

04

Масс-зарядовый состав плазмы вакуумной дуги с катодом из циркония, насыщенного дейтерием

© Г.Ю. Юшков¹, А.Г. Николаев¹, В.П. Фролова¹, Е.М. Окс^{1,2},
Г.С. Румянцев³, С.А. Баренгольц^{4,5}

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

² Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск

³ Всероссийский научно-исследовательский институт им. Н.Л. Духова, Москва

⁴ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

⁵ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

E-mail: sb@nsc.gpi.ru

Поступило в Редакцию 26 июня 2014 г.

Проведено экспериментальное исследование масс-зарядового состава плазмы вакуумной дуги с циркониевым катодом, содержащим дейтерий. Показано, что такая система обеспечивает эффективную генерацию ионов дейтерия, интегральная доля которых за импульс тока дуги составляет приблизительно 60%. Содержание ионов дейтерия в дуговой плазме максимально в начальной стадии горения разряда и заметно спадает в течение первых 150 μ s импульса тока дуги. Дейтерирование катода также приводит к снижению среднего заряда ионов металлической подложки в плазме вакуумно-дугового разряда.

Электроды, содержащие изотопы водорода в окклюдированном состоянии, являются источником рабочего газа в вакуумных нейтронных источниках, функционирующих в искродуговой стадии вакуумного разряда при его длительности в единицы микросекунд [1]. Масс-зарядовый состав плазмы разряда, динамика его изменения во многом определяет эффективность работы нейтронных источников данного типа, поскольку наряду с изотопами водорода продуктами эрозии электродов являются также и ионы металлической подложки. Повышение длительности генерации нейтронов в устройствах такого типа связано с увеличением времени функционирования разряда в дуговой стадии. В настоящей статье приведены результаты исследований масс-

зарядового состава плазмы вакуумной дуги с циркониевым катодом, содержащим дейтерий.

Эксперименты проводились в лаборатории плазменных источников Института сильноточной электроники СО РАН, с использованием вакуумного дугового источника ионов Mevva-V.Ru. Принцип действия источника подробно описан в [2] и основан на формировании пучка ионов металлов при отборе частиц с развитой поверхности плазмы, распространяющейся из области катодного пятна к эмиссионной сетке. Ток дуги ионного источника варьировался от 80 до 320 А. Длительность импульсов тока дуги и частота их повторения составляли $250\ \mu\text{s}$ и 0.5 Hz соответственно. Выбор столь малой скважности импульсов был обусловлен необходимостью предотвращения интегрального нагрева катода и выхода из объема катода дейтерия. Простые оценки показывают, что в этом случае при напряжении горения разряда 25–30 V средняя мощность, выделяемая в катодной области разряда, не превышала 2 W и нагрев катода был незначителен. Специально проведенные тестовые эксперименты показали, что заметная деградация катода, насыщенного дейтерием, наблюдалась лишь при частотах свыше 10 Hz.

В экспериментах использовался катод из дейтерида циркония $\text{ZrD}_{0.66}$ с атомной долей дейтерия 66% относительно атомной доли циркония. Катод представлял собой шайбу с внешним диаметром 23.5 mm, внутренним диаметром 9.2 mm, толщиной 1.8 mm. Для сравнения в ряде экспериментов использовался идентичный по размерам катод из того же циркония, который не подвергался насыщению дейтерием. Ток ионного пучка зависел от концентрации плазмы в области эмиссии ионов и при токе разряда 200 А составлял 600 mA.

Масс-зарядовый состав извлеченного из плазмы дуги ионного пучка измерялся на основе времяпролетной методики. Параметры используемого в эксперименте времяпролетного спектрометра [3] (пролетная база — 1 m, импульс отклоняющего напряжения на затворе 5 kV и его длительность 80 ns) обеспечивали возможность четкого разрешения всех возможных масс-зарядовых состояний, генерируемых в вакуумной дуге с дейтерированным циркониевым катодом.

Типичный спектр элементного состава ионного пучка вакуумной дуги с дейтерированным катодом представлен на рис. 1, а. Как видно из рисунка, в спектре пучка кроме ионов циркония (Zr^+ , Zr^{2+} , Zr^{3+} , Zr^{4+}) присутствовало значительное количество ионов дейтерия (D^+), причем пик ионов D^+ был максимальный по сравнению с пиками других типов

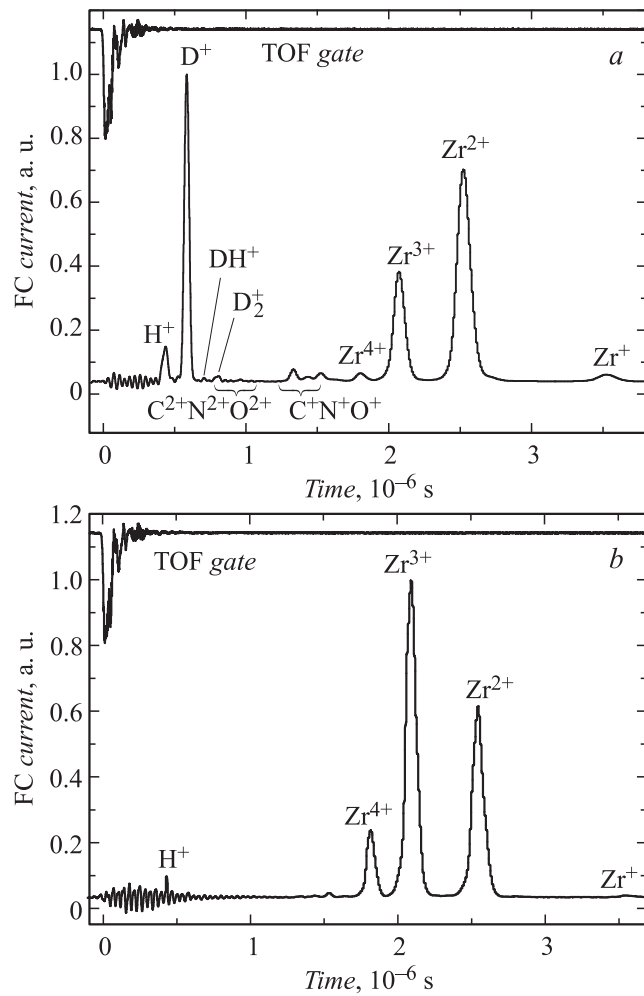


Рис. 1. Масс-зарядовый спектр ионного пучка для катода из дейтерида циркония (*a*) и из чистого циркония (*b*). Ток дуги 160 А. Ускоряющее напряжение — 30 kV. Остаточное давление — $4 \cdot 10^{-6}$ Torr. Момент измерения — 100 μ s после начала импульса разряда.

ионов. В спектре также наблюдались ионы молекулярного дейтерия (D_2^+) и протодейтерия (HD^+) в количестве менее 1/50 от количества ионов D^+ . Помимо основных элементов, входящих в состав катода — ионов D и Zr, также присутствуют ионы примесей, в число которых входят ионы H^+ и типичная группа атомарных одно- и двухзарядных ионов C, N, O в суммарном количестве порядка (5–20)% от пика ионов D^+ . Такой тип примесей характерен для катодов, подвергаемых нагреву с последующим охлаждением. Причина появления таких примесей — диффузия в поверхность катода газов и паров воды из атмосферы. Небольшое количество этих примесей (на уровне 1%) может быть следствием попадания в плазму разряда атомов со стенок разрядной системы и вакуумной камеры.

Поскольку в спектре ионного пучка присутствуют также атомарные ионы водорода (как известно, молекулярный ион водорода является дублетом атомарному иону дейтерия, практически одинаковое отношение заряда к массе ионов), вопрос количественного присутствия ионов молекулярного водорода в пике ионов дейтерия потребовал дополнительного исследования. При этом учитывалось, что поскольку сечение ионизации дейтерия и водорода практически идентично [4], то отношения пиков ионов H_2^+ к H^+ и D_2^+ к D^+ должны были иметь близкие значения. Из спектра ионного пучка, представленного на рис. 1, а, следует, что отношение пиков ионов D_2^+ к D^+ составляет величину порядка 2%. Учитывая, что пик ионов D^+ более чем в 7 раз превосходит пик ионов H^+ , количество ионов H_2^+ не превышает 0.3% от количества ионов D^+ , что является пренебрежимо малой величиной. Таким образом, поскольку все элементы, входящие в состав плазмы дугового разряда с дейтерированным циркониевым катодом идентифицированы, можно сравнить полученные результаты с плазмой дуги, горящей на чистом циркониевом катоде.

Масс-зарядовый состав плазмы для катода из чистого циркония приведен на рис. 1, б. Естественно, что для катода из чистого циркония наблюдаются только пики ионов атомарного и молекулярного водорода. Важным моментом является экспериментально обнаруженный факт, что средний заряд ионов циркония в случае катода из дейтерированного циркония снижается по сравнению с катодом из циркония. Максимальный пик спектра смещается с Zr^{3+} на Zr^{2+} , а доля ионов Zr^{4+} заметно уменьшается. Такое поведение среднего заряда ионов Zr при дейтерировании катода предсказано в рамках модели [5], основанной

на эктонном механизме функционирования катодного пятна вакуумной дуги [6–9]. Согласно результатам, полученным в рамках этой модели, снижение среднего заряда ионов циркония обусловлено дополнительными затратами энергии на ионизацию атомов дейтерия и, как следствие, уменьшением температуры электронов в области катодного пятна. В экспериментах по сравнению с катодом из чистого циркония средний заряд ионов Zr дейтерированного катода снижался с 2.6 до 2.28. Следует отметить, что во всем диапазоне исследуемых токов дугового разряда с дейтерированным катодом (80–320 А) изменение тока разряда практически не влияло на средний заряд ионов, несмотря на то, что интегральное за импульс содержание ионов водорода и дейтерия варьировалось в достаточно широких пределах (H^+ от 5 до 15%, D^+ от 52 до 63%).

Важным с практической точки зрения является исследование изменения доли ионов дейтерия „по длительности импульса“ вакуумного дугового разряда. Такие зависимости при двух значениях тока дуги и двух ускоряющих напряжениях представлены на рис. 2. Из приведенных на рисунке графиков видно, что содержание атомарных ионов дейтерия максимально вблизи переднего фронта импульса разряда, затем (после примерно $100 \mu s$) их относительное количество меняется слабо и снова уменьшается на заднем фронте импульса. Такое поведение зависимости может быть связано с большей интенсивностью взрывоэмиссионных процессов на переднем фронте при размножении катодных пятен в „новых“ местах привязки. При этом источником дейтерия могут быть не только катодные пятна, но и их следы, а также близкие к ним области катода [10]. Расстояние от катода до анодной сетки в экспериментах составляло 14 см. Это расстояние ионы дейтерия с энергиями в несколько десятых eV преодолевают за время, меньшее $50 \mu s$. В дальнейшем при формировании плазмы разряда обратный поток заряженных частиц из нее „очищает“ поверхность вблизи катодного пятна, приводя к снижению доли атомов примесей на поверхности катода, в том числе и нейтралов дейтерия. Таким образом, изменение характера зависимости относительного содержания дейтерия обусловлено, по-видимому, переходом от катодных пятен первого типа к пятнам второго типа. Все это приводит к уменьшению доли ионов дейтерия в плазме разряда, а следовательно и в извлекаемом пучке ионов. Сценарий качественно подтверждается сравнением зависимостей для различных токов разряда. Так, при

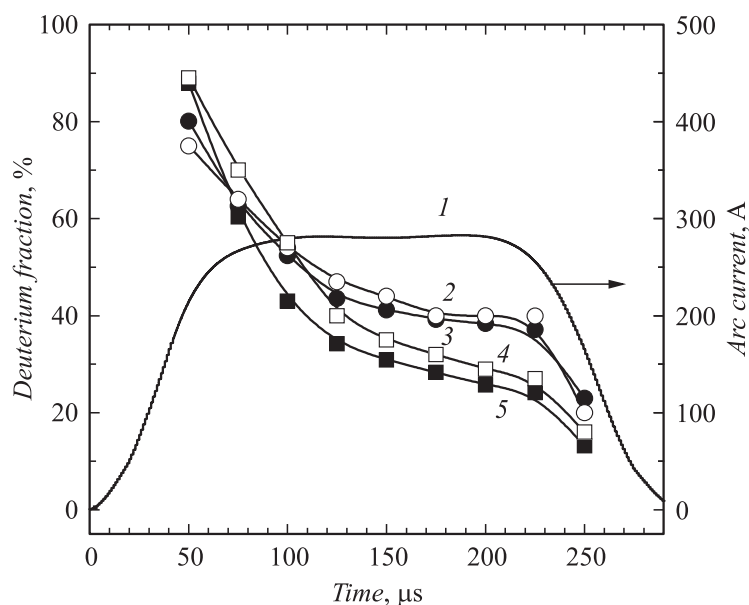


Рис. 2. Импульс тока дуги (1) и временные зависимости долевого содержания ионов дейтерия в ионном пучке в течение длительности импульса тока дуги (2–5). Ток дуги, А: 2, 3 — 160; 4, 5 — 280. Ускоряющее напряжение, кВ: 2, 4 — 30; 3, 5 — 20. Давление $4 \cdot 10^{-6}$ mm Hg.

большем токе разряда доля ионов D^+ в пучке выше в начале импульса (выше скорость размножения катодных пятен), быстрее спадает со временем (выше скорость генерации плазмы разряда), а значения при выходе зависимости в насыщение — ниже (больше концентрация плазмы, следовательно, и обратный поток заряженных частиц из нее).

Вид зависимости, приведенной на рис. 2, может быть также связан с различием в скоростях ионов дейтерия и циркония, эмитируемых катодным пятном, в рассматриваемом случае импульсной вакуумной дуги. Превышение скорости ионов легкой компоненты над скоростью тяжелой для такой дуги наблюдалось нами ранее [11], в отличие от дуги постоянного тока, для которой скоростью различных элемен-

тов, входящих в состав катода, практически совпадают [12]. Поэтому характер распределения ионов различных компонент по скоростям, его эволюция во времени требует дополнительного детального исследования.

Следует отметить, что изменение ускоряющего напряжения приводило к изменению доли ионов дейтерия в пучке. По-видимому, это связано с различной фокусировкой легких ионов дейтерия и тяжелых циркония в ионно-оптической системе ионного источника. Стабилизация плазменной границы мелкоструктурной металлической сеткой, размещенной на эмиссионном электроде, приводило к падению тока ионов дейтерия при любых напряжениях. Возможно, это обусловлено перезарядкой ионов дейтерия на нейтралах металла, появившихся в результате распыления поверхности сеток ионами циркония. Аналогичный эффект наблюдался при повышении давления остаточного газа.

Таким образом, как показали результаты наших экспериментов, катод вакуумной дуги, насыщенный дейтерием, обеспечивает эффективную генерацию ионов дейтерия, интегральная доля которых за импульс тока дуги составляет приблизительно 60%. Содержание ионов дейтерия в дуговой плазме максимально в начальной стадии горения разряда и заметно спадает в течение первых $150\ \mu\text{s}$ импульса тока дуги. Дейтерирование катода также приводит к снижению среднего заряда ионов металлической подложки в плазме вакуумно-дугового разряда.

Авторы выражают искреннюю благодарность Н.Н. Щитову за полезные обсуждения полученных результатов.

Работа поддержана грантом РФФИ № 12-08-13501-офи_м_РА.

Список литературы

- [1] *Кирьянов Г.И.* Генераторы быстрых нейтронов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 224 с.
- [2] *Nikolaev A.G., Oks E.M., Savkin K.P.* et al. // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83. P. 02A501.
- [3] *Gushenets V.I., Nikolaev A.G., Oks E.M.* et al. // Rev. Sci. Instrum. 2006. V. 77 (6). P. 063 301.
- [4] *Cowling I.R., Fletcher J.* // J. Phys. B: Atom. Molec. Phys. 1973. V. 6. L258.

- [5] Шмелев Д.Л., Баренгольц С.А., Щитов Н.Н. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 18. С. 16.
- [6] Mesyats G.A. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 1995. V. 23 (6). P. 879.
- [7] Mesyats G.A., Barengolts S.A., Chentsov A.V. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1999. V. 27 (4). P. 817.
- [8] Баренгольц С.А., Месяц Г.А., Шмелев Д.Л. // ЖЭТФ. 2001. Т. 120. С. 1227.
- [9] Mesyats G.A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. V. 41 (4). SI. P. 676.
- [10] Shkol'nik S.M. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2001 V. 29 (5). P. 675.
- [11] Nikolaev A.G., Yushkov G.Y., Savkin K.P., Oks E.M. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. V. 41 (8). SI. P. 1923.
- [12] Zhirkov I., Eriksson A.O., Rosen J. // J. Appl. Phys. 2013. V. 114. P. 213 302.