



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.9>

УДК: 533.9.082.74

17-я Международная конференция

«Газоразрядная плазма и ее применения»

Екатеринбург, Россия, 8-12 сентября 2025

ИССЛЕДОВАНИЕ МАССЗАРЯДОВОГО СОСТАВА ДУГОВОГО ИСТОЧНИКА ИОНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ МЕТОДОМ

А.С. Бугаев, В.И. Гушенец, Е.М. Окс

Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3

Статья поступила в редакцию 2 октября 2025 г.

Аннотация. Представлено описание модифицированного электроэрозионного генератора плазмы на основе вакуумного дугового разряда, широко используемого в науке и технике для синтеза металлических покрытий, получения интенсивных пучков ионов металлов, в электроразрядных двигателях малых космических аппаратов и др. устройствах. Для повышения эффективности плазмогенератора (увеличения выхода ионов) в качестве одного из его элементов использована плазмооптическая система типа цилиндрической плазменной линзы. Проведены исследования элементного и зарядового состава пучка ионов, извлекаемых из плазмы вакуумного дугового разряда с медным катодом, возбуждаемого пробоем по поверхности алундовой керамики Al_2O_3 , а также политетрафторэтилена $(-C_2F_4-)_n$. Результаты по масс-зарядовому составу ионного пучка были получены с использованием магнитного сепаратора на основе секторного электромагнита. Этот метод исследования, позволяет получать данные об эволюции составляющих пучка ионов с высоким временным

разрешением прямыми измерениями сигнала с коллектора сепаратора. Установлено, что в варианте генератора плазмы с политетрафторэтиленом, содержание ионов углерода и фтора в сильной степени зависит от разрядного тока. При токах дугового разряда менее 70 А, суммарное содержание ионов этих элементов составляет величину не более 15 % от ионов меди. Изучено влияние напряжения на электродах плазменной линзы и её магнитного поля на масс-зарядовый состав ионного пучка и его временную эволюцию для плазмогенератора с инициированием дугового разряда пробоем по поверхности керамики.

Ключевые слова: вакуумная дуга, источник ионов, генератор плазмы, секторный электромагнит, плазменная линза, многозарядные ионы.

Финансирование: Исследования поддержаны в рамках государственного задания ИСЭ СО РАН, проект FWRM-2021-0006.

Автор для переписки: Гушенец Василий Иванович, gvi@opee.hcei.tsc.ru

Введение

Электроэрозионные генераторы плазмы на основе дугового разряда с катодным пятном нашли широкое применение для синтеза металлических покрытий, генерации пучков ионов металлов, импульсных электронных пучков [1], а также в импульсных электроразрядных двигателях малых космических аппаратов [2,3], дуговых коммутаторах и разрядниках [4]. Инициирование дугового разряда в таких генераторах плазмы возможно несколькими способами [4,5]. Наиболее эффективный способ инициирования дугового разряда – это пробой по поверхности изолятора, разделяющего два электрода – катод и иницирующий электрод [5]. В зависимости от применения дугового генератора плазмы (источник ионов металлов, электронный источник и др.) в качестве изолятора, разделяющего электроды, используется либо керамика (в основном алундовая керамика, как наиболее дешевая и широко доступная), либо синтетические полимерные материалы. Одним из основных полимерных материалов используемым в иницирующих

устройствах является политетрафторэтилен (фторопласт), который отличается достаточной прочностью, высокой термостойкостью и химической инертностью.

Для облегчения инициирования дуги на поверхность изолятора наносят проводящую пленку, испарение которой при протекании тока между катодом и инициирующим электродом приводит к зажиганию дугового разряда. В процессе горения разряда пленка на поверхности изолятора восстанавливается напылением проводящего материала, поступающего из плазмы. В течение инициирования вакуумной дуги происходит эрозия поверхности изолятора. Сильная эрозия изолятора приводит к отказам в работе инициирующего устройства. Скорость эрозии обратно пропорциональна твердости материала, из которого изготовлен изолятор. Поэтому изолятор из керамических материалов (например, из оксида алюминия), отличающиеся высокой твердостью, предпочтительно использовать в генераторах чисто металлической плазмы. В этих генераторах плазмообразующей средой являются пары материала катода.

В импульсных электроразрядных (эрозионных) двигателях в основном используется фторопласт [2,3]. В таких устройствах плазмообразующей средой являются в основном пары материала изолятора. Считается, что впервые генератор эрозионной плазмы в качестве импульсного ускорителя плазмы для электроракетного двигателя был предложен Бостиком [6]. Фторопласт широко используется и в инициирующих устройствах в плазменных источниках электронов. Привлекательность использования фторопласта по сравнению с керамикой состоит в его достаточно высокой пластичности. Это позволяет выполнить прилегание изолятора к электродам без зазоров. Пятно дуги инициируется в месте контакта катода с изолятором и появление зазора между катодом и изолятором приводит к тому, что пятно может сместиться в зазор и в результате дуговой разряд с большой вероятностью может погаснуть [4,5].

Одним из широко распространённых методов исследования масс-зарядового состава плазмы вакуумного дугового разряда является время-пролетный метод. Реализация этого метода с отклоняющей системой

в виде набора из концентрических колец [7], которая является одновременно и фокусирующей электростатической линзой [8], позволила значительно повысить уровень регистрируемого сигнала и избавиться от усиления сигнала с помощью вторичного-электронного умножителя. Однако одним из недостатков метода является трудоемкость измерения поведения во времени составляющих плазмы дугового разряда. Большинство исследований основаны на интегрированных по времени измерениях с последующей обработкой этих измерений, и поэтому не так много исследований посвящено разрешенным по времени измерениям элементного и зарядового состава ионов. Метод отклонения и фокусировки ионного пучка в поперечном магнитном поле позволяет напрямую (без вторичной обработки) получить временную эволюцию каждой составляющей пучка по осциллограммам регистрируемого коллектором тока. Этот метод позволяет отследить эволюцию составляющих пучка с высоким временным разрешением, тогда как для стандартного времяпролетного метода временное разрешение ограничено пролетом наиболее медленной частицы. Дополнительная сложность измерений по времени пролета с высоким временным разрешением заключается в том, что время пролета различно для каждого отношения масса/заряд [7].

В экспериментах, результаты которых приводятся в этой статье, исследования массзарядового состава ионного пучка, сформированного источником ионов на основе вакуумного дугового разряда, проводились с использованием магнитного сепаратора на основе секторного электромагнита с изменяемым углом раствора сектора и углом фокусировки ионов 90° .

1. Описание экспериментального стенда

Схема экспериментального макета ионного источника представлена на рис. 1. Ионный источник состоит из двух частей: вакуумно-дугового генератора плазмы и трехэлектродной ионно-оптической системы извлечения и формирования ионного пучка. В отличие от традиционных генераторов вакуумно-дуговой плазмы, в исследуемом генераторе вместо полого анода

использована плазмооптическая система, типа цилиндрической плазменной линзы. Эта плазмооптическая система образована тремя электродами (центральным и двумя крайними электродами), помещенными в продольное магнитное поле. Крайние электроды подключены к плюсу источника питания дугового разряда, а центральный электрод в экспериментах имел различный потенциал относительно крайних электродов. Электроды линзы изготовлены из немагнитной нержавеющей стали. Магнитное поле создается набором постоянных неодимовых магнитов 6, а его конфигурация определяется магнитопроводами 7. Максимальное значение поля на оси плазмооптической системы в центре электрода 5 составляет величину близкую к 300 Гс. В месте расположения катода 1 магнитное поле снижается до 20-25 Гс. Инициирование дугового разряда осуществляется за счет пробоя по поверхности изолятора 3 при подаче положительного напряжения на поджигающий электрод 2 относительно катода 1.

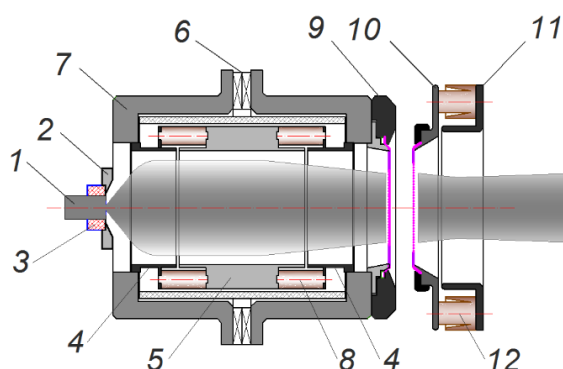


Рис. 1. Экспериментальный макет ионного источника с плазменной линзой.

1 – катод, 2 – поджигающий электрод, 3 – изолятор, 4 – внешние электроды, 5 – центральный электрод, 6 – неодимовые магниты, 7 – магнитопровод, 8, 12 – керамические стойки, 9 – эмиссионный электрод, 10 – экранирующий электрод, 11 – заземленный электрод.

В качестве изолятора 3 в экспериментах использовали вакуумно-плотную алюмооксидную керамику Al_2O_3 и фтор-полимер $(-C_2F_4-)_n$. Все результаты, приводимые в статье, получены для медного катода. Выбор меди связан с тем, что этот материал наиболее часто используется в модельных экспериментальных исследованиях вакуумной дуги и поэтому имеется обширный экспериментальный материал. Режим работы плазмогенератора импульсно-периодический с

длительностью импульса разрядного тока 100 мкс на полувысоте, с частотой повторения до 25 импульсов в секунду и амплитудой разрядного тока до 110 А.

Извлечение и формирование ионного пучка осуществляется с использованием триодной ионно-оптической системы, представляющей собой простейшую схему сохранения компенсации объемного заряда ионного пучка. Между эмиссионным электродом 9 и заземленным электродом 11, располагается экранирующий электрод 10, на который подается отрицательное напряжение, что предотвращает проникновение компенсирующих электронов из области транспортировки ионного пучка и нарушение компенсации его пространственного заряда. Отверстия в эмиссионном и экранирующем электродах закрыты мелкоструктурной вольфрамовой сеткой с высокой прозрачностью ($\sim 70\%$). Диаметр эмитирующей поверхности около 4 см. На расстоянии 10 см от эмиссионной границы установлена диафрагма с вертикально расположенной щелью размерами $6 \times 45 \text{ мм}^2$. Таким образом из пучка цилиндрической формы формировался пучок прямоугольного сечения.

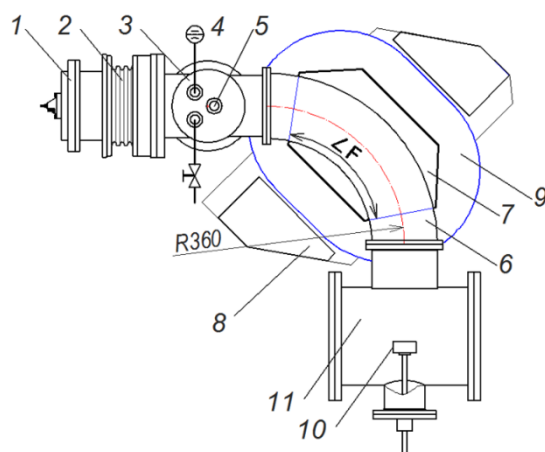


Рис. 2. Схема экспериментального стенда (вид сверху).

1 – ионный источник, 2 – высоковольтный изолятор, 3 – входная камера, 4 – вакуумметр, 5 – ввод коллектора, 6 – ионопровод, 7 – полюс электромагнита, 8 – внешнее ярмо электромагнита, 9 – обмотка электромагнита, 10 – коллектор, 11 – выходная (диагностическая) камера.

$\angle F$ – угол раствора магнита.

Исследования массзарядового состава плазмы, формируемой вакуумно-дуговым плазмогенератором, выполнялись на стенде (рис. 2), оборудованном сепаратором заряженных частиц на основе секторного

электромагнита с практически однородным поперечным магнитным полем. Такое поле создается в промежутке между полюсами магнита, когда ширина зазора много меньше пролетного пути частиц в магнитном поле.

Угол раствора секторного магнита ($\angle F$, рис. 2) регулировался в областях входа и выхода ионного пучка, что позволяет подобрать наилучшие углы входа и выхода инжектируемого пучка и улучшить его фокусировку. Регистрация тока составляющих ионного пучка производилась коллектором 10, расположенным за выходным створом магнита в месте нахождения фокуса. Коллектор, стандартной для таких измерений конструкции с подавлением ионно-электронной эмиссии, имел входную диафрагму с прямоугольным окном $6 \times 50 \text{ мм}^2$.

Стенд оборудован двумя вакуумными постами с турбомолекулярными насосами. Один вакуумный пост установлен перед входом в канал транспортировки ионного пучка (ионопровод 6) магнитного сепаратора, второй на выходе из ионопровода и подключен к камере регистрации 11 тока сепарированного ионного пучка. Во всех экспериментах давление было не выше, чем 2×10^{-6} Торр.

2. Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

В экспериментальный макет генератора плазмы, как отмечено выше, встроена цилиндрическая плазменная линза. Данная плазменная линза ранее использовалась как плазменный фильтр в экспериментах по удалению микрокапель из плотного низкотемпературного многокомпонентного плазменного потока, генерируемого эрозионным вакуумно-дуговым источником плазмы [9]. Плазменная линза генерирует поток энергетичных электронов, который формируется за счет вторичной ионно-электронной эмиссии с внутренней поверхности центрального электрода линзы и ускоряется в пристеночном слое. Предварительные оценки и эксперименты показали, что поток этих электронов является одним из основных источников нагрева микрокапель и может обеспечить эффективное их испарение, особенно капель малого размера. Как было установлено в предыдущих исследованиях, наряду с

быстрыми электронами, источниками нагрева капель в разряде являются потоки медленных («тепловых») электронов и ионов [10,11].

Помимо применения для фильтрации микрокапель в потоке плазмы, плазмооптическая система типа цилиндрической плазменной линзы имеет хорошие перспективы использования для повышения эффективности источников ионов, благодаря фокусировке потока низкоэнергетической плазмы в направлении извлечения заряженных частиц [12]. Ранее было установлено [13], что одновременное приложение продольного магнитного поля и отрицательного потенциала к центральному электроду 5 (рис. 1) привело к кратному увеличению эмиссионного тока и стабилизации амплитуды этого тока.

Эксперименты с использованием керамики в инициирующем устройстве проводились в режиме фильтрации капельной фракции плазменного потока линзой. В этом режиме на центральный электрод плазменной линзы подавалось относительно высокое отрицательное напряжение (в экспериментах до -2 кВ).

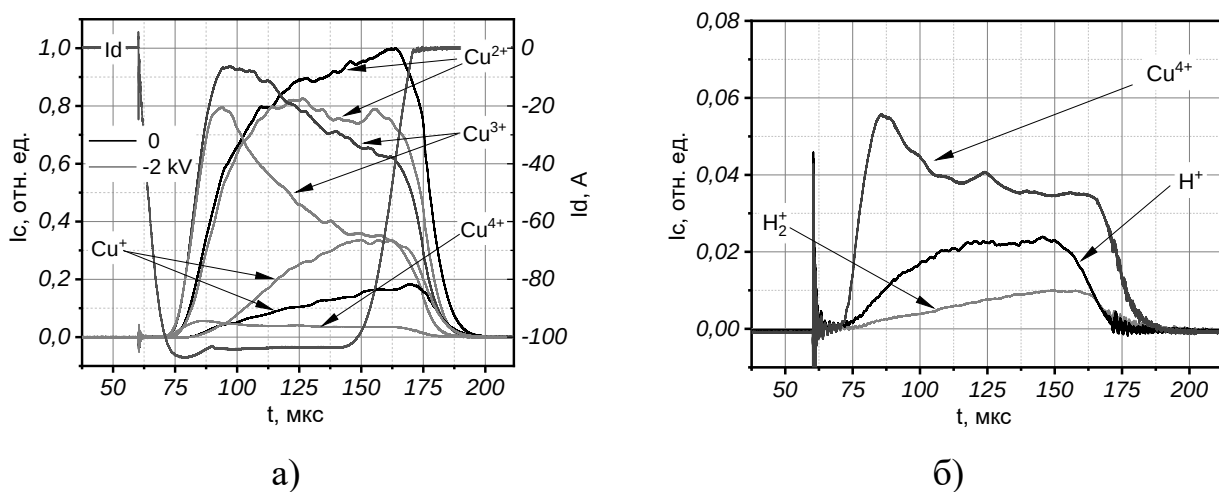


Рис. 3. Интенсивности составляющих ионного пучка I_c в зависимости от потенциала на электродах линзы. I_d – осциллограмма тока разряда.

Все осциллограммы нормированы на максимальное значение тока двухзарядной меди Cu^{2+} .

Интерес к этому режиму обусловлен еще и увеличением электрической прочности ускоряющего промежутка, достигаемым за счет снижения потока капель [13], что особенно актуально для ионных источников с высокой плотностью тока отбора с эмиссионной поверхности плазменного эмиттера и значительным

ускоряющим напряжением (30 кВ и выше). В экспериментах плотность тока ионов, извлекаемых из плазмы, находилась в пределах 50-100 мА/см².

Были выполнены исследования влияния напряжения на линзе на поведение составляющих пучка металлических ионов. Результаты этих исследований представлены на рис. 3, из которых можно получить в том числе представление об изменении во времени составляющих ионного пучка. Основными составляющими ионного пучка являются ионы меди (Cu^+ , Cu^{2+} , Cu^{3+} и Cu^{4+}). Также в составе пучка присутствует небольшое количество ионов водорода (атомарных и молекулярных) и, незначительное, ионов углерода. Амплитуда последних составляет всего 0.5 % от амплитуды двухзарядной меди. В качестве иллюстрации выше сказанного, на рис. 3б отдельно приведены осциллограммы токов ионов водорода и (для сравнения) тока ионов меди Cu^{4+} . Присутствие в спектре других ионов пучка не регистрируются, так как они, возможно, маскируются шумовой составляющей сигнала.

Несмотря на то, что после завершения стадии формирования разряда, ток разряда и напряжение горения остаются практически неизменными, амплитуда составляющих пучка продолжает достаточно существенно меняться в течении времени горения дугового разряда. Токи ионов меди с зарядностью 3 и 4 значительно снижаются со временем, тогда как интенсивности одно и двухзарядных ионов меди растут в течении всего токового импульса. После подачи отрицательного напряжения на центральный электрод линзы происходит дальнейшее общее снижение многозарядных ионов меди, и одновременно почти двукратный рост ионов однозарядной меди.

Увеличение ионов Cu^+ в течении всего импульса и с ростом отрицательного напряжения, как видно на рисунке 3а, вызвано тем, что однозарядные ионы большей частью генерируются взаимодействием частиц в плазме, а не в катодном пятне, согласно реакции:



Для этой реакции требуется наличие достаточного количества нейтральных атомов, которые появляются за счет распыления материала катода. Кроме того, нейтральные атомы могут быть получены при испарении капель малого размера в транспортируемом потоке плазмы при воздействии на них высокоэнергетичных электронов. При прохождении плазменного потока через плазменную линзу часть ионной составляющей потока извлекается на центральный электрод, находящийся под отрицательным потенциалом, и за счет ионно-электронной эмиссии с его поверхности формируется поток электронов. Формирование в объеме транспортировки плазменного потока области с энергетичными электронами создает условия для их эффективного взаимодействия с движущимися сравнительно медленно каплями. При определенных условиях энергия, вносимая электронами, может быть достаточной для дробления и испарения микрокапель [10,11].

Что касается других составляющих спектра ионного пучка (водорода, углерода), то с ростом отрицательного напряжения амплитуды их растут. Так как эти ионы появляются в результате ионизации газа и молекул некоторых веществ (паров масла, например) десорбированных с электродов плазмогенератора (в том числе с центрального электрода линзы), то увеличение отрицательного напряжения на этом электроде линзы приводит к увеличению энергии бомбардируемых электрод ионов, что увеличивает десорбцию.

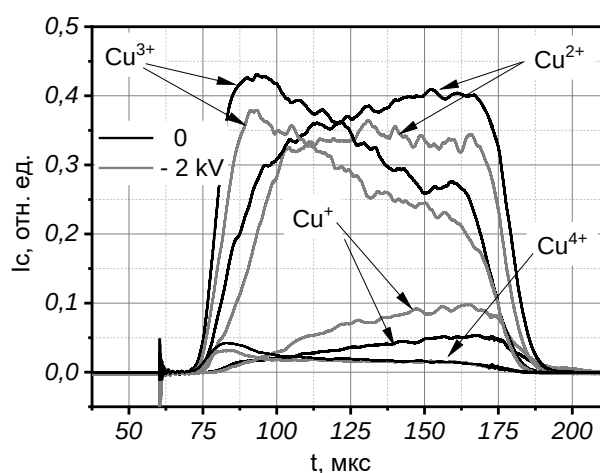


Рис. 4. Интенсивности ионов меди в магнитном поле 120 Гс. Все осциллограммы нормированы на максимальное значение тока двухзарядной меди, осциллограмма которой приведена на рис. 3а.

Снижение магнитного поля линзы (с 300 Гс до 120 Гс) привело к почти двукратному снижению эмиссионного тока и соответственно к снижению тока составляющих ионного пучка (рис. 4). При этом, если токи многозарядных ионов снизились в 2-2.5 раза, то ток однозарядных ионов снизился в три-четыре раза, что может свидетельствовать об уменьшении наработки той части нейтральных атомов меди, которые появляются в результате испарения капель в плазменном потоке. Заметно снизилось влияние отрицательного напряжения на многозарядные ионы, что тоже может быть связано с уменьшением нейтральных атомов.

Как показали эксперименты, несмотря на малый износ керамического изолятора, ресурс работы инициирующего узла оказался на практике значительно меньше ресурса работы этого узла с фторопластовым изолятором. Связано это с тем, что при работе поджигающего узла с керамикой время от времени появлялись сколы в области прилегающей к катоду, а также из-за нагрева катода (при большой частоте следования импульсов) в ряде экспериментов наблюдали появление продольных трещин. Возникновение трещин связано с различием в тепловом расширении керамики и меди.

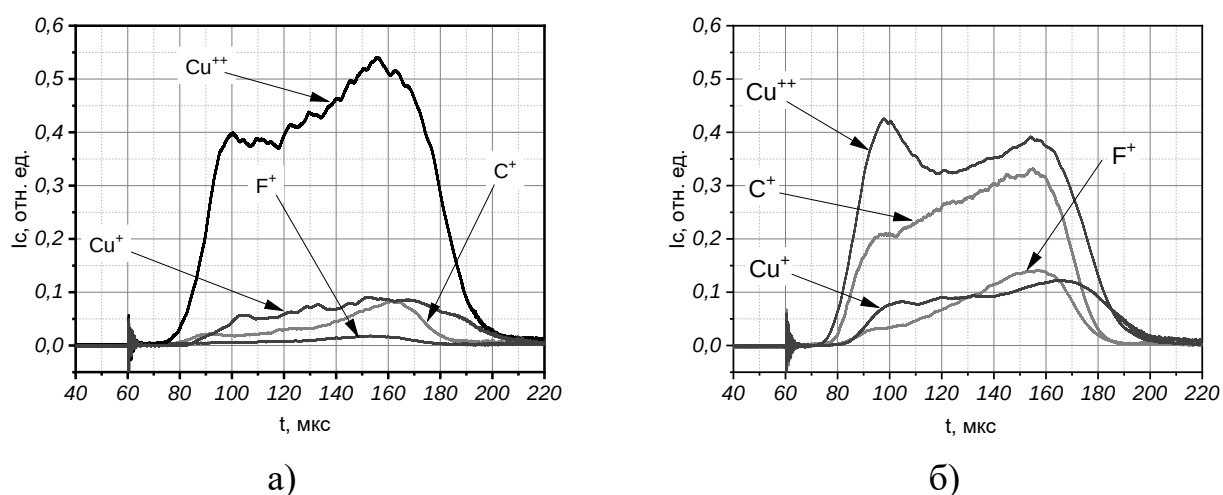


Рис. 5. Интенсивности основных составляющих ионного пучка для разрядных токов 70 А (а) и 100 А (б) с фторопластовым изолятором в инициирующем устройстве. Все осциллограммы нормированы на максимальное значение тока двухзарядной меди Cu^{2+} , осциллограмма которой приведена на рис. 3а.

Резонно возникает вопрос о возможности использования в источниках ионов металлов инициирующего устройства с фторопластовым изолятором,

тем более, что такое устройство успешно используется, например, в плазменных источниках электронов. Из представленных на рис. 5 результатов исследования состава ионного пучка с фторопластовым изолятором в иницирующем устройстве следует, что при токах разряда менее 70 А (если нет достаточно специальных требований к содержанию неметаллических ионов) фторопласт может быть применен в генераторах плазмы с медным катодом. В первой половине импульса разрядного тока доля ионов углерода и фтора снижается до 10%. Что касается других материалов катода, то это требует дополнительных исследований. В этих экспериментах исчезли из зарядового состава пучка трех- и четырехзарядные ионы меди. Подобная картина наблюдается и в случае напуска газа (например, аргона) в разрядную область. Содержание углерода и фтора в сильной степени зависит от тока разряда (рис. 5б). При этом ток ионов углерода во всех измерениях превышал ток ионов фтора, что возможно связано со значительно меньшей величиной потенциала ионизации атомов углерода (11,3 эВ) по сравнению с потенциалом ионизации атомов фтора (17,4 эВ), и почти в три раза превышающим сечением ионизации электронами [16].

Заключение

Проведены исследования временной эволюции с высоким разрешением по времени элементного и зарядового состава импульсной вакуумной дуги с медным катодом. Результаты были получены прямым измерением тока коллектора, установленного на выходе коммерческого электромагнитного сепаратора. В экспериментах использовалась модифицированная версия вакуумно-дугового генератора с плазмооптическим устройством (плазменной линзой), работающим в режиме плазменного фильтра, и двумя вариантами иницирующих устройств. При использовании иницирующего устройства с керамическим изолятором, разделяющим электроды, основными составляющими спектра сепарированного пучка являются ионы меди (Cu^+ , Cu^{2+} , Cu^{3+} и Cu^{4+}). Снижение интенсивностей ионов Cu^{3+} и Cu^{4+} и увеличение интенсивности одно- и двухзарядных ионов меди со временем свидетельствуют о столкновениях в

плотной плазме с обменом зарядов. Подтверждением последнего являются эксперименты с подачей на центральный электрод линзы относительно высокого отрицательного напряжения. В этом случае линза работает в режиме плазменного фильтра, когда под действием вторичных электронов происходит испарение микрокапель, присутствующих в плазменном потоке, что приводит к появлению в разрядной области дополнительных нейтральных атомов меди. В результате амплитуда однозарядных ионов меди удваивается, а амплитуды многозарядных ионов меди снижаются, и особенно сильно снижается ток трехзарядных ионов. В течение нескольких десятков микросекунд после зажигания разряда, когда плазма расширяется в направлении эмиссионного электрода, в плазменном потоке преобладают трехзарядные ионы меди.

Эксперименты, проведенные с использованием фторопласта в иницирующем устройстве, показали, что в наших экспериментальных условиях, при разрядных токах менее 70 А, ионный пучок почти на 80 % состоит из двухзарядных ионов меди. Многозарядные ионы меди Cu^{3+} и Cu^{4+} , которые присутствовали в ионном пучке в экспериментах с керамическим изолятором, в этих экспериментах не наблюдались. Суммарная доля ионов углерода и фтора в составе ионного пучка не превышала 15 %. Ток ионов углерода более чем в два раза превышал ток ионов фтора, а формы их токовых импульсов повторяли друг друга. С ростом разрядного тока резко увеличиваются интенсивности ионов углерода и фтора – основных элементов фторопласта.

Финансирование: Исследования поддержаны в рамках государственного задания ИСЭ СО РАН, проект FWRM-2021-0006

Литература

1. Oks E., Brown I. (ed.). Emerging applications of vacuum-arc-produced plasma, ion and electron beams // Dordrecht: Springer Dordrecht – 2003.
<https://doi.org/10.1007/978-94-010-0277-6>
2. Гришин С. Д., Лесков Л. В., Козлов Н. П. Электрические ракетные двигатели // М.: Машиностроение– 1975.

3. Antropov N. N. et al. Development of Russian next-generation ablative pulsed plasma thrusters // *Procedia engineering*. – 2017. – V. 185. – P. 53-60. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.291>
4. Gilmour A. S., Hope R. F., Miller R. N. 10 kHz Vacuum Arc Switch Ignition // *IEEE 14th Puls. Pwr. Symp.* – 1980. – P. 80-84.
5. Gilmour A. S., Lockwood D. L. Pulsed metallic-plasma generators // *Proceedings of the IEEE*. – 1972. – V. 60. – № 8. – P. 977-991. <https://doi.org/10.1109/proc.1972.8821>
6. Bostick W. H., Byfield H. A High Efficiency Plasma Motor // *XIth International Astronautical Congress Stockholm 1960 / XI. Internationaler Astronautischer Kongress / XIe Congrès International D’Astronautique: Proceedings Vol. I Main Sessions*. – Vienna: Springer Vienna, 1960. – P. 210-214. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-8071-6_22
7. Gushenets V. I. et al. Simple and inexpensive time-of-flight charge-to-mass analyzer for ion beam source characterization // *Review of scientific instruments*. – 2006. – V. 77. – № 6. – P. 063301. <https://doi.org/10.1063/1.2206778>
8. Jianlin K. et al. Focusing of intense and divergent ion beams in a magnetic mass analyzer // *Review of Scientific Instruments*. – 2014. – V. 85. – № 7. –P. 073306. <https://doi.org/10.1063/1.4891419>
9. Gushenets V. I. et al. Plasma lens clearing of the microdroplets in cathodic arc plasma flow // *2015 IEEE International Conference on Plasma Sciences (ICOPS)*. – IEEE. – 2015. – P. 1. <https://doi.org/10.1109/PLASMA.2015.7179830>
10. Goncharov A. A. et al. Evaporation of micro-droplets in cathode arc plasma coating under formed electron beam // *Problems of Atomic Science and Technology*. – 2022. – V. 142. –№ 6. – P. 89-94. <https://doi.org/10.46813/2022-142-089>
11. Goncharov A. A., Litovko I. V., Ryabtsev A. V. Temperature dynamics of the microdroplet fraction of metal plasma in plasma-optical devices with fast electrons // *Problems of Atomic Science and Technology*. – 2023. – V. 146. - № 4. – P. 164-169. <https://doi.org/10.46813/2023-146-164>

12. Bugaev A. et al. Self-sustained focusing of high-density streaming plasma // Journal of Applied Physics. – 2017. – V. 121. – № 4. – P. 043301. <https://doi.org/10.1063/1.4974870>
13. Goncharov A. A. et al. Recent Advances in the Development of Erosion Sources of Plasma // Science and Innovation. – 2019. – V. 15. – № 4. – P. 31-41. <https://doi.org/10.15407/scine15.04.031>
14. Vorobyov M. S. et al. Investigation of the stability of the electron source with a multi-aperture plasma emitter generating a large cross-section electron beam // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing. – 2015. – V. 652. – № 1. – P. 012048. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/652/1/012048>
15. Goncharov A. A., Maslov V. I., Fisk A. Novel plasma-optical device for the elimination of droplets in cathodic arc plasma coating // Proc. Conf. 55th SVC Ann. Tech. – 2012. – P. 441-444. <http://dx.doi.org/10.13140/2.1.4205.3760>
16. Bartlett P. L., Stelbovics A. T. Electron-impact ionization cross sections for elements $Z=1$ to $Z=54$ // Atomic Data and Nuclear Data Tables. – 2004. – V. 86. – № 2. – P. 235-265. <https://doi.org/10.1016/j.adt.2003.11.006>

Для цитирования:

Бугаев А.С., Гушенец В.И., Окс Е.М. Исследование массзарядового состава дугового источника ионов электромагнитным методом. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.9>