

04;12;13

Масс-зарядный состав продуктов эрозии фторопластового изолятора в плазме вакуумного дугового разряда

© К.П. Савкин¹, А.Г. Николаев¹, Е.М. Окс^{1,2}, Г.Ю. Юшков¹¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия² Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

E-mail: savkin@oree.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 14 ноября 2023 г.

В окончательной редакции 21 декабря 2023 г.

Принято к публикации 27 декабря 2023 г.

Исследован элементный и зарядовый состав плазмы импульсного вакуумного дугового разряда с катодом из молибдена, инициируемого пробоем по поверхности фторопласта. Показано, что содержание атомарных ионов углерода и фтора в полном потоке частиц сравнимо с долей ионов молибдена. Из полученных результатов следует, что источником фтора и углерода являлся не только фторопластовый изолятор, но и поверхность катода, на которую осаждались фторуглеродные компоненты в промежутках между импульсами тока вакуумной дуги.

Ключевые слова: катодное пятно, пробой по поверхности изолятора, вакуумная дуга, эрозия фторопласта, фтор.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.08.57516.19803

Неослабевающий интерес к исследованию взаимодействия плазмы с поверхностью политетрафторэтилена (фторопласта) обусловлен применением этого материала в вакуумно-дуговых системах генерации плазмы и плазменных источниках электронов для инициирования разрядов с катодным пятном [1], а также в импульсных плазменных двигателях малоразмерных космических аппаратов [2–4]. В последнем случае фторопластовый изолятор преднамеренно подвергается электротепловой эрозии, и ее продукты являются плазмообразующим материалом. В результате электродинамического ускорения этой плазмы малый космический аппарат получает импульс тяги [5]. В случае плазменного двигателя основное значение имеет масса эродируемого материала за время импульса разряда, поэтому значительная часть известных работ была направлена на увеличение или оптимизацию скорости эрозии. Исследованию масс-зарядного состава ионов плазмы разряда с эродируемой поверхностью фторопласта, определяющего выходные и эксплуатационные параметры этих вакуумно-дуговых устройств, не уделялось достаточного внимания.

Метод времяпролетной масс-зарядной спектроскопии в совокупности с источником ионов на основе вакуумного дугового разряда технически прост и эффективен для экспресс-анализа элементного и зарядового состава плазмы вакуумных разрядов, в том числе функционирующих при условиях и удельных параметрах, достаточно близких к тем, при которых эксплуатируются плазменные двигатели малоразмерных космических аппаратов.

В исследованиях использовался экспериментальный стенд ионного источника на основе вакуумной дуги Mevva-5.RU [6], оснащенный времяпролетным масс-спектрометром [7]. Схема эксперимента показана на рис. 1, а.

Для проведения эксперимента катодный узел ионного источника был модифицирован. Вместо керамического изолятора, по поверхности которого производился пробой для инициирования вакуумного дугового разряда, применялась трубка, изготовленная из фторопласта. Внутри этой детали с минимальными зазорами размещался цилиндрический катод диаметром 6.5 mm, изготовленный из молибдена. На фторопластовый изолятор был надет кольцевой электрод из нержавеющей стали, который являлся анодом инициирующего разряда (рис. 1, б). Между этими электродами прикладывались импульсы напряжения с амплитудой холостого хода 10 kV. После пробоя по торцу фторопластовой трубки ток разряда достигал амплитуды 40 А за несколько микросекунд, затем экспоненциально спадал приблизительно за 50 μ s. При попадании эрозивной плазмы в основной разрядный промежуток, к которому прикладывалось постоянное напряжение 500 V от заряженной искусственной формирующей линии, происходило инициирование вакуумного дугового разряда между катодом и анодом дуги, стенки которого образовывали цилиндрическую полость. Амплитуда импульсов тока вакуумной дуги была 300 А при длительности 250 μ s с частотой следования 0.5 s⁻¹. Предельное остаточное давление в вакуумной системе обеспечивалось турбомолекулярным насосом и составляло $2 \cdot 10^4$ Pa.

Трехэлектродная ионно-оптическая система применялась для формирования ионного пучка при ускоряющем напряжении 30 kV. Временное разделение ускоренных ионов на группы в соответствии с отношением массы к заряду (M_i/Q_i) осуществлялось при их прохождении через пространство дрейфа после подачи на систему кольцевых отклоняющих электродов, образующих за-

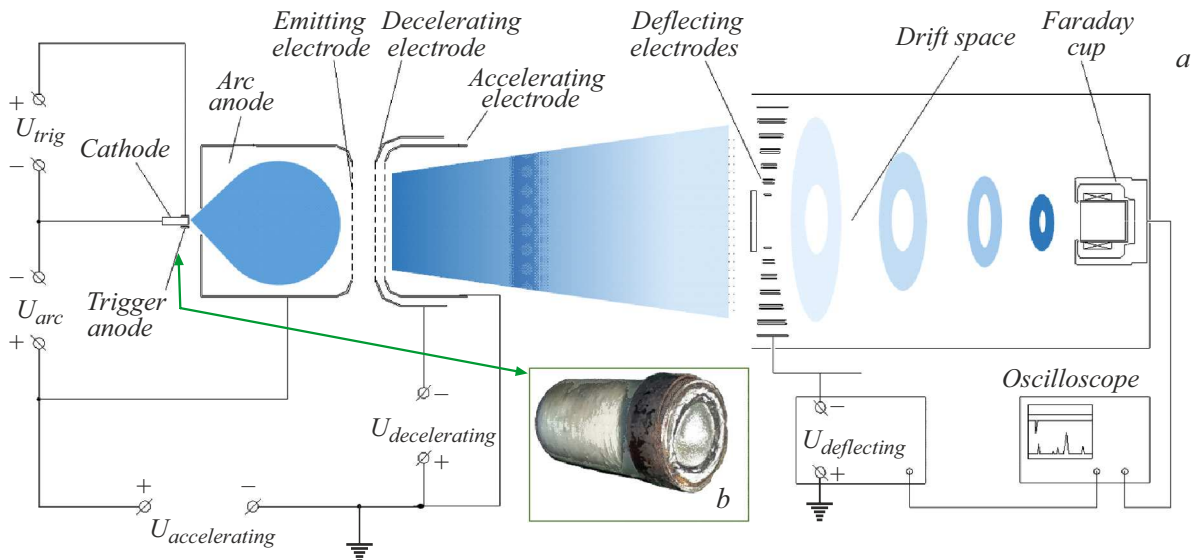


Рис. 1. Схема эксперимента. *a* — устройство ионного источника и времяпролетного спектрометра; *b* — фотография катодного узла в сборе.

твор времяпролетного спектрометра, импульсного напряжения 6 kV длительностью 100 ns.

Поскольку длительность отклоняющего импульса много меньше времени пролета ионов τ базы спектрометра ($L = 1$ m), в процессе движения ионов от затвора к цилиндру Фарадея спектрометра компоненты ионного пучка с различными значениями M_i/Q разделяются на группы во время движения. При этом в цепи измерения тока цилиндра Фарадея наблюдаются пики, соответствующие времени достижения рабочей поверхности коллектора группами ионов с определенным значением M_i/Q . Время пролета τ , определяемое как промежуток времени между приложением к затвору спектрометра отклоняющего импульса и сигналом в цепи цилиндра Фарадея, связано с M_i/Q соотношением

$$M_i/Q = 2\tau^2 eU/L, \quad (1)$$

где M_i — масса иона, Q — зарядовое состояние (кратность ионизации) иона, τ — время пролета, U — ускоряющее напряжение, e — заряд электрона, L — расстояние от затвора спектрометра до коллектора на основе цилиндра Фарадея.

Очевидно, что отношение массы иона к его зарядовому состоянию пропорционально квадрату времени его пролета, поэтому, определив значения времен пролета для всех пиков в спектре и заведомо зная о соответствии хотя бы одного из пиков частицам с известной массой и кратностью ионизации, возможно идентифицировать все типы частиц, которые присутствовали в пучке. Например, известно, что в плазме вакуумной дуги с катодом из молибдена однозарядному иону молибдена Mo^+ соответствует крайний правый пик в спектре, который имеет наибольшее время пролета. Следовательно, для любых двух пиков в спектре будет справедливо соотношение

$$(M_{Mo}/Q_1)/(M_m/Q_x) = \tau_{Mo}^2/\tau_x^2, \quad (2)$$

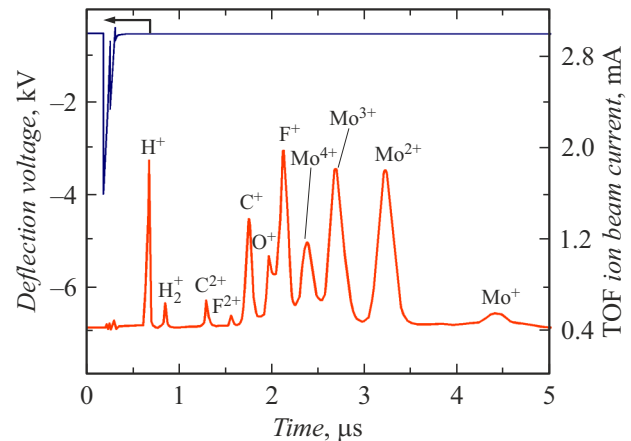


Рис. 2. Времяпролетный масс-зарядный спектр ионного пучка через $50 \mu s$ после инициирования вакуумного дугового разряда. Верхний луч — импульс отклоняющего напряжения, нижний луч — сигнал цилиндра Фарадея.

где M_{Mo} — атомная масса молибдена, $Q_1 = 1$ — зарядовое состояние однозарядного иона, M_m — искомая масса неизвестного иона, Q_x — искомое зарядовое состояние неизвестного иона, τ_{Mo} — время пролета однозарядного иона молибдена, τ_x — время пролета неизвестного иона с массой M_m и зарядовым состоянием Q_x .

После несложных преобразований получается

$$M_m/Q_x = M_{Mo}(\tau_x^2/\tau_{Mo}^2). \quad (3)$$

С применением соотношения (3) были идентифицированы частицы, присутствующие во времяпролетном спектре, представленном на рис. 2.

Вместе с ионами материала катода — одно-, двух-, трех- и четырехкратно ионизованными атомами молиб-

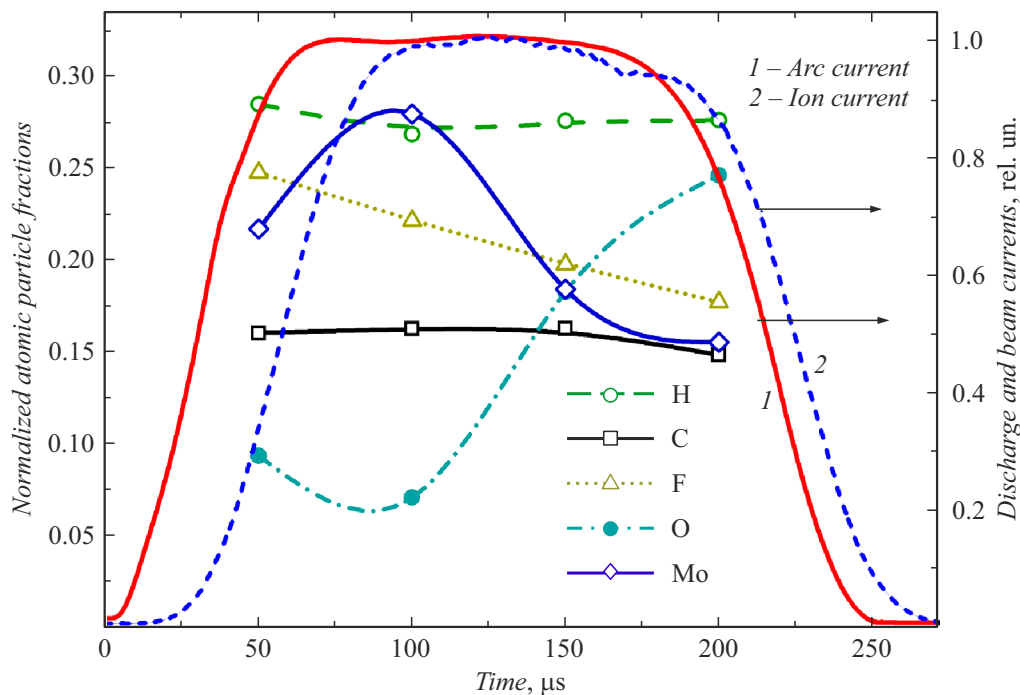


Рис. 3. Зависимости долей содержания частиц в ионном пучке от времени и осциллограммы импульсов тока вакуумной дуги (1) и ионного тока (2).

дена (Mo^+ , Mo^{2+} , Mo^{3+} , Mo^{4+}) — в плазме регистрировались одно- и двухзарядные ионы фтора (F^+ , F^{2+}), углерода (C^+ , C^{2+}), а также кислорода O^+ и водорода (H_2^+ , H^+). Суммарная доля ионов фтора и углерода в полном потоке ионизованных атомных частиц в данный момент времени составляла приблизительно 25 и 16% соответственно. На рис. 3 представлено содержание атомных частиц элементов в ионном пучке в зависимости от времени на фоне осциллограмм импульсов тока вакуумного дугового разряда и плотности тока в центре ионного пучка, полученных в режиме усреднения по 16 импульсам, нормированных на максимальное значение 300 А и 2 mA/cm^2 соответственно. В течение квазистационарного участка импульса тока дугового разряда на протяжении $200 \mu\text{s}$ содержание ионов фтора монотонно снижалось с 25 до 18%. Доля ионов углерода на протяжении квазистационарного участка тока основного разряда сохранялась на уровне 16%.

Наличие ионов кислорода O^+ обусловлено разложением оксидов молибдена, которые присутствовали на рабочей поверхности катода в результате длительного хранения его на воздухе и нахождения в остаточной атмосфере вакуумной камеры в промежутках между импульсами тока разряда, а также последующей диссоциацией молекулярного и ионизацией атомарного кислорода. Динамика содержания ионов кислорода и молибдена в пучке, а следовательно, и в плазме катодных пятен вакуумного дугового разряда может объясняться следующим. В начале импульса тока разряда катодные пятна первого рода [8] функционировали на участках поверхности катода, где чистый металл граничил с

областями, закрытыми непроводящими пленками, состоящими преимущественно из оксидов молибдена. С течением времени происходила деструкция этих оксидных пленок и увеличение площади чистой металлической поверхности. В связи с этим наблюдалось снижение содержания частиц кислорода и возрастание доли ионов молибдена в интервале времени от 50 до $80 \mu\text{s}$. Вместе с тем в результате диффузии тепла от катодных кратеров происходило нагревание материала катода, в том числе увеличение температуры неэродированных участков, покрытых оксидами молибдена, что могло приводить к возрастанию их электропроводности. Следовательно, катодные пятна вакуумного дугового разряда могли функционировать на их поверхности, как на чистом металле. В результате воздействия плазмы происходило разложение оксидов молибдена с последующей ионизацией составляющих атомов. Ввиду стехиометрического состава молекул оксидов молибдена, где на один атом молибдена всегда приходится большее количество атомов кислорода, становится возможным объяснение снижения доли ионов молибдена при одновременном возрастании содержания ионов кислорода.

Процессы, ответственные за присутствие в плазме вакуумной дуги продуктов эрозии фторопласта, предполагаются следующими. Во время импульса инициирующего разряда рабочий торец фторопластовой втулки подвергался воздействию заряженных частиц, преимущественно электронов, которые начиная с этапа формирования начальных лавин разрушали молекулярные связи на поверхности изолятора. Атомы углерода и молекулы фтора F_2 поступали в разрядный промежуток,

где происходила их ионизация. Как было показано в работе [5], выход фтора начинался через 1–1.5 μ s после иницирования пробоя по поверхности диэлектрика и продолжался после спада тока разряда в течение 10–15 μ s из нагретых участков поверхности фторопласта. Таким образом, в разрядной системе реализовался источник фтора F₂. В условиях настоящей работы при спаде тока иницирующего разряда ток вакуумной дуги в основном разрядном промежутке между катодом и полым анодом уже достигал своих амплитудных значений. Следовательно, катодные пятна продолжали функционировать вблизи фторопластового изолятора, вызывая его эрозию и продолжение поступления в разрядный промежуток частиц углерода и фтора. По-видимому, в плазме дугового разряда происходила диссоциация молекул F₂ из-за достаточно малой энергии связи — 1.6 eV. Вследствие высокой окислительной способности атомарного фтора чистый молибден и его оксиды могли вступать с ним в реакцию и образовывать фториды и оксифториды молибдена на поверхности катода. При попадании данных соединений в область функционирования катодных пятен они могли принимать участие в реакциях разложения и последующей ионизации составляющих их атомов.

На основании результатов настоящей работы можно сделать следующие выводы.

Плазма вакуумной дуги, иницируемой пробоем по поверхности фторопласта, содержит значительную долю ионов фтора, которая плавно снижается за время длительности импульса тока разряда приблизительно с 30 до 15% в общем потоке частиц.

Источником ионов фтора является не только поверхность фторопластового изолятора между катодом и анодом иницирующего разряда, но и поверхность катода вакуумной дуги, на которой могут присутствовать фторсодержащие соединения, образованные в результате взаимодействия ионов и атомов фтора с атомами материала катода и его оксидами.

Полученные результаты могут быть полезны исследователям и техническим специалистам, занимающимся применением плазменных двигателей на основе абляции фторопласта. В настоящей работе мы обращаем внимание на экспериментальный факт испускания фтора, поскольку его присутствие может оказаться нежелательным при реализации определенных технологий. Напротив, генерация ионов атомарного фтора может оказаться неожиданным преимуществом подобной разрядной системы в исследованиях и технологических процессах, где ионы фтора будут востребованы.

Финансирование работы

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИСЭ СО РАН (проект FWRM-2021-0006).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.С. Бугаев, В.И. Гушенец, Е.М. Окс, М.В. Шандриков, в сб. *Плазменная эмиссионная электроника*, тр. VII Международного Крейнделевского семинара, под ред. М.С. Воробьева (Изд-во БНЦ СО РАН, Улан-Удэ, 2023), с. 123–132.
- [2] П.А. Морозов, И.Ф. Пунанов, Р.В. Емлин, К.А. Хрущев, *Изв. вузов. Физика*, **57** (11-3), 280 (2014).
- [3] M. Keidar, I.D. Boyd, I.I. Beilis, *IEEE Trans. Plasma. Sci.*, **28** (2), 376 (2000). DOI: 10.1109/27.848096
- [4] W.Y.L. Ling, S. Zhang, H. Fu, M. Huang, J. Quansah, X. Liu, N. Wang, *Chin. J. Aeronaut.*, **33** (12), 2999 (2020). DOI: 10.1016/j.cja.2020.03.024
- [5] А.В. Богатый, Г.А. Дьяконов, С.А. Семенихин, *Космические исследования*, **57** (5), 332 (2019). DOI: 10.1134/S0023420619050017 [A.V. Bogaty, G.A. D'yakonov, S.A. Semenikhin, *Cosmic. Res.*, **57** (5), 310 (2019). DOI: 10.1134/S0010952519050010].
- [6] A.G. Nikolaev, E.M. Oks, K.P. Savkin, G.Yu. Yushkov, I.G. Brown, *Rev. Sci. Instrum.*, **83** (2), 02A501 (2012). DOI: 10.1063/1.3655529
- [7] V.I. Gushenets, A.G. Nikolaev, E.M. Oks, L.G. Vintzenko, G.Yu. Yushkov, A. Oztarhan, I.G. Brown, *Rev. Sci. Instrum.*, **77** (6), 063301 (2006). DOI: 10.1063/1.2206778
- [8] Г.А. Любимов, В.И. Раховский, *УФН*, **125** (8), 665 (1978). DOI: 10.3367/UFNr.0125.197808c.0665 [G.A. Lyubimov, V.I. Rakhovskii, *Sov. Phys. Usp.*, **21** (8), 693 (1978). DOI: 10.1070/PU1978v021n08ABEH005674].