

## Генерация многозарядных ионов тяжелых металлов в плазме сильноточной короткоимпульсной вакуумной дуги

*А.Г. Николаев\**, *В.Д. Гридилев*, *В.П. Фролова*, *Г.Ю. Юшков*

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

*\*nik@opee.hcei.tsc.ru*

**Аннотация.** В статье представлены экспериментальные результаты по генерации многозарядных ионов тяжелых металлов в плазме вакуумной дуги с амплитудой тока около 3.5 кА и длительностью импульса около 1 мкс. Исследования проведены для ряда материалов катода дуги с различными свойствами, а именно для серебра, олова, лантана, гадолиния, и свинца. Показано, что при идентичных параметрах импульса тока вакуумной дуги максимальные зарядовые состояния ионов для всех исследованных материалов катодов составляют 11+, а средний заряд ионов различен и лежит в пределах от 7.8+ (Sn) до 9.6+ (La). Особенности механизма увеличения зарядовых состояний ионов плазмы вакуумной дуги обсуждаются.

**Ключевые слова:** вакуумный дуговой ионный источник, многозарядные ионы, ионный пучок

### 1. Введение

Пучки ионов тяжелых металлов, генерируемых вакуумно-дуговыми ионными источниками, находят применение как в фундаментальных исследованиях в области ядерной и атомной физики [1, 2], так и при решении прикладных задач, таких как модификация поверхности ионами [3–5]. При типичных параметрах вакуумного дугового разряда ионного источника, т.е. при амплитуде импульса тока дуги в сотни ампер и длительности импульса в сотни микросекунд [6], ионы металлов, генерируемые вакуумной дугой, имеют зарядовые состояния от 1+ для углерода до 5+ для вольфрама [6–8] при среднем зарядовом состоянии ионов не более 3+ [8]. Дальнейшее повышение зарядовых состояний ионов плазмы вакуумной дуги является актуальной задачей, поскольку позволяет обеспечить увеличение энергии ионов в извлекаемом ионном пучке без соответствующего повышения ускоряющего напряжения, что расширяет технологические возможности ионных источников на основе вакуумной дуги. Для реализации этой концепции был разработан ряд методов увеличения зарядности ионов пучка вакуумного дугового ионного источника, таких как создание в катодной области вакуумного дугового ионного источника магнитного поля [9]; принудительная импульсная модуляция тока дуги [10]; инжекция в плазму дуги дополнительного пучка электронов [11]; дополнительный нагрев электронов плазмы микроволновым излучением гиротрона в условиях электронного-циклотронного резонанса [12, 13]. Наиболее простым и эффективным из этих способов на данный момент является реализация сильноточной дуги с килоамперной амплитудой тока разряда с короткой длительностью импульса микросекундного и субмикросекундного диапазона [14–17]. Экспериментальному изучению этого метода генерации в плазме разряда многозарядных ионов различных тяжелых металлов посвящена настоящая статья.

### 2. Экспериментальное оборудование

Схема экспериментальной установки для генерации многозарядных ионов тяжелых металлов в плазме вакуумной дуги приведена на рис. 1. Использовалась разрядная система вакуумного дугового ионного источника Mevva-V.Ru [7, 18], которая была модернизирована для генерации многозарядных ионов тяжелых металлов [16]. Катод вакуумной дуги, диаметром 6.3 мм и длиной 40 мм, размещался внутри керамической трубки с толщиной стенки 1 мм, снаружи которой располагался кольцевой поджигающий электрод. Катодный узел был закреплен на высоковольтном двухэлектродном вакуумном вводе, который

располагался на конусообразном фланце, установленном на пологом аноде таким образом, чтобы расстояние от катода до ближайшей стенки анода было не менее 50 мм. Это было необходимо, чтобы снизить «загрязнение» масс-зарядовых спектров плазмы материала катода ионами примесей, появляющихся за счет десорбции атомов и молекул остаточного газа со стенок полого анода и ионизируемых в плазме разряда.

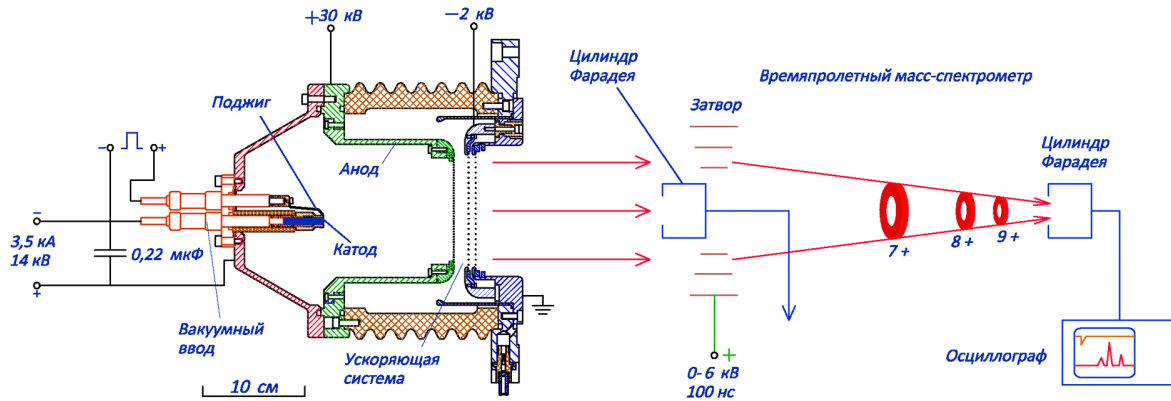


Рис. 1. Схема экспериментальной установки на основе вакуумной дуги для генерации пучков многозарядных ионов.

Ионный пучок формировался с помощью трехэлектродной ускоряющей системы. Все электроды были одинаковы: диаметр 10 см, толщина 4 мм, в каждом выполнено 199 отверстий диаметром 5 мм, юстированных соосно между всеми электродами. Эмиссионный электрод, к которому прикладывалось ускоряющее напряжение и через отверстия, в котором извлекался ионный пучок, был расположен на торце полого анода. На второй электрод подавалось отрицательное смещение для отражения вторичных электронов, образующихся в области прохождения ионного пучка. Третий, ускоряющий электрод, располагался на вакуумной камере и был заземлен. Вакуумная камера экспериментальной установки откачивалась криогенным насосом до предельного остаточного давления  $3 \cdot 10^{-7}$  Торр, чтобы снизить влияние остаточной атмосферы вакуумной камеры на масс-зарядовый состав пучка. На противоположном конце вакуумной камеры был расположен времяпролетный масс-спектрометр, с помощью которого осуществлялся анализ масс-зарядового состава ионного пучка. Затвор спектрометра типа Бредбери – Нильсона, содержал пять пар концентрических колец, к которым прикладывался отклоняющий ионы высоковольтный импульс напряжения [19]. В центре затвора был установлен магнитоизолированный цилиндр Фарадея с площадью коллимирующего отверстия  $10 \text{ см}^2$ . Он был предназначен, с одной стороны, для измерения тока ионного пучка на входе в спектрометр, а, с другой стороны, предотвращал прохождение ионного пучка в цилиндр Фарадея спектрометра в отсутствие отклоняющего импульса затвора. Таким образом, ионный ток измерялся магнитоизолированным цилиндром Фарадея на расстоянии 1.4 м от ускоряющей системы ионного источника. В данных экспериментах, для лучшего разрешения спектров, содержащих многозарядные ионы, база спектрометра была увеличена до 1.5 м [20].

Инициирование вакуумного дугового разряда происходило пробоем по торцевой поверхности керамической трубки при приложении высоковольтного импульса напряжением более 10 кВ. Разряд между катодом и анодом, между которыми приложено напряжение величиной 14 кВ, формировался при разряде низкоиндуктивного конденсатора емкостью 0.22 мкФ, который определял амплитудное значение тока дуги и длительность дугового импульса, которые в экспериментах составляли около 3.5 кА и около 0.95 мкс (FWHM),

соответственно. Частота следования импульсов составляла 0.5 импульсов в секунду. Для формирования ионного пучка использовалось ускоряющее напряжение величиной 30 кВ, оптимальное для используемого времяпролетного масс-спектрометра.

### 3. Экспериментальные результаты

Импульс тока вакуумной дуги, напряжения на разрядном промежутке, а также расчётная мощность разряда в случае катода из гадолиния представлены на рис. 2а. При использовании разрядного конденсатора емкостью 0.22 мкФ и при приложении к разрядному промежутку напряжения 14 кВ получены импульсы тока дуги с амплитудой более 3.3 кА при длительности около 0.9 мкс, при этом импульсная мощность, выделяемая в разряде, может достигать уровня 8 МВт.

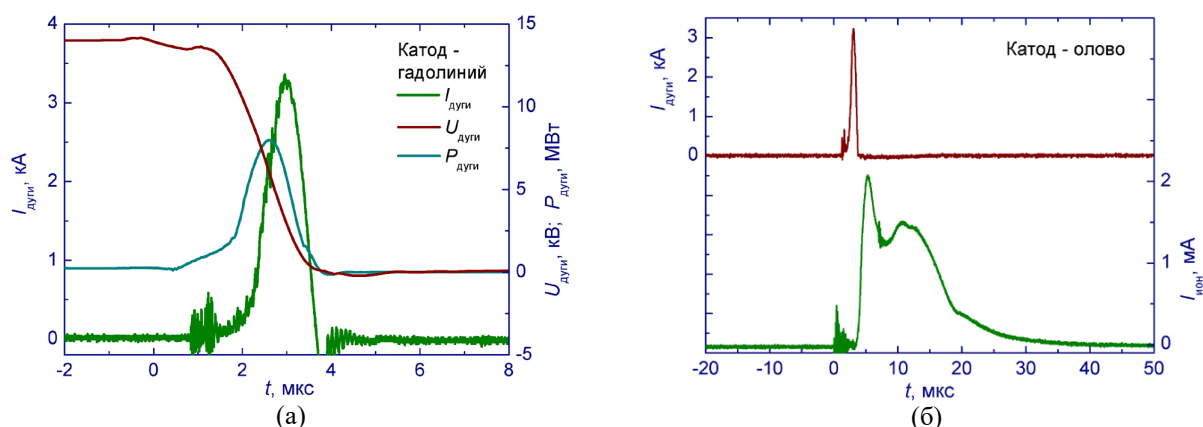


Рис. 2. Импульс тока вакуумной дуги, напряжение на разрядном промежутке и расчётная мощность разряда для катода из гадолиния (а); ток дуги и соответствующий ему ионный ток на цилиндр Фарадея площадью  $10 \text{ см}^2$  для катода из олова (б). Разрядный конденсатор – 0.22 мкФ, напряжение, приложенное к промежутку 14 кВ, ускоряющее напряжение – 30 кВ.

Импульс тока дуги и соответствующий ему импульс тока ионного пучка для случая катода из олова представлен на рис. 2б. Длительность импульса тока ионного пучка на полувысоте была около 13 мкс и, таким образом, превышала длительность импульса тока дуги более, чем на порядок. Это связано с тем, что ионы в дуговой плазме имеют широкое распределение по скоростям и угловым направлениям траекторий их движения, а также с наличием в плазме наряду с ионами металла более легких ионов газов, некоторое количество которых присутствует в остаточной атмосфере. В результате этого плазменный поток при движении из области катода в область извлечения ионов существенно «расплывается» в пространстве. Кроме этого, происходит и расплывание самого ионного пучка по мере движения ионов с различными скоростями, определяемыми не только величиной ускоряющего напряжения, но и их массами и зарядовыми состояниями, на расстоянии от эмиссионной поверхности плазмы до цилиндра Фарадея. Так, при ускоряющем напряжении 30 кВ ионы водорода, образующие передний фронт импульса ионного тока, проходят это расстояние за 0.6 мкс, а однозарядные ионы олова, присутствующие, в основном, на заднем фронте импульса – за 6.4 мкс.

При параметрах импульса вакуумной дуги, аналогичных показанным на рис. 2а, для временной области соответствующей моменту достижения током максимума, были получены пучки всех пяти исследованных материалов с максимальными зарядовыми состояниями  $11+$ , при этом средняя зарядность  $Q_{\text{ср}}$  ионов в пучке различалась и составила:

лантан – 9.63, гадолиний – 9.59, свинец – 9.06, серебро – 8.27, олово – 7.84. Времяпролетные спектры для случая олова и свинца приведены, в качестве примеров, на рис. 3.

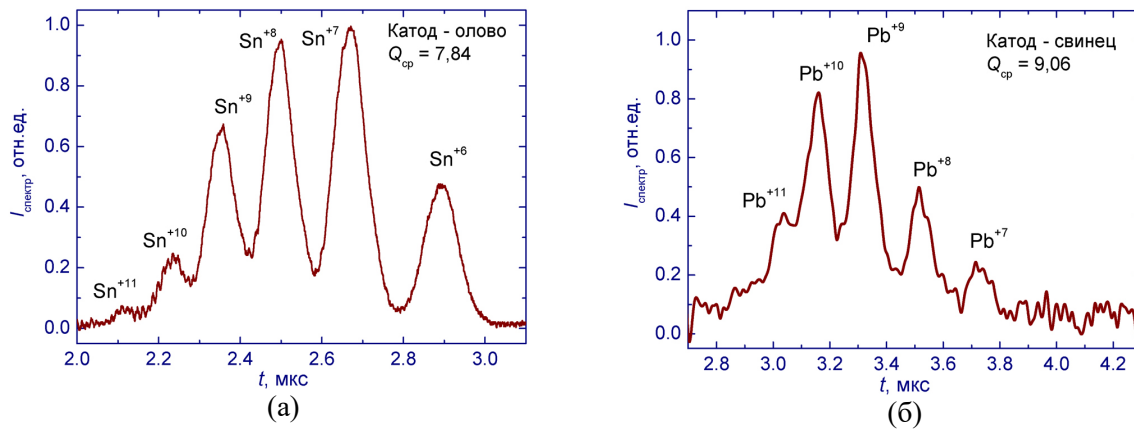


Рис. 3. Зарядовые состояния ионов олова (а) и свинца (б) в извлеченном ионном пучке, измеренные с помощью времяпролетного масс-спектрометра. Ускоряющее напряжение 26.8 кВ для олова и 23.5 кВ для свинца, параметры импульса дуги соответствуют рис. 2, давление в вакуумной камере  $3 \times 10^{-7}$  Торр.

Как было показано в работах [16, 17, 21, 22], многозарядные ионы в плазме сильноточного разряда короткой длительности образуются в результате сжатия плазмы, происходящего при пинчевании столба разряда собственным магнитным полем. В области пинча электроны плазмы быстро нагревается, происходит дополнительная ионизация и генерация многозарядных ионов. В работе [22] установлено, что  $Q_{cp}$  линейно зависит от напряжения, приложенного к разрядному промежутку. На основе фотографирования плазменного потока такого разряда с наносекундными временами экспозиции, осуществленного в работах [16, 17], было показано, что пинчевание разряда и генерация многозарядных ионов происходит в момент достижения амплитудой импульса тока дуги максимального значения. Таким образом, на значения  $Q_{cp}$  должно влиять напряжение на разрядном промежутке в момент максимума тока дуги  $U_{пик}$ . Зависимость  $Q_{cp}$  ионов материала катода от  $U_{пик}$  приведена на рис. 4а. Видно, что для исследованных материалов катодов  $Q_{cp}$  линейно увеличивается при повышении  $U_{пик}$ . Этот экспериментальный факт имеет простое феноменологическое объяснение. Даже при пинчевании разряда мощность, вкладываемая в сжимаемую плазму, определяется мощностью самого разряда. Эта мощность определяется не только амплитудой тока разряда, которая была приблизительно одинакова в этих экспериментах, но и напряжением на разрядном промежутке. Таким образом, чем выше напряжение на разрядном промежутке, тем выше мощность, вкладываемая в разряд, и тем выше зарядовые состояния ионов в плазме разряда.

С другой стороны, зарядовые состояния ионов для различных материалов катода определяются не только параметрами плазмы, но и строением электронных оболочек их атомов, которые могут иметь различные потенциалы ионизации при одинаковой кратности зарядовых состояний ионов. Зависимость средней зарядности ионов материала катода от энергии  $E_{ион}$ , которую необходимо затратить для ионизации максимального зарядового состояния приведена на рис. 4б. Энергия  $E_{ион}$  определяется как сумма потенциалов ионизации всех зарядовых состояний [23] от 1+ до максимального 11+. Видно, что при увеличении  $E_{ион}$  средняя зарядность ионов плазмы материала катода линейно снижается. Это связано с тем, что, при прочих равных условиях, чем меньше энергия, которую необходимо затратить на ионизацию, тем более высокий средний заряд ионов в плазме будет достигнут.

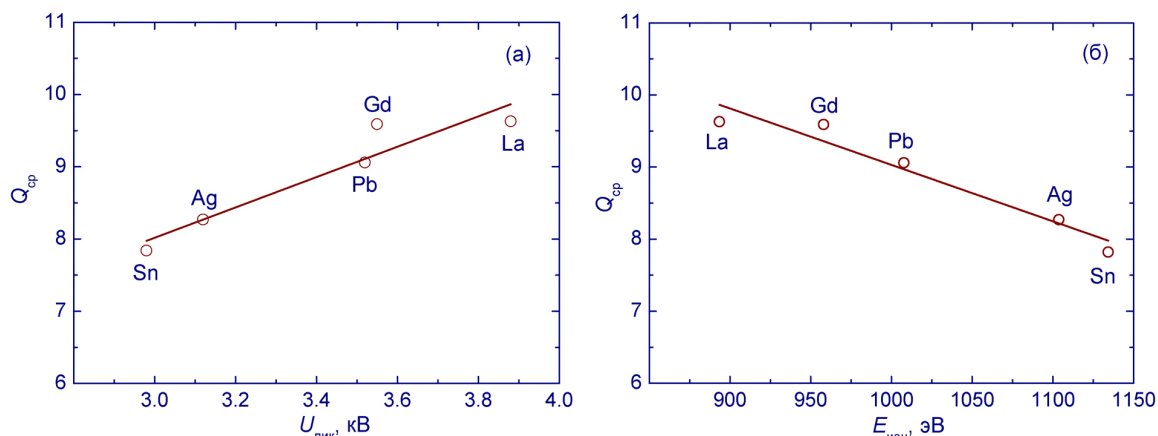


Рис. 4. Зависимость средней зарядности ионов материала катода (а) от напряжения на промежутке в максимуме тока дуги; (б) от энергии, необходимой для ионизации максимального зарядового состояния  $11+$ .

#### 4. Выводы

В результате проведенных исследований было показано, что в плазме вакуумного дугового разряда длительностью уровня микросекунды и амплитудой тока несколько килоампер в случае катодов из лантана, гадолиния, свинца, серебра и олова максимальное достигнутое зарядовое состояние материала катода составляет  $11+$ . При этом средняя зарядность ионов в плазме выше для тех материалов катода, у которых меньше энергия, необходимая для последовательной ионизации максимального зарядового состояния. Кроме того, средняя зарядность пропорциональна напряжению, приложенному к разрядному промежутку.

#### Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 24-29-00249 (<https://rscf.ru/project/24-29-00249/>).

#### 5. Литература

- [1] H. Reich, P. Spaedtke, and E.M. Oks, Metal vapor vacuum arc ion source development at GSI, *Rev. Sci. Instrum.*, **71**, 707, 2000, doi: 10.1063/1.1150268.
- [2] A. Adonin, and R. Hollinger, Progress on MEVVA source VARIS at GSI, *Rev. Sci. Instrum.*, **89**, 052304, 2018, doi: 10.1063/1.5017137.
- [3] A. Nikolaev, E.M. Oks, K. Savkin, G.Yu. Yushkov, D.J. Brenner, G. Johnson, Randers-Pehrson G., Brown I.G., and MacGill R.A., Surface resistivity tailoring of ceramic insulators for an ion microprobe application, *Surf. Coat. Technol.*, **201**, 8120, 2007, doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.10.051
- [4] E. Sokullu Urkac, A. Oztarhan, N. Kaya, F. Tihminlioglu, D. Ila, C. Muntele, S. Budak, E. Oks, A. Nikolaev, A. Ezdesir, and Z. Tek, Thermal characterization of Ag and Ag + N ion implanted ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE), *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B*, **261**, 699, 2007, doi: 10.1016/j.nimb.2007.04.102
- [5] J.M. Schneider, A. Anders, and G.Yu. Yushkov, Magnetic-field-dependent plasma composition of a pulsed aluminum arc in an oxygen ambient, *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 150, 2001, doi: 10.1063/1.1339847
- [6] I.G. Brown, Vacuum arc ion sources, *Rev. Sci. Instrum.*, **65**, 3061, 1994, doi:10.1063/1.1144756

- [7] A. Nikolaev, K.P. Savkin, E.M. Oks, and G.Yu. Yushkov, Ion angular distribution in plasma of vacuum arc ion source with composite cathode and elevated gas pressure, *Rev. Sci. Instrum.*, **85**, 02B501, 2014, doi: 10.1063/1.4824641
- [8] A., Anders Ion charge state distributions of vacuum arc plasmas: The origin of species, *Phys. Rev. E*, **55**, 969, 1997; doi: 10.1103/PhysRevE.55.969
- [9] A.G. Nikolaev, E.M. Oks, and G.Yu. Yushkov, Charge-state distribution of ions in a vacuum arc discharge plasma in a high magnetic field *Technical Physics*, **43**, 514, 1998, doi: 10.1134/1.1259030
- [10] G. Yushkov, E. Oks, A. Anders, and I. Brown, Effect of multiple current spikes on the enhancement of ion charge states of vacuum arc plasmas *J. Appl. Phys.*, **87**, 8345, 2000, doi: 10.1063/1.373546
- [11] A.S. Bugaev, V.I. Gushenets, G.Y. Yushkov, E.M. Oks, A. Anders, I. Brown, A. Gershkovich and P. Spadke, Generation of multiply charged ions in the plasma of a vacuum arc discharge, *Rus. Phys. J.*, **44**, 912, 2001, doi: 10.1023/A:1014349620595
- [12] A.V. Vodopyanov, S.V. Golubev, D.A. Mansfeld, S.V. Razin, A.G. Nikolaev, E.M. Oks, K.P. Savkin, and G.Yu. Yushkov, Generation of multiply charged refractory metals in an electron-cyclotron resonant discharge in a direct magnetic trap, *Technical Physics*, **50**, 1207, 2005, doi: 10.1134/1.2051464
- [13] A.V. Vodopyanov, S.V. Golubev, V.G. Zorin, S.V., Razin A.V. Vizir, A.G. Nikolaev, E.M. Oks, and G.Y. Yushkov, Multiple ionization of metal ions by ECR heating of electrons in vacuum arc plasmas, *Rev. Sci. Instrum.*, **75**, 1888, 2004, doi: 10.1063/1.1702139
- [14] G.Yu. Yushkov and A. Anders, Extractable, elevated ion charge states in the transition regime from vacuum sparks to high current vacuum arcs, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 041502, 2008, doi: 10.1063/1.2839616
- [15] V. Frolova, A. Nikolaev, E. Oks, and G. Yushkov, Multiply charged ion source based on high current short pulse vacuum arc, *AIP Conf. Proc.* **2011**, 030007, 2018, doi: 10.1063/1.5053268
- [16] G.Yu. Yushkov, A.G. Nikolaev, V.P. Frolova, E.M. Oks, A.G. Rousskikh, and A.S. Zhigalin, Multiply charged metal ions in high current pulsed vacuum arcs, *Physics of Plasmas*, **24**, 123501, 2017, doi: 10.1063/1.5003676
- [17] V.P. Frolova, A.G. Nikolaev, E.M. Oks, V.I. Oreshkin, D.L. Shmelev, and G.Yu. Yushkov, Experiment and simulation of generation of highly charged ions in a pulsed vacuum arc, *Vacuum*, **213**, 112062, 2023, doi: 10.1016/j.vacuum.2023.112062
- [18] A.G. Nikolaev, E.M. Oks, V.P. Frolova, and G.Y. Yushkov, Generation of boron plasma in vacuum arc with lanthanum hexaboride cathode, *Tech. Phys. Lett.*, **41**, 880, 2015, doi: 10.1134/S1063785015090266
- [19] I.G. Brown, J.E. Galvin, R.A. MacGill, and R.T. Wright, Improved timeofflight ion charge state diagnostic, *Rev. Sci. Instrum.*, **58**, 1589, 1987, doi: 10.1063/1.1139405
- [20] A.G. Nikolaev, V.P. Frolova, G.Yu. Yushkov, and E.M. Oks, Production of multiply charged bismuth ion beams in a vacuum arc ion source with a submicrosecond pulse duration, *Russ. Phys. J.*, **65**, 1613, 2023, doi: 10.1007/s11182-023-02809-3
- [21] I.A. Krinberg, and V.L. Paperny, Pinch effect in vacuum arc plasma sources under moderate discharge currents, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **35**, 549, 2002, doi: 10.1088/0022-3727/35/6/310
- [22] M.F. Artamonov, V.I. Krasov, and V.L. Paperny, Generation of multiply charged ions from a cathode jet of a low-energy vacuum spark, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **34**, 3364, 2001, doi: 10.1088/0022-3727/34/23/307
- [23] T.A. Carlson, Jr. C.W. Nestor, N. Wasserman, and J.D. Mcdowell, *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, **2**, 63, 1970, doi: 10.1016/S0092-640X(70)80005-5