

На правах рукописи

Музюкин Илья Львович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКОВ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ИЗ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНЫХ
ВАКУУМНЫХ РАЗРЯДОВ**

Специальность 01.04.13 – «Электрофизика, электрофизические установки»

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург, 2008

Работа выполнена в Институте Электрофизики УрО РАН

Научный руководитель	кандидат физико-математических наук Игорь Владимирович Уйманов (ИЭФ УрО РАН)
Официальные оппоненты	доктор физико-математических наук Николай Борисович Волков (ИЭФ УрО РАН) доктор физико-математических наук, профессор Виктор Львович Паперный (Иркутский государственный университет)
Ведущая организация	Институт сильноточной электроники СО РАН г.Томск

Защита состоится 23 декабря 2008 года в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.024.01 при Институте электрофизики УрО РАН по адресу: 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЭФ УрО РАН.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.–м.н.

Н.Н.Сюткин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Вакуумный разряд является наиболее эффективным источником плазмы, имеющим широкий спектр научного и технологического применения. Наиболее известными сферами применения плазмы вакуумного разряда в научной сфере является разработка источников ионов для ускорителей, применение ускоренных ионов в ядерных исследованиях и в исследованиях инерциального термоядерного синтеза. В технологической области плазма вакуумного разряда применяется в модификации поверхности изделий путем имплантации и осаждения, создания перспективных космических двигателей и эффективной лазерной накачки. Одним из важнейших явлений, определяющим процессы в источниках плазмы на основе вакуумных разрядов, является коллективное ускорение ионов при разлете плазмы в вакуум. Объяснение и впоследствии управление этим явлением имеет определяющее значение для получения новых высокоэффективных источников плазмы для технологического применения и научных исследований. Получение новых экспериментальных данных относительно потоков плазмы в вакуумных разрядах может помочь в прояснении физической картины процессов ионизации и ускорения плазмы в этих разрядах, что позволит оптимизировать многочисленные технологические и научные устройства, использующие плазму вакуумного разряда.

Цель работы: Целью настоящей работы является экспериментальное исследование потока плазмы электрического разряда в вакууме. При этом основной задачей являлось выявление ранее не исследованных, но важных параметров разрядов, нахождение общих черт и зависимостей для различных видов разрядов и, по возможности, определение общей качественной картины процесса расширения плазмы в вакуум.

При этом задачи можно конкретизировать следующим образом:

- Определение временных характеристик потока плазмы вакуумной дуги, условий ускорений для различных типов заряженных частиц;
- Получение относительных количественных данных об ускоренных ионах в вакуумной искре. При этом параметры разрядного импульса должны обеспечивать функционирование только одного цикла взрывной эмиссии. Получение зависимости параметров плазмы от геометрии разряда;
- Исследование параметров плазмы наносекундного перекрытия диэлектрика для различных конфигураций разряда.

Научная новизна: На основе схемы спектрометра Томсона разработано и создано диагностическое оборудование, которое позволяет проводить автоматический количественный анализ энергетического и масс-зарядового состава потока ионов импульсных источников плазмы.

На основе сочетания электростатического энерго-анализатора и времяпролетного масс-анализатора создана экспериментальная установка и разработан метод измерений нестационарных процессов в потоке заряженных частиц из плазмы вакуумной дуги.

Впервые были проведены исследования потока плазмы под катодной поверхностью вакуумной дуги, выяснен энергетический и зарядовый состав потока ионов, а также временной характер общего ионного потока.

Впервые исследован временной характер потока ионов в вакуумной дуге с временным разрешением до 200 нс. Было выяснено, что поток ионов представляет собой последовательность интенсивных выбросов с практическим отсутствием постоянной составляющей.

Впервые проведен временной анализ потока ускоренных электронов из плазмы вакуумной дуги. Показано, что потоки ускоренных электронов имеют характер выбросов с длительностью 50–200 нс. Появление ускоренных электронов обычно связано с нестабильностью тока дуги. Потоки электронов в различных направлениях распространяются синхронно, причем интенсивность потока достигает максимума в направлении нормали к

поверхности катода и опускается до уровня шума в тангенциальном направлении.

Впервые исследованы параметры потока ионов наносекундной вакуумной искры с длительностью импульса напряжения 20 нс. Получены параметры зарядового массового состава и энергетического распределения ионов. Получена зависимость параметров потока от расстояния анод – катод.

Исследован наносекундный (длительность импульса напряжения 20 нс) разряд по поверхности диэлектрика. Впервые получены относительные количественные данные о массовом зарядовом и энергетическом составе потока ионов. Выявлены особенности разлета плазмы в различных направлениях от поверхности диэлектрика. Выявлен эффект селективного ускорения ионов водорода в наносекундном комбинированном разряде.

Структура диссертации: Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 129 страниц, включает в себя 65 иллюстраций, список цитируемой литературы состоит из 105 наименований.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. С помощью прямых корпускулярно-спектроскопических методов впервые исследован зарядовый состав плазмы и распределение ионов по энергиям в вакуумной искре с длительностью импульса 20 нс и амплитудой 150 кВ. На основе полученных результатов показано, что зарядовый состав плазмы высоковольтной наносекундной вакуумной искры совпадает с зарядовым составом плазмы установившегося дугового разряда. При этом энергетическое распределение ионов вакуумной искры с медным катодом имеет несколько максимумов, которые смещаются в сторону более высоких энергий с ростом заряда иона и с увеличением межэлектродного расстояния.

2. На основе исследования с угловым разрешением энерго-массового состава потока ионов из плазмы наносекундного вакуумного пробоя по

поверхности полиэтилена высокого давления показано, что ионы водорода ускоряются в более широком телесном угле с углом раствора $>90^\circ$, чем ионы углерода, для которых этот угол раствора не превосходит 40° . При этом ионы углерода ускоряются на большем расстоянии от поверхности диэлектрика, которое может достигать нескольких сантиметров, чем ионы водорода.

3. Обнаружен эффект селективного ускорения ионов водорода в наносекундном комбинированном разряде, совмещающем в себе разряд по поверхности полиэтилена и пробой вакуумного промежутка. Этот эффект состоит в том, что при величине вакуумного промежутка более 2 мм и подаче положительного высоковольтного импульса в потоке ионов регистрируются только ионы водорода, ускоренные до энергий, которые могут на порядок превышать энергии ионов водорода при отсутствии вакуумного промежутка.

4. Поток электронов из плазмы вакуумного дугового разряда с энергиями, превышающими падение напряжения на разряде, представляет собой последовательность выбросов тока длительностью от 50 до 200 нс. Появление выбросов тока ускоренных электронов синхронно во времени для различных направлений и при этом наибольшая интенсивность потока электронов наблюдается в направлении, нормальном к катодной поверхности

Апробация работы. По результатам работы опубликовано 16 печатных работ в центральной и международной печати, в материалах международных конференций. Результаты работы докладывались на международном симпозиуме по разрядам и электрической изоляции в вакууме (ISDEIV) в 1998 г. в г. Эйндховен и в 2004 г. в г. Ялта. На конференции «Физика экстремальных состояний вещества» Эльбрус 2004, 2005, 2006 гг.

Вклад автора в разработку проблемы. Автором осуществлены выбор и разработка методики исследований. Проектирование и создание экспериментальных установок. Проведение экспериментов и анализ результатов. Оформление результатов и написание печатных работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы диссертации, определены основные цели работы, изложена ее научная новизна и краткое содержание диссертации, формулируются выносимые на защиту научные положения.

Первая глава носит обзорный характер и посвящена рассмотрению наиболее важных результатов в области исследования потоков плазмы в вакуумных разрядах, имеющих в литературе. Описаны экспериментальные исследования вакуумной искры и вакуумного дугового разряда. Рассмотрены экспериментальные методы, их достоинства и недостатки, а также их влияние на результаты исследований. Рассмотрение процесса разлета плазмы в вакуум было разделено на два принципиально отличающихся случая. Основным критерием разделения принято наличие явной границы плазма – вакуум во время процесса разлета плазмы. Для существования такой границы длительность разрядного импульса должна быть меньше времени достижения плазмой заземленных электродов или стенок камеры. Характерные энергии ионов в этом случае лежали в диапазоне от десятков

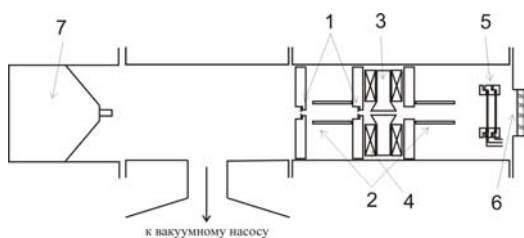


Рис. 1. Общий вид и конструкция спектрометра:

1 - коллиматор, 2 - магнитные экраны,
3 - полюсные наконечники,
4 - магнитные катушки, 5 - детектор,
6 - окно, 7 - источник ионов

кэВ до десятков МэВ. Вариант с отсутствием явной границы плазма-вакуум реализуется во время дугового разряда относительно большой длительности. Поток плазмы дугового разряда содержит в основном поток ионов с энергиями от десятков до сотен эВ. В конце обзора дано краткое описание основных теоретических моделей, используемых для объяснения исследуемых явлений. Существующие теоретические модели объясняют наличие ускоренных ионов в плазме вакуумных разрядов, данные теоретических расчетов совпадают с

кэВ до десятков МэВ. Вариант с отсутствием явной границы плазма-вакуум реализуется во время дугового разряда относительно большой длительности. Поток плазмы дугового разряда содержит в основном поток ионов с энергиями от десятков до сотен эВ. В конце обзора дано краткое описание основных теоретических

моделей, используемых для объяснения исследуемых явлений.

Существующие теоретические модели объясняют наличие ускоренных ионов в плазме вакуумных разрядов, данные теоретических расчетов совпадают с

экспериментальными по порядку величины. Однако не было теоретически получено объяснение формы энергетических распределений ионов в плазме вакуумных разрядов, а так же зависимости характерных энергий ионов от масс и зарядовых состояний ионов.

Во второй главе рассмотрены основные методики, примененные в диссертационной работе для исследования плазмы вакуумных разрядов.

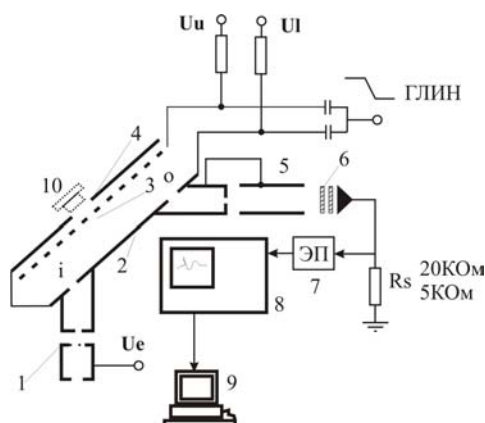


Рис.2. Электрическая схема анализатора:
 1 – входной узел, 2 – нижняя пластина, 3 – верхняя пластина,
 4 – коллектор, 5 – пролетная труба,
 6 – детектор, 7 – усилитель,
 8 – осциллограф, 9 – ПК,
 10 – юстировочное зеркало

проводился наложением расчетных парабол на спектрограмму и считыванием интенсивности для каждой энергии.

Для измерений энергетического спектра и временной зависимости потока ионов в дуге использовался электростатический энерго-анализатор, совмещенный с времяпролетным масс-анализатором. Электростатический дискриминатор энергии конденсаторного типа настроен на определенное значение E/Z . Для получения полного энергетического спектра на блок пластин (2, 3, 4) и пролетную трубу (5) подается линейно изменяющееся напряжение. Для получения масс-зарядового состава нужно, чтобы время сканирования было бы меньше разности пролета ближайших по параметру M/Z частиц. Для временного анализа потока ионов одного значения E/Z

Основным методом в исследовании наносекундных импульсных разрядов в вакууме являлся спектрометр Томсона с автоматической системой фотометрирования.

Схема спектрометра представлена на Рис.1 В качестве детектора использовалась микроканальная пластина для усиления сигнала до 10000 раз. За МКП находился люминофорный экран, свечение которого регистрировалось CCD камерой. Анализ спектрограмм

напряжения на пластинах остаются постоянными и, если токовый импульс меньше разности пролета ближайших по M/Z , можно получить сигналы для каждой группы ионов и совместить их друг с другом и с сигналом тока дуги.

В третьей главе описываются измерения потока плазмы в наносекундных вакуумных разрядах, с использованием спектрометра Томсона.

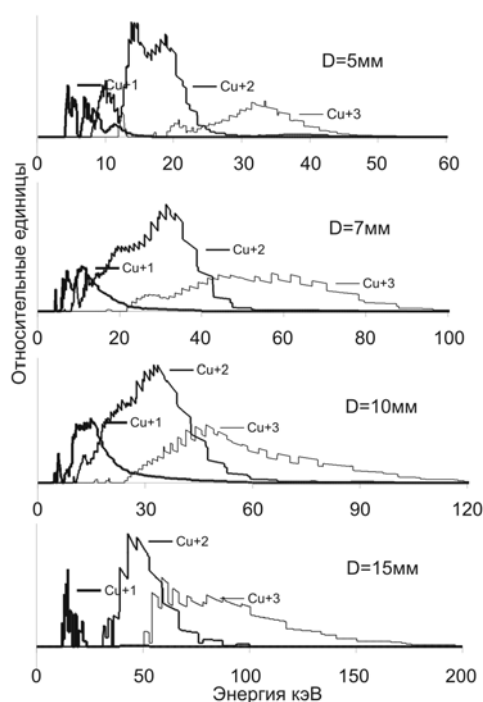


Рис.3. Спектры ионов меди в случае медного катода при различных межэлектродных расстояниях D

В разделе 3.1 описываются эксперименты с наносекундной вакуумной искрой. Основной задачей в проведении этих экспериментов была попытка получить параметры плазмы, образованной за один цикл взрывоэмиссионного центра - эктона. Для этого был использован высоковольтный наносекундный генератор РАДАН с амплитудой импульса 150 кВ и длительностью 5 нс. Так как вакуумный промежуток не является согласованной нагрузкой, в импульсе напряжения присутствуют отражения. Общая длина

импульса увеличивается до 20 нс. Вакуумный диод представляет собой острый катод и сеточный анод. Расстояние анод-катод могло меняться. Были получены энергетические спектры ионов для медного и графитового катодов в зависимости от расстояния анод-катод (Рис.3). Из приведенных рисунков видно, что кривые спектров имеют несколько максимумов. Эти максимумы смещаются в сторону больших энергий при увеличении расстояния анод-катод. Также видно, что характерные энергии прямо пропорциональны заряду иона. Наиболее вероятные энергии для Cu^+ и примесей C^+ и H^+ приблизительно совпадают, что может свидетельствовать об ускорении всех ионов одной разностью потенциалов. Необходимо

отметить также, что зарядовый состав ускоренной компоненты плазмы наносекундной искры качественно совпадает с зарядовым составом дуги. Это подтверждает то, что зарядовый состав формируется на ранних стадиях развития пробоя - за один жизненный цикл взрывоэмиссионного центра – эктона. Общая доля примесей составляет 50%. Само наличие зависимости энергий ионов от расстояния анод-катод является неожиданным фактом. Здесь важное значение может иметь собственно сам процесс расширения плазмы в вакуум и конфигурация электродов. Из механизмов ускорения ионов могут рассматриваться кулоновский взрыв¹ и ускорение ионов в глубокой потенциальной яме². Анод может в этом случае работать как коллектор электронов, создающий в расширяющейся плазме

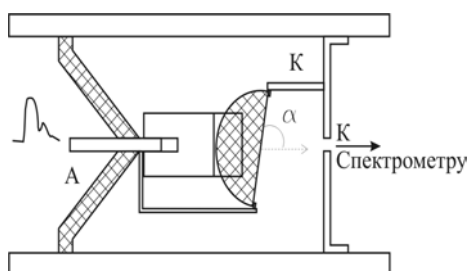


Рис.4. Схема разрядной камеры: А- анод, К- катод, Разряд происходит на поверхности поворотного полуцилиндра

нескомпенсированный объемный заряд. Чем дальше расположен анод, тем дольше действует коллектор электронов и процесс расталкивания ионов. При достижении плазмой анода потенциал плазмы сравнивается с потенциалом заземленного анода и процесс ускорения заканчивается.

В разделе 3.2. исследована зависимость состава потока плазмы наносекундного пробоя по поверхности диэлектрика от направления разлета. Для этого была сконструирована разрядная схема, показанная на Рис.4. Разряд происходил на плоской грани поворачивающегося полуцилиндра. В этом эксперименте первая диафрагма у спектрометра Томсона была удалена, а ее функцию выполняло отверстие в

¹Kovalev V. F. Analytic Solutions to the Vlasov Equations for Expanding Plasmas/ V. F. Kovalev, V.Yu. Bychenkov // PHYSICAL REVIEW LETTERS. –2003. -V. 90. -N.18. -pp. 185004-185008

²Баренгольц С.А. Модель коллективного ускорения ионов в вакуумном разряде на основе концепции глубокой потенциальной ямы/ С.А. Баренгольц, Г.А. Месяц, Э.А. Перельштейн // ЖЭТФ. –2000. -Т.118. -Вып.6 (12). -с. 1358-1365.

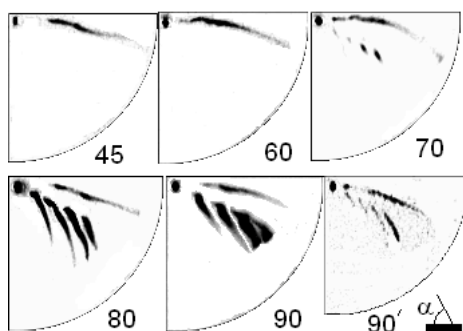


Рис.5. Вид спектрограмм для различных ориентаций поверхности: $\alpha = 45^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ и 90°

диафрагме на расстоянии 1 см от разрядной поверхности. На дальний от диафрагмы край подавался импульс напряжения, а ближний был заземлен. Вид спектрограмм в зависимости от угла α представлен на Рис. 5. Видно, что ионы водорода присутствуют, начиная с $\alpha = 45^\circ$. Ионы углерода начинают появляться при $\alpha > 70^\circ$ или углах менее 20° к нормали к поверхности. При приближении к нормали наблюдается эффект уширения парабол ионов водорода и увеличения их интенсивности. В то же время измерения по нормали с обычным положением первой диафрагмы (спектрограмма 90' Рис. 5.) дает массовый состав близкий к химическому и нормальную ширину парабол углерода. Этот эффект может быть объяснен разными областями ускорения ионов. Ионы водорода ускоряются перед диафрагмой и поэтому парабола имеет нормальную ширину. Ионы углерода ускоряются после диафрагмы и облако плазмы ионов водорода существенно шире отверстия в диафрагме, что объясняет уширение парабол углерода. Кроме того, в области ускорения углерода присутствуют ионы, образовавшиеся на широком участке разряда, что может объяснить возросшую интенсивность парабол углерода.

В разделе 3.3. исследованы различные варианты комбинированного разряда, совмещающего в себе разряд по поверхности диэлектрика и пробой вакуумного промежутка. В результате был обнаружен эффект селективного ускорения ионов водорода в таком разряде. Основная разрядная схема представлена на Рис. 6. На штыревой потенциальный электрод надевался полиэтиленовый цилиндр с центральным отверстием. Длина образованного капилляра составляло 5 мм. Использовался генератор РАДАН 150. Заземленный электрод представлял собой пластину с отверстием затянутым сеткой. Вакуумный зазор менялся от 2 мм до 15 мм. При подаче

положительного импульса регистрировались ионы водорода с энергиями до 350 кэВ. Ионов углерода замечено не было.

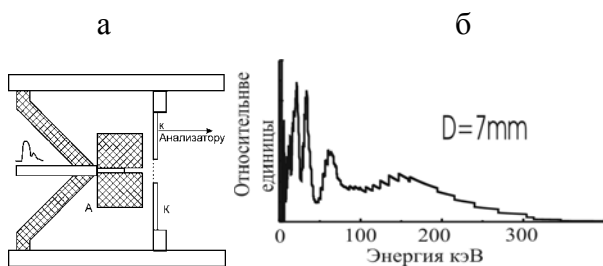


Рис.6. Капиллярный разряд в диэлектрике и пробой вакуумного промежутка:
а - схема, б - спектр энергий H^+

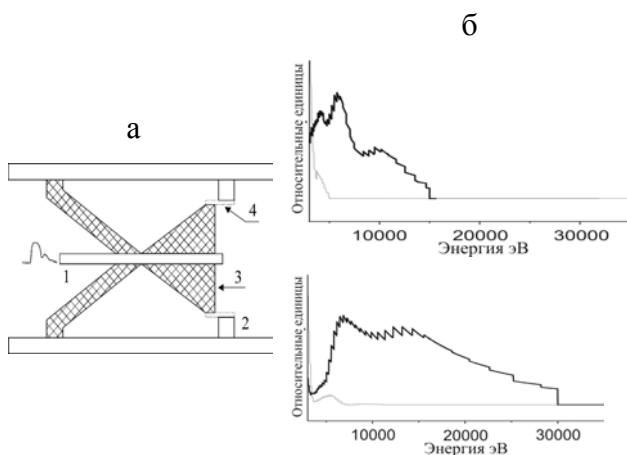


Рис.7. Поверхностный разряд по диэлектрику и пробой вакуумного промежутка 0,5 мм:
а - схема (1- потенциальный электрод, 2 - заземленный электрод, 3 - точка прицеливания, 4 - кольцо),
б - спектр энергий H^+

вакуумного промежутка. Во всех случаях этот эффект присутствовал. Был исследован коаксиальный разряд по диэлектрику с вакуумным промежутком 0,5 мм, который мог устраняться металлическим кольцом (Рис. 7.). Обнаружено, что при появлении зазора в 0,5 мм доля ионов H^+ растет с 50% до 76%. При этом в распределении H^+ появляется высокоэнергетичный хвост. Данная схема является переходной от поверхностного перекрытия к комбинированному разряду.

Причем, был предпринят поиск ионов углерода по расположению точки прицеливания оси спектрометра и всему доступному диапазону энергий. В случае подачи отрицательного импульса никакого сигнала ионов зафиксировано не было во всем диапазоне энергий и точек прицеливания. Для положительного импульса максимальные энергии ионов водорода росли при увеличении зазора от 2 мм до 7 мм, достигнув в максимуме 350 кэВ, и после этого снижались вплоть до расстояния 15 мм. Были исследованы несколько разрядных схем, совмещающих разряд по поверхности диэлектрика и пробой

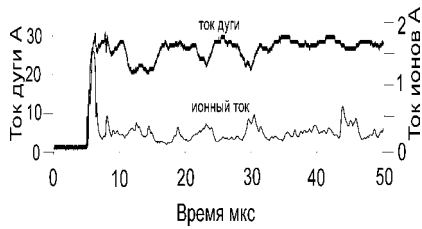


Рис.8. Осциллограмма тока дуги и тока ионов на коллектор за катодной пленкой

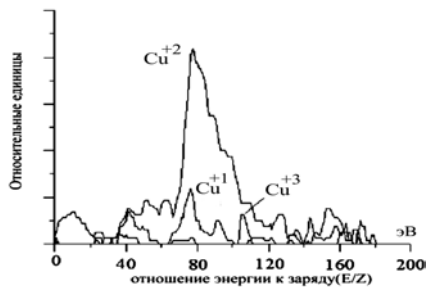


Рис.9. Энергетический спектр ионов меди

ионный ток коллекторной

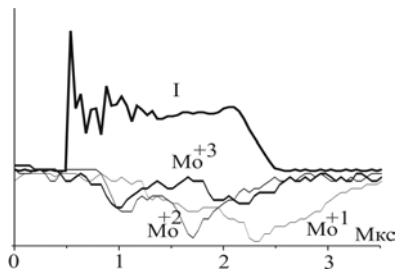


Рис.10. Сигналы потока ионов при настройке $E/Z = 42$ эВ, для вакуумной дуги с Mo электродами

В главе 4 описываются эксперименты с потоками ионов и электронов из плазмы вакуумной дуги. В разделе 4.1. описано исследование параметров потока ионов, возвращающихся на катодную поверхность из плотной плазмы катодного пятна. Для этого в качестве катода была применена тонкая 2 мкм медная пленка, прожигаемая разрядом. В образовавшееся отверстие поступала плазма, которая потом анализировалась ионным спектрометром. Разряд зажигался в закрытом пленкой объеме, таким образом, в общий объем камеры поступала только плазма из отверстий.

Так же было возможно измерять общий ионный ток коллекторной пластиной расположенной под пленкой на расстоянии 3 мм. Результаты коллекторных измерений показывают (Рис. 8.), что ток на коллектор положительный. В осциллограмме тока присутствуют положительные интенсивные выбросы, соответствующие локальным падениям тока разряда. Спектр ионов меди представлен на Рис. 9. Видно, что как энергетический, так и зарядовый состав потока совпадает с известными параметрами

потока от катодного пятна. В разделе 4.2. описывается измерение временного характера ионного потока. Для выяснения временного характера потока ионов был использован режим электростатического спектрометра для временного анализа потока частиц с определенным E/Z . Энергетический дискриминатор настраивался на параметры E/Z от 20 эВ до 80 эВ. Результаты

показывают (Рис. 10.), что поток ионов для одной энергии состоит из последовательности всплесков.

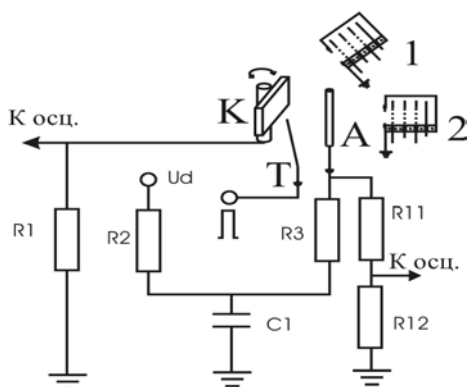


Рис.11. Электрическая схема эксперимента 1, 2 – сеточные анализаторы

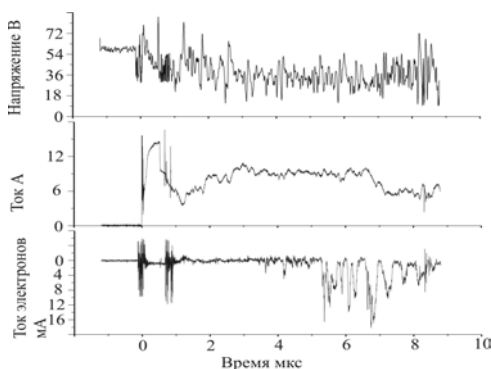


Рис.12. Осциллограммы напряжения, тока дуги и потока электронов при задерживающем потенциале сеточного анализатора 60 В

потока электронов с разных направлений использовались 2 сеточных анализатора. Ток дуги составлял 10 А, зарядное напряжение 70 В. Расстояние анод – катод составляло 3 мм. Измерялись напряжение и ток дуги, а также сигналы с двух анализаторов. Типичная осциллограмма с появлением ускоренных электронов показана на Рис. 12. Показано, что поток электронов представляет собой последовательность выбросов длительностью от 50 до 200 нс. Выбросы потока ускоренных электронов с высокой вероятностью соответствуют локальным падениям тока дуги и попыткам дуги погаснуть. Появление выбросов ускоренных электронов синхронно для разных

В каждом всплеске зарядовый состав меняется, но всплески разных зарядов совпадают во времени. Прекращению разряда соответствует мощный всплеск однозарядных ионов. Данные эксперименты показывают, что, скорее всего, поток ионов из катодной области вакуумной дуги состоит из интенсивных всплесков. Другим вариантом может быть постоянное ускорение ионов в узком диапазоне E/Z , при меняющемся в широком диапазоне E .

В разделе 4.3. для исследования временного характера ускоренного электронного потока были использованы малогабаритные энергоанализаторы, действующие по принципу задерживающего потенциала. Схема разряда представлена на Рис. 11. Катодная пластина могла поворачиваться на угол $\pm 90^\circ$ по оси. Для синхронного анализа

направлений. Наибольшую амплитуду имеют выбросы по нормали к поверхности катода независимо от положения анода. При приближении к тангенциальному направлению амплитуда выбросов стремится к нулю.

В заключении сформулированы основные результаты исследования.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. I.L.Muzukin, A.M.Mourzakaev. The characteristics of an ion flow from a cathode spot of a vacuum arc, XIX International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. 1998, Eindhoven, Netherlands, Pp. 306-309
2. I.L.Muzukin, A.M.Mourzakaev. Temporal characteristics of charged particle flows in a low current vacuum arc. XX International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. 2002, Tours, France, Pp. 560-563
3. И.Л.Музюкин, С.В.Барахвостов. Угловая зависимость энергомассового состава плазмы вакуумного пробоя по поверхности. ПЖТФ, 2005, т. 31, В. 10 стр. 27-30
4. И.Л.Музюкин. Исследование временных характеристик потока ионов из катодной области вакуумной дуг ЖТФ, 2006, том 76, В. 2, стр. 128-131
5. И.Л.Музюкин С.В.Барахвостов, Ю.А.Земсков. Энергетический и зарядовый состав потока плазмы наносекундной вакуумной искры ПЖТФ, 2006, том 32, В. 12, стр. 45-50
6. И.Л.Музюкин, Ю.Н.Вершинин, С.В.Барахвостов. Генерация высокоэнергетических протонов при поверхностном разряде ПЖТФ, 2006, том 32, В. 5, стр. 65-70
7. И.Л.Музюкин, Ю.Н.Вершинин, С.В.Барахвостов. Особенности энергомассового состава плазмы коаксиального вакуумного наносекундного поверхностного разряда, ЖТФ, 2006, том 76, В. 9, стр. 46-50
8. I.L.Muzyukin, S.V.Barakhvostov. A Nanosecond Discharge Over a Dielectric Surface as a Method for Generation of Multicharged Plasma. Plasma Science, IEEE Transactions 2005, vol. 33, № 5, Page(s): 1654 – 1657

9. I.L.Muzyukin. Time-resolved investigations of the accelerated electron flow from the cathode region of a vacuum arc, IEEE Transactions on Plasma Science, Volume 33, Issue 5, Oct. 2005, Page(s): 1560 – 1563
10. I.L.Muzyukin, S.V.Barakhvostov. Characteristics of the plasma flow of a nanosecond vacuum flashover, Изв. вузов. Физика. N 8, стр.34-36, 2006
11. И.Л.Музюкин. Исследования энергетического и массового состава ионов плазмы наносекундной вакуумной искры, Физика экстремальных состояний вещества – 2005, Черногоровка – 2005, стр. 210-212
12. И.Л. Музюкин, С.В. Барахвостов. Эффект селективного ускорения ионов водорода при пробое комбинированного промежутка, Физика экстремальных состояний вещества 2006, Черногоровка 2006, стр. 238-239
13. I.L. Muzyukin, S.V.Barakhvostov. Effect of the selective acceleration of light ions in vacuum flashover, combined with a vacuum gap breakdown, XXIIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2006
14. I.L.Muzyukin. Investigation of a plasma flow of a short vacuum spark, Proceedings XXIIth Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2006, Matsue, Japan.
15. I.L.Muzyukin, S.V.Barakhvostov. Angular dependence of energy-mass distribution of surface discharge plasma ions. XXI International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. 2004, vol. 1, Yalta, Crimea, Pp. 135-140
16. I.L.Muzyukin. Temporal measurement of an accelerated electron flow from area of a vacuum arc, XXI International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. 2004, vol. 1, Yalta, Crimea, Pp. 269-272

