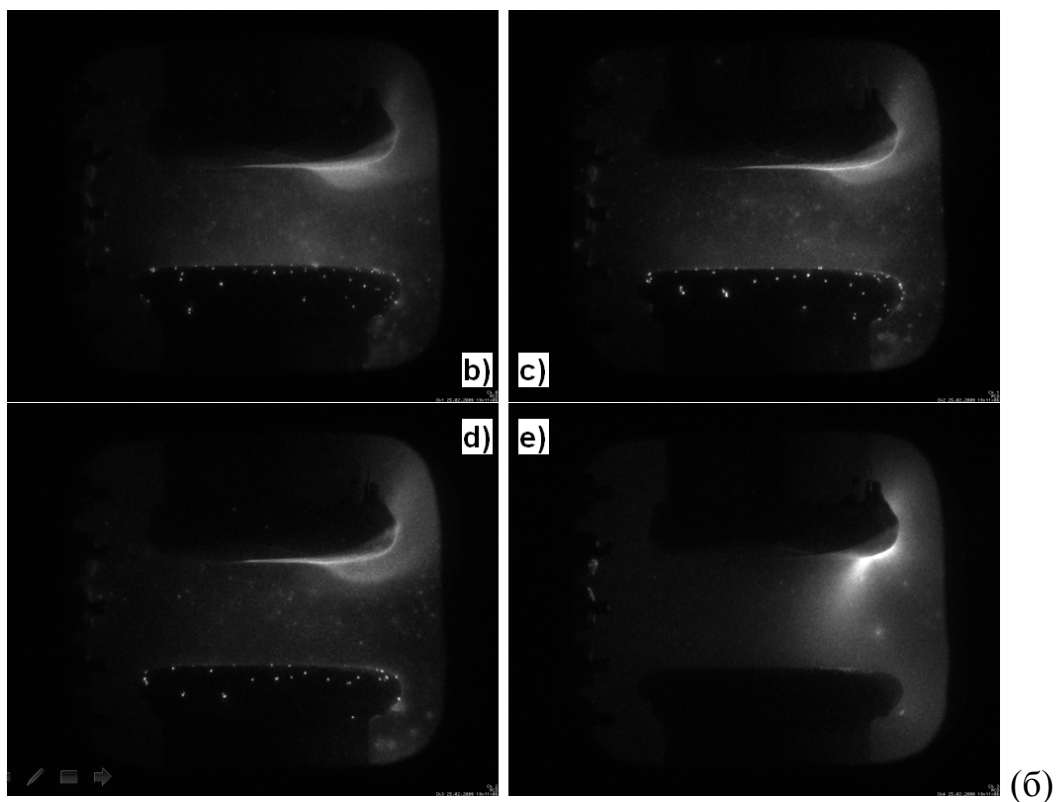
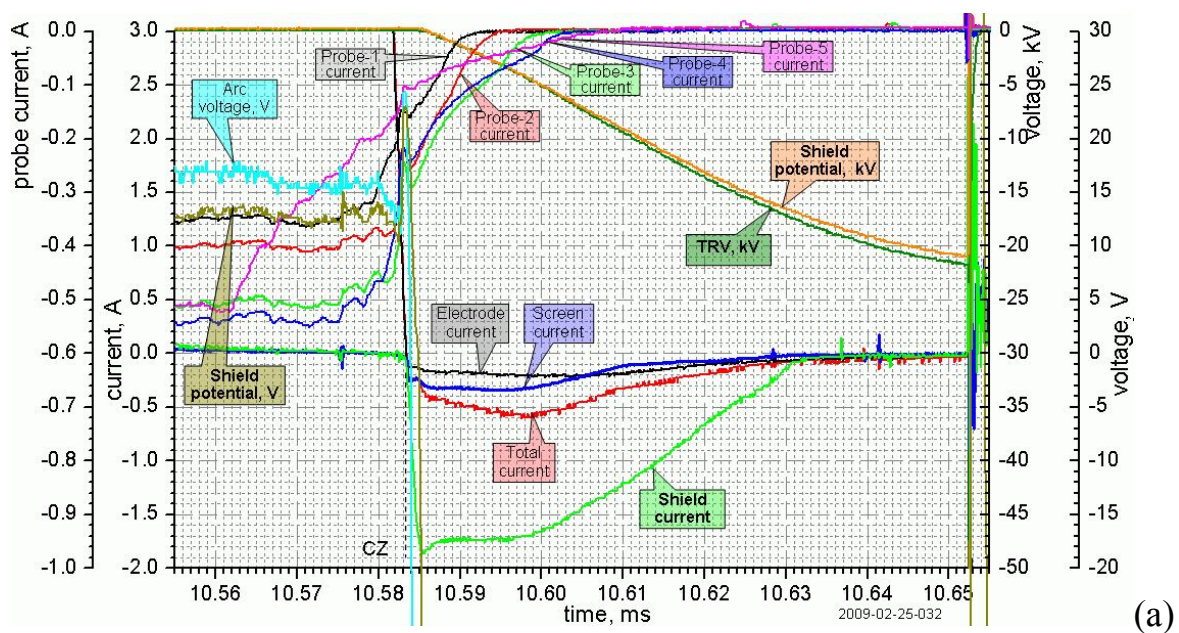


Рис. 30. Набор осциллограмм вблизи НТ (а) в случае экрана под потенциалом ПВН. Ток дуги 15 кА, питание зондов +40 В, положение зондов 3,5 мм, изображения (б) получены в моменты 605 мкс до НТ (б), за 5 мкс до НТ (с), 45 мкс после НТ (д) и 195 мкс после НТ (е).

3.2.2.4. Динамика катодного слоя при экране под потенциалом земли

При проведении данной экспериментальной серии экран был подключен к земле через сопротивление $R_{10} = 4.25 \text{ Ом}$. Поэтому потенциал экрана относительно земли, приведенный на нижеследующих осциллограммах, является фактически падением напряжения на резисторе и определяется током в цепи экрана. Осциллограммы процесса при токах дуги амплитудой 8 и 12 кА представлены на рисунках 31 и 32.

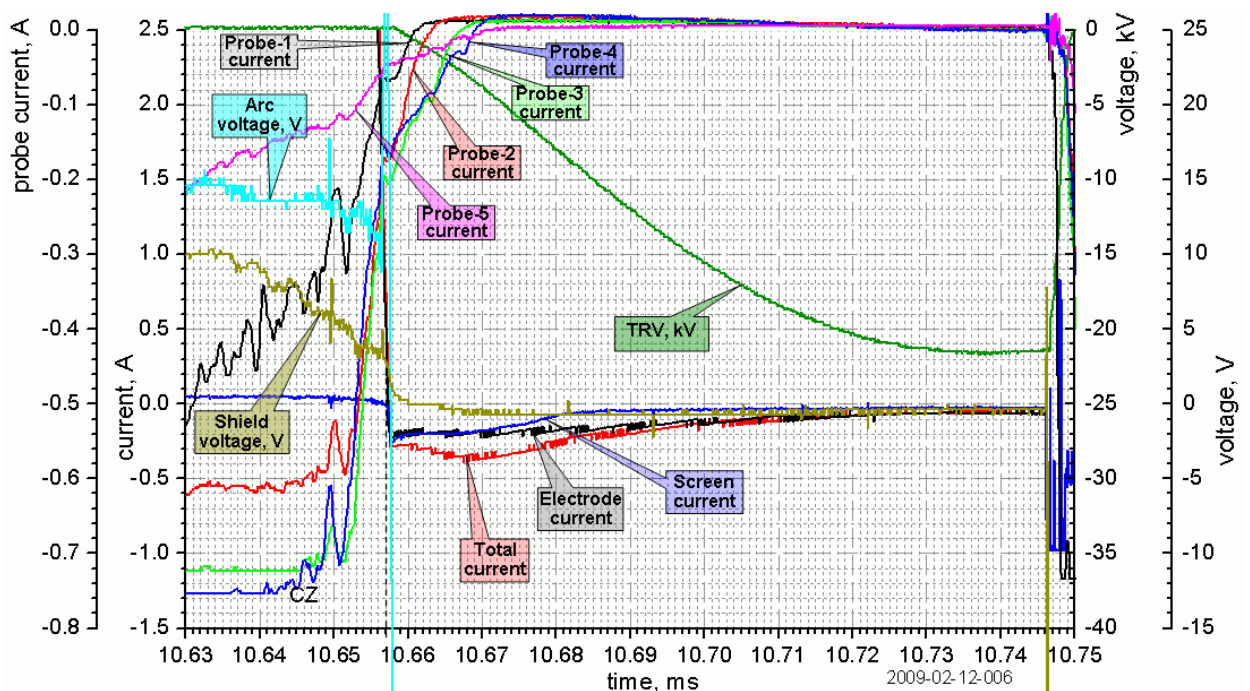


Рис. 31. Набор осциллограмм вблизи НТ в случае экрана под потенциалом земли. Ток дуги 8 кА, питание зондов +40 В, положение зондов 2,5 мм.

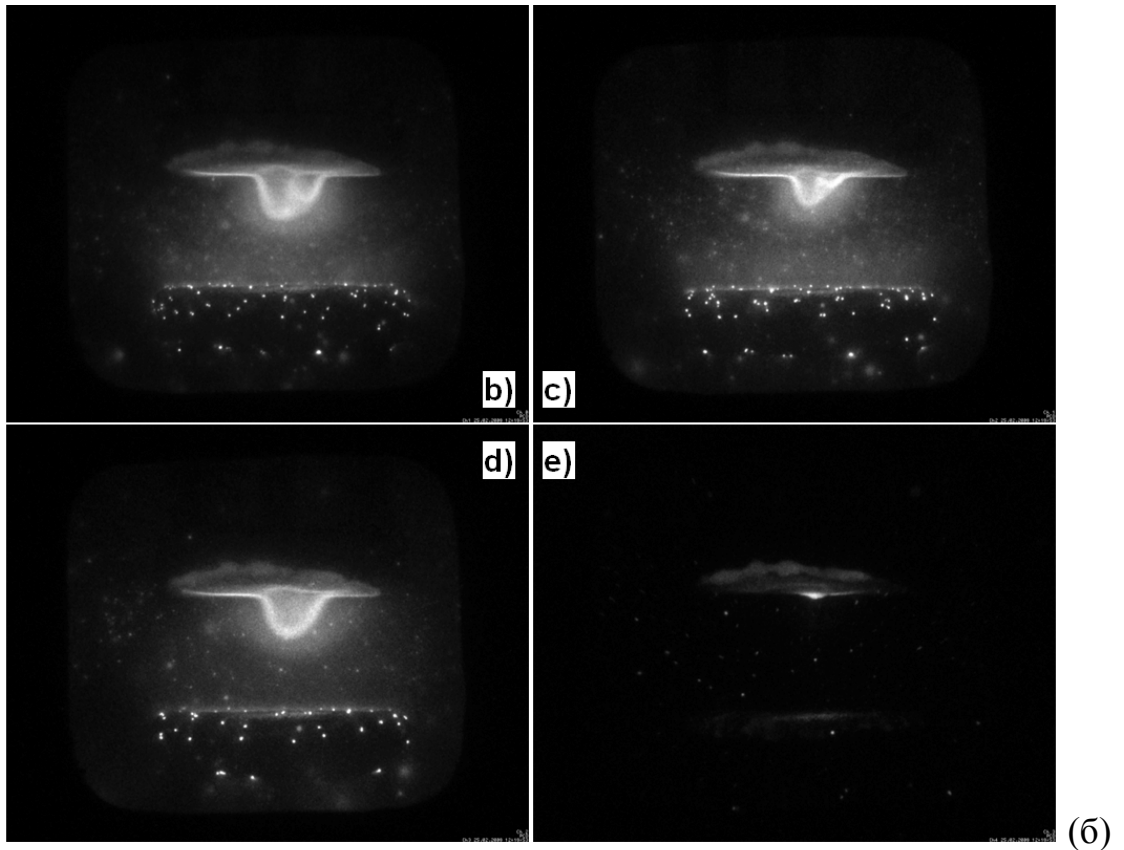
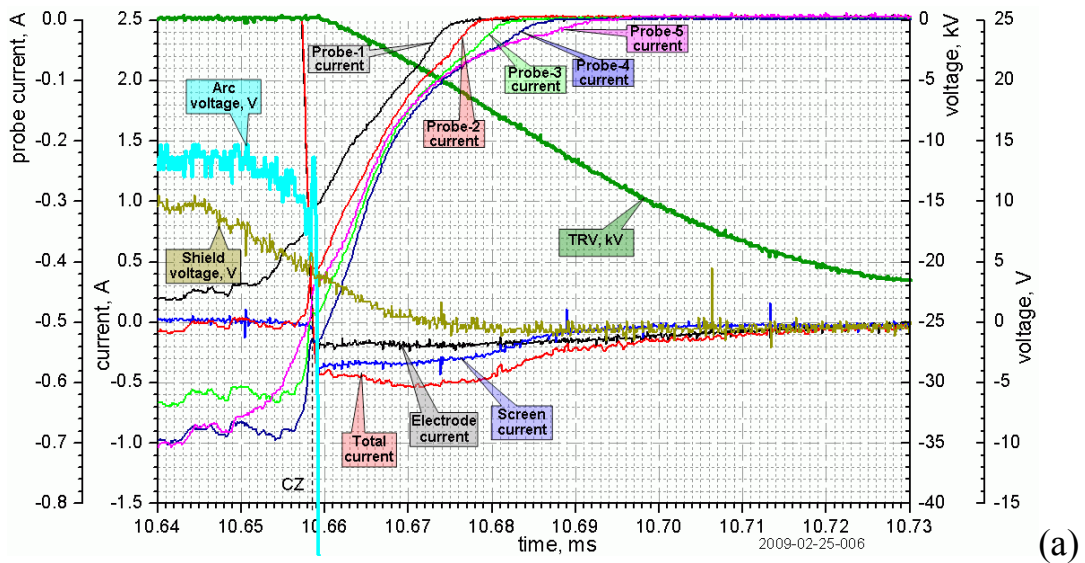


Рис. 32. Набор осциллограмм вблизи НТ (а) в случае экрана под потенциалом земли. Ток дуги 12 кА, питание зондов +40 В, положение зондов 11 мм, изображения (б) получены в моменты 600 мкс до НТ (б), за 10 мкс до НТ (с), 50 мкс после НТ (d) и 200 мкс после НТ (e).

Уровень ПДТ оказался близок к ПДТ при экране под потенциалом ПВН. Как и в случае медных электродов, ПДТ экрана оказался близок к нулю. В

отличие от медных электродов, никакого роста тока в период предшествующий пробойю не наблюдалось. Амплитуды ПДТ в цепи контактного электрода и охранного экрана вокруг него, усредненные по всем импульсам серий с токами $8 \div 15$ кА представлены в таблице 5. Уровни токов коррелируют с приведенными в таблице 4.

Таблица 5. Амплитудные значения ПДТ, усреднённые по числу импульсов дуги для всех положений зондов.

Ток дуги, кА	8	10	12
ПДТ на катод, А	0,187407	0,183333	0,2
Среднеквадратичное отклонение, А	0,033695	0,024398	0
ПДТ на охранный экран, А	0,24037	0,302941	0,345
Среднеквадратичное отклонение, А	0,049729	0,032933	0,036178

Обработанные данные по динамике катодного слоя приведены в Приложении МХ3 для амплитуды тока дуги 8 кА, МХ5 для 10 кА и МХ8 для 12 А.

Набор экспериментальных данных по измерению расширения прикатодного слоя.

Большой экран отсутствует.

Амплитуда тока дуги 8 кА.

Внешний диаметр охранного экрана 30 мм.

Таблица 6. Вертикальные положения зондов.

№ зонда	1	2	3	4	5
у, мм	-2.64	2.08	6.76	11.89	16.57

Таблица 7. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 2,13$ мм.

	Время, мкс				Анодное пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	
	1.4	2.5	7	10	*
	1.3	2.4	7.5	14.5	*
	0.5	1.4	3.4	5.1	left
	1.6	2.2	6	9.7	справа
	2	3.1	8.3	14.5	*
	1.9	2.7	6.9	10	centre
	1.5	2.2	7.4	14.5	справа
среднее	1.46	2.36	6.64	11.19	
СКО	0.49	0.56	1.59	3.54	

Таблица 8. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 9,63$ мм.

	Время, мкс				Анодное пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	
	6.3	7.9	10.5	14.3	left
	6.2	7.3	9.8	*	centre
	2.1	2.1	3.3	5	справа
	8.5	10.3	13.3	17.4	справа
	4.8	5.8	7.7	10.8	centre
	2.3	2.4	3.9	6	centre
	8	10.5	14.5	19.5	left

среднее	5.46	6.61	9	12.17	
СКО	2.54	3.41	4.32	5.95	

Таблица 9. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 20,13$ мм

	Время, мкс				Анодное пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	
	13.7	15.7	18.4	22.4	*
	16	17.5	20	23.5	centre
	13.3	14	16	18.5	*
	15.8	17	19.2	22.2	centre
среднее	14.7	16.05	18.4	21.65	
СКО	1.4	1.56	1.73	2.18	

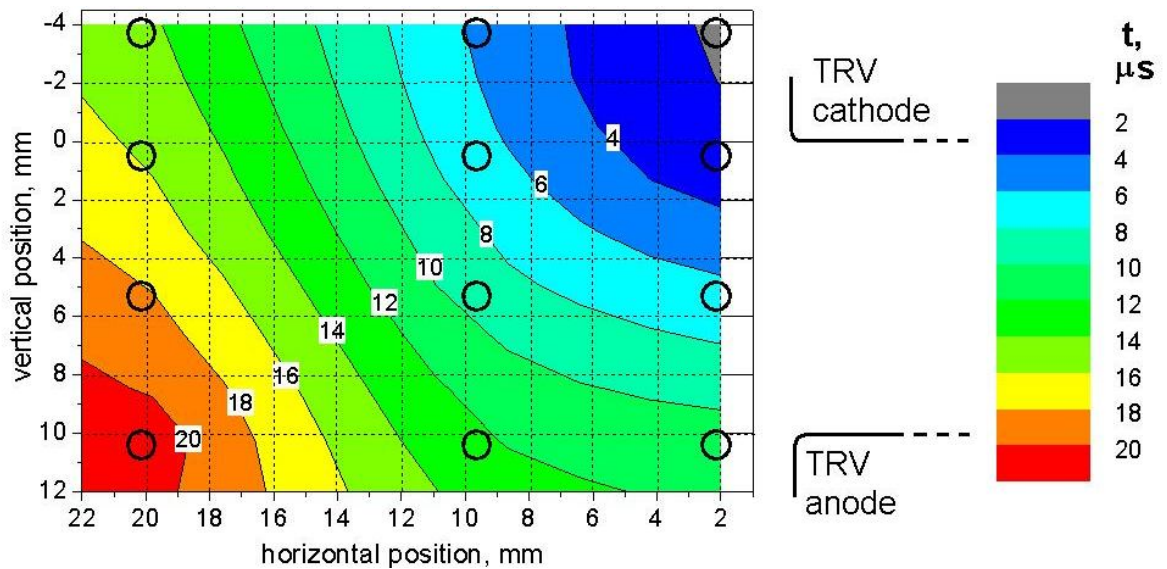


Рис. 33. Время полуоткрытия зонда в зависимости от его позиции при $I_{\max} = 8$ кА и скорость роста ПВН -0.8 кВ/мкс. Положение зондов показаны окружностями.

Набор экспериментальных данных по измерению расширения прикатодного слоя.

Большой экран отсутствует.

Амплитуда тока дуги 10 кА.

Внешний диаметр малого экрана 40 мм.

Таблица 10. Вертикальные положения зондов.

№ зонда	1	2	3	4	5
у, мм	-2.64	2.08	6.76	11.89	16.57

Таблица 11. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 4.2$ мм.

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	
	1	1.5		6	17	справа
	2.8	5.5		15	28	справа-centre
	1.2	2.6		7	17	centre
	0.5	1.7		4.5	9	справа
	2.7	4.9		15		
	1.8	4.5		10	15	
	1.2	3		7.5	18	справа
	1.6	3.5		11.8	18	front-справа
среднее	1.6	3.4		9.6	17.43	
СКО	0.809	1.473		4.026	5.62	

Таблица 12. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 10.2$ мм.

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	
	14	18.5	25.5			left
	9	12		27	40	centre-справа
	7.5	9.5	12	16	20	справа
	12	16		28	35	
	9.5	12.5	18	25.5	35	left
среднее	10.4	13.7	18.5	24.13	32.5	
СКО	2.58	3.55	6.76	5.51	8.66	

Таблица 13. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 20.7$ мм.

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	
	24	26.5	30	35.5	41	left
	22	26	31	40	50	left
	23	27.5	32	40	50	centre
	13	15	18.5	24	30	справа
	12	14.5	19	25.5	33	справа
среднее	18.8	21.9	26.1	33	40.8	
СКО	5.81	6.567	6.75	7.77	9.31	

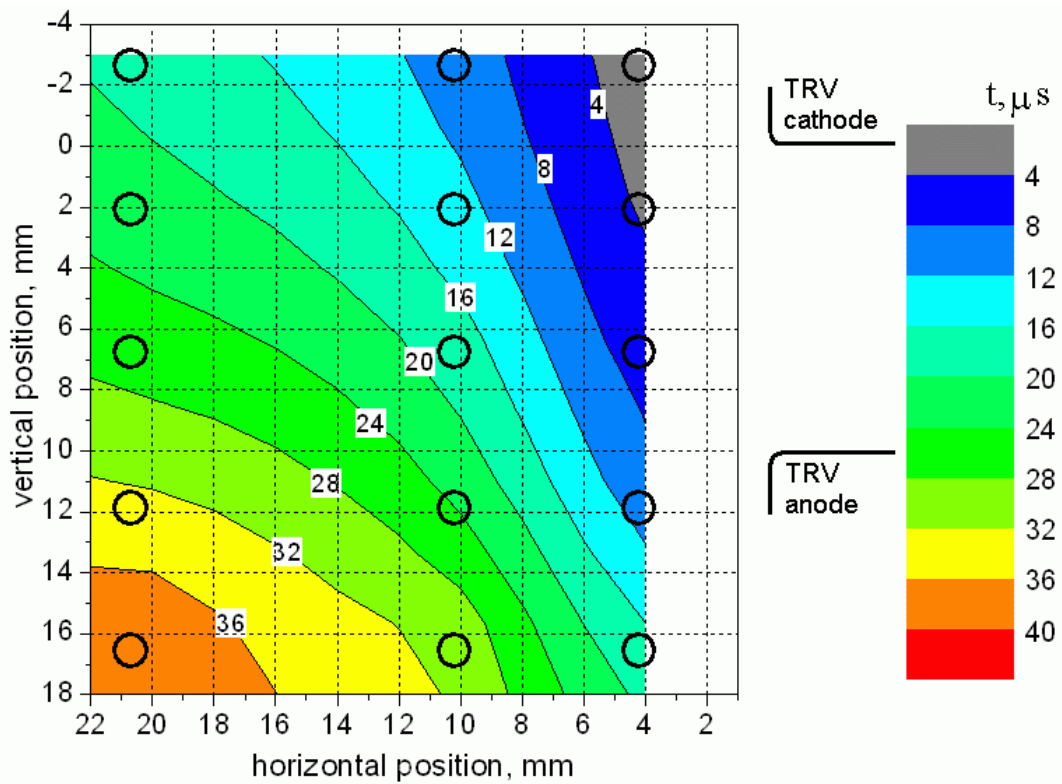


Рис. 34. Время полуоткрытия зонда в зависимости от его позиции при $I_{\max} = 10$ кА и скорость роста ПВН -0.8 кВ/мкс. Положение зондов показаны окружностями.

Набор экспериментальных данных по измерению расширения прикатодного слоя.

Большой экран отсутствует.

Амплитуда тока дуги 12 кА.

Внешний диаметр малого экрана 40 мм.

Таблица 14. Вертикальные положения зондов.

№ зонда	1	2	3	4	5
у, мм	-1.56	3.1	7.83	12.86	17.38

Таблица 15. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 4.2$ мм.

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	
	1.2	2.6		13.5	24	справа
	*	*		*		front-back
	1	2.5		11.5	21.5	справа
	0.5	1.7		7		справа
среднее	0.9	2.27		10.78	22.75	
СКО	0.29	0.4		2.72	1.77	

Таблица 16. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 8.18$ мм.

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	
	3	5.3		13	24	справа
	3.2	5.7		17.7	26.7	front-справа
	4	6		16	27	справа
	6.5	9.5		22.5	33.5	front-справа
	4.8	6.8		18.8	33	справа
среднее	4.3	6.66		17.6	28.84	
СКО	1.42	1.68		3.51	4.2	

Таблица 17. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 19.5$ мм.

	Время, мкс	

	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	пятно
	19.3	23		36	43	справа
	13	15.7		27.5	34.5	front-справа
	10.5	12.5		22	30	справа
	21.5	26.5		40	50	
	15	18.5		27	32	centre(big)
среднее	15.86	19.24		30.5	37.9	
СКО	4.51	5.6		7.31	8.38	

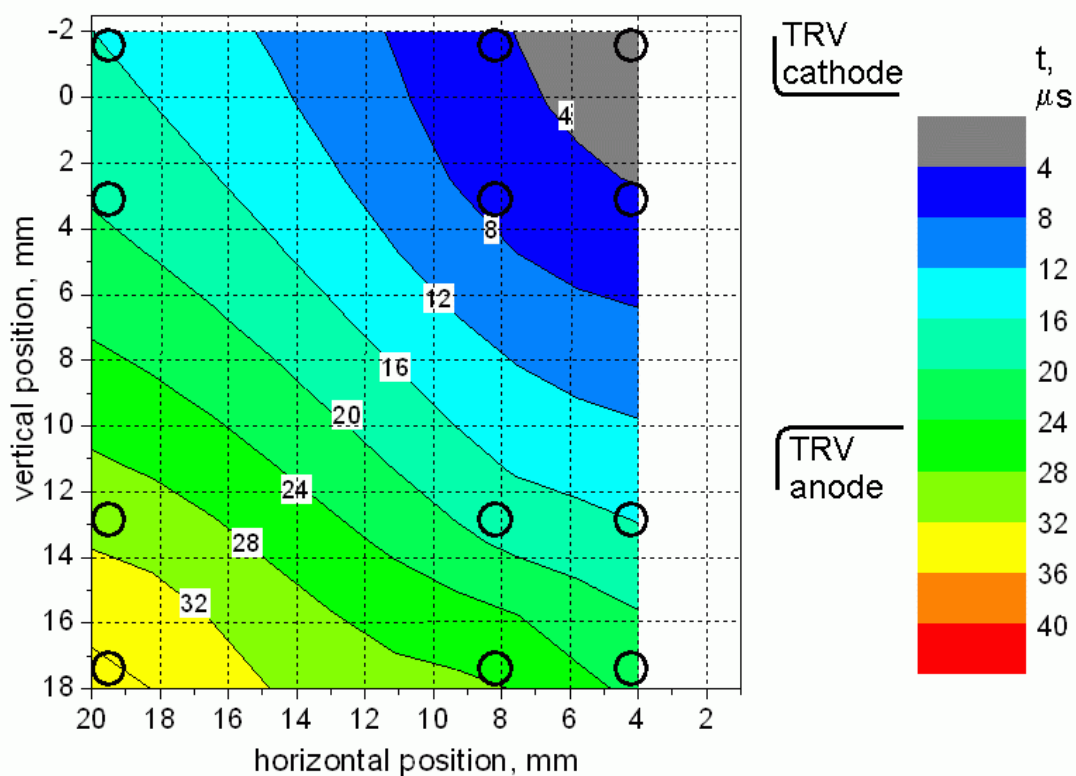


Рис. 35. Время полукрытия зонда в зависимости от его позиции при $I_{\max} = 12$ кА и скорость роста ПВН -0.8 кВ/мкс. Положение зондов показаны окружностями.

Набор экспериментальных данных по измерению расширения прикатодного слоя.

Большой экран под плавающим потенциалом.

Амплитуда тока дуги 8 кА.

Внешний диаметр малого экрана 40 мм.

Таблица 18. Вертикальные положения зондов.

№ зонда	1	2	3	4	5
у, мм	-3.74	1	5.89	10.58	15.58

Таблица 19. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 3.69$ мм.

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	
	3.9	7.3	10.9	13	13.8	centre-справа
		8.8	11.3	13.3		справа
	4	14.5	15.6	19.7	20.1	
			13.5	17.7		centre
	2.6	4.3	7	9.6	10.1	
среднее	3.5	8.725	11.66	14.66	14.67	
СКО	0.78	4.28	3.21	4.03	5.06	

Таблица 20. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 9.69$ мм

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	
	6	7.9	10.3	12.8	15.5	
	5.9	7.1	9.8	12	13.1	справа
	12	15	19.7	25.2		
	6.2	7.2	9	11.2		left-centre
	9.5	13.4	18.4	23.3		centre
среднее	7.92	10.12	13.44	16.9	14.3	
СКО	2.73	3.78	5.16	6.771	1.7	

Таблица 21. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 20.19$ мм.

	Время, мкс	
--	------------	--

	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	
	17.8		24	27	31	centre-left
	9.4	10.8	12.5	12.8	14	centre
	15	17.7	21	23.5	25	centre
	7.9	8.6	10.1	11.1	12	справа
	13.8	15.6	18.1	20.6	21.8	справа
среднее	12.78	13.18	17.14	19	20.76	
СКО	4.07	4.2	5.79	6.85	7.85	

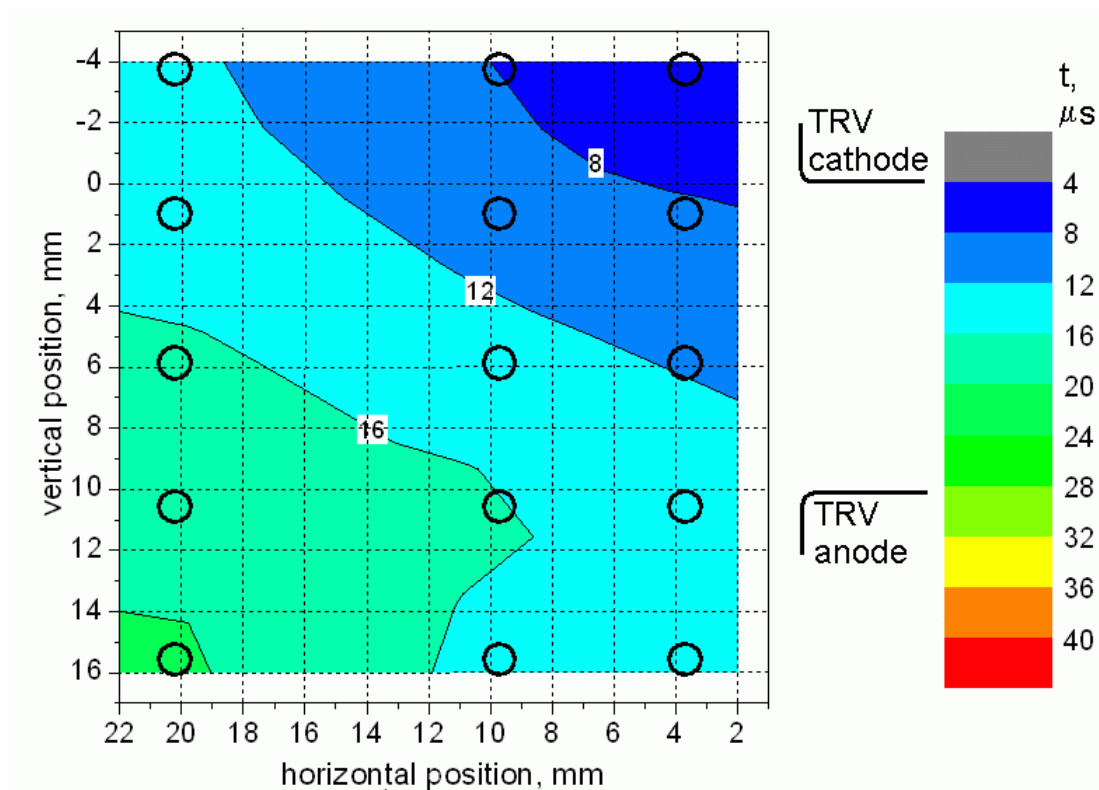


Рис. 36. Время полуоткрытия зонда в зависимости от его позиции при $I_{\max} = 8$ кА и скорость роста ПВН -0.8 кВ/мкс. Положение зондов показаны окружностями.

Набор экспериментальных данных по измерению расширения прикатодного слоя.

Большой экран под плавающим потенциалом.

Амплитуда тока дуги 10 кА.

Внешний диаметр малого экрана 40 мм.

Таблица 22. Вертикальные положения зондов.

№ зонда	1	2	3	4	5
у, мм	-1.75	2.79	7.59	12.23	17.13

Таблица 23. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 4.2$ мм.

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	
	2,9	5,3		14	19	centre
	3,8	7,5		16,9	29,9	справа
	3,5		13	16,1		справа
	1,5	3,6				left-centre
среднее	2,93	5,47	13	15,67	24,45	
СКО	1,02	1,96		1,5	7,71	

Таблица 24. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 11.7$ мм.

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	
	10,5	14	18			справа
	10,7	14,7	19	23,6		справа
	11,3	15,1	19,5	23,4		centre-справа
	10,7	13,9	17,8	21		справа
	21	28				centre
среднее	12,84	17,14	18,58	22,67		
СКО	4,57	6,09	0,81	1,45		

Таблица 25. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 22.2$ мм

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	
	17,4	20,5	23,9	27,1	31,4	centre-left
	18	21,9	26,1	30,1	35,9	
	17,2	19,7	22,8	26,2	29,7	left
	19,2	23	28,5	33,1	41,5	справа
среднее	17,95	21,28	25,33	29,13	34,63	
СКО	0,9	1,47	2,52	3,13	5,281	

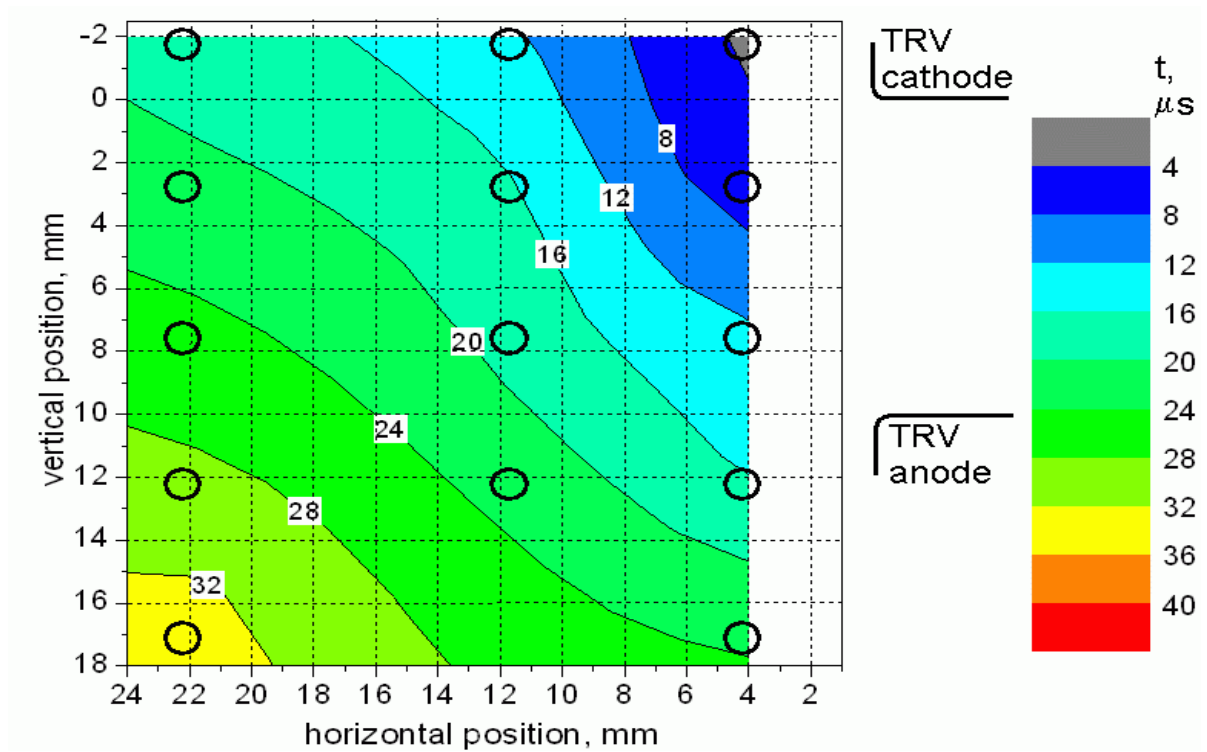


Рис. 37. Время полуоткрытия зонда в зависимости от его позиции при $I_{\max} = 10$ кА и скорость роста ПВН -0.8 кВ/мкс. Положение зондов показаны окружностями.

Приложение М6

Набор экспериментальных данных по измерению расширения прикатодного слоя.

Большой экран заземлен.

Амплитуда тока дуги 8 кА.

Внешний диаметр малого экрана 40 мм.

Таблица 26. Вертикальные положения зондов.

№ зонда	1	2	3	4	5
x, мм	3.71	3.61	3.88	3.88	4.12
y, мм	-4.56	0.34	5.1	9.56	14.39

Вертикальная позиция была изменена из-за эрозии медных электродов. Измеренный темп эрозии составил 33 мкм за 1 акт горения дуги амплитудой 8 кА, что находится в согласии с литературными данными [8]. Позиция каждого из зондов вычислялась индивидуально путём линейной интерполяции между событиями, сопровождающимися измерениями промежутка.

Таблица 27. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 3.61$ мм.

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд					
	N1	N2	N3	N4	N5	
	4.4	6.2	9.9	13.4	16.4	справа
	3.5	4.1	5.5	7.5	11.7	центр
	5.5	7	10.7	15.6	19.9	центр
	3.3	4.2	6.1	7.7	13.2	центр
	3	4	7.4	11	13.5	центр
среднее	3.94	5.1	7.92	11.04	14.94	
СКО	1.02	1.4	2.34	3.54	3.25	

Таблица 28. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 11.11$ мм.

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд					
	N1	N2	N3	N4	N5	

	10.9	13.7	17.9	19.5		справа
	9.6	11.5				центр
	8.8	9.3	11.9	15.9		центр
	8	9	10.4			центр-справа
	8.2	11	12.3	16.7	21.2	центр
среднее	9.1	10.9	13.125	17.37	21.2	
СКО	1.18	1.9	3.29	1.89		

Таблица 29. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 18.61$ мм.

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд					
	N1	N2	N3	N4	N5	
	11.5	13.3	14.3	16.4		центр-справа
	12.1	13.7	15	18.6	21.5	центр
	10	13.2	15.8	19	22.8	центр-справа
	11.9	14.1	16.8	19.3	23.2	центр-справа
	12.8	14.8	17.6	20.1	23.3	справа
среднее	11.66	13.82	15.9	18.68	22.7	
СКО	1.04	0.65	1.33	1.39	0.83	

Таблица 30. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 26.11$ мм.

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд					
	N1	N2	N3	N4	N5	
	13.3	13.6	15.3	16.4	17.5	центр-справа
	18.6	20.5	23.1	25.3	27.7	справа
	20.5	23.4	27.5	33.3	39	центр-справа
	14.6	16.1	18.2	20	22.1	справа
	15.9	17.2	19.3	21.5	23.5	центр-справа
среднее	16.58	18.16	20.68	23.3	25.96	
СКО	2.94	3.84	4.73	6.44	8.15	

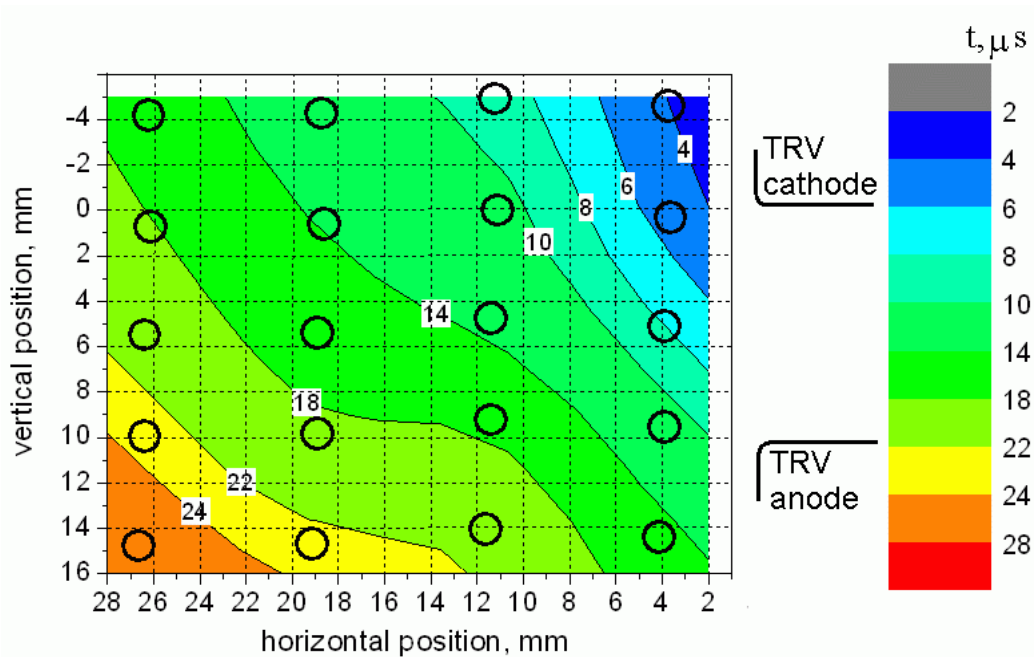


Рис. 38. Время полуоткрытия зонда в зависимости от его позиции при $I_{\max} = 8$ кА и скорость роста ПВН -0.8 кВ/мкс. Положение зондов показаны окружностями.

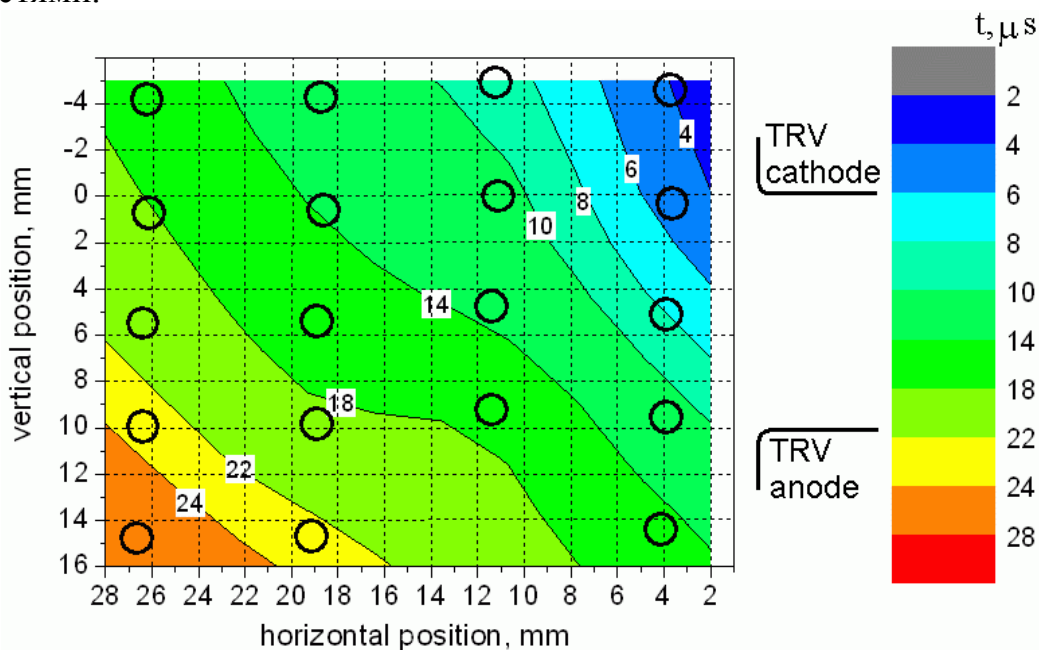


Рис. 39. Время полуоткрытия зонда в зависимости от его позиции при $I_{\max} = 8$ кА и скорость роста ПВН -0.8 кВ/мкс. Положение зондов показаны окружностями. Данные для зонда № 5 в положении $x=11.11$ мм были исключены из статистики.

Приложение М7

Набор экспериментальных данных по измерению расширения прикатодного слоя.

Большой экран заземлен.

Амплитуда тока дуги 10 кА.

Внешний диаметр малого экрана 40 мм.

Таблица 31. Вертикальные положения зондов.

№ зонда	1	2	3	4	5
x, мм	3.78	3.64	4.05	4.05	4.25
y, мм	+2.72	7.45	12.25	16.67	21.43

Таблица 32. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 3.64$ мм.

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	
	9.2	12	14			
	8.5	13.5	19.5	27.5		
	5.1	8.5	10.8	12		справа
	9	16	19.8			
среднее	7.95	12.5	16.025	19.75		
СКО	1.92	3.14	4.39	10.96		

Таблица 33. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 11.14$ мм.

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	
	12.4	17	21	27		справа
	24	28.2	30.5	32	33.5	
	10.5	13.5	17.2	31	39.5	
	13.5	20	26	33.8		
среднее	15.1	19.68	23.68	30.95	36.5	
СКО	6.06	6.27	5.80	2.88	4.24	

Таблица 34. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 18.64$ мм.

Время, мкс						Анодное пятно
Зонд						
N1	N2	N3	N4	N5		
29.5	35.5	39.5	43.5		ц.-слева	
17.7	24.5	34.3	49.5	65.5	справа	
14.2	16.5	19.1	22	23		

	14	17	22.8	31	39
среднее	18.85	23.38	28.93	36.5	42.5
СКО	7.30	8.87	9.57	12.36	21.47

Таблица 35. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 26.14$ mm

		Время, мкс					Анодное пятно
		Зонд					
		N1	N2	N3	N4	N5	
		27.5	31	34.5	38.5	42.8	ц.-слева
		24.5	27.1	29.2	32.8	35.8	центр
		23.5	28	34	43	48	
		29.5	35	40.4	47.5	54.5	
среднее		26.25	30.28	34.525	40.45	45.28	
СКО		2.75	3.56	4.59	6.298	7.93	

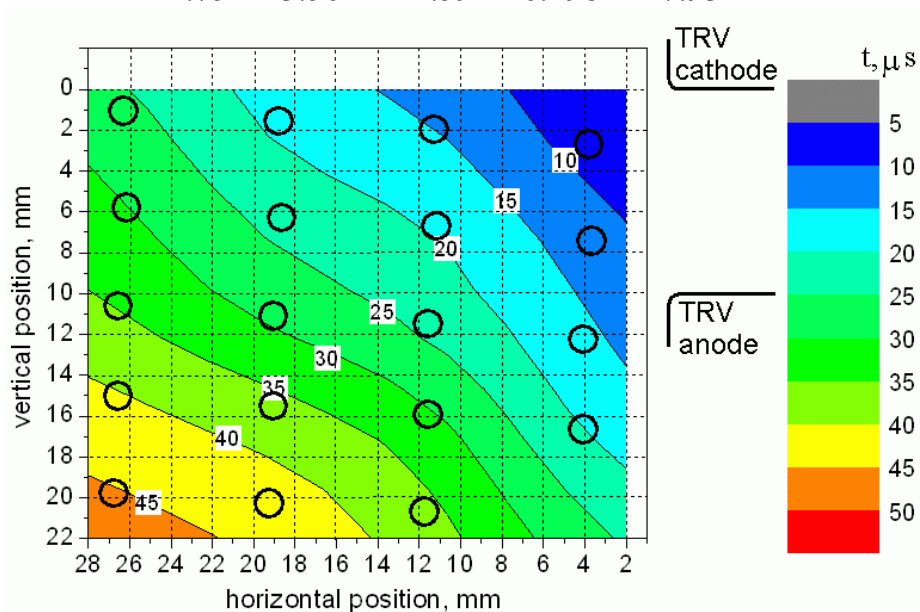


Рис. 40. Время полуоткрытия зонда в зависимости от его позиции при $I_{\max} = 10$ кА и скорость роста ПВН -0.8 кВ/мкс. Положение зондов показаны окружностями.

Набор экспериментальных данных по измерению расширения прикатодного слоя.

Большой экран соединен с потенциальным ПВН электродом.

Амплитуда тока дуги 8 кА. Внешний диаметр малого экрана 40 мм.

Таблица 36. Вертикальные положения зондов.

№ зонда	1	2	3	4	5
x, мм	3.27	3.1	3.47	3.47	3.67
y, мм	-2.93	1.91	6.6	11.16	15.85

Таблица 37. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 3.1$ мм.

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	
	5	7.6	13.8	14.5	15.5	центр
	4.7	7.9	13.5	16.1	20.9	центр
	4.5	6.5	10.8	13.4	14.6	
	4.8	7	11.4	13.5	14.3	справа
	4.8	7.2	10.6	13.3	14.8	центр
среднее	4.76	7.24	12.02	14.16	16.02	
СКО	0.18	0.54	1.52	1.19	2.76	

Таблица 38. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 10.6$ мм.

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	
	10	11.6	13.2	15.7	16.7	центр
	7.7	8.8	10.8	12.3	13.8	
	9.4	11.1	12.9	14.5	14.6	справа
	10.1	11.8	13.5	16.1	16.1	центр-справа
	9	10.1	13	14.3	14.9	справа
Среднее	9.24	10.68	12.68	14.58	15.22	
СКО	0.97	1.248	1.08	1.49	1.17	

Таблица 39. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 18.1$ мм.

Время, мкс

	Зонд					пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	
среднее СКО	14.8	16.1	17.1	18	17.1	центр-справа
	17.5	19	21.1	22.5	22.6	справа
	14.1	16.1	18.5	20.3	21.5	
	15.47	17.07	18.9	20.27	20.4	
	1.84	1.67	2.03	2.25	2.91	

Таблица 40. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 25.6$ мм.

	Время, мкс					Анодное пятно справа
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	
среднее СКО	14.9	15.5				
	14.9	15.5				

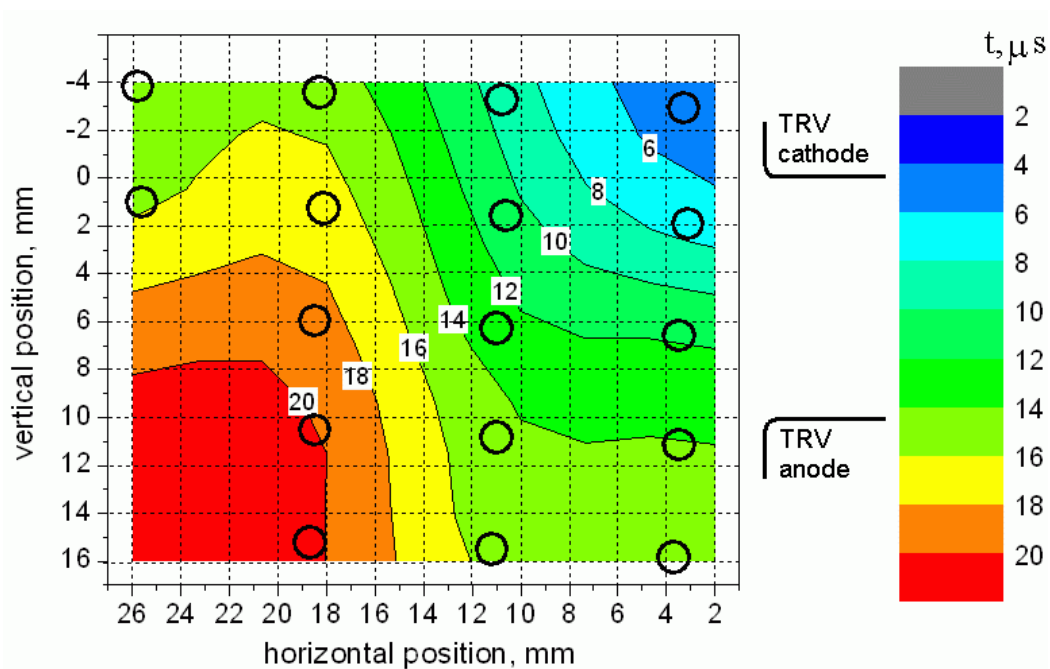


Рис. 41. Время полуоткрытия зонда в зависимости от его позиции при $I_{\max} = 8$ кА и скорость роста ПВН -0.8 кВ/мкс. Положение зондов показаны окружностями.

Набор экспериментальных данных по измерению расширения прикатодного слоя.

Большой экран соединен с потенциальным ПВН электродом.

Амплитуда тока дуги 10 кА. Внешний диаметр малого экрана 40 мм.

Таблица 41. Вертикальные положения зондов.

№ зонда	1	2	3	4	5
x, мм	3.44	3.44	3.78	3.78	3.84
y, мм	-2.28	2.62	7.35	11.91	16.67

Таблица 42. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 3.44$ мм.

	Время, мкс					Анодно е пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	
	5.5	7.9	12.9	17.5	21	
	4.4	6.6	10.1	13.1		
	7	11.3	17	21.5		справа
среднее	5.63	8.6	13.33	17.37	21	
СКО	1.31	2.43	3.47	4.2		

Таблица 43. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 10.94$ мм.

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	
	10	12.3	15.5	17	18.5	справа
	8.9	11.5	15.2	18	20.5	
	13.8	17.7	20.9	24	27	
	15.9	19.5		26	27.2	центр
среднее	12.15	15.25	17.2	21.25	23.3	
СКО	3.26	3.95	3.21	4.43	4.46	

Таблица 44. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 18.44$ мм.

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	
	16.8	19.2		23	22.3	центр-справа
	14.6	17.1		20.1		справа
	15.2	18.6	22.3	22.8	23.4	справа

	26.5	29.1	33.5		центр
	22.5	24	26	26.2	
среднее	19.12	21.6	27.27	23.03	22.85
СКО	5.17	4.92	5.71	2.5	0.78

Таблица 45. Времена задержки полуоткрытия зонда (мкс). $x = 25.94$ мм.

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд					
	N1	N2	N3	N4	N5	
	23	25.3	26	28		центр
	13.7	14.9	14.8	15	13.2	центр
	17.9	21	23			центр-справа
	18.5	20.5	23.6			
	17.9	19.8	21.9	22.8	22.5	
среднее	18.2	20.3	21.86	21.93	17.85	
СКО	3.3	3.71	4.22	6.54	6.58	

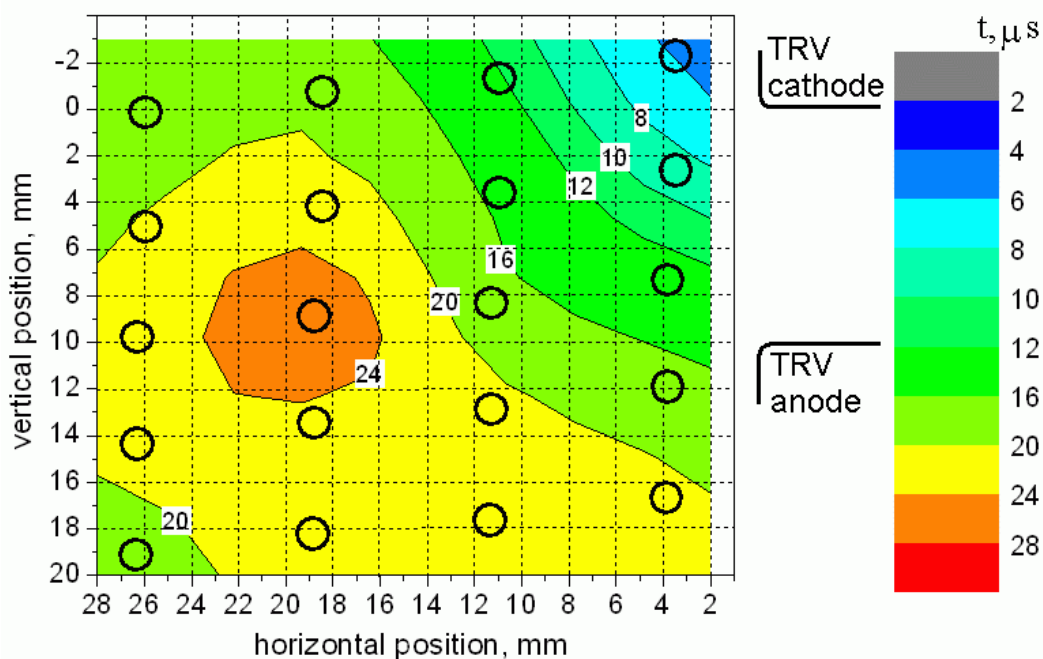


Рис. 42. Время полуоткрытия зонда в зависимости от его позиции при $I_{\max} = 10$ кА и скорость роста ПВН -0.8 кВ/мкс. Положение зондов показаны окружностями.

Набор экспериментальных данных по измерению концентрации плазмы методом электронного тока насыщения одиночного зонда.

Большой экран под плавающим потенциалом.

Внешний диаметр малого экрана 40 мм.

Таблица 46. Электронный ток насыщения и плотность плазмы на различном удалении от разрядного промежутка при токе дуги 8 кА.

	Зонд N 1 current, А	Plasma density, cm ⁻³	Анодное пятно
	0.7	8.00E+11	ц.-справа
	1	1.13E+12	ц.-справа
среднее	0.85	9.65E+11	
СКО	0.21	2.33E+11	
	0.3	3.40E+11	центр
	0.34	3.80E+11	справа
	0.2	2.30E+11	справа
	0.7	8.00E+11	ц.-справа
	0.2	2.30E+11	центр
	0.18	2.00E+11	центр
среднее	0.32	3.63E+11	
СКО	0.2	2.25E+11	

Таблица 47. Электронный ток насыщения и плотность плазмы на различном удалении от разрядного промежутка при токе дуги 10 кА.

	Зонд N 1 current, А	Plasma density, cm ⁻³	Анодное пятно
	3.7	4.20E+12	ц.-слева
	2.2	2.60E+12	центр
	2.5	2.80E+12	центр
	0.4	4.50E+11	справа
Среднее	2.2	2.51E+12	
СКО	1.36	1.55E+12	
	0.75	8.50E+11	слева

	1.4	1.60E+12	справа
Среднее	1.08	1.23E+12	
СКО	0.46	5.3E+11	

Таблица 48. Электронный ток насыщения и плотность плазмы на различном удалении от разрядного промежутка при токе дуги 12 кА.

	Зонд N 1 current, А	Plasma density, cm ⁻³	Анодное пятно
	2.6	3.00E+12	справа
	7	8.00E+12	слева
среднее	4.8	5.5E+12	
СКО	3.11	3.54E+12	
	1.4	1.60E+12	справа
	*	*	справа
	5.2	5.90E+12	центр
среднее	3.3	3.75E+12	
СКО	1.9	2.15E+12	
	0.35	4.00E+11	справа
	0.33	3.70E+11	центр
среднее	0.34	3.85E+11	
СКО	0.014142	2.12E+10	

Приложение МХ1

Условия эксперимента:

- Амплитуда тока дуги 8 кА;
- Темп падения тока вблизи НТ –1.85 А/мкс; и
- Темп роста ПВН 1 В/мкс при длительности линейной части роста 15 мкс.
- Экран находился под плавающим потенциалом.

Таблица 49. Положение зондов.

Номер зонда	1	2	3	4	5
у, мм	-3.87	0.57	5.62	10.77	15.31

Таблица 50. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 3.19$ мм

	Время, мкс				
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5
	1.3	2.5	6.8	10.1	11.5
	1.4	2.4	6.2	9.3	10.3
	1.5	2.5	7.8	11.4	12.2
	1.5	2.3	5.2	8.6	10.3
	1	1.6	4.1	6.7	7.5
	2	3	7.2	10.9	13
	2.3	3.1	6.3	9.3	11.5
среднее	1.57	2.49	6.231	9.47	10.9
СКО	0.44	0.49	1.25	1.56	1.78

Таблица 51. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 4.69$ мм

	Время, мкс				
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5
	1.3	2	4.3	7.2	9
	3	4.2	7.3	10.4	12.4
	3.3	5.1	8.5	11.7	13.2
	2.5	3.7	6.8	10.1	11.6
	2.7	4.4	7.9	11.1	12.8
среднее	2.56	3.88	6.96	10.1	11.8
СКО	0.77	1.16	1.62	1.74	1.67

Таблица 52. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 7.69$ мм

	Время, мкс				
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5
	3.5	6.7	10.1	13.4	16.7
	3.3	4.4	6.6	9.1	10.1
	2.4	4.2	7.1	10.1	11.5
	4.5	5.8	8.5	11.1	13.9
	4.4	5.9	8.2	10.6	12.8
	3.5	5.1	7.6	10.4	11.6
среднее	3.6	5.35	8.02	10.78	12.77
СКО	0.77	0.96	1.24	1.44	2.32

Таблица 53. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 12.19$ мм

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	
	6.5	8	10.4	12.4	14.3	
	4.8	6.1	8.1	10.2	11.5	справа
	4.6	6.7	8.8	10.9	12.1	справа
	5.8	7.3	9.4	11.5	12.8	справа
	7.1	9.6	12.1	14.5	17.1	слева
	7.6	9.6	12.5	14.8	17.4	слева
среднее	6.07	7.88	10.22	12.38	14.2	
СКО	1.22	1.47	1.79	1.90	2.54	

Таблица 54. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 18.19$ мм

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	
	12.8	14.5	17.3	20.6	23.6	слева
	9.9	11.5	14	17	19.1	
	9.6	11.5	13.9	16	18	ц.
	10.1	11.5	13.7	16	18.1	ц.
	10.4	11.4	13.5	15.9	17.9	слева
среднее	10.56	12.08	14.48	17.1	19.34	
СКО	1.29	1.35	1.59	2.01	2.43	

Таблица 55. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 24.19$ мм

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	
	14.3	15.8	18.3	21	22.5	слева
	14.2	15.8	17.9	20.1	22	
	9.4	10.1	11.8	13.2	14.9	справа
	7.3	8.2	9.6	11.8	13.6	справа
	10.8	12.6	13.4	15.2	17.3	справа
	8.4	9.4	10.6	11.9	13	справа
среднее	10.73	11.98	13.6	15.53	17.22	
СКО	2.96	3.29	3.71	4.08	4.17	

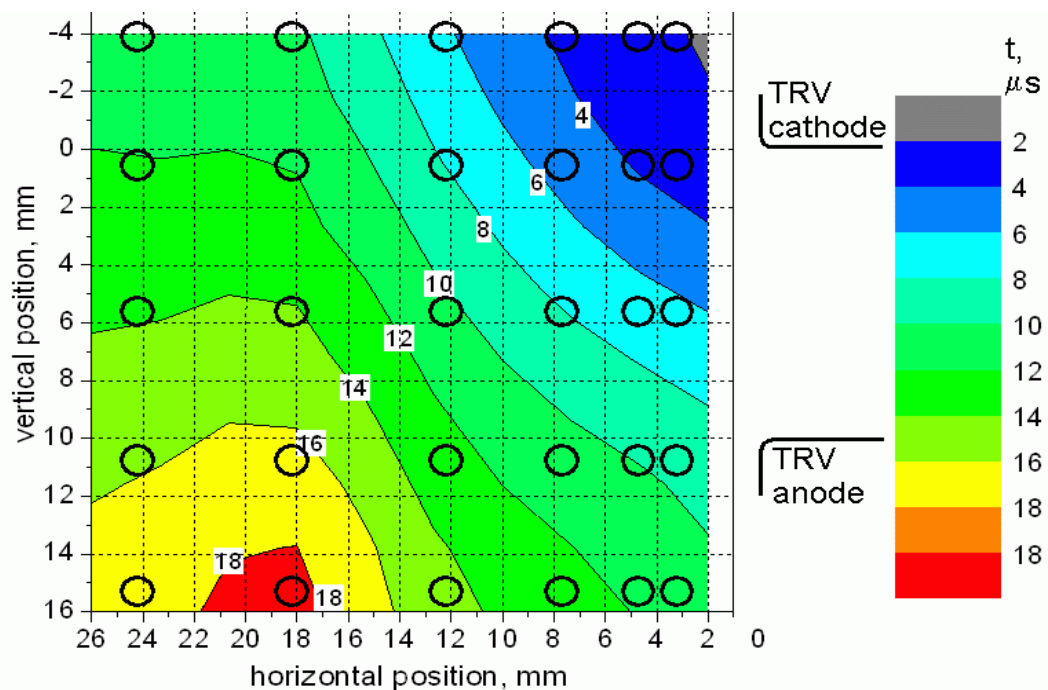


Рис. 43. Время полуоткрытия зонда vs. положение зонда при $I_{\max} = 8$ кА при темпе роста ПВН = -1 кВ/мкс. Положиции зондов показаны окружностями. Экран под плавающим потенциалом.

Условия эксперимента:

Амплитуда тока дуги 8 кА;

Темп падения тока вблизи НТ –1.85 А/мкс; и

Темп роста ПВН 1 В/мкс при длительности линейной части роста 15 мкс.

Экран находился под потенциалом ПВН;

Таблица 56. Положение зондов.

Номер зонда	1	2	3	4	5
у, мм	-3.87	0.57	5.62	10.77	15.31

Таблица 57. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 3.19$ мм

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	
	2.6	4.3	7.5	10.9	11.5	ц.
	1.4	3.2	6.2	9.3	10	справа
	2	2.8	5.5	8.6		ц.
	2.2	3.6	6.2	9.1	9.9	справа
	1.1	3.5	7.8	10.5	11.6	ц.-справа
среднее	1.86	3.48	6.64	9.68	10.75	
СКО	0.61	0.55	0.97	0.98	0.93	

Таблица 58. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 4.69$ мм

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	
	1.7	3.4	5.7	7.8	8.7	справа
	3.3	4.9	7.6	10.2	10.9	ц.-справа
	2.2	3.3	5.5	7.8	9	справа-ц.
	4.2	5.8	9.3	12.1	13.1	слева
	2.7	4.2	7.4	10.4	11.9	ц.
среднее	2.82	4.32	7.1	9.66	10.72	
СКО	0.97	1.05	1.56	1.85	1.88	

Таблица 59. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 7.69$ мм

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	
	2.4	3.5	5.7	8	9	справа
	5.6	7.2	9.7	12.2	12.9	ц.
	3.2	4.6	6.9	9.3	10.5	справа
	4.4	5.6	8.3	10.8	11.8	ц.
	5.6	8.2	11.1	14.2	16.5	слева
среднее	4.24	5.82	8.34	10.9	12.14	

СКО	1.43	1.9	2.15	2.43	2.84	
-----	------	-----	------	------	------	--

Таблица 60. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 12.19$ мм

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	
	4.3	6	8.2	10.2	10.7	справа
	4.2	5.7	7.9	9.8	10.3	справа
	4	6.3	8.3	10.2	10.7	
	4.6	5.8	8	9.8	10	справа
	4.2	5.3	6.7	8		
	5.1	6	7.8	8.8	9.2	справа
среднее	4.4	5.85	7.82	9.47	10.18	
СКО	0.39	0.34	0.58	0.88	0.62	

Таблица 61. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 18.19$ мм

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	
	9.8	10.3	11.3	11.9	12.5	ц.-back
	6.2	7.1	8.4	9.2	9.4	справа
	7.6	8.5	10.2	11.2	11.7	справа
	10.3	11.5	12.6	13.6	14	ц.
	9.3	10.4	11.5	12.5	12.9	ц.-front
	8.5	9.5	10.7	11.2	10.8	справа
	7.6	9	10.7	11.7	12.2	справа
	10.8	11.9	13.4	14.2	14.2	слева-ц.
	10.3	11.4	12.9	14	14.5	слева
	9.2	10.3	11.7	12.2	12.2	
среднее	8.96	9.99	11.34	12.17	12.44	
СКО	1.47	1.49	1.46	1.51	1.58	

Таблица 62. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 24.19$ мм

	Время, мкс					Анодное пятно
	Зонд N1	N2	N3	N4	N5	
	8.4	9.7	10.6	10.6	9.8	справа
	10.9	11.8	12.6	13.1	12.6	ц.
	12.4	13.4	14.5	14.5	14.5	слева
	10.8	12.2	13.4	14	14	ц.
	9.2	10.5	11.6	12	11.2	справа
	9	10.3	11	11.2	11	
среднее	10.12	11.32	12.28	12.57	12.18	
СКО	1.51	1.39	1.5	1.56	1.84	

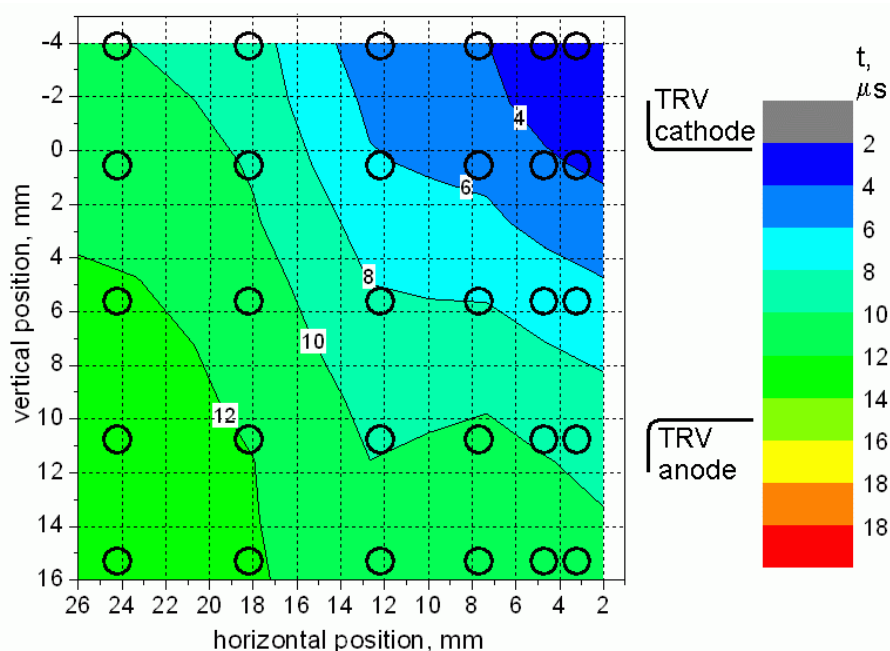


Рис. 44. Время полуоткрытия зонда vs. положение зонда при $I_{\max} = 8$ кА при темпе роста ПВН = -1 кВ/мкс. Позиции зондов показаны окружностями. Экран по ПВН.

Приложение МХЗ

Условия эксперимента:

- Амплитуда тока дуги 8 кА;
- Темп падения тока вблизи НТ -1.85 А/мкс; и
- Темп роста ПВН $0,4$ В/мкс при длительности линейной части роста 15 мкс.
- Экран находился под потенциалом земли.

Таблица 63. Положение зондов.

Номер зонда	1	2	3	4	5
х, мм	3.36	3.56	2.88	2.48	2.92
у, мм	-5.8	-0.31	4.37	9.09	13.86

Таблица 64. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 3.36$ мм.

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	2.5	3.6	7.6	11.4	12.1	0.06	0.18	0.21	0.18	0.04	справа
	2.8	4.7	8.5	12.7	13.5	0.18	0.34	0.39	0.34	0.11	ц.-справа
	2.7	4.5	7.6	11.7	12.8	0.26	0.33	0.42	0.38	0.13	справа-back
	3	4.7	8.5	12.2	13.6	0.2	0.3	0.33	0.26	0.09	*
	3.3	4.8	8.2	11.9	13.3	0.21	0.38	0.44	0.4	0.12	справа-back
среднее	2.86	4.46	8.08	12	13.1	0.18	0.31	0.36	0.31	0.1	
СКО	0.31	0.49	0.45	0.5	0.62	0.07	0.08	0.09	0.09	0.03	

Таблица 65. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 6.36$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	6.2	8.7	11.4	14	15.2	0.33	0.28	0.29	0.23	0.13	ц.-back
	5.8	7.8	10	13	14.7	0.36	0.41	0.42	0.36	0.12	справа-back
	5.6	7.6	9.9	11.6	14.1	0.34	0.4	0.42	0.32	0.17	справа
	5.7	7.5	9.6	11.9	14.1	0.14	0.14	0.15	0.15	0.11	справа-back
среднее	5.83	7.9	10.2	12.6	14.5	0.3	0.31	0.32	0.27	0.13	
СКО	0.26	0.55	0.80	1.1	0.53	0.10	0.13	0.13	0.09	0.03	

Таблица 66. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 10.86$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	11.3	12.7	14.5	15.5	*	0.23	0.25	0.3	0.3	0.29	ц.
	8.7	10.2	12	12.5	13.7	0.3	0.29	0.29	0.2	0.11	ц.-справа
	8.2	10.2	12.5	13	14.4	0.1	0.12	0.14	0.11	0.06	справа-back
	7.9	9.6	10.5	10.7	12.2	0.16	0.18	0.22	0.2	0.16	справа
	10.5	12	13.8	14.7	17.3	0.37	0.43	0.5	0.48	0.31	ц.
среднее	9.32	10.9	12.7	13.3	14.4	0.23	0.25	0.29	0.29	0.19	
СКО	1.5	1.33	1.57	1.89	2.14	0.11	0.12	0.13	0.14	0.11	

Таблица 67. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 18.36$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	12.6	14.4	14.5	14.7	*	0.28	0.24	0.24	0.2	0.16	*
	11.8	12.8	13.6	13.7	15	0.22	0.2	0.2	0.16	0.11	*
	13.1	15	16.1	17.1	17.8	0.24	0.23	0.24	0.22	0.19	*
	11.5	13.5	14.5	14.6	15.5	0.19	0.18	0.18	0.15	0.13	справа-back
	12.9	15	16	*	16.5	0.17	0.16	0.18	0.18	0.16	*
среднее	12.4	14.1	14.9	15.0	16.2	0.22	0.20	0.21	0.18	0.15	
СКО	0.7	0.97	1.08	1.45	1.24	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	

Таблица 68. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 25.86$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	12.6	11.6	*	*	*	0.22	0.18	0.17	0.14	0.13	*
	10	*	*	*	*	0.24	0.2	0.2	0.18	0.16	*
	15.3	15.6	15.2	15.4	15.8	0.14	0.13	0.14	0.14	0.13	*
	14.1	15.6	15.6	14.1	15.7	0.19	0.17	0.14	0.12	0.1	*
	*	*	18.1	18	18.5	0.22	0.2	0.2	0.17	0.14	*
	15.6	17.1	17.1	16.6	17.2	0.12	0.1	0.11	0.1	0.1	*
	15.4	17.1	18.2	18.9	20.3	0.17	0.15	0.13	0.1	0.09	справа

	20.2	22	24	26.8	29.5	0.23	0.23	0.32	0.36	0.36	l-c-f
	21.4	23.3	25.2	26.6	*	0.17	0.17	0.22	0.25	*	l-c-f
среднее	15.6	17.5	19.1	19.5	19.5	0.19	0.17	0.18	0.17	0.15	
СКО	3.73	4.00	3.97	5.18	5.2	0.04	0.04	0.06	0.08	0.08	

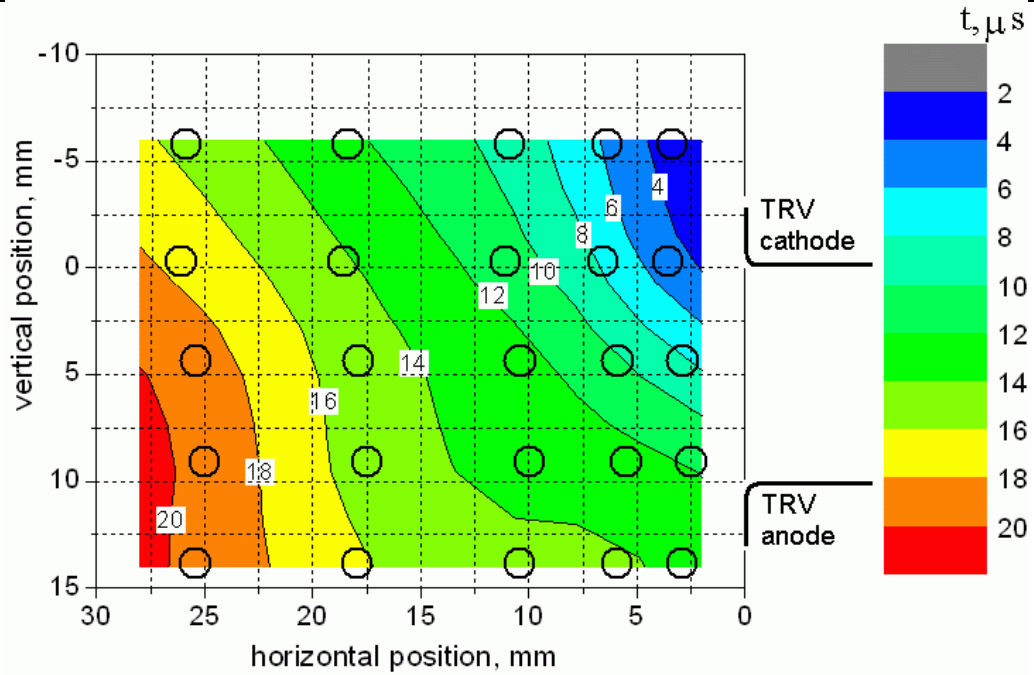


Рис. 45. Время полуоткрытия зонда vs. положение зонда при $I_{\max} = 8$ кА при темпе роста ПВН = -0.4 кВ/мкс. Shield grounded. Позиции зондов показаны окружностями.

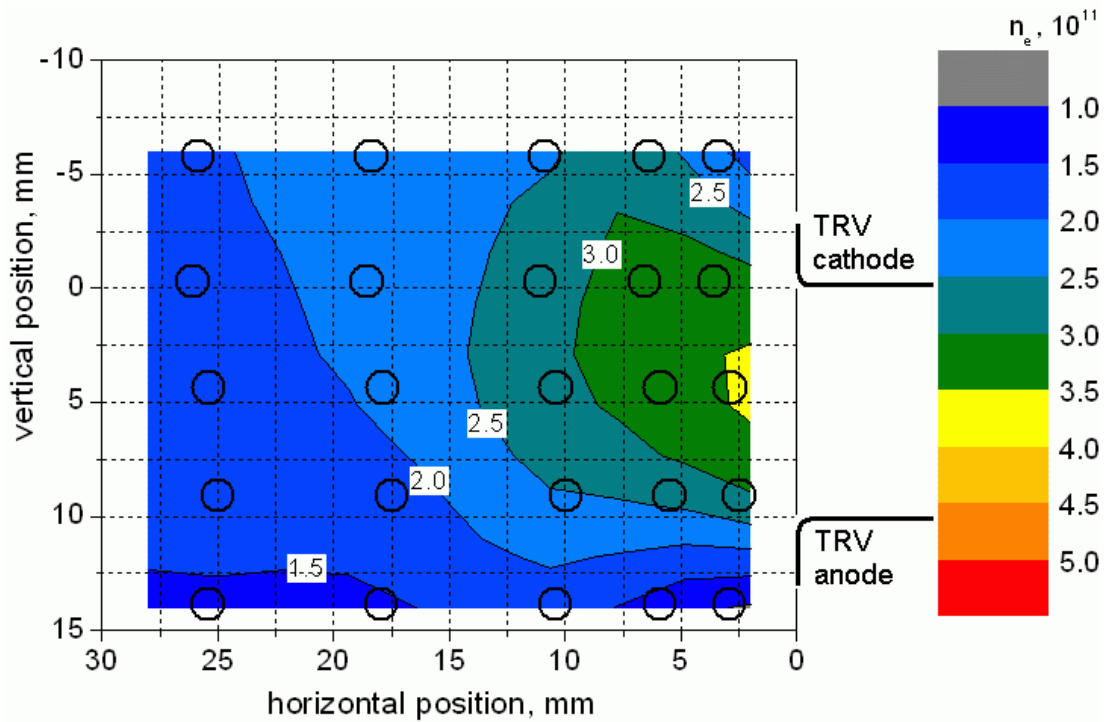


Рис. 46. Распределение электронной плотности при $I_{\max}=8$ кА при темпе роста ПВН = -0.4 кВ/мкс. Позиции зондов показаны окружностями.

Условия эксперимента:

- Амплитуда тока дуги 8 кА;
- Темп падения тока вблизи НТ –1.85 А/мкс; и
- Темп роста ПВН 0,4 В/мкс при длительности линейной части роста 15 мкс.
- Экран находился под потенциалом ПВН.

Таблица 69. Положение зондов.

Номер зонда	1	2	3	4	5
х, мм	3.39	3.56	2.81	2.51	2.92
у, мм	-5.86	-0.37	4.34	9.09	13.83

Таблица 70. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 3.39$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	3.2	4.6	9.1	12.6	14.2	0.2	0.26	0.32	0.37	0.13	ц.
	3.3	5.3	8.8	12.3	13.6	0.16	0.24	0.27	0.24	0.08	ц.-справа
	3.7	5.6	9.2	13.4	15.1	0.68	0.62	0.8	0.92	0.88	ц.(back)
	3.3	5.2	8.3	12.3	13.6	0.31	0.34	0.48	0.46	0.17	back
	4	6.1	10.2	14	14.5	0.32	0.82	1.06	1.02	0.3	с-г-f
среднее	3.5	5.36	9.12	12.9	14.2	0.33	0.46	0.59	0.60	0.31	
СКО	0.34	0.55	0.7	0.75	0.64	0.21	0.25	0.34	0.35	0.33	

Таблица 71. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 6.39$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	6.2	8.6	9.7	12.7	13.4	0.34	0.32	0.34	0.3	0.13	справа
	7.2	9.2	11.4	14.3	14.6	0.34	0.44	0.56	0.54	0.31	ц.-front
	6.7	8.6	10.7	14.2	15.1	0.34	0.36	0.44	0.42	0.17	с-г-(f)
	7.1	8.9	11.1	13.9	15.5	0.14	0.18	0.38	0.6	0.6	слева-back
	7.6	9.6	11.5	13.9	15.2	0.3	0.32	0.39	0.41	0.36	ц.-back
среднее	6.96	8.98	10.9	13.8	14.8	0.29	0.32	0.42	0.45	0.31	
СКО	0.53	0.43	0.73	0.64	0.83	0.09	0.09	0.08	0.12	0.2	

Таблица 72. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 10.89$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	8	9.1	11.5	12.1	12.8	0.2	0.22	0.22	0.18	0.1	справа(front)
	9.4	11.4	12.3	12.8	14.3	0.18	0.19	0.21	0.2	0.16	справа-

											front
	11.5	13.4	15.4	15.9	16.5	0.33	0.39	0.57	0.58	0.55	ц.-front
	10.6	12.1	14.3	14.7	15.6	0.32	0.27	0.3	0.28	0.22	ц.
	10.8	11.7	15.3	16.8	17.8	0.66	0.76	1.08	1.24	1.08	слева-ц.
среднее	10.1	11.5	13.8	14.5	15.4	0.34	0.37	0.48	0.5	0.42	
СКО	1.38	1.56	1.77	2	1.94	0.19	0.23	0.37	0.45	0.41	

Таблица 73. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 18.39$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	14.4	14.6	15	16	17.9	0.28	0.22	0.25	0.25	0.2	ц.
	12.9	13	13.9	14.3	13.5	0.17	0.16	0.18	0.18	0.17	ц.-front
	13.2	14	16	15	15	0.12	0.11	0.11	0.1	0.1	ц.
	12.6	14.2	15.4	15.4	15	0.16	0.13	0.13	0.1	0.09	справа
	9.8	12	12.8	14.3	12.8	0.11	0.11	0.11	0.11	0.1	справа-front
среднее	12.6	13.6	14.6	15	14.8	0.17	0.14	0.16	0.15	0.13	
СКО	1.7	1.05	1.27	0.73	1.96	0.07	0.05	0.06	0.07	0.05	

Таблица 74. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 25.89$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	13	13.7	14.6	14.8	14.1	0.34	0.28	0.24	0.18	0.11	справа
	13	14.8	14.8	14	14.9	0.23	0.21	0.22	0.22	0.21	*
	12.8	15	16.4	16.8	16.2	0.18	0.16	0.18	0.18	0.18	ц.-слева
	14.6	16.6	17.9	17.1	16.7	0.21	0.21	0.26	0.27	0.26	ц.-слева
	12.5	13	14.9	14.8	13	0.07	0.06	0.06	0.05	0.06	справа-front
среднее	13.2	14.6	15.7	15.5	15	0.21	0.18	0.19	0.18	0.16	
СКО	0.82	1.38	1.41	1.37	1.51	0.1	0.08	0.08	0.08	0.08	

Таблица 75. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 33.39$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	6.3	6.6	6.6	6.4	5.8	0.07	0.05	0.04	0.04	0.04	справа-front
	12.2	12.4	12.6	12.7	11.3	0.18	0.16	0.16	0.14	0.13	ц.
	14	14.3	14.5	13.6	15.1	0.21	0.2	0.23	0.24	0.23	с-l-f
	14.6	15	17.9	18.1	15.7	0.19	0.17	0.2	0.22	0.22	ц.-слева
	10.2	11.8	11.8	12.1	9.1	0.09	0.07	0.08	0.08	0.09	с-r-f
среднее	11.5	12.	12.7	12.6	11.4	0.15	0.13	0.14	0.14	0.14	
СКО	3.36	3.3	4.13	4.18	4.15	0.06	0.06	0.08	0.09	0.08	

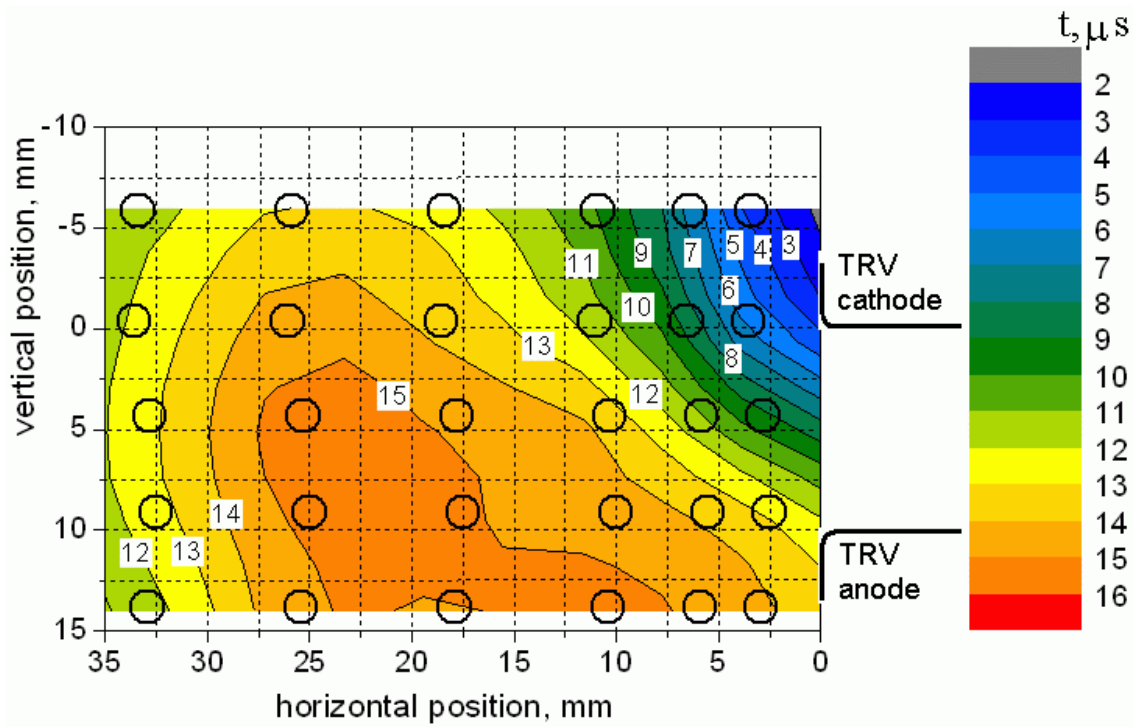


Рис. 47. Время полуоткрытия зонда vs. положение зонда при $I_{\max} = 8$ кА при темпе роста ПВН = -0.4 кВ/мкс. Полозиции зондов показаны окружностями. Shield TRV connected.

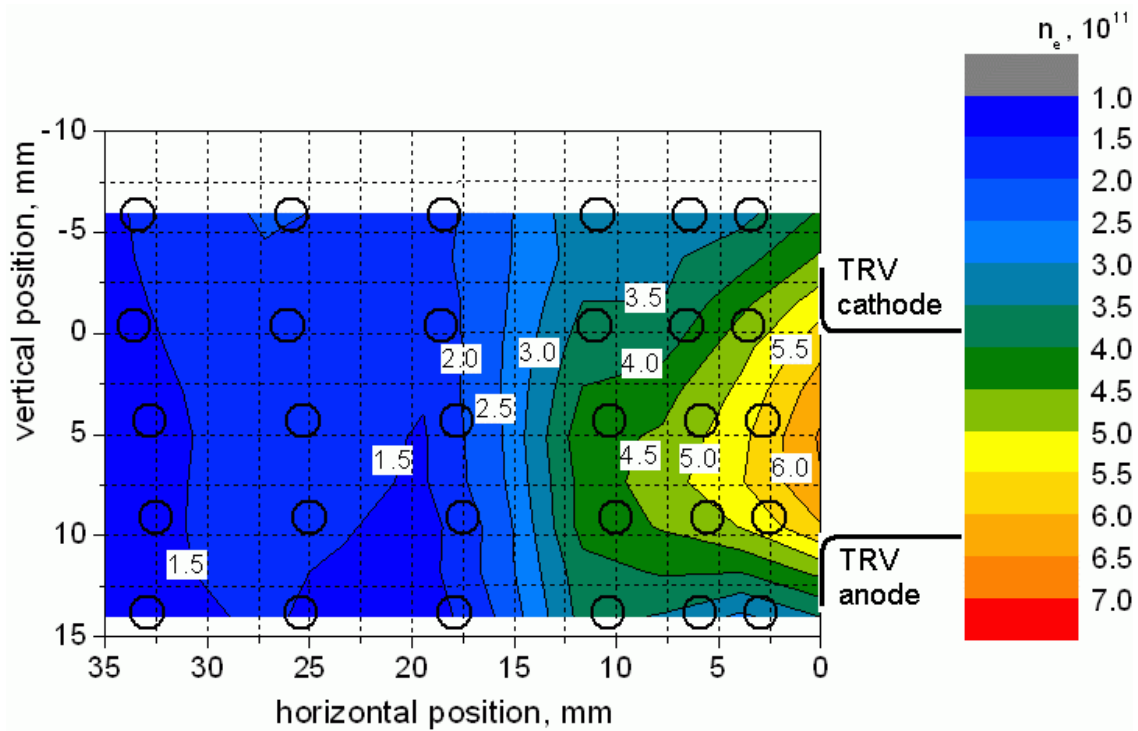


Рис. 48. Распределение электронной плотности при $I_{\max}=8$ кА при темпе роста ПВН = -0.4 кВ/мкс. Полозиции зондов показаны окружностями.

Условия эксперимента:

- Амплитуда тока дуги 10 кА;
- Темп падения тока вблизи НТ –1.85 А/мкс; и
- Темп роста ПВН 0,4 В/мкс при длительности линейной части роста 15 мкс.
- Экран находился под потенциалом земли.

Таблица 76. Положение зондов.

Номер зонда	1	2	3	4	5
х, мм	3.39	3.56	2.81	2.51	2.92
у, мм	-5.86	-0.37	4.34	9.09	13.83

Таблица 77. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 3.39$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	4.5	5.6	9.5	13.2	*	0.31	0.38	0.51	0.44	0.13	ц.
	2.8	4.9	8	12.4	13.9	0.07	0.12	0.16	0.14	0.04	справа
	3.1	5.1	8.9	12.5	14	0.24	0.39	0.5	0.44	0.12	справа
	4.4	6.1	11.3	15.3	17.5	0.24	0.36	0.62	0.6	0.3	*
	2.8	3.5	7.3	10.8	*	0.06	0.08	0.1	0.08	0.04	справа
среднее	3.52	5.04	9	12.8	15.1	0.18	0.27	0.38	0.34	0.13	
СКО	0.86	0.98	1.54	1.63	2.05	0.11	0.15	0.23	0.22	0.11	

Таблица 78. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 10.89$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	9.9	12.7	14.8	17.5	*	0.14	0.15	0.19	0.17	0.14	ц.
	10.3	13	15.2	17	*	0.22	0.22	0.23	0.2	0.12	ц.
	12.2	15.3	18	20.5	27.5	0.18	0.22	0.34	0.45	0.41	ц.
	11.3	14	16.1	18.2	*	0.18	0.21	0.35	0.43	0.41	слева
среднее	10.9	13.8	16.	18.3	27.5	0.18	0.2	0.28	0.31	0.27	
СКО	1.03	1.17	1.42	1.55	*	0.03	0.03	0.08	0.15	0.16	

Таблица 79. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 18.39$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	19.5	23	25.5	28.8	32.5	0.32	0.35	0.48	0.61	0.53	с-b-l
	19.2	22.9	25	28.1	33	0.5	0.48	0.5	0.48	0.37	ц.-back
	13.7	16.8	17.5	19.1	23.5	0.26	0.22	0.22	0.18	0.12	справа-front

	18.7	21.1	23.9	26.9	29.9	0.26	0.29	0.45	0.58	0.57	слева
среднее	17.8	21	23	25.7	29.7	0.34	0.34	0.41	0.46	0.4	
СКО	2.74	2.9	3.71	4.49	4.37	0.11	0.11	0.13	0.2	0.2	

Таблица 80. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 25.89$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	17.7	19.6	21.9	23.5	27.7	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11	справа-front
	24	26.8	29.3	32	35.5	0.17	0.16	0.18	0.19	0.16	c-l-f
	24.1	26.7	28.5	31.4	34.8	0.24	0.26	0.37	0.48	0.45	*
	24.2	26.9	29.5	32.1	36	0.22	0.24	0.32	0.34	0.32	*
среднее	22.5	25	27.3	29.8	33.5	0.19	0.2	0.25	0.28	0.26	
СКО	3.2	3.6	3.63	4.1	3.9	0.05	0.07	0.12	0.16	0.16	

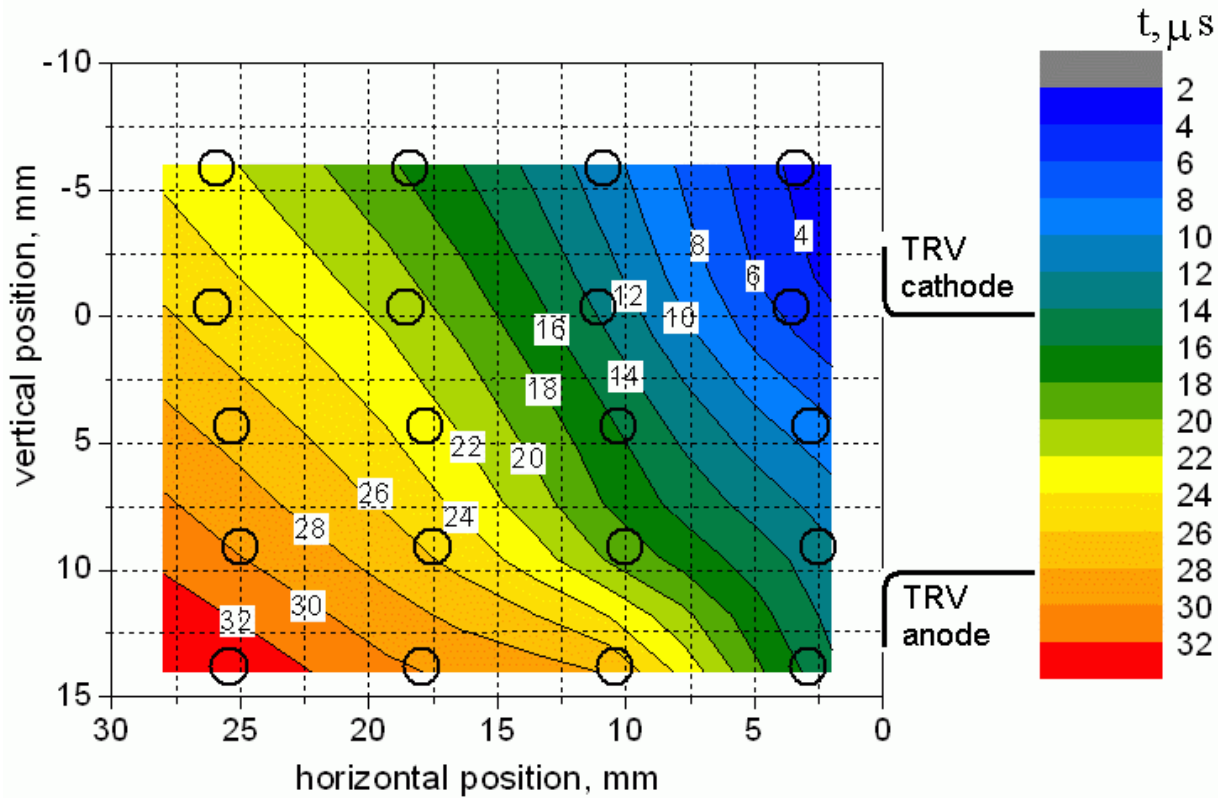


Рис. 49. Время полуоткрытия зонда vs. положение зонда при $I_{\max} = 10$ кА при темпе роста ПВН = -0.4 кВ/мкс. Положиции зондов показаны окружностями.

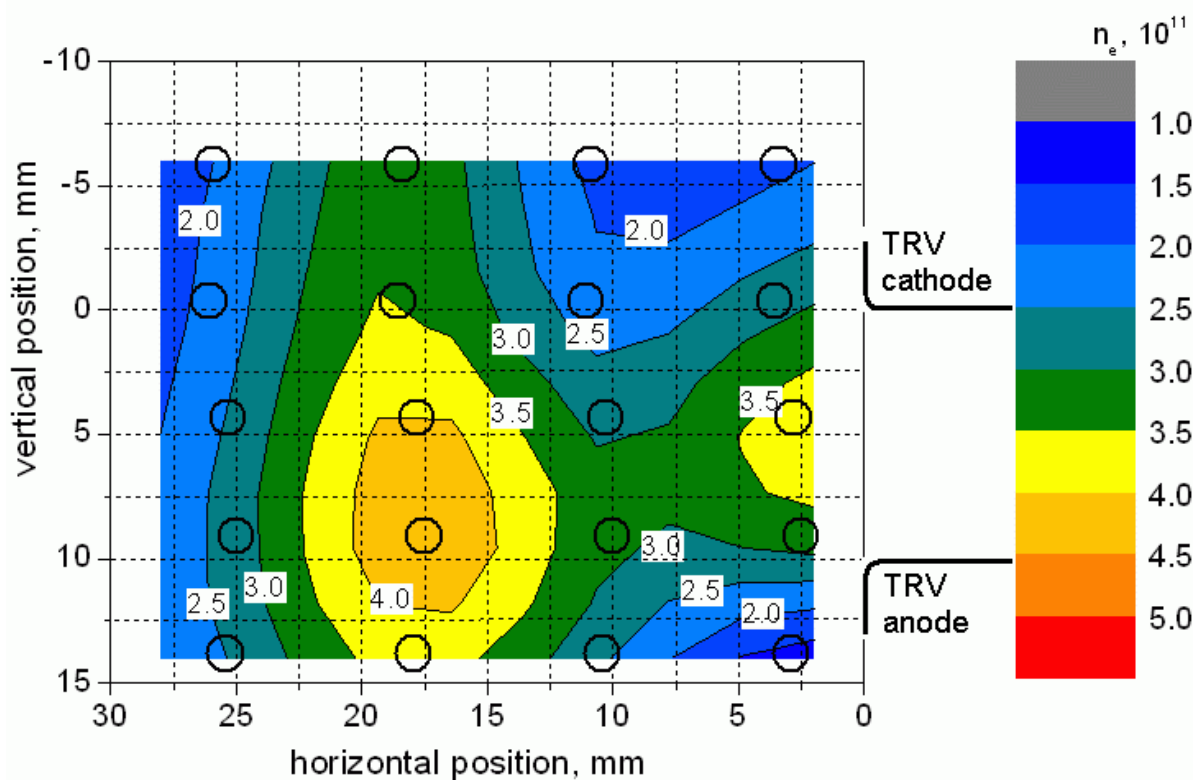


Рис. 50. Распределение электронной плотности при $I_{\max}=10\text{кА}$ при темпе роста ПВН = -0.4кВ/мкс . Позиции зондов показаны окружностями.

Приложение МХ6

Условия эксперимента:

- Амплитуда тока дуги 10 кА;
- Темп падения тока вблизи НТ -1.85 А/мкс ; и
- Темп роста ПВН $0,4\text{ В/мкс}$ при длительности линейной части роста 15 мкс.
- Экран находился под потенциалом ПВН.

Таблица 81. Положение зондов.

Номер зонда	1	2	3	4	5
х, мм	3.39	3.56	2.81	2.51	2.92
у, мм	-5.86	-0.37	4.34	9.09	13.83

Таблица 82. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 3.39$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	4.1	6.6	11.5	15.3	*	0.44	0.5	0.69	0.68	0.14	ц.
	5.1	*	*	21.5	22	0.2	*	*	0.48	0.26	ц.
	4	6.1	11.2	14.3	15.8	0.2	0.3	0.41	0.36	0.1	справа-front
	5	7.1	12.5	16.3	18.3	0.21	0.33	0.68	0.68	0.24	с-f-r
	5.1	*	*	21	*	0.1	*	*	0.48	0.4	слева-ц.
	3.9	5.8	10.8	14.1	16.8	0.1	0.14	0.22	0.21	0.06	*
среднее	4.53	6.4	11.5	17.1	18.2	0.21	0.32	0.5	0.48	0.2	
СКО	0.59	0.57	0.73	3.33	2.7	0.12	0.15	0.23	0.18	0.13	

Таблица 83. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 10.89$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	11	13.9	15.6	16.7	18.8	0.56	0.43	0.53	0.54	0.36	*
	9.8	12.2	14.3	15.3	17.1	0.28	0.26	0.24	0.16	0.1	back
	11	14	15.1	16.1	*	0.18	0.22	0.51	0.26	0.12	справа
	11	13.7	15.5	16.5	19.9	0.26	0.24	0.29	0.27	0.18	справа
	12.6	16.3	17.8	20	22	0.46	0.36	0.48	0.52	0.34	ц.(back)
среднее	11.1	14	15.7	16.9	19.5	0.35	0.3	0.41	0.35	0.22	
СКО	1	1.47	1.3	1.8	2.05	0.16	0.09	0.13	0.17	0.12	

Таблица 84. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 18.39$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	17.1	19.9	21.9	22.9	23.9	0.24	0.26	0.42	0.56	0.5	слева
	17.1	19.2	21.3	22.3	23.7	0.34	0.32	0.39	0.42	0.36	ц.-front
	17.4	20	21.5	22.5	24.5	0.31	0.33	0.51	0.68	0.61	ц.(слева)
	19.2	21.1	23.1	24.1	25.3	0.29	0.35	0.56	0.7	0.64	*
среднее	17.7	20.1	22	23	24.4	0.3	0.32	0.47	0.59	0.53	
СКО	1.01	0.79	0.81	0.81	0.72	0.04	0.04	0.08	0.13	0.13	

Таблица 85. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 25.89$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	18.4	18.7	18.2	*	*	0.23	0.2	0.21	0.18	0.15	с-r-b
	15.1	17.1	18.8	*	19.5	0.2	0.16	0.19	0.16	0.14	*
	18	19.3	20.5	20.5	21	0.29	0.28	0.34	0.37	0.34	ц.
	19.8	21.5	23	23.9	*	0.27	0.23	0.27	0.3	0.27	ц.
	21.8	23.5	25.7	27.9	28.7	0.36	0.33	0.35	0.47	0.39	слева-ц.

среднее	18.6	20.	21.2	24.1	23.1	0.27	0.24	0.27	0.3	0.26	
СКО	2.45	2.5	3.11	3.7	4.94	0.06	0.07	0.07	0.13	0.11	

Таблица 86. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 33.39$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	13.3	14.4	15.8	16.2	13.3	0.15	0.12	0.14	0.14	0.11	справа
	17	16.7	16.6	16.4	15.5	0.25	0.2	0.23	0.23	0.2	ц.
	10.8	*	10.9	14.7	*	0.07	0.06	0.07	0.08	0.06	справа
	12.7	14.7	17.2	16	13.5	0.12	0.1	0.11	0.11	0.1	ц.-справа
	15	15.9	17.8	19.4	15.9	0.17	0.15	0.17	0.18	0.14	*
среднее	13.7	15.4	15.7	16.5	14.6	0.15	0.13	0.14	0.15	0.12	
СКО	2.35	1.07	2.76	1.73	1.34	0.07	0.05	0.06	0.06	0.05	

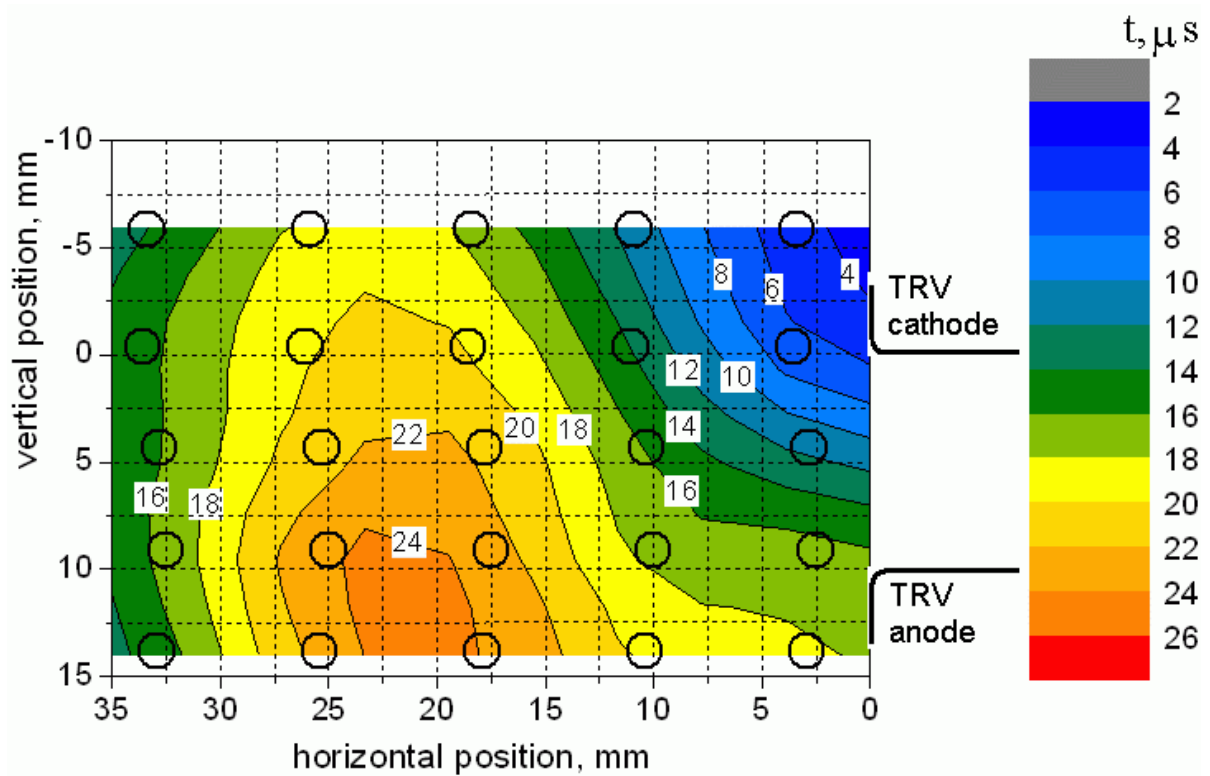


Рис. 51. Время полуоткрытия зонда vs. положение зонда при $I_{\max} = 10$ кА при темпе роста ПВН = -0.4 кВ/мкс. Положиции зондов показаны окружностями. Shield is of TRV potential.

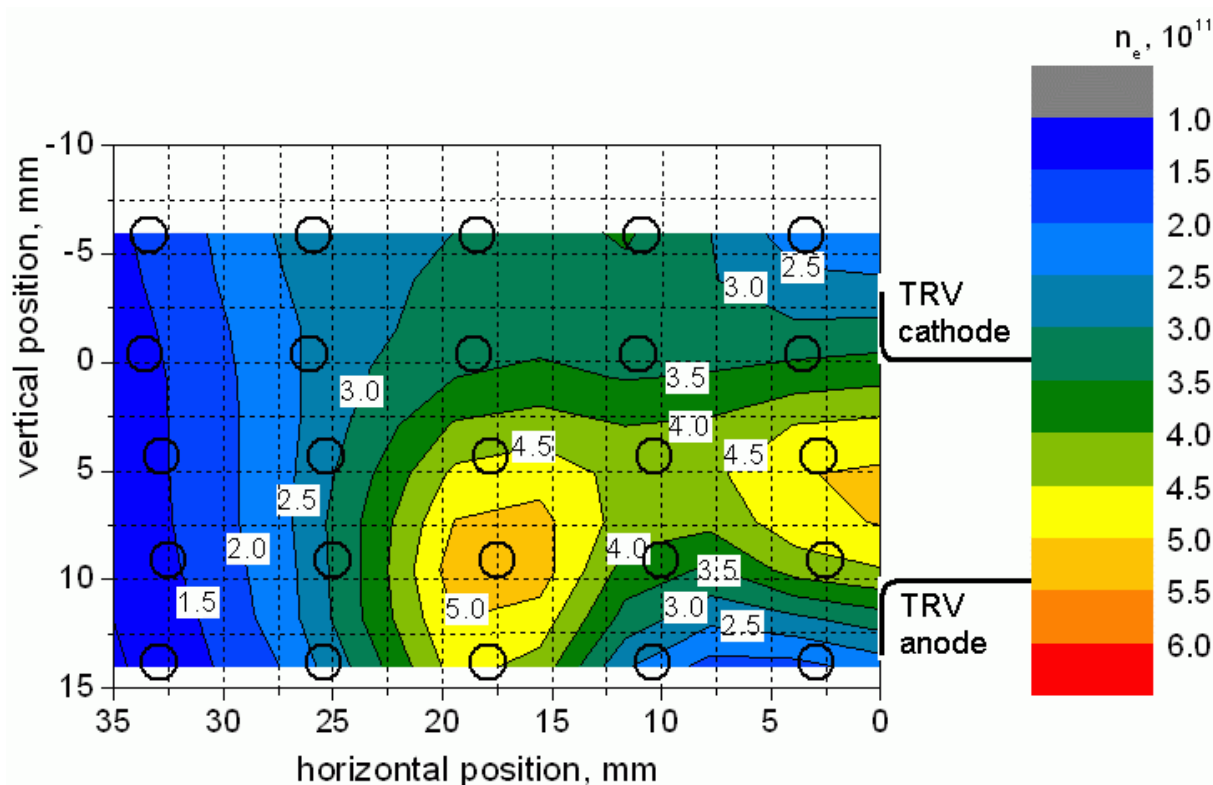


Рис. 52. Распределение электронной плотности при $I_{\max}=10\text{кА}$ при темпе роста ПВН = -0.4кВ/мкс . Позиции зондов показаны окружностями.

Приложение МХ7

Условия эксперимента:

- Амплитуда тока дуги 12 кА;
- Темп падения тока вблизи НТ -1.85 А/мкс ; и
- Темп роста ПВН $0,4\text{ В/мкс}$ при длительности линейной части роста 15 мкс.
- Экран находился под потенциалом ПВН.

Таблица 87. Положение зондов.

Номер зонда	1	2	3	4	5
х, мм	3.04	3.42	3.11	2.33	2.53
у, мм	-5.39	-0.44	4.61	9.36	14.24

Таблица 88. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x=3.04\text{ мм}$

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	5.1	7.8	13.4	16.6	19.5	0.5	0.63	1.06	0.9	0.24	back
	3.8	5.6	10.5	13.6	*	0.1	0.11	0.15	0.12	0.06	справа

	4.6	*	*	*	20.4	0.17	*	*	*	0.35	слева
среднее	4.5	6.7	12	15.1	20	0.26	0.37	0.61	0.51	0.22	
СКО	0.66	1.56	2.05	2.12	0.64	0.21	0.26	0.46	0.39	0.15	

Таблица 89. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 4.54$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	6.5	9.5	13	15.5	17.5	0.48	0.41	0.5	0.42	0.19	справа
	6.6	*	13.2	17	21	0.16	*	0.3	0.38	0.29	ц.
	6.8	*	14	17.1	20	0.3	*	0.56	0.43	0.13	справа
	7.1	*	14.5	16.6	20.3	0.3	*	0.22	0.22	0.14	back
	*	*	15.3	18	21	0.36	*	0.73	0.49	0.16	справа-back
среднее	6.75	9.5	14	16.8	20	0.32	0.41	0.46	0.39	0.18	
СКО	0.26	*	0.95	0.91	1.44	0.12	*	0.20	0.10	0.06	

Таблица 90. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 10.54$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	16.5	20.1	23.2	26.3	26.9	0.48	0.47	0.65	0.69	0.48	ц.
	10.5	14	16.7	19	21.5	0.13	0.13	0.18	0.18	0.14	справа
	11	13.8	16.5	19.2	23.5	0.45	0.42	0.5	0.38	0.19	справа
	12.9	16.4	19.6	23.3	*	0.32	0.4	0.72	*	0.88	слева
среднее	12.7	16.1	19	22	24	0.35	0.35	0.51	0.42	0.43	
СКО	2.72	2.93	3.14	3.51	2.73	0.16	0.16	0.24	0.21	0.34	

Таблица 91. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 18.04$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	16.7	17.7	19.5	22.8	23.9	0.15	0.14	0.17	0.16	0.14	справа
	20.7	23.2	25.2	29.7	31.8	0.57	0.54	0.58	0.61	0.48	ц.
	15.6	17.6	21.3	23.9	25	0.16	0.14	0.16	0.14	0.12	справа
	20.7	24	26.8	29.9	32	0.42	0.42	0.64	0.83	0.81	слева
среднее	18.4	20.6	23.2	26.6	28.2	0.33	0.31	0.39	0.44	0.39	
СКО	2.67	3.45	3.38	3.75	4.32	0.21	0.20	0.26	0.34	0.33	

Таблица 92. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 25.54$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	16.7	18.8	20.7	21.4	22.8	0.14	0.12	0.14	0.14	0.13	справа
	21.4	24.2	26.1	27.6	*	0.36	0.32	0.38	0.37	0.29	ц.(back)
	16.8	18.2	20.2	21.5	20.5	0.13	0.12	0.14	0.14	0.12	справа-

											front
	27.4	30.7	32.2	35.1	36	0.76	0.74	0.84	1.12	0.88	слева
среднее	20.6	23	24.8	26.4	26.4	0.35	0.33	0.38	0.44	0.36	
СКО	5.05	5.81	5.61	6.48	8.36	0.29	0.29	0.29	0.4	0.31	

Таблица 93. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 33.04$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	19.6	22.6	25.7	27.3	23.6	0.28	0.28	0.38	0.48	0.43	ц.-слева
	15.9	16.4	16.5	16.8	15.5	0.23	0.18	0.2	0.18	0.14	справа
	10.4	13.2	14.8	16	11.6	0.11	0.09	0.11	0.11	0.08	back-справа
	16.2	17.8	18.2	18.8	17	0.34	0.27	0.31	0.32	0.25	с-l-f
среднее	15.5	17.5	18.8	19.7	16.9	0.24	0.21	0.25	0.27	0.23	
СКО	3.81	3.91	4.8	5.18	5	0.1	0.09	0.12	0.17	0.15	

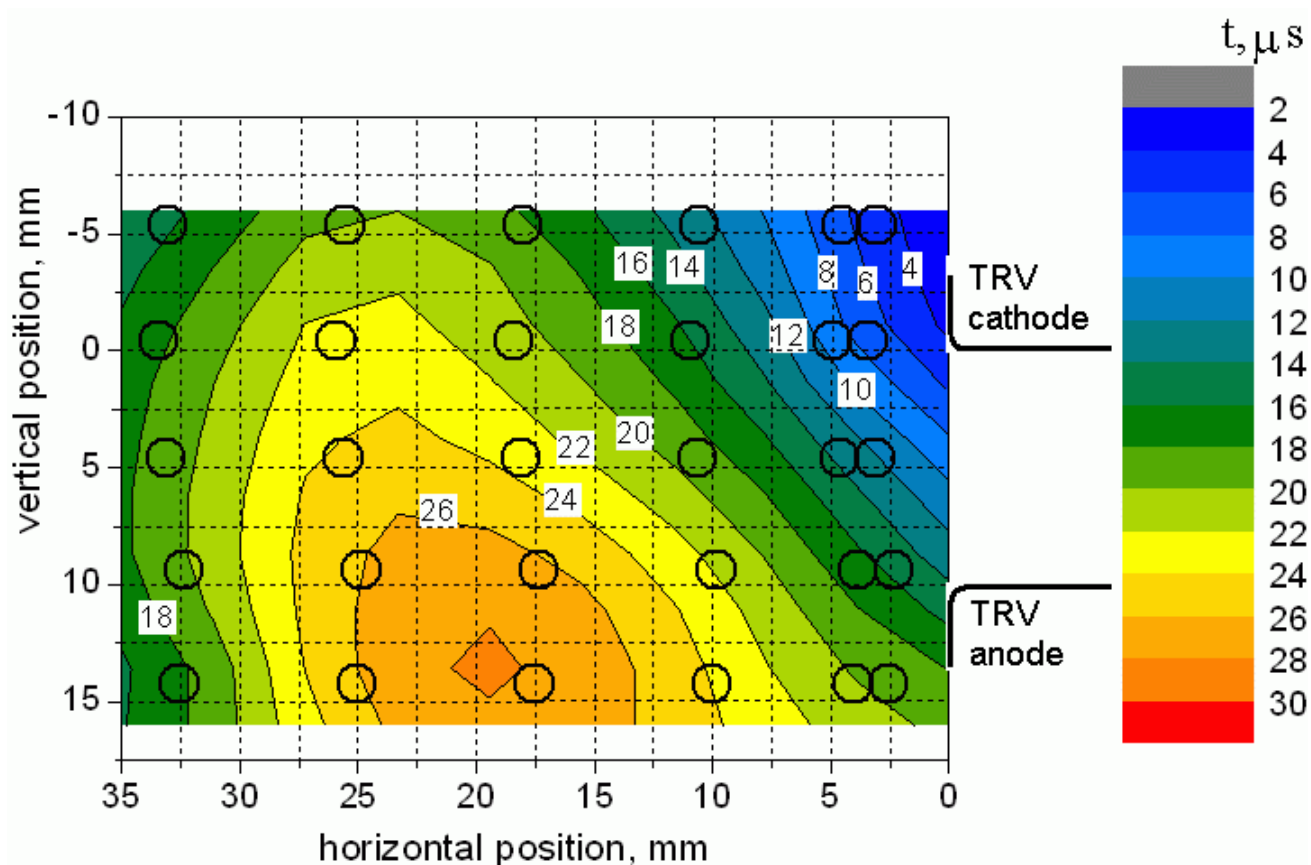


Рис. 53. Время полуоткрытия зонда vs. положение зонда при $I_{\max} = 12$ кА при темпе роста ПВН = -0.4 кВ/мкс. Положения зондов показаны окружностями.

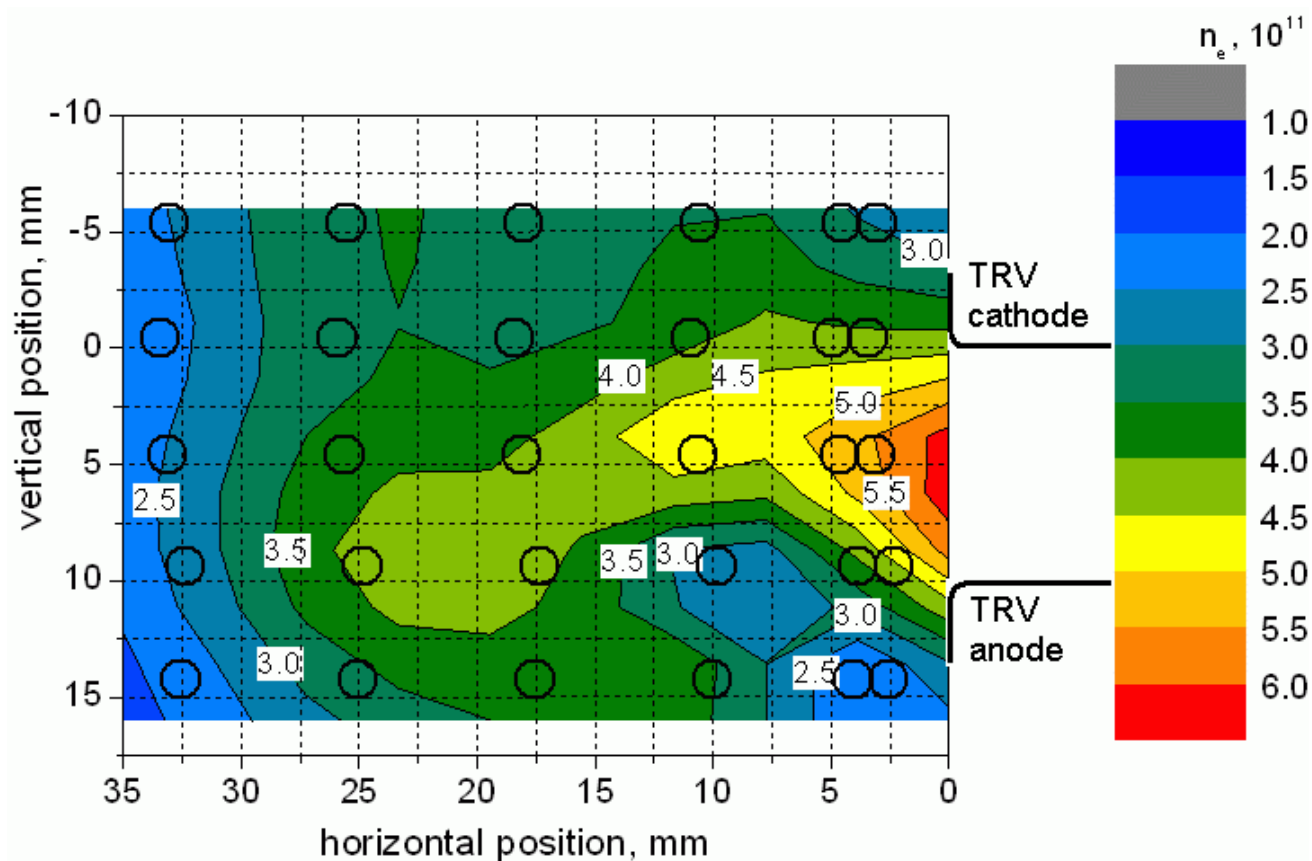


Рис. 54. Распределение электронной плотности при $I_{\max}=12\text{кА}$ при темпе роста ПВН = -0.4кВ/мкс . Позиции зондов показаны окружностями.

Приложение МХ8

Условия эксперимента:

- Амплитуда тока дуги 12 кА;
- Темп падения тока вблизи НТ -1.85 А/мкс ; и
- Темп роста ПВН $0,4\text{ В/мкс}$ при длительности линейной части роста 15 мкс.
- Экран находился под потенциалом земли.

Таблица 94. Положение зондов.

Номер зонда	1	2	3	4	5
х, мм	3.86	3.73	4.07	4	4
у, мм	-5.9	-0.78	4.03	9.12	13.9

Таблица 95. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 3.86$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	4.4	6.8	12.1	16.2	17.9	0.32	0.48	0.56	0.46	0.16	справа
	5.7	8.7	14.1	17.5	18.7	0.24	0.44	0.72	0.8	0.5	ц.-back
	4.9	7	11.5	14.9	17.4	0.3	0.44	0.56	0.47	0.21	справа
	5.1	7.8	13.7	17.5	18.8	0.2	0.37	0.47	0.52	0.22	ц.-back
среднее	5.03	7.56	12.9	16.5	18.2	0.27	0.43	0.58	0.56	0.27	
СКО	0.54	0.87	1.25	1.24	0.67	0.06	0.05	0.10	0.16	0.15	

Таблица 96. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 11.36$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	10.3	12.5	15.2	16.8	16.9	0.19	0.23	0.26	0.27	0.19	справа
	14.8	17.7	20.9	24.7	28.5	0.33	0.44	0.52	0.56	0.48	ц.-front
	11.7	13.9	16.3	18.9	19.4	0.17	0.2	0.2	0.2	0.16	справа
	10.6	13.2	15.8	18.9	25	0.14	0.18	0.19	0.19	0.15	справа-front
	12.5	16.4	19.8	23.8	27	0.2	0.25	0.3	0.38	0.35	ц.-слева
среднее	12	14.7	17.6	20.6	23.4	0.21	0.26	0.29	0.32	0.27	
СКО	1.80	2.21	2.57	3.44	5	0.07	0.10	0.13	0.15	0.14	

Таблица 97. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 18.86$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	21.2	23.8	26.6	31.1	34.5	0.29	0.38	0.41	0.48	0.47	слева
	16.7	19	21.6	24.3	27	0.16	0.17	0.17	0.18	0.15	справа
	19.7	23.2	26.1	30.2	34.1	0.25	0.29	0.28	0.27	0.21	ц.-справа
	22.6	25.6	29.6	34.1	38.7	0.35	0.47	0.52	0.62	0.6	слева
среднее	20.1	22.9	26	29.9	33.6	0.26	0.33	0.34	0.39	0.36	
СКО	2.53	2.79	3.30	4.10	4.85	0.08	0.13	0.15	0.2	0.21	

Таблица 98. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 26.36$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	19	20.2	20.9	21.5	21.6	0.17	0.15	0.12	0.11	0.08	справа
	30.2	33	35.5	37.8	37.9	0.28	0.32	0.33	0.35	0.28	слева
	28.4	30.5	33.4	34.5	35.2	0.22	0.24	0.28	0.28	0.24	с-l-f
	31.7	35	38.5	42.3	43.5	0.31	0.34	0.31	0.31	0.27	ц.(back)
	21.5	23.3	25.3	26.3	26.3	0.21	0.21	0.24	0.24	0.16	справа
среднее	26.2	28.4	30.7	32.5	32.9	0.24	0.25	0.26	0.26	0.21	
СКО	5.59	6.37	7.35	8.48	8.86	0.06	0.08	0.08	0.09	0.09	

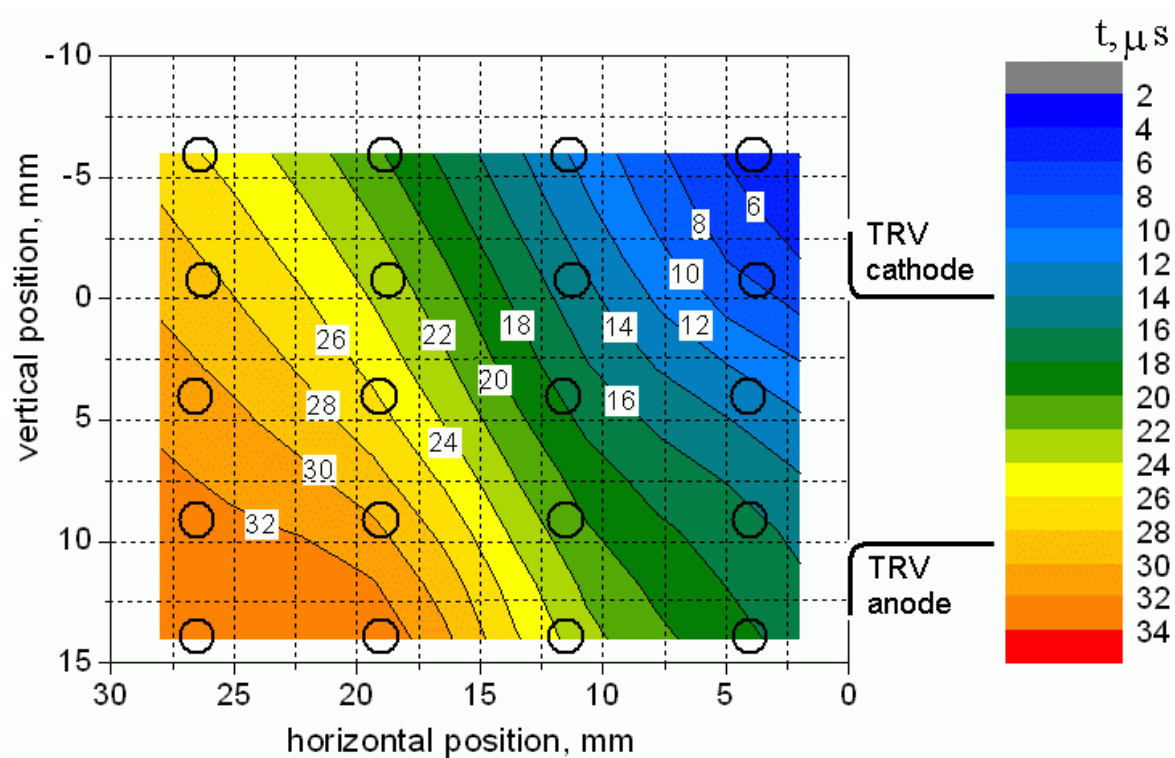


Рис. 55. Время полуоткрытия зонда vs. положение зонда при $I_{\max} = 12$ кА при темпе роста ПВН = -0.4 кВ/мкс. Положиции зондов показаны окружностями.

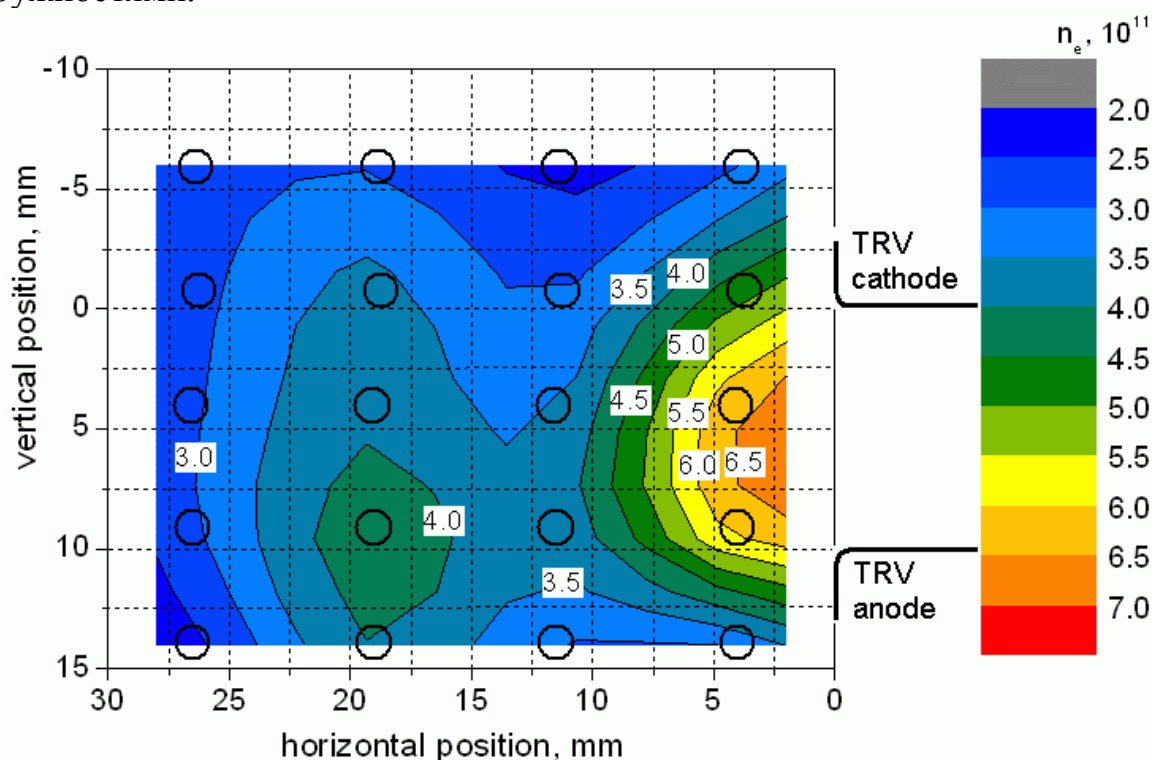


Рис. 56. Распределение электронной плотности при $I_{\max}=12$ кА при темпе роста ПВН = -0.4 кВ/мкс. Положиции зондов показаны окружностями.

Условия эксперимента:

- Амплитуда тока дуги 15 кА;
- Темп падения тока вблизи НТ –1.85 А/мкс; и
- Темп роста ПВН 0,4 В/мкс при длительности линейной части роста 15 мкс.
- Экран находился под потенциалом ПВН.

Таблица 99. Положение зондов.

Номер зонда	1	2	3	4	5
x, мм	3.86	3.73	4.07	4	4
y, мм	-5.9	-0.78	4.03	9.12	13.9

Таблица 100. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 3.86$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	5.6	7.4	12.6	17	*	0.18	0.29	0.32	0.26	0.13	справа
	5	7.1	12.4	17.1	18.4	0.14	0.24	0.28	0.24	0.11	справа
	6.2	7.8	13.9	18.8	21.2	0.18	0.4	1	1	0.54	ц.
	5.5	9.3	15.1	19.3	20.5	0.24	0.54	0.69	0.58	0.18	справа-front
среднее	5.58	7.9	13.5	18.1	20.	0.19	0.37	0.57	0.52	0.24	
СКО	0.49	0.98	1.26	1.17	1.46	0.04	0.13	0.34	0.36	0.20	

Таблица 101. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 11.36$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	16.2	19.8	24.3	28.3	33	0.36	0.59	1.04	1.28	0.96	ц.-слева
	12.5	15.4	18.2	20.5	23.2	0.29	0.36	0.35	0.3	0.22	справа-back
	16.2	20.7	24.1	27	28.8	0.36	0.44	0.57	0.6	0.42	ц.-back
	12.8	16	19	21	23.5	0.31	0.35	0.33	0.27	0.18	справа-front
среднее	14.4	18	21.4	24.2	27.1	0.33	0.44	0.57	0.61	0.45	
СКО	2.05	2.66	3.25	4.02	4.69	0.04	0.11	0.33	0.47	0.36	

Таблица 102. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 18.86$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	18.5	20.7	23	24.5	26.1	0.36	0.4	0.4	0.4	0.36	справа-front
	19	21.3	22.3	23.3	23.5	0.47	0.54	0.57	0.61	0.5	справа(back

											k)
	22.6	26.4	30.1	32.9	35.2	0.32	0.45	0.68	0.9	0.88	слева-back
	17	19.2	22	24.3	25.6	0.22	0.27	0.28	0.27	0.24	справа-ц.
среднее	19.3	21.9	24.4	26.3	27.6	0.34	0.42	0.48	0.55	0.5	
СКО	2.06	2.71	3.34	3.87	4.49	0.09	0.1	0.15	0.24	0.24	

Таблица 103. Время полуоткрытия зонда (мкс). $x = 26.36$ мм

	Время, мкс					Ток на зонд при НТ, А					Анодное пятно
	N1	N2	N3	N4	N5	N1	N2	N3	N4	N5	
	24.5	27.3	29.9	31.2	30.5	0.46	0.54	0.55	0.6	0.52	*
	15.3	16.8	17.3	17.6	16	0.16	0.15	0.14	0.14	0.11	*
	21.4	23.3	24.3	24.5	23.5	0.36	0.43	0.42	0.42	0.32	*
	17.4	19.5	20.7	20.5	18.3	0.27	0.27	0.26	0.25	0.2	справа
	26.5	30.5	32.2	34.2	33.2	0.39	0.46	0.48	0.52	0.48	ц.-back
среднее	21.	23.5	24.9	25.6	24.3	0.33	0.37	0.37	0.39	0.33	
СКО	4.69	5.58	6.21	7.01	7.47	0.12	0.16	0.17	0.19	0.18	

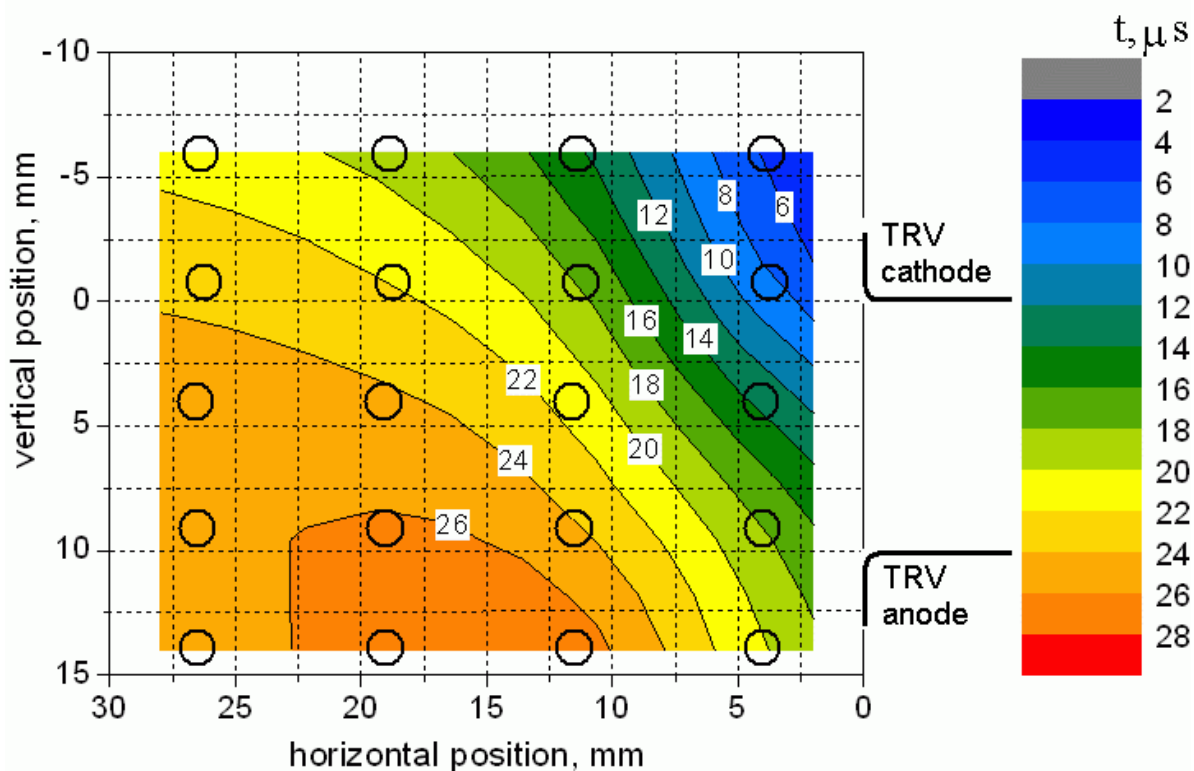


Рис. 57. Время полуоткрытия зонда vs. положение зонда при $I_{\max} = 15$ кА при темпе роста ПВН = -0.4 кВ/мкс. Положиции зондов показаны окружностями.

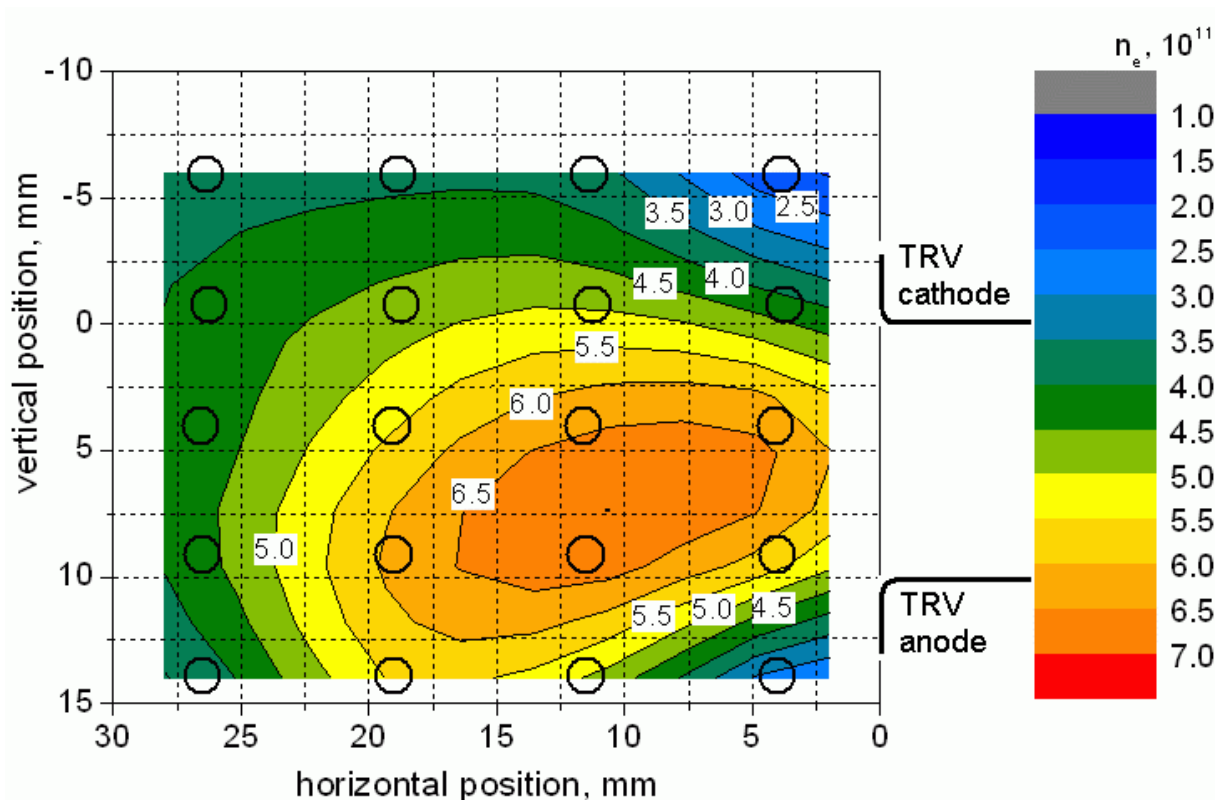


Рис. 58. Распределение электронной плотности при $I_{\max}=15\text{кА}$ при темпе роста ПВН = -0.4 кВ/мкс . Позиции зондов показаны окружностями.

3.2.3. Анализ процесса восстановления вакуумного промежутка после перехода тока дуги через ноль

Из анализа экспериментальных данных следует ряд принципиально важных закономерностей, общих для всех экспериментов независимо от параметров разряда, материала электродов и параметров импульса ПВН. Одной из таких закономерностей является прямая зависимость скорости расширения плазменного слоя от концентрации. Эта закономерность проявляется в зависимости времени оголения зонда катодным слоем от тока на зонд, который, в свою очередь, пропорционален концентрации плазмы (рис. 59).

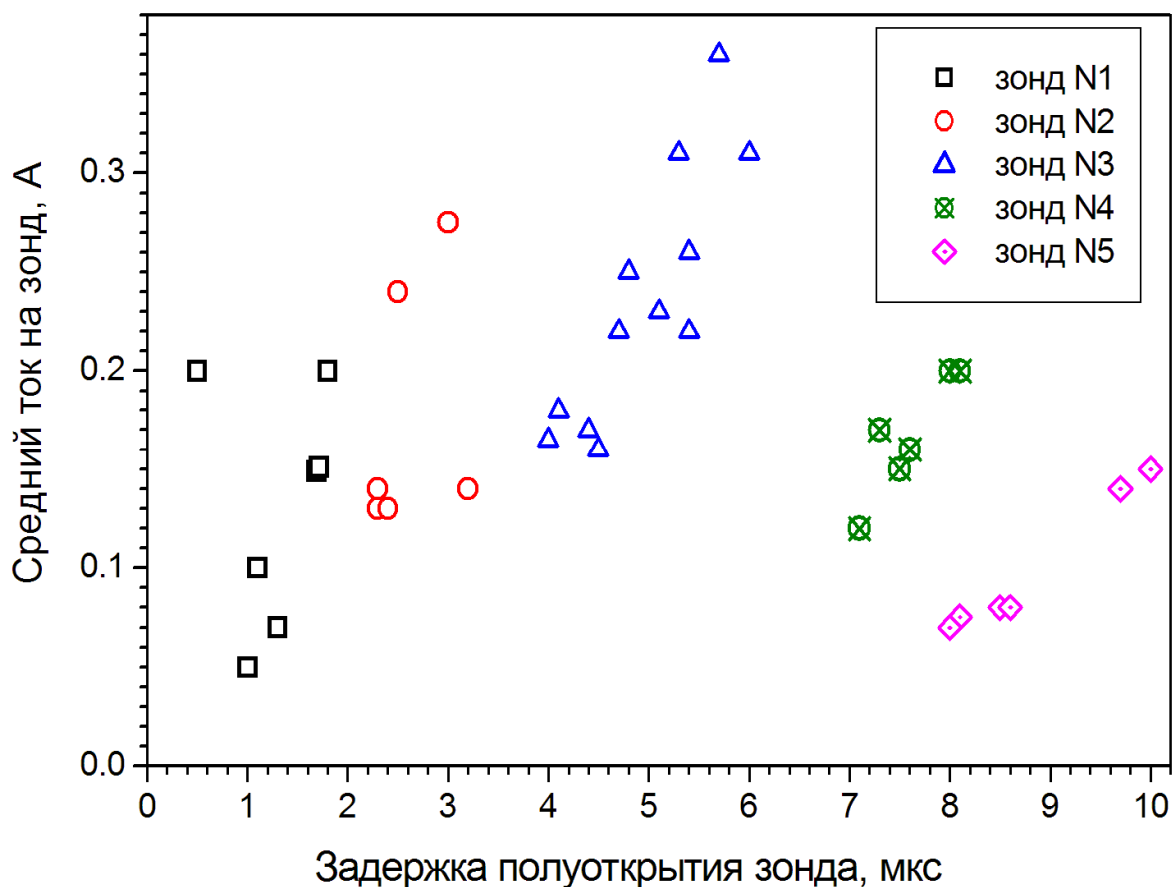


Рис. 59. Зависимость регистрируемого тока на зонд от времени полуоткрытия зонда.

Очевидно, что именно в средней плоскости промежутка на одинаковом удалении от электродов можно ожидать максимальной концентрации плазмы, поскольку источниками плазмы являются пятна на электродах (катодные и анодное). Такая закономерность действительно наблюдается и регистрируется в виде минимума на зависимости скорости расширения катодного слоя от вертикальной позиции зонда (рис. 60), где середина промежутка соответствует расстоянию 0,5 см.

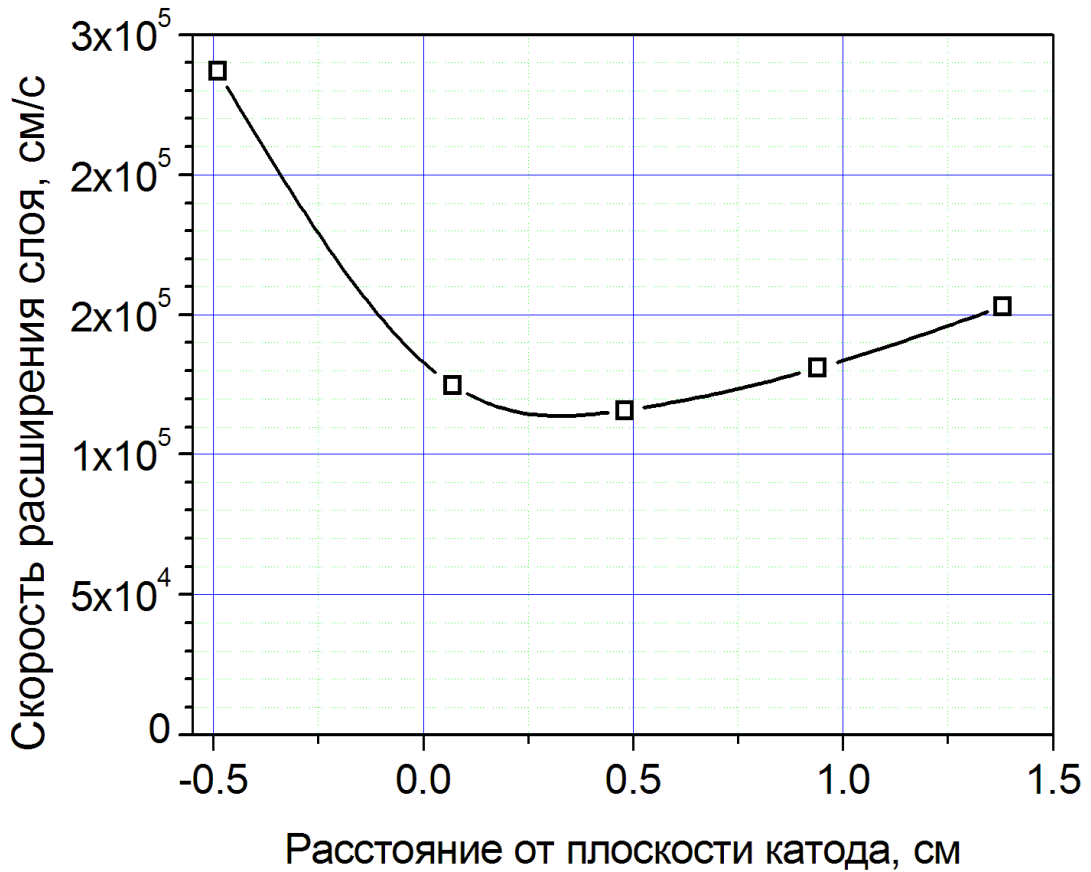


Рис. 60. Зависимость скорости расширения катодного слоя от расстояния до катодной плоскости.

Другим фактором, кроме концентрации, влияющим на скорость расширения плазменной границы, является ПВН, поскольку ширина катодного слоя x_{CL} зависит от напряжения на катоде U_c :

$$x_{CL} = \frac{\sqrt{2}}{3} L_D \left(\frac{2eU_c}{kT_e} \right)^{3/4}, \quad (16)$$

где L_D – длина Дебая, T_e – электронная температура. В этой связи скорость расширения слоя у катодного электрода выше, чем у анодного, что явно видно на рисунке 60.

Скорость расширения слоя падает с ростом тока и увеличивается с ростом скорости нарастания ПВН (рис. 61).

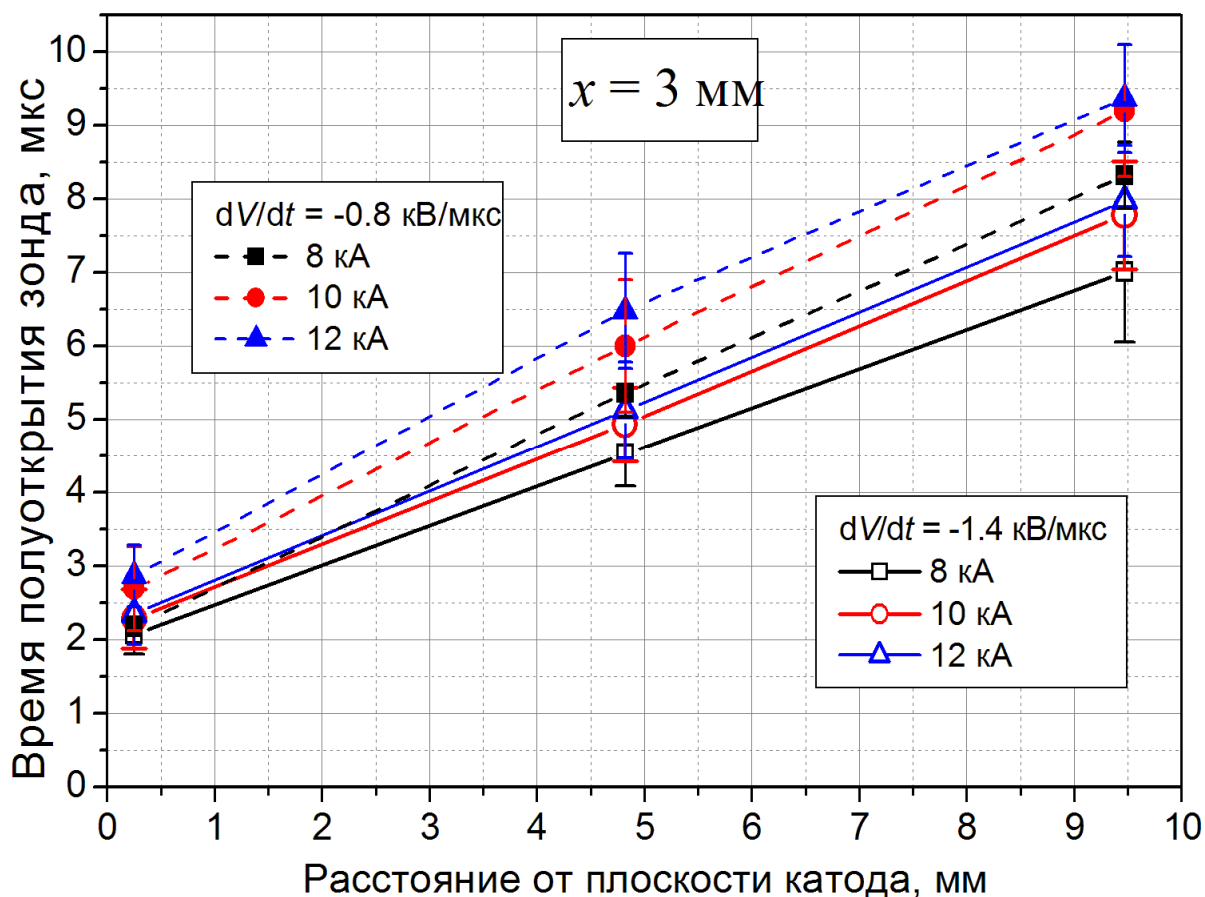


Рис. 61. Влияние тока дуги и скорости роста ПВН на время полуоткрытия зондов на различных расстояниях от плоскости катода.

Скорость распространения катодного слоя (восстановления промежутка) в условиях растущего ПВН определяет среднюю напряжённость электрического поля на катоде. Напряжённость поля в промежутке является ключевым параметром данного процесса, поскольку от её величины зависит анализ возможных механизмов пробоя после НТ. Вычисленные из экспериментальных данных значения напряженности поля приведены в таблице 104.

Анализируя данные таблицы 104, можно утверждать, что напряжённости поля невелики с точки зрения инициирования пробоя по механизму вакуумного пробоя [9]. Но, с другой стороны, этого поля достаточно для

возбуждения аperiодической неустойчивости на поверхности жидкого металла [10] и роста конуса Тейлора, неминуемо приводящего к пробую [11].

Таблица 104. Средние значения скорости распространения катодного слоя и напряжённости электрического поля в восстанавливающемся вакуумном промежутке.

Темп роста ПВН = -1.4 кВ/мкс	<i>i</i> =8 кА		<i>i</i> =10 кА		<i>i</i> =12 кА	
	Скорость слоя, см/мкс	Средняя напряжённость электрического поля, кВ/см	Скорость слоя, см/мкс	Средняя напряжённость электрического поля, кВ/см	Скорость слоя, см/мкс	Средняя напряжённость электрического поля, кВ/см
Зонд N2, <i>y</i> =0.25	0.146	9.6	0.132	10.62	0.128	10.93
Зонд N3, <i>y</i> =4.82	0.126	11.17	0.112	12.16	0.111	12.64
Зонд N4, <i>y</i> =9.47	0.142	9.88	0.128	10.97	0.124	11.24
Темп роста ПВН = -0.8 кВ/мкс	<i>i</i> =8 кА		<i>i</i> =10 кА		<i>i</i> =12 кА	
	Скорость слоя, см/мкс	Средняя напряжённость электрического поля, кВ/см	Скорость слоя, см/мкс	Средняя напряжённость электрического поля, кВ/см	Скорость слоя, см/мкс	Средняя напряжённость электрического поля, кВ/см
Зонд N2, <i>y</i> =0.25	0.138	5.79	0.112	7.15	0.105	7.63
Зонд N3, <i>y</i> =4.82	0.106	7.57	0.095	8.45	0.088	9.13
Зонд N4, <i>y</i> =9.47	0.119	6.7	0.108	7.41	0.106	7.55

Кроме вакуумного пробоя, условия электрической изоляции в промежутке длиной 1 см при давлении 10 Па [12] и напряжённости электрического поля порядка 10^4 В/см (табл. 104) соответствует минимуму кривой Пашена для паров меди [3], т.е., пробой промежутка после НТ может возникать также и по механизму пробоя газонаполненного промежутка низкого давления.

3.2.4. Выводы к разделу 3.2

1. Электронная температура и плотность плазмы сильноточной вакуумной дуги были измерены одиночными и двойными зондами Ленгмюра. Показано, что электронная температура не зависит от тока и случайным образом достигает значений от 1,4 до 3 эВ. При этом для меди характерны более высокие значения температуры плазмы, чем для контактного материала $\text{Cu}_{0.75}\text{Cr}_{0.25}$.
2. После нуля тока дуги плотность плазмы падает настолько, что единственным методом измерения её плотности является измерение электронного тока насыщения на зонд.
3. Динамика катодного слоя после нуля тока при различных темпах роста ПВН была восстановлена с использованием линейки одиночных зондов, сканирующей пространство в радиальном направлении от края контактного промежутка. Скорость расширения слоя падает с ростом тока дуги. Электрическое поле в промежутке растёт с ростом скорости роста ПВН и ростом тока дуги.
4. Измеренные значения скорости расширения катодного слоя близки к значению скорости Бома.
5. Средняя напряжённость электрического поля в промежутке между катодом и плазменной границей имеет значения порядка 10 кВ/см, что недостаточно для инициирования вакуумного пробоя иначе, чем в результате роста конуса Тейлора. Кроме того, в условия контактного промежутка после нуля тока сильноточной вакуумной дуги, такое поле может инициировать пробой по механизму пробоя газонаполненного промежутка низкого давления.

3.3. Написание учебного пособия «Физические основы электрической изоляции и разряда в вакууме» для подготовки магистрантов по программе «Физическая электроника» направления 210100 «Электроника и микроэлектроника» в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Национальном исследовательском Томском политехническом университете

3.3.1. Автореферат учебного пособия «Физические основы электрической изоляции и разряда в вакууме»

Электрический разряд в вакууме в лабораторных условиях был впервые реализован в начале 19-го века *Петровым*, и описание его экспериментов опубликовано в 1803 в труде «Известие о Гальвани–Вольтовских опытах». К сожалению, российская научная школа того времени страдала от клановости, и опубликованные труды *Петрова* были изъяты из обращения. В результате западноевропейские научные школы открывали заново дуговой разряд в газе и вакууме в течение десятков лет, сохраняя за собой приоритет открытий.

Вплоть до конца 19-го века физика вакуумного разряда рассматривалась исключительно как абстрактная отрасль науки, не имеющая практической значимости. Ситуация изменилась после успешного практического использования данного явления *Райтом* в работе по напылению плёнок при горении вакуумной дуги. Этот метод был впервые использован для металлизации стекла при производстве зеркал как альтернатива традиционному серебрению на основе амальгамы. Замечательно то, что данный способ получения плёнок, несмотря на множественные

модификаций, является актуальным и широко используемым в мире в настоящее время.

Позднее *Вудом* было заложено ещё одно направление в физике и технике вакуумного разряда, а именно, был создан первый импульсный источник рентгеновского излучения на основе вакуумной искры, более чем на полвека предвосхитивший открытие взрывной электронной эмиссии и последующее развитие импульсной сильноточной электроники.

В начале 20-го века физика вакуумного разряда интенсивно развивалась благодаря успехам в вакуумной технике, однако это развитие носило исключительно эмпирический характер, пока не была создана электронная теория твёрдого тела, основанная на принципах вакуумной механики. Прежде всего, была создана теория автоэлектронной эмиссии, объяснившая существование темновых токов в вакууме в сильных электрических полях, обнаруженное ранее.

Появление и последующее развитие источников рентгеновского излучения требовало решения проблем электрической изоляции в вакууме, что явилось стимулом для рождения физики вакуумной изоляции и вакуумного пробоя как самостоятельного научного направления. На стыке физики вакуумного пробоя и физики вакуумной дуги родилось новое направление в электротехнике – вакуумные коммутаторы.

Таким образом, к 30-м годам 20-го века сформировались основные направления физики вакуумной изоляции и вакуумного пробоя и физики вакуумной дуги, и всё последующее развитие данной отрасли науки и техники лежало в русле заложенных в начале 20-го века тенденций.

Анализируя динамику роста числа публикаций по физике вакуумного разряда и изоляции в вакууме (рис. 62) можно проследить основные тенденции развития данной отрасли знаний. Прежде всего обращает на себя внимание видимое доминирование проблем вакуумного разряда над проблемами вакуумной изоляции, что связано не столько с недостаточным

интересом к вакуумному пробоя, сколько с недоступностью необходимых инструментов исследования. В отличие от вакуумного разряда, легко зажигаемого с требуемой синхронизацией во времени и локализацией в пространстве, вакуумный пробой – явление случайное и непредсказуемое. При этом источником пробоя являются объекты, имеющие характерные размеры от долей до единиц микрометров и случайно локализованные на макроскопических поверхностях электродов.

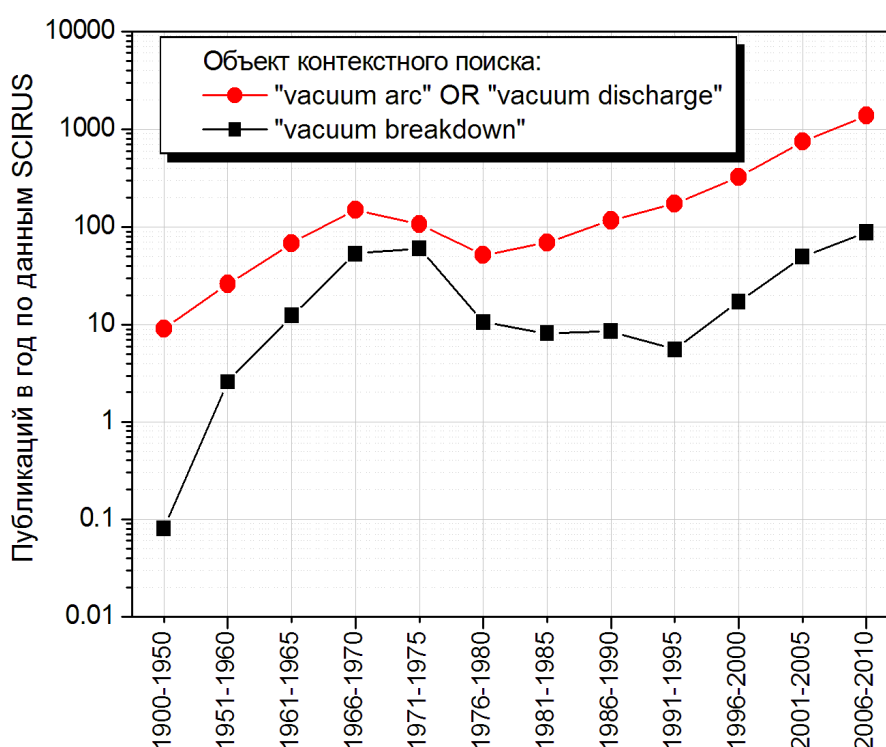


Рис. 62. Динамика роста числа публикаций по физике вакуумного разряда и по физике вакуумного пробоя. Статистика собрана с использованием поисковой системы SCIRUS.

Исследование вакуумного разряда дало ряд уникальных технологических инструментов, один из которых – плазменные методы нанесения металлических покрытий. Другим, более поздним направлением, явилась эмиссионная электроника, в том числе плазменная эмиссионная электроника. Исследования в этой области привели как к рождению нового научного

инструмента – ускорителя заряженных частиц, так и к используемым на практике интенсивным пучкам заряженных частиц и излучения, генерируемого с использованием таких пучков. Именно развитие ускорительной техники определило рост числа исследований в области разрядов и электроизоляции в вакууме, достигший максимума в период 60-х и 70-х годов 20-го века. После этого наблюдался некоторый спад интереса в научном сообществе, вызванный рядом причин, первая из которых – достижение некоторого «насыщения» в понимании и разрешении проблем и «перепроизводство идей» и новых технических решений. Промышленность, несмотря на своё развитие, не успевала осваивать идеи, предлагаемые наукой. Тенденция «перепроизводства идей» сохранялась вплоть до конца 90-х годов, пока не наступил ренессанс интереса к физике вакуумного разряда, что в значительной степени связано с развитием вакуумной коммутационной техники, а также с началом широкого использования пучково-плазменных технологий в промышленности.

Можно с уверенностью прогнозировать, что физика разряда и электрической изоляции в вакууме как область науки и техники в будущем будет продолжать своё развитие, в том числе в связи с развитием космических технологий, где вакуум является естественной окружающей средой.

Данное учебное пособие посвящено физическим основам проблем, возникающих в условиях электрической изоляции и разряда в вакууме. Прежде всего рассматриваются вопросы твердотельной эмиссионной электроники, поскольку именно эмиссионная активность поверхности электродов изолирующих промежутков определяет уровень пробивных электрических полей. Кроме фундаментальных типов эмиссии электронов из конденсированного вещества рассмотрены вопросы распыления поверхности потоками тяжёлых частиц и эмиссии электронов и ионов из плазмы, имеющих место в условиях вакуумного разряда. В завершение

рассматриваются механизмы инициирования вакуумного пробоя, динамика процессов при развитии пробоя, катодные и анодные процессы вакуумной дуги.

3.3.2. Рабочая программа курса «Электрическая изоляция и разряд в вакууме»

НАПРАВЛЕНИЕ ООП 210100 «Электроника и нанoeлектроника»

ПРОФИЛЬ ПОДГОТОВКИ «Физическая электроника»

КВАЛИФИКАЦИЯ (СТЕПЕНЬ) магистр

БАЗОВЫЙ УЧЕБНЫЙ ПЛАН ПРИЕМА 2011 г.

КУРС – 11-й СЕМЕСТР

КОЛИЧЕСТВО КРЕДИТОВ 2

ПРЕРЕКВИЗИТЫ Б2.Б4 «Физика», Б3.Б5 «Теоретические основы электротехники», Б2.Б3 «Математика», Б3.Б7 «Физика конденсированного состояния», Б3.Б9 «Физические основы электроники»

ВИДЫ УЧЕБНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ И ВРЕМЕННОЙ РЕСУРС:

Лекции	9 час.
Лабораторные работы	9 час.
Практические занятия	27 час.
Конференции	
Курсовой проект	
АУДИТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ	45 час.
САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА	54 час.
ИТОГО	99 час.

ФОРМА ОБУЧЕНИЯ очная

ВИД ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ – ЗАЧЁТ

ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ кафедры сильноточной
электроники ИФВТ

1. Цели освоения дисциплины

1. Изучение физических основ электрической проводимости в вакуумных изолирующих промежутках и нарушения электрической изоляции в вакууме.
2. Изучение методов практического использования вакуумного разряда.
3. Изучение методов улучшения электрической изоляции в вакууме.

2. Место дисциплины в структуре ООП

Профессиональный цикл М2, реквизит дисциплины М2.В.1.1, пререквизиты Б2.Б4 «Физика», Б3.Б5 «Теоретические основы электротехники», Б2.Б3 «Математика», Б3.Б7 «Физика конденсированного состояния», Б3.Б9 «Физические основы электроники».

Вакуумная среда и плазма вакуумного разряда широко используется в сильноточной вакуумной электронике. Дисциплина «Электрическая изоляция и разряд в вакууме» изучает физические основы электрической проводимости в вакуумных изолирующих промежутках, нарушения электрической изоляции в вакууме, а также вопросы практического использования эмиссионных явлений, электрического пробоя и разряда в вакууме.

Для успешного освоения дисциплины «Электрическая изоляция и разряд в вакууме» студенты должны

знать:

- физику в рамках дисциплин Б2.Б4 «Физика», Б3.Б7 «Физика конденсированного состояния», Б3.Б9 «Физические основы электроники»;
- основы высшей математики в рамках дисциплины Б2.Б3 «Математика»;
- процессы в RLC контурах;

уметь:

- работать на ПК в современных операционных средах и в стандартных офисных приложениях;
- использовать технические средства для измерения физических величин;
- оперативно осваивать стандартные пакеты прикладных программ для решения практических задач.

3. Результаты освоения дисциплины

В результате изучения дисциплины студент должен

знать:

- термины и понятия, используемые для описания эмиссионных явлений в вакууме;
- физические основы основных видов эмиссии из конденсированного вещества в вакууме;
- основные физические процессы, приводящие к нарушению электрической изоляции в вакууме;
- физические основы эмиссии заряженных частиц из плазмы вакуумного разряда;
- направления использования эмиссионных явлений в диагностических целях;
- основные методы улучшения электрической изоляции в вакууме;
- направления практического использования плазмы вакуумного разряда.

иметь навыки:

- анализа элементарных эмиссионных процессов в электровакуумных устройствах различного применения.

В процессе освоения дисциплины у студентов развиваются следующие компетенции:

1. Универсальные (общекультурные) – Р7 по профилю подготовки «Физическая электроника» ООП 210100 «Электроника и наноэлектроника».

2. Профессиональные – Р1, Р2, Р3, Р4 и Р5 по профилю подготовки «Физическая электроника» ООП 210100 «Электроника и наноэлектроника».

4. Структура и содержание дисциплины**4.1 Аннотированное содержание разделов дисциплины:**

1. «Введение». Исторический экскурс в развитие вакуумного разряда и вакуумной изоляции как научного направления. Краткая аннотация курса.

2. «Основные виды эмиссии электронов из конденсированного вещества». Работа выхода электрона из конденсированного вещества. Статистические характеристики свободного электронного газа в металлах. Поверхность твёрдого тела. Эффект Шоттки. Фундаментальные виды

эмиссии. Контактная разность потенциалов в вакуумном промежутке.

3. «Термоэлектронная эмиссия». Формула Ричардсона–Дэшмана. Влияние электрического поля на термоэлектронную эмиссию. Измерение работы выхода термоэмиссионным методом. Калориметрический эффект термоэлектронной эмиссии. Термоэлектронные катоды. Термоэмиссионный преобразователь.

4. «Фотоэлектронная эмиссия». Феноменологическое описание явления. Экспериментальная проверка феноменологической модели. Критика феноменологической модели. Селективность фотокатодов. Влияние температуры на фотоэмиссию. Влияние внешнего электрического поля на фотоэмиссию. Многофотонная фотоэмиссия металлов. Фотоэмиссионные приборы для исследования быстропротекающих процессов.

5. «Вторичная эмиссия». Вторичная электронно-электронная эмиссия. Вторичная потенциальная ионно-электронная эмиссия. Вторичная кинетическая ионно-электронная эмиссия. Катодное распыление. Поверхностная ионизация.

6. «Автоэлектронная эмиссия». Формула Фаулера-Нордгейма. Калориметрический эффект автоэмиссии. Ограничение автоэмиссии пространственным зарядом эмитированных электронов. Определение параметров автоэлектронных катодов из экспериментальных данных. Экспериментальное наблюдение автоэлектронной эмиссии. Эмиссионный сканер. Эмиссионные центры в практически используемых вакуумных промежутках. Предельные токи автоэмиссии.

7. «Эмиссия заряженных частиц из плазмы». Эмиссия электронов из плазмы. Эмиссия ионов из плазмы.

8. «Электрическая изоляция и пробой в вакууме». Катодное инициирование пробоя. Анодное инициирование пробоя. Жидкая фаза на электроде. Эффект полного напряжения. Пробой по поверхности диэлектрика в вакууме.

9. «Вакуумный разряд». Взрывная электронная эмиссия. ВАХ диода с взрывоэмиссионным катодом. Катодное пятно. Вакуумная дуга. Эрозия электродов. Эмиссия и испарение капельной фракции.

10. «Практическое применение вакуумного разряда». Вакуумный сетевой выключатель. Взрывоэмиссионные катоды. Сильноточные источники электронных пучков на основе взрывной эмиссии электронов.

Перечень практических работ:

- Расчёт режима работы термокатода с неоднородной по поверхности работой выхода.
- Расчёт плазменного эмиттера электронов.
- Оценка напряжённости электрического поля в катодном слое плазмы.
- Расчёт осциллограммы тока при пробое вакуумного конденсатора.

Перечень лабораторных работ:

- Сильноточный отражательный разряд и его диагностика.
- Воздействие сильноточного электронного пучка на металлические материалы.
- Генерация, транспортировка и диагностика сильноточного низкоэнергетического электронного пучка в плазмонаполненном диоде.

4.2 Структура дисциплины по разделам и видам учебной деятельности с указанием временного ресурса в часах.

Таблица 105.

*Структура модуля (дисциплины)
по разделам и формам организации обучения*

Название раздела/темы	Аудиторная работа (час)			СРС (час)	Контр. Р. Инд.З.	Итого
	Лекции	Практ./се м. Занятия	Лаб. зан.			
1. Введение	0,5					0,5
2. Основные виды эмиссии электронов из	0,5	1	3	6		10,5

конденсированного вещества						
3. Термоэлектронная эмиссия	1	1	3	6		11
4. Фотоэлектронная эмиссия	1	1	3	6		11
5. Вторичная эмиссия	1	1	3	6	КР.1	11
6. Автоэлектронная эмиссия	1	1	3	6		11
7. Эмиссия заряженных частиц из плазмы	1	1	3	6		11
8. Электрическая изоляция и пробой в вакууме	1	1	3	6		11
9. Вакуумный разряд	1	1	3	6	КР.2	11
10. Практическое применение вакуумного разряда	1	1	3	6	ИД10.1	11
Итого	9	9	27	54		99

5. Образовательные технологии

Таблица 106.

Методы и формы организации обучения (ФОО)

ФОО	Лекц.	Лаб. раб.	Пр. зан./ Сем.,	Тр*., Мк**	СРС	К. пр.
Методы						
IT-методы	•				•	
Работа в команде						
Case-study		•			•	
Игра						
Методы проблемного обучения						

Обучение на основе опыта		•				
Опережающая самостоятельная работа	•	•			•	
Проектный метод			•		•	
Поисковый метод					•	
Исследовательский метод		•			•	
Другие методы						

* - Тренинг, ** - Мастер-класс

6. Организация и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

6.1. Текущая СРС:

- работа с лекционным материалом;
- подготовка к лабораторным занятиям;
- подготовка к контрольным работам, экзамену;
- обзор литературы и электронных источников информации по индивидуальному домашнему заданию;
- опережающая самостоятельная работа;
- выполнение домашних заданий, а также изучение тем, не входящих в состав дисциплины, но рекомендуемых для расширения кругозора.

Творческая проблемно-ориентированная самостоятельная работа

(ТСР):

- выполнение индивидуального задания.

6.2. Содержание самостоятельной работы студентов по дисциплине

1. Тематика индивидуального задания:

Подготовить реферат и доклад на тему «Ферроэлектрические катоды и источники электронных пучков на их основе»

2. Темы, выносимые на самостоятельную проработку:

- 1) Телевизионные приборы на основе внешнего и внутреннего фотоэффекта.
- 2) Вторично-ионная масс-спектрометрия.
- 3) Автоэмиссионные панели.
- 4) Атомно-силовая и туннельная микроскопия.

6.3 Контроль самостоятельной работы

Для закрепления теоретического материала, выполнения отчетов по лабораторным работам по дисциплине во внеучебное время студентам предоставляется возможность пользования библиотекой ТПУ, библиотеками лабораторий кафедры, методические указания по лабораторным работам, методические пособия и контролирующие материалы по дисциплине. Студенты имеют возможность получить консультации по вопросам дисциплины, как у ведущего лектора, так и зав. лабораторией.

Составляющие самостоятельной работы:

- Закрепление теоретического материала при подготовке к лекциям, контрольным работам;
- Подготовка к лабораторным занятиям;
- Выполнение индивидуального задания.

Контроль заключается в оценке качества выполнения студентами вышеперечисленных пунктов.

6.4 Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

Перечень необходимого учебно-методического обеспечения приведен в разделе 9.

7. Средства (ФОС) текущей и итоговой оценки качества освоения дисциплины

Таблица 107. Вопросы для проверки текущей успеваемости:

НЕНУЖНОЕ ЗАЧЕРКНУТЬ

1.	Какой вид имеет распределение эмитированных термоэлектронов по энергии?	Максвелла Бозе–Эйнштейна Ферми–Дирака
2.	Какой вид имеет распределение электронов по энергии в металле при $T = 0 \text{ K}$?	Максвелла Бозе–Эйнштейна Ферми–Дирака

3.	Что описывает выражение $\left(\frac{8kT}{\pi m}\right)^{1/2}$?	Среднюю кинетическую энергию частиц Среднюю потенциальную энергию частиц Тепловую скорость частиц
4.	Чье имя носит формула $j = A_0 \bar{D} T^2 e^{-\frac{\phi}{kT}}$?	Ричардсона Фаулера Ленгмюра
5.	Что происходит с работой выхода при наличии электрического поля, ускоряющего электроны?	Не изменяется Повышается Понижается
6.	Какой знак имеет калориметрический эффект при термоэлектронной эмиссии?	Положительный всегда Положительный или отрицательный Отрицательный всегда
7.	Возможно ли туннелирование электрона сквозь потенциальный барьер бесконечной ширины?	Да, всегда Да, при высоких температурах Нет, никогда
8.	Как изменяется фототок при изменении светового потока?	Пропорционально квадратному корню из потока Пропорционально потоку Пропорционально квадрату потока
9.	Как изменяется максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов при увеличении длины волны падающего света?	Растет Не изменяется Падает
10.	Как изменяется максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов при увеличении частоты падающего света?	Растет Не изменяется Падает
11.	Как изменяется максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов при увеличении интенсивности падающего светового потока?	Растет Не изменяется Падает
12.	Как изменяется пороговая для фотоэмиссии частота света при наличии электрического поля, ускоряющего электроны?	Растет Не изменяется Падает
13.	Как изменяется пороговая для фотоэмиссии длина волны света при наличии электрического поля, ускоряющего электроны?	Растет Не изменяется Падает

14.	Как изменяется пороговая для фотоэмиссии частота света при росте температуры катода?	Растет Не изменяется Падает
15.	Как изменяется пороговая для фотоэмиссии длина волны света при росте температуры катода?	Растет Не изменяется Падает
16.	В какой области спектра вторичных электронов наблюдаются пики характеристических потерь электронов?	Истинно вторичных электронов Неупруго отраженных электронов Упруго отраженных электронов
17.	В какой области спектра вторичных электронов наблюдаются Ожэ пики?	Истинно вторичных электронов Неупруго отраженных электронов Упруго отраженных электронов
18.	Возможна ли потенциальная ионно-электронная эмиссия при облучении медной поверхности ионами меди?	Возможна всегда Возможна иногда Невозможна никогда
19.	Возможна ли потенциальная ионно-электронная эмиссия при облучении медной поверхности ионами гелия?	Возможна всегда Возможна иногда Невозможна никогда
20.	Проявляется ли эффект Шоттки при автоэмиссии?	Да, всегда Да, при высоких температурах Нет, никогда
21.	Чье имя носит формула $j = \frac{e^3 E^2}{8\pi h \varphi^2(y)} \exp\left[\frac{-8\pi(2m)^{1/2} \varphi^{3/2} \mathbf{v}(y)}{3heE}\right] ?$	Ричардсона Фаулера Ленгмюра
22.	Возможно ли туннелирование электрона сквозь потенциальный барьер конечной ширины?	Да, всегда Да, при высоких температурах Нет, никогда
23.	Какой знак имеет калориметрический эффект при автоэлектронной эмиссии?	Положительный всегда Положительный или отрицательный Отрицательный всегда
24.	Как влияет пространственный заряд эмитированных электронов на эмиссию?	Подавляет Не влияет Способствует
25.	Как смещается максимум распределения эмитированных электронов по энергиям относительно уровня энергии вакуума (пространства без частиц) при росте напряжённости электрического поля?	Удаляется Не изменяется Приближается

26.	Как смещается максимум распределения эмитированных электронов по энергиям относительно уровня энергии вакуума (пространства без частиц) при росте температуры эмиттера?	Удалается Не изменяется Приближается
27.	Возможно ли провисание потенциала в вакуумном диоде при стационарной эмиссии электронов из плазменного эмиттера	Да, всегда Да, при некоторых условиях Нет, никогда
28.	Которая из величин, температура электронов или их концентрация, оказывает большее влияние на плотность тока электронного плазменного эмиттера?	Концентрация Температура Концентрация и температура в равной степени
29.	Температура какой компоненты плазмы, электронной или ионной, определяет плотность тока эмиссии ионов из плазмы?	Ионов Электронов Ионов и электронов в равной степени
30.	Как соотносится кинетическая и потенциальная энергия электронов в плазме?	Кинетическая много больше потенциальной Кинетическая много меньше потенциальной Кинетическая и потенциальная одного порядка величины
31.	От чего зависит электрическая прочность вакуумного промежутка?	Только от напряженности электрического поля Только от разности потенциала От напряженности электрического поля и разности потенциалов
32.	Где появляется свечение плазмы при вакуумном пробое раньше?	На катоде В промежутке На аноде
33.	Как изменяется вероятность вакуумного пробоя с ростом площади электродов при прочих равных условиях?	Растет Не изменяется Падает
34.	Как изменяется напряженность электрического поля вакуумного пробоя с ростом межэлектродного расстояния?	Растет Не изменяется Падает

35.	Каково соотношение кинетической энергии ионов плазмы катодного пятна вакуумной дуги и значения катодного падения потенциала, умноженного на заряд электрона?	Энергия ионов выше потенциала, умноженного на заряд электрона Энергия ионов равна потенциалу, умноженному на заряд электрона Энергия ионов ниже потенциала, умноженного на заряд электрона
36.	Как изменяется удельная ионная эрозия катода с ростом тока разряда при горении катодной дуги в вакууме?	Растет Не изменяется Падает
37.	Как влияет магнитное поле на направление перемещения катодных пятен в вакуумной дуге?	Пятна перемещаются в направлении $-\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ Не влияет Пятна перемещаются в направлении $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$
38.	Каков уровень пороговых токов вакуумной дуги на металлическом катоде	Десятые доли ампера Единицы ампер Десятки ампер
39.	Как движутся по отношению друг к другу катодные пятна при одновременном горении в сильноточной вакуумной дуге?	Сближаются Движутся независимо Расходятся

Итоговый контроль (экзаменационные вопросы):

1. Энергетическая диаграмма на границе твердое тело – вакуум. Уровень Ферми и работа выхода электронов из металла, собственного полупроводника, донорного полупроводника, акцепторного полупроводника.
2. Условие выхода электрона из твердого тела в вакуум. Способы передачи связанному электрону необходимой для эмиссии энергии и виды эмиссии, соответствующие этим способам. Особенности эмиссии при наличии потенциального барьера конечной ширины.
3. Термоэлектронная эмиссия в вакуум из металлов. Формула Ричардсона-Дэшмана.

4. Ток насыщения термокатода. Вольтамперные характеристики вакуумного термоэмиссионного диода.
5. Эффект Шоттки. Влияние электрического поля на термоэлектронную эмиссию.
6. Влияние электрического поля на фотоэлектронную эмиссию.
7. Внешний и внутренний фотоэффект. Фотоэлектронная эмиссия. Законы внешнего фотоэффекта. Уравнение Эйнштейна. Пороговая длина волны (красная граница). Влияние температуры и электрического поля на фотоэлектронную эмиссию.
8. Вторичная электрон–электронная эмиссия (ВЭЭ). Схема экспериментальной установки для исследования ВЭЭ. Функция распределения электронов по энергиям. Истинно вторичные, рассеянные (неупруго отраженные) и упруго отраженные электроны. Характеристические потери упруго отраженных электронов и электроны, эмитированные по механизму Оже.
9. Потенциальная вторичная ионно-электронная эмиссия. Потенциальная энергия на поверхности твердого тела при непосредственной близости иона. Оже–нейтрализация иона. Условие эмиссии электрона при нейтрализации иона.
10. Кинетическая вторичная ионно-электронная эмиссия. Ионно-ионная эмиссия. Катодное распыление. Доля ионов в распыленном материале (уравнение Саха для поверхностной ионизации).
11. Автоэлектронная эмиссия. Формула Фаулера-Нордгейма.
12. Определение параметров автоэлектронных катодов из экспериментальных данных; метод прямых Фаулера-Нордгейма; количественные оценки.
13. Влияние температуры на автоэлектронную эмиссию. Эффект Ноттингама. Температура инверсии.
14. Эмиссия электронов и ионов из плазмы.

15. Вакуумный пробой. Критерий начала пробоя. Катодные и анодные механизмы инициирования пробоя, условия их реализации.
16. Зависимость времени запаздывания пробоя от плотности тока в эмиссионном центре и от напряженности электрического поля на катоде при катодном механизме инициирования пробоя.
17. Плазмообразование в вакуумной промежутке. Взрывная электронная эмиссия. Катодное пятно. Эмиссионные процессы в катодном пятне.

Дополнительные вопросы:

1. Определение работы выхода термоэмиссионным методом.
2. Определение работы выхода фотоэмиссионным методом.
3. Определение работы выхода автоэмиссионным методом.

8. Рейтинг качества освоения модуля (дисциплины)

Приводится рейтинг-план текущей оценки успеваемости студентов в семестре и рейтинг промежуточной аттестации студентов по итогам освоения дисциплины. В соответствии с рейтинговой системой текущий контроль производится раз в два месяца в течение семестра путем балльной оценки качества усвоения теоретического материала (ответы на вопросы) и результатов практической деятельности (решение задач, выполнение заданий, решение проблем).

В течение семестра предусмотрены две контрольные точки.

Промежуточная аттестация (зачет) производится в конце семестра. Итоговый рейтинг определяется суммированием баллов текущей оценки в течение семестра и баллов промежуточной аттестации в конце семестра по результатам зачета. Максимальный итоговый рейтинг соответствует 100 баллам.

Рейтинг-план освоения модуля дисциплины.

При изучении курса «Электрическая изоляция и разряд в вакууме» используется рейтинговая система оценки знаний студентов.

Максимальный рейтинговая оценка, которую может набрать студент за время изучения дисциплины (1 семестр) составляет 100 баллов. Данная оценка образуется из 4-х составляющих, которые отражают как посещаемость лекций, так и знания, приобретённые в результате прослушивания лекций, а при отсутствии на лекции(ях) в результате самостоятельного изучения литературы. Система рейтинговой оценки по курсу:

1. ПЛ1 – посещение 6-ти лекций, посвящённых физическим основам фундаментальных типов эмиссии в вакууме. За каждую посещённую лекцию начисляется 4 балла. Максимальное значение ПЛ1 равно 24.
2. КТ1 – контрольная точка № 1. На контрольную точку выносятся 26 вопросов, к каждому из которых даётся 3 ответа, один из которых является правильным. На ответы студентам даётся 30 мин. За каждый правильный ответ начисляется 1 балл. Максимальное значение КТ1 равно 26.
3. ПЛ2 – посещение 6-ти лекций, посвящённых физическим основам сильноточной эмиссионной электронике. За каждую посещённую лекцию начисляется 4 балла. Максимальное значение ПЛ2 равно 24.
4. КТ2 – контрольная точка № 2. На контрольную точку выносятся 26 вопросов, к каждому из которых даётся 3 ответа, один из которых является правильным. На ответы студентам даётся 30 мин. За каждый правильный ответ начисляется 1 балл. Максимальное значение КТ2 равно 26.
5. ИРД (итоговый рейтинг по дисциплине) вычисляется по формуле:
$$\text{ИРД} = \text{ПЛ1} + \text{КТ1} + \text{ПЛ2} + \text{КТ2}.$$
6. Контрольные точки проводятся 2 раза в семестр. По прохождению контрольной точки для каждого студента фиксируется текущий рейтинг, равный ПЛ1 + КТ1 для первой контрольной точки (максимальное значение равно 50) и ИРД для второй.
7. В соответствии с набранным ИРД устанавливаются следующие действия со стороны преподавателя:

$\text{ИРД} \geq 50$ является условием допуска к сдаче зачёта по дисциплине.

$\text{ИРД} \geq 72$ является условием досрочной сдачи зачёта по дисциплине.

9. Учебно-методическое и информационное обеспечение модуля (дисциплины)

ОСНОВНАЯ

1. Добрецов А.Н., Гомоюнова М.В., Эмиссионная электроника.- Москва: Наука, 1966.- 564 с.
2. Фоменко В.С., Эмиссионные свойства материалов. Справочник.- Киев: Наукова думка, 1981.- 339 с.
3. Шимони К., Физическая электроника.- Москва: Энергия, 1977.- 605 с.
4. Г.А. Месяц, Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга.- М.: Наука, 2000.- 424 с.
5. Н.И. Сливков, Процессы при высоком напряжении в вакууме.- М.: Энергоатомиздат, 1986.- 255 с.
6. В.И. Раховский, Физические основы коммутации электрического тока в вакууме.- М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1970. - 536 с.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ

1. Ашкрофт Н., Мермин Н., Физика твердого тела.- Москва: Мир, 1979. – т. 1.- 399.- т. 2.- 422 с.

10. Материально-техническое обеспечение дисциплины

- Стенд для исследования процессов формирования и транспортировки нерелятивистского сильноточного электронного пучка в плазмонаполненном диоде и воздействия электронного пучка на различные материалы.

Программа составлена на основе Стандарта ООП ТПУ в соответствии с требованиями ФГОС по направлению и профилю подготовки:

направление 210100 Электроника и микроэлектроника,

профиль подготовки Физическая электроника

Программа одобрена на заседании кафедры сильноточной электроники ИФВТ ТПУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа полученных экспериментальных данных установлено, что скорость расширения катодного слоя падает с ростом тока дуги. В условиях переходного восстанавливающегося напряжения эта скорость растёт, но не успевает вырасти настолько, чтобы компенсировать полностью замедление границы при росте концентрации плазмы с увеличением тока дуги. Как результат баланса процессов электрическое поле под плазмой, вычисляемое как отношение скорости роста напряжения к скорости расширения слоя, растёт как с ростом тока дуги, так и с ростом скорости роста переходного восстанавливающегося напряжения после обрыва дуги при переходе тока через ноль.

Вычисленные на основании измерений значения средней напряжённости электрического поля в восстанавливающемся после обрыва дуги вакуумном промежутке по порядку величины близки к 10 кВ/см. При таких полях пробой по механизму пробоя высоковакуумных промежутков с холодными электродами происходить не может. Но эти поля достаточно велики для инициирования роста конуса Тейлора на жидкометаллических выступах, усиливающих поле, и имеющих в изобилии на расплавленной поверхности электродов после нуля тока дуги. Рост конуса Тейлора неминуемо завершается взрывом вершины в конечной стадии роста из-за интенсивной автоэлектронной эмиссии и инициированием пробоя восстанавливающегося изолирующего промежутка.

Другим, альтернативным механизмом пробоя восстанавливающегося промежутка является механизм пробоя газонаполненного промежутка низкого давления газа. Применительно к рассматриваемой системе, условия изоляции после нуля тока дуги соответствуют минимуму кривой Пашена, что связано с относительно высоким давлением паров металла, достигающим 10 Па и даже выше.

Полученные результаты исследования позволят лучше понимать процессы, происходящие в вакуумных сетевых выключателях после прерывания токов короткого замыкания сети, и более целенаправленно искать пути по подавлению пробоев после выключения тока.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. E. Gidalevich, S. Goldsmith, and R. L. Vohman, Shock front formation at vacuum arc anodes // *J. Appl. Phys.* – 2002. – vol. 92. – No. 9. – pp. 4891–4896.
2. B. M. Smirnov, *Reference Data on Atomic Physics and Atomic Processes.* – Berlin: Springer–Verlag. – 2008. – p. 81.
3. P.G. Slade, *The Vacuum Interrupter. Theory, Design, and Application.* – NY: CRC Press. – 2008. – 510 p.
4. Диаграммы состояния двойных металлических систем / Справочник по ред. Н.П. Лякишева. – М: Машиностроение. – 1997. – т. 2. – стр. 112–114.
5. A. Shashurin, I.I. Beilis, R.L. Vohman, Heat flux to an asymmetric anode in a hot refractory anode vacuum arc // *Plasma Sources Sci. Technol.* . – 2010. – vol. 19. – 015002 (8pp).
6. A. Anders, Ion charge state distributions of vacuum arc plasmas: The origin of species // *Phys. Rev. E.* – 1997. – v. 55. – No. 1. – pp. 969–981.
7. Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. Импульсный электрический разряд в вакууме. – Новосибирск: «Наука» . – 1984. – 256 с.
8. *Handbook of Vacuum Science and Technology. Fundamentals and Applications* / ed. by R.L. Vohman. – Noyes Publications. – 1995. – 742 p.
9. Сливков И.Н. Электроизоляция и разряд в вакууме. – М: Атомиздат. – 1972. – 304 с.
10. L. Tonks, A Theory of Liquid Surface Rupture By a Uniform Electric Field. – *Phys. Rev.* – 1935. – Vol. 48. – pp. 562–568.

11. L.M. Swanson, G.A. Schwind, Electron Emission from a Liquid Metal. – J. Appl. Phys. – 1978. – Vol. 49. – pp. 5655–5662.
12. 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 // Proc. 24th Int. Symp. Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Braunschweig, Germany. – 2010. – pp. 351–354.