

## Особенности функционирования дугового разряда в форвакуумном плазменном источнике электронов

© А.В. Казаков,<sup>1</sup> А.В. Медовник,<sup>1</sup> В.А. Бурдовицин,<sup>1</sup> Е.М. Окс<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050 Томск, Россия

<sup>2</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055 Томск, Россия  
e-mail: Kazakov89@sibmail.com

(Поступило в Редакцию 13 декабря 2013 г. В окончательной редакции 22 мая 2014 г.)

Проведены исследования параметров и характеристик импульсного дугового разряда с катодным пятном, используемого в форвакуумном плазменном источнике электронов. Показано, что в отличие от электронного источника на основе тлеющего разряда с полым катодом приложение ускоряющего напряжения в меньшей степени влияет на процессы зажигания дуги. Выявлено, что в форвакуумной области давлений в течение импульса тока дуги возможны два режима (стадии) горения дугового разряда. Начальная стадия импульса тока дуги характеризуется более высоким напряжением горения и заметной долей ионов остаточного газа в плазме. При переходе во второй режим напряжение горения дуги снижается, и в плазме доминируют ионы материала катода. Длительность первой стадии разряда возрастает с повышением давления газа и уменьшением тока дуги.

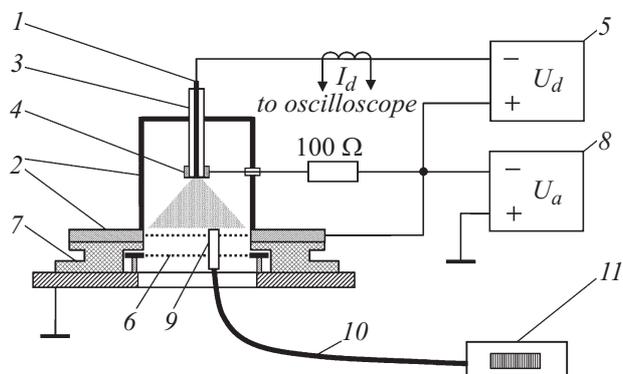
### Введение

Форвакуумные плазменные источники электронов обеспечивают эффективную генерацию непрерывных и импульсных электронных пучков в области давлений 1–100 Па [1–4]. В импульсном режиме работы таких устройств наряду с тлеющим разрядом с полым катодом [3] используется также и дуговой разряд с катодным пятном [4]. Переход к дуге связан, прежде всего, со стремлением к увеличению тока электронного пучка. В дуговом разряде, как известно [5], плазмообразующая среда обеспечивается испарением и ионизацией материала в катодном пятне. Помимо катодного пятна генерация плазмы также осуществляется в относительно небольшой прилегающей к катоду области разряда. В этой области парциальное давление паров материала катода намного превышает остаточное давление газа. Тем не менее повышение давления газа в разрядном промежутке дугового разряда от чисто „вакуумного“ случая ( $10^{-4}$  Па) до „газового“ ( $10^{-1}$  Па) оказывает влияние на параметры дуговой плазмы, главным образом, на ее масс-зарядовый состав, обуславливая резкое снижение доли многозарядных ионов материала катода [6] и появление ионов газов [7]. Очевидно, что при горении дугового разряда в области еще более высоких давлений форвакуумного диапазона наличие газа может оказать заметное влияние на параметры дуги, а следовательно, и на эмиссионные характеристики дуговой плазмы.

Особенностям функционирования дугового разряда в форвакуумном диапазоне давлений применительно к использованию дуги в плазменном источнике электронов посвящены исследования, результаты которых представлены в настоящей работе.

### Экспериментальная установка и методика эксперимента

Электродная система форвакуумного импульсного плазменного источника электронов на основе дугового разряда (рис. 1) включает в себя стержневой катод 1 диаметром 5 мм и полый цилиндрический анод 2 диаметром и длиной 100 и 80 мм соответственно. Оба электрода изготовлены из меди. Катод заключен в керамическую трубку 3, которая ограничивает его рабочую область торцевой поверхностью. На противоположном от катода основании цилиндрического анода выполнено эмиссионное окно диаметром 90 мм, перекрытое мелкоструктурной сеткой из нержавеющей стали. Дуговой разряд между катодом 1 и анодом 2 инициировался



**Рис. 1.** Электронный источник и схема измерения параметров: 1 — катод, 2 — анод, 3 — керамический изолятор, 4 — поджигающий электрод, 5 — импульсный блок питания разряда, 6 — ускоряющий электрод (экстрактор), 7 — капролоновый изолятор, 8 — высоковольтный блок питания, 9 — оптический зонд, 10 — оптоволокно, 11 — спектрометр.

вспомогательным разрядом по поверхности керамики, разделяющей катод 1 и поджигающий электрод 4. Электрическое соединение поджигающего электрода с анодом через резистор обеспечивало возможность использования одного и того же импульсного источника электропитания 5 для зажигания дугового разряда и поддержания тока дуги (так называемый режим „triggerless“ [8]). На стадии зажигания дуги при нулевом токе разряда напряжение между катодом и анодом  $U_d$  составляло величину до 1000 В. При горении дуги  $U_d$  падало до напряжения горения разряда в несколько десятков В.

В экспериментах ток дуги варьировали в пределах от 20 до 60 А. Длительность импульса тока дуги варьировали от 300 до 700  $\mu\text{s}$ . За исключением специальных исследований характеристик и параметров разряда от частоты повторения импульсов  $\nu$ , во всех остальных экспериментах  $\nu = 1$  pps. Отбор электронов из плазмы и формирование электронного пучка осуществлялись при подаче постоянного напряжения  $U_a = 1\text{--}12\text{ kV}$  между анодом 2 и ускоряющим электродом (экстрактором) 6. Источник электронов устанавливался на фланец вакуумной камеры, которая откачивалась механическим насосом со скоростью откачки  $11\text{ s}^{-1}$ . Давление в пределах 4–70 Па регулировалось непосредственной подачей рабочего газа (аргона или воздуха) в камеру. Конструкция электронного источника, его параметры и характеристики более подробно описаны в [4].

Измерение тока разряда  $I_d$  обеспечивалось трансформатором тока (поясом Роговского) с чувствительностью 50 А/В. Для измерения напряжения горения дуги использовался резистивный делитель напряжения НVP-15HF с коэффициентом 1:1000.

Исследование оптического спектра свечения разряда осуществлялось с помощью оптического зонда 9. Сигнал по оптоволокну 10 передавался на спектрометр 11 — Ocean Optics-2000USB с диапазоном длин волн 200–1100 nm. При исследовании спектров ускоряющий электрод удалялся. Оптический зонд размещался с радиальным сдвигом на 15 mm от оси катода. Установка оптического зонда непосредственно напротив катода оказалась неэффективной из-за высокого уровня засветки от катодного пятна, интенсивность свечения которого многократно превышала интенсивность свечения плазмы. Идентификация наблюдаемых в эксперименте линий излучения проводилась по [9,10].

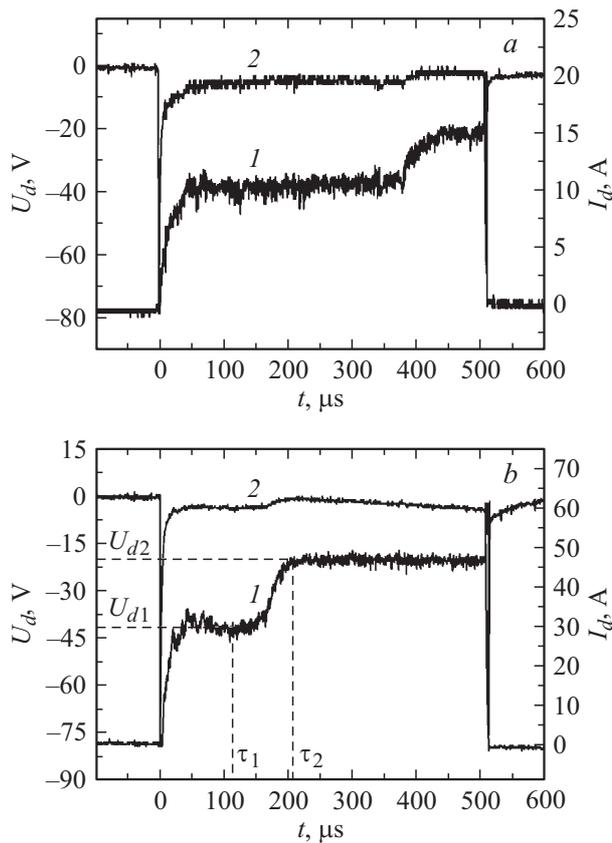
## Результаты экспериментов

Как было показано в [1], принципиальной особенностью функционирования форвакуумных плазменных источников электронов является влияние обратного ионного потока из области ускорения и транспортировки ускоренного электронного пучка на условия иницирования и горения разряда, эмиссионные свойства плазмы,

а также предельные параметры пучка. Ионы обратного потока генерируются в пучковой плазме. Помимо пучковой плазмы вклад в ионный поток вносят ионы из прианодной плазмы „паразитного“ высоковольтного тлеющего разряда (ВТР). Этот разряд устойчиво существует в ускоряющем промежутке при относительно высоких давлениях форвакуумного диапазона. Даже в отсутствие электронного пучка обратный поток ионов ВТР достаточно существенен [11]. Именно влиянием этого ионного потока объясняется наблюдаемое нами ранее снижение напряжения зажигания тлеющего разряда с полым катодом в форвакуумном плазменном источнике электронов при подаче ускоряющего напряжения [12].

Приложение ускоряющего напряжения  $U_a$  и возникающий при этом ВТР оказывают влияние и на зажигание дугового разряда. Однако по сравнению с тлеющим разрядом с полым катодом ускоряющее напряжение, определяющее ток ВТР, в меньшей степени влияет на напряжение зажигания дугового разряда. Для разряда с полым катодом практически все ионы ВТР, проникающие в разрядную систему, попадают в катодную полость и, выбивая с ее поверхности дополнительные электроны, обуславливают, таким образом, двукратное снижение напряжения зажигания разряда [12]. В случае дугового разряда иницированию дуги способствует лишь небольшая доля ионов ВТР, перехватываемая торцевой поверхностью катода. Именно поэтому приложение ускоряющего напряжения уменьшало напряжение зажигания дуги в разрядной ячейке электронного источника не более чем на 10–15%. Изменение давления остаточного газа также оказывает слабое влияние на зажигание дуги в форвакуумном плазменном источнике электронов. Так, повышение давления с  $10^{-2}$  до 4 Па снижало напряжение зажигания дуги на величину не более 50–100 В. В заметной степени давление газа влияет на скорость нарастания тока дуги. Как показали эксперименты, в этом же диапазоне изменения давления длительность фронта импульса тока дуги сокращается приблизительно в 2 раза (в диапазоне тока дуги 10–30 А с 9–6 до 5–3  $\mu\text{s}$ ). Аналогичное влияние давления на время установления тока импульсной дуги описано в [13]. В этой работе при изменении давления с  $10^{-3}$  до  $10^{-2}$  Па длительность фронта импульса тока дуги сокращалась с 1 до 0,4  $\mu\text{s}$ . Существенная разница времен нарастания тока может быть связана с геометрическими отличиями разрядных систем и особенностями импульсных источников питания дуги.

При практически прямоугольной форме импульса тока дугового разряда  $I_d$  на осциллограмме напряжения горения дуги  $U_d$  отчетливо проявляются два режима (две стадии) горения разряда, отличающиеся величиной  $U_d$  (рис. 2). Переход от первой (начальной) стадии с напряжением  $U_{d1}$  ко второй с  $U_{d2}$  сопровождается заметным падением напряжения горения дуги. Времена  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , соответствующие длительности первой стадии и моменту перехода ко второй стадии соответственно, зависят от давления газа и тока разряда. С повышением



**Рис. 2.** Осциллограммы импульсов напряжения горения (1) и тока разряда (2) при  $I_d, A$ : 20 (a), 60 (b);  $P = 30 Pa$  (воздух).

давления и уменьшением тока разряда величины  $\tau_1$  и  $\tau_2$  возрастают (рис. 3), тогда как время перехода от первой стадии ко второй ( $\tau_2 - \tau_1$ ) либо слегка возрастает (рис. 3, a) либо остается неизменным (рис. 3, b). В условиях эксперимента при давлении выше 15 Pa и токе дуги менее 20 A переход во второй режим горения с меньшим напряжением горения не наблюдался, а при давлении газа ниже 10 Pa переход в этот режим происходил на фронте импульса при любых токах дуги. При этом в обоих режимах горения дуги напряжение горения разряда слабо изменяется с ростом тока дуги и давления газа.

В работе [14] было показано, что для дугового разряда, функционирующего при давлениях газа порядка 0.1 Pa, увеличение частоты повторения импульсов оказывало заметное влияние на параметры дуговой плазмы. В частности, это приводило к уменьшению доли газовых ионов в плазме в результате более интенсивной десорбции газа с поверхности катода. Подобного влияния частоты повторения импульсов следовало бы ожидать и для дугового разряда при более высоких давлениях форвакуумного диапазона. Однако, как показали эксперименты, изменение частоты следования импульсов в диапазоне  $\nu = 0.2 - 25 pps$  практически не влияло ни на длительность первой стадии горения дуги, ни на время перехода во вторую стадию. По-видимому,

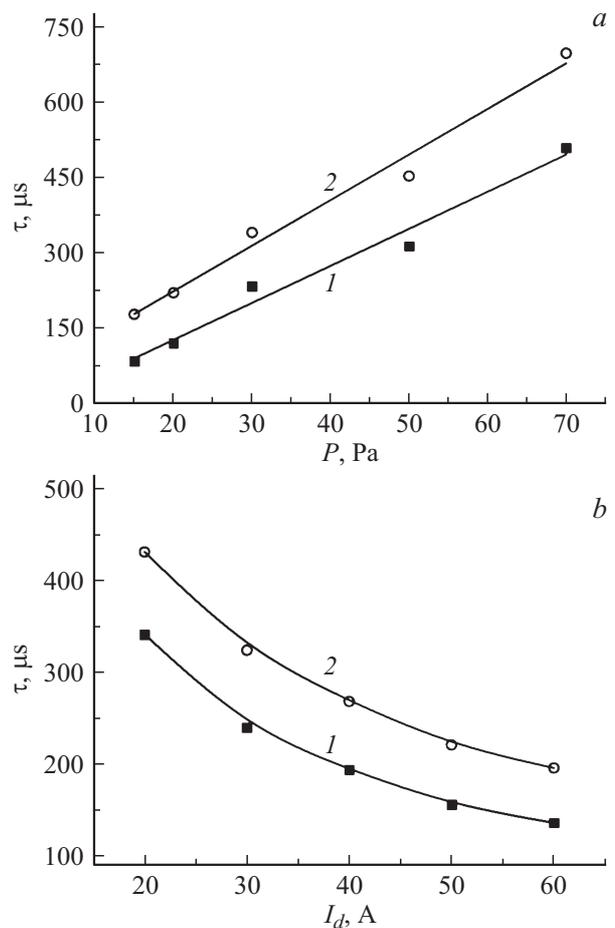
для объяснения такого различия во влиянии частоты повторения импульсов потребуется проведение более детальных исследований.

В процессе измерений оптических спектров излучения плазмы дугового разряда исследовались два крайних случая:

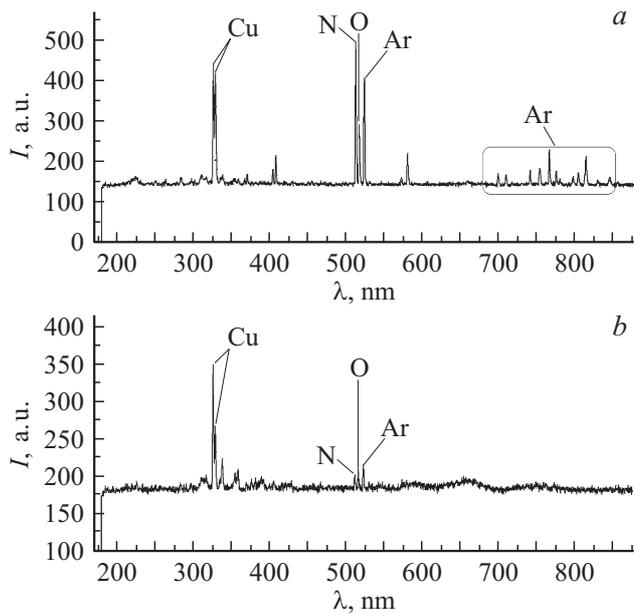
- высокое давление (50 Pa), когда дуговой разряд в течение всей длительности импульса функционирует в стадии 1 с более высоким напряжением горения.

- низкое давление (4 Pa) — дуга практически сразу переходит в стадию 2 с относительно низким напряжением горения.

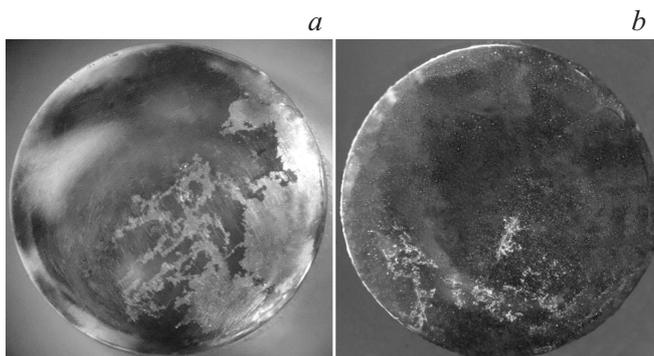
Типичные оптические спектры свечения плазмы дугового разряда при различных давлениях, газах и токах представлены на рис. 4. Видно, что для первого режима горения дуги (рис. 4, a) интенсивность газовых спектральных линий превосходит интенсивность линий материала катода (меди). Для другого крайнего случая (второй стадии горения дуги) ситуация меняется на прямо противоположную. В спектре свечения плазмы преобладают линии меди, интенсивность которых в несколько раз превышает интенсивность спектральных линий остаточной атмосферы (рис. 4, b). Треки катодно-



**Рис. 3.** Зависимости длительностей  $\tau_1$  (1) и  $\tau_2$  (2) от: a — давления  $P$  ( $I_d = 30 A$ ), b — тока разряда  $I_d$  ( $P = 30 Pa$ ). Рабочий газ — воздух.



**Рис. 4.** Оптические спектры излучения разряда: *a* —  $P = 50$  Па (стадия 1),  $I_d = 60$  А; *b* —  $P = 4$  Па (стадия 2),  $I_d = 60$  А. Рабочий газ — аргон + остаточная атмосфера.



**Рис. 5.** Треки катодных пятен при  $I_d = 60$  А,  $\tau = 300 \mu\text{s}$ , 50 импульсов  $P$ , Па: *a* — 50 (стадия 1), *b* — 4 (стадия 2). Рабочий газ — воздух.

го пятна на поверхности катода для этих двух крайних режимов горения дуги представлены на рис. 5. При давлении 50 Па, соответствующей первой стадии горения дуги (рис. 5, *a*), след катодного пятна занимает большую площадь, чем для стадии 2 (рис. 5, *b*). На стадии 2 треки катодных пятен имеют относительно большую глубину и меньшую протяженность.

## Заключение

Наблюдаемые в эксперименте режимы горения дугового разряда с различной величиной  $U_d$  могут быть связаны с процессами десорбции газа с поверхности катода, при которых в течение одного импульса тока дуги реализуются оба типа катодных пятен [15]. На

первой (начальной) стадии горения дуги катодные пятна функционируют на „загрязненной“ поверхности катода. По-видимому, первая стадия связана с формированием на поверхности катода пятен первого типа и частично второго, тогда как на стадии горения дуги с меньшим напряжением горения существуют только пятна второго рода.

Работа поддержана грантами РФФИ № 13-08-00175\_а и 14-08-31075-мол\_а.

## Список литературы

- [1] Burdovitsin V.A., Oks E.M. // Laser Part. Beams. 2008. Vol. 26. N 4. P. 619–635.
- [2] Зенин А.А., Климов А.С., Бурдовицин В.А., Окс Е.М. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. Вып. 10. С. 9–14.
- [3] Юшков Ю.Г., Бурдовицин В.А., Медовник А.В., Окс Е.М. // ПТЭ. 2011. Вып. 2. С. 85–88.
- [4] Казаков А.В., Бурдовицин В.А., Медовник А.В., Окс Е.М. // ПТЭ. 2013. Вып. 6. С. 50–53.
- [5] Месяц Г.А. Эктоны. Ч. 1. Екатеринбург: Наука, 1993. 184 с.
- [6] Spadtke P., Emig H., Wolf B.H., Oks E. // Rev. Sci. Instrum. 1994. Vol. 65. N 10. P. 3113–3118.
- [7] Николаев А.Г., Окс Е.М., Юшков Г.Ю. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 9. С. 24–28.
- [8] Anders A., Brown I.G., Mac Gill R.A., Dickinson M.R. // J. Phys. Appl. Phys. 1998. Vol. 31. N 5. P. 584–587.
- [9] Стриганов А.Р., Одицова Г.А. Таблицы спектральных линий атомов и ионов: справочник М.: Энергоиздат, 1982. 312 с.
- [10] Стриганов А.Р., Свентицкий Н.С. Таблицы спектральных линий нейтральных и ионизованных атомов. М.: Атомиздат, 1966. 899 с.
- [11] Медовник А.В., Бурдовицин В.А., Окс Е.М. // Изв. вузов. Физика. 2010. Т. 53. № 2. С. 27–32.
- [12] Жирков И.С., Бурдовицин В.А., Окс Е.М., Осипов И.В. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 10. С. 128–131.
- [13] Koval N.N., Kreindel Yu.E., Tolkachev V.S., Schanin P.M. // IEEE T. Electr. Insul. 1985. Vol. EI-20. N 4. P. 735–737.
- [14] Yushkov G.U., Anders A. // IEEE T. Plasma Sci. 1998. Vol. 26. N 2. P. 220–226.
- [15] Anders A. Cathodic Arcs: From fractal spots to energetic condensation. NY.: Springer, 2008. 558 p.