

Экспериментальный стенд для исследования вакуумного дугового разряда с композитными и газонасыщенными катодами

А. Г. Николаев, Е. М. Окс, К. П. Савкин, В. П. Фролова, Г. Ю. Юшков

Описано устройство и приведены характеристики модернизированного экспериментально-диагностического стенда, разработанного в Институте сильноточной электроники СО РАН (г. Томск). Стенд оснащен вакуумно-дуговым источником ионов металлов, и системой диагностики, включающей времяпролетный спектрометр масс-зарядового состава ионного пучка. Обозначены перспективы применения экспериментально-диагностического стенда в исследованиях плазмы вакуумного дугового разряда с композитными и газонасыщенными катодами.

Ключевые слова: вакуумный дуговой разряд, композитный катод, газонасыщенный катод, масс-зарядовый состав.

Ссылка: Николаев А. Г., Окс Е. М., Савкин К. П., Фролова В. П., Юшков Г. Ю. // Прикладная физика. 2018. № 5. С. 98.

Reference: A. G. Nikolaev, E. M. Oks, K. P. Savkin, V. P. Frolova, and G. Yu. Yushkov, Prikl. Fiz., No. 5, 98 (2018).

Введение

Интерес к исследованиям физических особенностей вакуумного дугового разряда обусловлен его широким применением в направлениях, связанных с созданием электрических реактивных двигателей для управления малыми спутниками на околоземной орбите [1], геттерных насосов для получения сверхвысокого вакуума [2], в качестве генератора плазмы и источника ионов металлов в напылительных [3] и в имплантационных установках [4] для получения функциональных покрытий.

Несмотря на заметный прогресс, достигнутый в понимании основных физических процессов функционирования катодного пятна вакуумной дуги, расширение диапазона параметров дугового разряда и условий его функционирования [5–8]

определяет необходимость дальнейших исследований разряда такого типа. Одним из направлений развития вакуумных дуговых разрядных систем является использование катодов сложного состава [9]. Это могут быть как композитные катоды, выполненные из различных материалов, так и металлические катоды, насыщенные газовым компонентом. Композитные катоды Cu-Cr различного долевого состава используются в сильноточных вакуумных выключателях [10], а катоды, содержащие изотопы водорода, перспективны для создания компактных нейтронных генераторов [11].

Малая область пространства, занимаемая плотной столкновительной плазмой катодных пятен, а также высокие направленные скорости ионов затрудняют использование зондовой методики для исследования плазмы вакуумной дуги. Этого недостатка лишен метод корпускулярной эмиссионной диагностики [12], основанный на измерении масс-зарядового состава ионных пучков, извлеченных из плазмы. Масс-зарядовый состав ионного пучка в полной мере определяется параметрами дуговой плазмы, которые, в свою очередь, связаны с условиями функционирования катодного пятна и ионизационными процессами в разрядном промежутке [13].

В настоящей работе описан экспериментально-диагностический стенд, модернизированный для изучения процессов в вакуумном дуговом разряде с композитными и газосодержащими катодами.

Николаев Алексей Геннадьевич¹, с.н.с., к.т.н.
Окс Ефим Михайлович^{1,2}, зав. лаб., зав. кафедрой, д.т.н.
Савкин Константин Петрович¹, н.с., к.т.н.
Фролова Валерия Петровна^{1,2}, м.н.с., к.ф.-м.н.
Юшков Георгий Юрьевич¹, в.н.с., д.т.н.

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН.
Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3.
E-mail: savkin@opee.hcei.tsc.ru

² Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.
Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 40.

Статья поступила в редакцию 2 июля 2018 г.

© Николаев А. Г., Окс Е. М., Савкин К. П., Фролова В. П., Юшков Г. Ю., 2018

Устройство экспериментального стенда

Экспериментальный стенд оснащен источником ионов $Mevva-5.Ru$ [14] с ускоряющим напряжением до 60 кВ и круглой эмиссионной апертурой площадью около 100 см^2 . Источник обеспечивает импульсный ток ионного пучка длительностью 400 мкс и амплитудой до нескольких сотен миллиампер. Ионный источник установлен на многофункциональной вакуумной камере, позволяющей выполнять измерения пространственных распределений по сечению пучка. Для измерения масс-зарядового состава ионного пучка используется времяпролетный масс-спектрометр оригинальной конструкции.

На рис. 1 представлено устройство экспериментального стенда в виде схемы. Основу ионного источника составляют катодный узел 1, полый анод 2 и ионно-оптическая система, образованная электродами 3–5. Ускоренные ионы, извлеченные из плазмы вакуумного дугового разряда, проходя через заземленную вакуумную камеру 6, где находится подвижный цилиндр Фарадея 7, во время

действия импульса отклоняющего напряжения, прикладываемого к концентрическим пластинам затвора 8, попадают в трубу дрейфа 9. За время прохождения пролетной базы длиной 1 м ионный пучок разделяется на группы, движущиеся с разными скоростями, обратно пропорциональными отношению массы ионов к их заряду. Данные группы ионов достигают цилиндра Фарадея 10, сигнал с которого регистрируется осциллографом 11.

На фотографии (рис. 2) показан внешний вид экспериментального стенда. Задающий генератор, а также устройства контроля и измерения параметров электропитания разрядных систем ионного источника, смонтированы в стойке управления 1. Внутри экран комнаты 2 расположен ионный источник, который крепится к торцу вакуумной камеры 3. На противоположном торце камеры расположена дрейфовая труба времяпролетного масс-спектрометра 4. Необходимое рабочее давление в камере (не более 3×10^{-6} Торр) обеспечивается турбомолекулярным насосом 5.

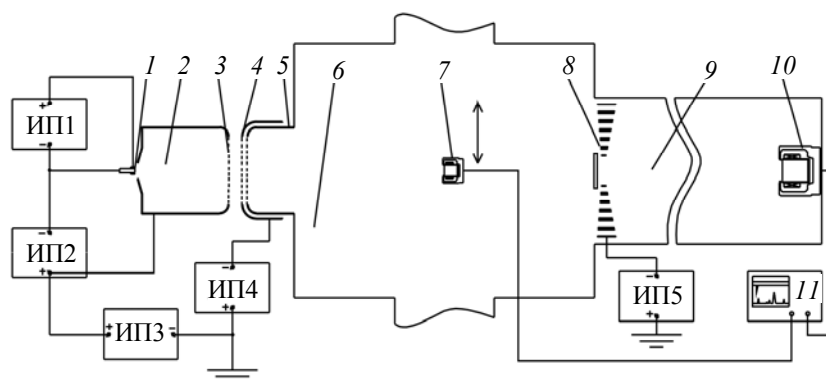


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – катодный узел; 2 – полый анод; 3 – эмиссионный электрод; 4 – электрод-супрессор; 5 – извлекающий электрод (заземлен); 6 – вакуумная камера; 7 – подвижный коллектор для измерения тока ионных пучков; 8 – затвор времяпролетного спектрометра; 9 – труба дрейфа; 10 – цилиндр Фарадея; 11 – осциллограф; ИПП1 – импульсный источник питания иницирующего разряда, 15 кВ, 60 А, 50 мкс; ИПП2 – импульсный источник питания вакуумного дугового разряда, 50–300 А, 400 мкс; ИПП3 – источник питания постоянного ускоряющего напряжения, 5–60 кВ; ИПП4 – источник питания постоянного напряжения супрессора, 1–5 кВ; ИПП5 – импульсный источник питания отклоняющего напряжения затвора времяпролетного спектрометра, 6 кВ, 100 нс.

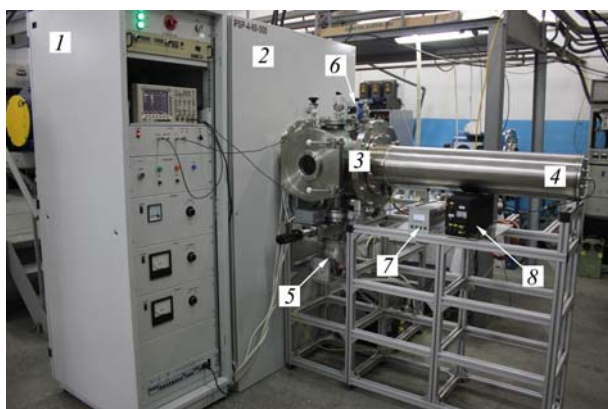


Рис. 2. Фотография экспериментального стенда: 1 – стойка управления; 2 – экран-комната; 3 – вакуумная камера; 4 – времяпролетный спектрометр; 5 – турбомолекулярный насос; 6 – вакуумметр; 7 – блок питания насоса; 8 – блок питания спектрометра.

Устройство и принцип функционирования источника ионов Mevva-5.Ru и времяпролетного спектрометра в режиме генерации и диагностики пучков ионов металлов более детально представлены в работах [12, 14] соответственно.

При исследовании разрядов с композитными и газосодержащими катодами существенным становится взаимодействие ионов элементов, входящих в состав материала катода. Его следствием является изменение направлений движения ионов более лёгких элементов, в частности, в уменьшении их доли в центральной части угловых распределений и увеличение в боковых частях [15]. По сравнению с применявшимися ранее версиями ионных источников, в данном экспериментальном стенде реализованы конструктивные дополнения, позволяющие существенным образом расширить

его диагностические возможности. Для исследований угловых распределений плотности ионного тока и масс-зарядного состава ионного пучка вакуумного дугового разряда, отражающих соответствующие распределения плотности плазмы и ее ионного состава, вместо обычного многокатодного узла применяется разрядная система, показанная на рис. 3, при наблюдении в сторону извлечения ионов через многоапертурный эмиссионный электрод 5. Горец катода 10 находится в центре полусферического сеточного анода 6. Электроды 6 и 10 объединены в единый поворотный узел, расположенный внутри полого анода 4. Таким образом, совместный поворот катода и анода исключает влияние геометрических параметров разрядной системы на процесс измерения угловых распределений.

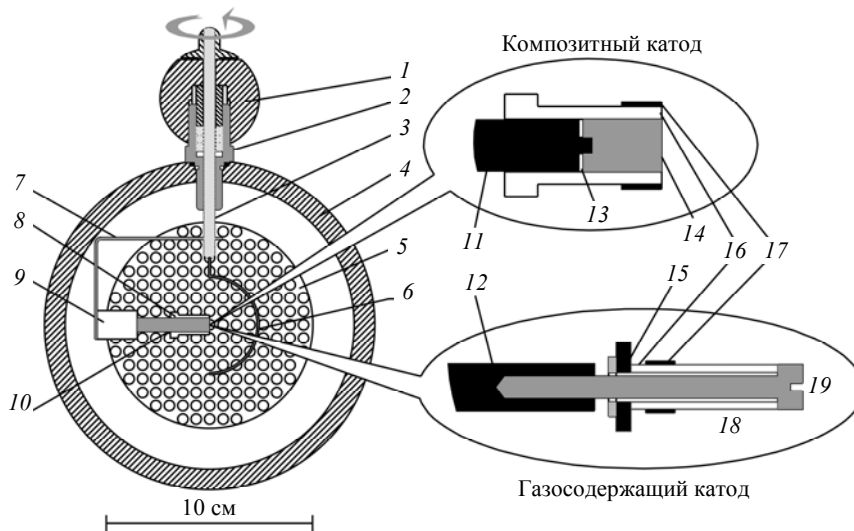


Рис. 3. Разрядная система для исследования вакуумной дуги с композитными катодами: 1 – гайка; 2 – ввод Вильсона; 3 – поворотный шток; 4 – корпус полого анода; 5 – многоапертурный эмиссионный электрод; 6 – полусферический сеточный анод; 7 – рамка-эксцентрик; 8 – керамическая втулка; 9 – изолятор – основание катода; 10 – катод. Устройство катодов: 11 – керн; 12 – медное основание; 13 – паяное соединение; 14 – композитный катод; 15 – газонасыщенный катод; 16 – поверхность керамики, по которой осуществляется иницирующий разряд; 17 – анод иницирующего разряда; 18 – керамическая трубка; 19 – контактный центрирующий винт.

Для экспериментов с катодами, состоящими из нескольких металлов, применяются электроды следующей конструкции. Насадка 14 из композитного материала припаявается к медному керну 11. Полученная сборка вставляется в трубчатый керамический изолятор 8, охваченный металлическим кольцом 17 вблизи рабочего торца. Для исследования дугового разряда с газосодержащими материалами электродов, катод имеет форму плоского диска с центральным отверстием. В центре цилиндрического медного основания 12 закреплен контактный центрирующий винт 19, на котором располагается катод 15, выполненный из меди с покрытием из циркония, осажденного в атмосфере водорода. Керамическая трубка 18, по наружной поверхности 16 которой зажигается иницирующий вакуумную дугу разряд, также закреплена на винте 19 соосно катодному диску 15. Анод иницирующего разряда выполнен в виде кольца 17, закрепленного на образующей поверхности керамической трубки.

С применением каждого из катодов (см. рис. 3) вакуумный дуговой разряд инициируется пробоем по поверхности керамики 14 при приложении между катодом 13 и поджигающим электродом 15 импульса напряжения с амплитудой до 18 кВ, длительностью 20 мкс. Импульс тока вакуумной дуги обеспечивается разрядом искусственной формирующей линии. Его амплитуда может регулироваться в диапазоне от 50 до 300 А, причем при длительности порядка 400 мкс.

Тестовые исследования масс-зарядового состава ионов в плазме вакуумной дуги

В качестве демонстрации возможностей созданного стенда приводятся результаты исследования плазмы вакуумного дугового разряда с катодом, материал которого является композитом, полученным из меди и хрома методом порошковой металлургии. Такой материал применяется в электродах сильноточных вакуумных выключате-

лей [16]. Экспериментальный образец композитного катода был изготовлен непосредственно из электрода промышленного вакуумного прерывателя производства компании Plansee©, с заявленной долей хрома – 25 %. На экспериментальном стенде моделировалась ситуация, характерная для функционирования катодных пятен на поверхности электрода (рабочее давление – не более 10^{-4} Торр, усредненная по поверхности катода плотность тока дуги 3–5 А/мм²). Для этих измерений катодный узел (см. рис. 3) был развернут таким образом, что рабочая поверхность катода 14 была обращена непосредственно в сторону эмиссионного электрода 5. Из представленного на рис. 4 времяпролетного спектра видно, что в пучке, извлеченном из плазмы вакуумной дуги, присутствуют ионы хрома с зарядностями от 1⁺ до 4⁺, и ионы меди с зарядностями от 1⁺ до 3⁺. Ионы Cu⁴⁺ не наблюдаются в сравнении с результатами, полученными с применением однокомпонентных катодов. Соответственно произошло изменение средних зарядности ионов каждого материала. Для меди $\langle Q \rangle_{Cu}$ уменьшилась с 2,3⁺ до 2⁺, и для хрома $\langle Q \rangle_{Cr}$ уменьшилась с 2,21⁺ до 2,1⁺.

В плазме вакуумной дуги с катодом из медно-хромового композита происходит усреднение энергии, вкладываемой в разряд между двумя электронными подсистемами. В результате снижается температура электронов в плазме. Установившейся температуры все еще достаточно, для заметной ионизации частиц Cr³⁺ до зарядности Cr⁴⁺, но уже недостаточно для генерации Cu⁴⁺.

Такая оценка также использовалась нами для объяснения процессов формирования масс-зарядного состава плазмы вакуумной дуги с катодами на основе карбида вольфрама WCCo_{0,5} и медно-титанового композита TiCu_{0,1} [17].

Процессы, происходящие в вакуумных нейтронных трубках на основе вакуумной дуги с катодами, содержащими изотопы водорода в агглютированном состоянии, можно моделировать в радиационно-безопасном режиме, применяя катоды, насыщенные водородом. Результаты исследования масс-зарядного состава плазмы вакуумной дуги с катодом на основе плёнки циркония, насыщенной водородом, на медном основании (рис. 4) показывают присутствие ионов материала плёнки (Zr⁺ и Zr²⁺), материала подложки (Cu⁺ – Cu⁴⁺), ионы содержащегося в пленке газа (H⁺ и H₂⁺). Наблюдается также небольшая доля примеси, а именно, ионы углерода C⁺. Значения средней зарядности ионов этих металлов в составе композитного пленочного катода также снижаются, для ионов меди до 1,9⁺ для ионов циркония с 2,6⁺ до 1,9⁺. Помимо приведенных выше возможных причин снижения зарядности ионов элементов, входящих в состав композитного катода, в дуговой плазме уменьшение долей многозарядных ионов может быть связано с локальным повышением давления водорода в области эффективной ионизации. Известно [9], что повышение давления газа в плазме вакуумной дуги негативно влияет на генерацию многозарядных ионов металлов.

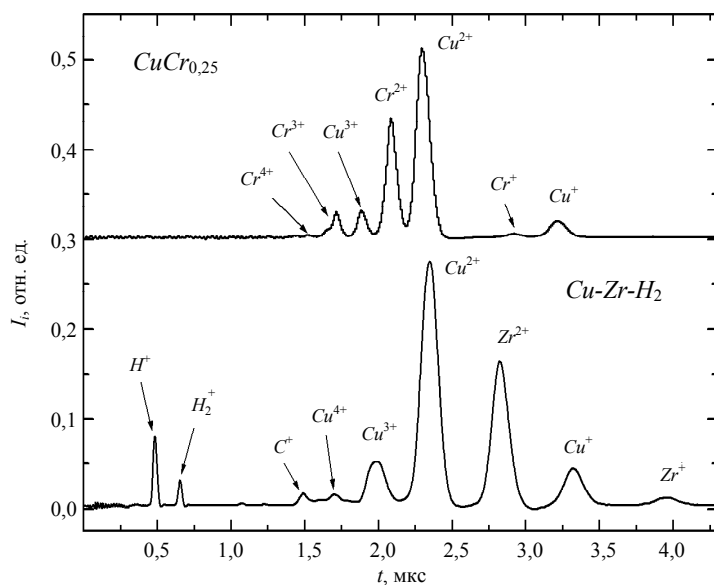


Рис. 4. Масс-зарядный состав ионов плазмы вакуумной дуги с катодами из медно-хромового композита Cu_{0,75}Cr_{0,25} и насыщенного водородом пленочного циркониевого катода на медном основании, пропорциональный ионному току I_i во времяпролетном масс-спектрометре. Ток дуги 200 А, момент измерения на 150 мкс от начала импульса тока дуги, всё при ускоряющем напряжении 32 кВ.

Заключение

Созданный экспериментальный стенд предназначен для проведения исследований процессов

в плазме вакуумного дугового разряда эмиссионными методами. Показаны возможности экспериментального моделирования условий, характерных для режимов горения вакуумных дуговых

разрядов в сильноточных вакуумных выключателях и нейтронных трубках. Проведенная модернизация дуговых разрядных систем позволит проводить исследования, связанные с получением временных и пространственных распределений масс-зарядного состава плазмы вакуумной дуги с композиционными и газонасыщенными катодами. В частности, открываются перспективы дальнейших исследований влияния состава композитного катода на параметры плазмы, а также решения задачи повышения доли ионов изотопов водорода в плазме дуги с газонасыщенным катодом.

*Работа выполняется при поддержке
Российского научного фонда в рамках
научного проекта № 18-19-00069.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Qi N., Gensler S., Prasad R. R., Krishnan M., Vizir A., Brown I. / Proceedings of 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Cleveland, OH, USA 13–15 July 1998. P. AIAA-98-3663 (1-9).
2. Бендер Е. Д., Кузнецов Г. Ф., Савкин В. Я. // ПТЭ. 1987. № 2. С. 144.
3. Андреев А. А., Саблев Л. П., Шулаев В. М., Григорьев С. Н. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005.

4. Öztarhan A., Brown I., Bakkaloglu C., Watt G., Evans P., Oks E., Nikolaev A., Tek Z. // Surf. Coat. Technol. 2005. Vol. 196. No. 1-3. P. 327.
5. Yushkov G. Yu., Nikolaev A. G., Frolova V. P., Oks E. M., Rousskikh A. G., Zhigalin A. S. // Physics of Plasmas. 2017. Vol. 24. P. 123501.
6. Фролова В. П., Николаев А. Г., Юшков Г. Ю. // Электронные средства и системы управления. 2017. № 1-1. С. 237.
7. Anders A., Yushkov G. Yu. // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 91. P. 4824.
8. Yushkov G. Yu., Anders A., Frolova V. P., Nikolaev A. G., Oks E. M., Vodopyanov A. V. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2015. Vol. 43. No. 8. P. 2310.
9. Nikolaev A. G., Savkin K. P., Yushkov G. Yu., Oks E. M. // Rev. Sci. Instrum. 2014. Vol. 85. P. 02B501.
10. Slade P. G. The Vacuum Interrupter. Theory, Design, and Application – NY: CRC Press, 2008.
11. Курьянов Г. И. Генераторы быстрых нейтронов. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
12. Gushenets V. I., Nikolaev A. G., Oks E. M., Vintzenko L. G., Yushkov G. Yu., Öztarhan A., Brown I. G. // Rev. Sci. Instrum. 2006. Vol. 77. P. 063301.
13. Anders A. / Proceedings of the NATO Advanced Workshop on Emerging Applications of Vacuum-Arc-Produced Plasma, Ion and Electron Beams, Lake Baykal, Russia 24–28 June 2002. P. 1–14.
14. Nikolaev A. G., Oks E. M., Savkin K. P., Yushkov G. Yu., Brown I. G. // Rev. Sci. Instrum. 2012. Vol. 83. No. 2 (1). P. 02A501.
15. Nikolaev A. G., Oks E. M., Savkin K. P., Yushkov G. Yu., Frolova V. P., Barengolts S. A. // J. Appl. Phys. 2014. Vol. 116. P. 213303.
16. Gentsch D. / Proceedings on XXII-nd Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Matsue, Japan. 25–29 September 2006. P. 437–442.
17. Savkin K. P., Yushkov Yu. G., Nikolaev A. G., Oks E. M., Yushkov G. Yu. // Rev. Sci. Instrum. 2010. Vol. 81. P. 02A501.

PACS: 52.70.–m; 52.80.Vp

Experimental stand for investigation of a vacuum arc discharge with compound and gas-saturated cathodes

A. G. Nikolaev¹, E. M. Oks^{1,2}, K. P. Savkin¹, V. P. Frolova¹, and G. Yu. Yushkov¹

¹ Institute of High Current Electronics, SB RAS
2/3 Akademicheskii av., Tomsk, 634055, Russia
E-mail: savkin@opee.hcei.tsc.ru

² Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40 Lenin av., Tomsk, 634050, Russia

Received July 2, 2018

The general structure and the characteristics of the modernized experimental diagnostic stand developed at the Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, are presented. The stand is equipped with a vacuum-arc source of metal ions, and a diagnostic system that includes a time-of-flight spectrometer of the mass-charge composition of the ion beam. The possibilities of application the experimental-diagnostic stand for investigations of vacuum arc plasma with composite and gas-saturated cathodes are indicated.

Keywords: vacuum arc discharge, compound cathode, gas-saturated cathode, mass-to-charge composition.

REFERENCES

1. N Qi., S. Gensler, R. R. Prasad, M. Krishnan, A. Vizir, and I. Brown, in *Proceedings on 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*. (Cleveland, OH, USA. 13-15 July 1998). P. AIAA-98-3663 (1-9).
2. E. D. Bender, G. F. Kusnetsov, and V. Ya. Savkin, *Instruments and Experimental Techniques (USSR)* **2**, 144 (1987).
3. A. A. Andreev, L. P. Sablev, V. M. Shulaev, and S. N. Grigoriev, *Vacuum Arc Devises and Coatings* (National Science Center Kharkov Institute of Physics and Technology, Kharkov, 2005) [in Russian].
4. A. Öztarhan, I. Brown, C. Bakkaloglu, G. Watt, P. Evans, E. Oks, A. Nikolaev, and Z. Tek, *Surf. Coat. Technol.* **196**, 327 (2005).
5. G. Yu. Yushkov, A. G. Nikolaev, V. P. Frolova, E. M. Oks, A. G. Rousskikh, and A. S. Zhigalin, *Physics of Plasmas* **24**, 123501 (2017).
6. V. P. Frolova, A. G. Nikolaev, and G. Yu. Yushkov, *Elektonnye Sredstva i Sistemy Upravleniya* **1** (1), 237 (2017).
7. A. Anders, G. Yu. Yushkov, *J. Appl. Phys.* **91**, 4824 (2002).
8. G. Yu. Yushkov, A. Anders, V. P. Frolova, A. G. Nikolaev, E. M. Oks, and A. V. Vodopyanov, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **43** (8), 2310 (2015).
9. A. G. Nikolaev, K. P. Savkin, G. Yu. Yushkov, and E. M. Oks, *Rev. Sci. Instrum.* **85**, 02B501 (2014).
10. P. G. Slade, *The Vacuum Interrupter. Theory, Design, and Application* (CRC Press, New York, 2008).
11. G. I. Kirianov, *Generators of Fast Neutrons* (Energoatomizdat, Moscow, 1990) [in Russian].
12. V. I. Gushenets, A. G. Nikolaev, E. M. Oks, L. G. Vintizenko, G. Yu. Yushkov, A. Öztarhan, and I. G. Brown, *Rev. Sci. Instrum.* **77**, 063301 (2006).
13. A. Anders, in *Proceedings of the NATO Advanced Workshop on Emerging Applications of Vacuum-Arc-Produced Plasma, Ion and Electron Beams*, (Lake Baykal, Russia 24–28 June 2002). P. 1–14.
14. A. G. Nikolaev, E. M. Oks, K. P. Savkin, G. Yu. Yushkov, and I. G. Brown, *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 02A501 (2012).
15. A. G. Nikolaev, E. M. Oks, K. P. Savkin, G. Yu. Yushkov, V. P. Frolova, and S. A. Barendolts, *J. Appl. Phys.* **116**, 213303 (2014).
16. D. Gentsch, in *Proceedings on XXII-nd Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, (Matsue, Japan. 25–29 September 2006). P. 437–442.
17. K. P. Savkin, Yu. G. Yushkov, A. G. Nikolaev, E. M. Oks, and G. Yu. Yushkov, *Rev. Sci. Instrum.* **81**, 02A501 (2010).