

Генерация пучков многозарядных ионов тантала в вакуумном дуговом ионном источнике с субмикросекундной длительностью импульса

А. Г. Николаев, В. П. Фролова, Г. Ю. Юшков

В вакуумных дуговых ионных источниках, функционирующих при амплитуде импульса тока дуги в сотни ампер и длительности импульса более десятков микросекунд, средняя зарядность ионов материала катода в ионном пучке находится в пределах от 1+ для углерода до около 3+ для тяжелых металлов. Повышение зарядовых состояний ионов плазмы вакуумной дуги позволяет обеспечить увеличение энергии ионов в извлекаемом пучке без соответствующего повышения ускоряющего напряжения, либо наоборот, получить ионы с заданной энергией при существенно меньшем ускоряющем напряжении. Это расширяет возможности ионных источников при решении задач науки и практики. Зарядовые состояния ионов могут быть существенно увеличены в случае вакуумной дуги с субмикросекундной длительностью импульса. В данной статье представлено исследование процессов генерации пучков многозарядных ионов тяжелых металлов на примере ионов тантала. За счет сокращения длительности импульса тока дуги до субмикросекундного уровня были получены рекордные для тантала зарядовые состояния вплоть до 13+ при среднем заряде ионов тантала в пучке 11+.

Ключевые слова: вакуумный дуговой ионный источник, многозарядные ионы, ионы тяжелых металлов, ионный пучок.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-3-30-36

Введение

Вакуумные дуговые источники ионов – это устройства, в которых генерация пучка осуществляется за счет извлечения и дальнейшего ускорения ионов из плазмы вакуумного дугового разряда с катодом, выполненным из материала, ионы которого требуется получить. Испарение и ионизация этого материала осуществляются в так называемых ка-

тодных пятнах – плазменных образованиях микронного размера с наносекундными временами жизни, хаотически перемещающихся по поверхности катода. Такие источники способны генерировать импульсные ионные пучки любого твердотельного проводящего материала. Они находят применение в качестве инжекторов ускорителей тяжелых ионов [1, 2] и технологических имплантеров для модификации поверхности различных материалов [3]. Обычно такие источники функционируют при амплитуде импульса тока дуги сотни ампер, длительности импульса сотни микросекунд и частоте повторения импульсов от единиц до десятков импульсов в секунду. Как правило, амплитуда тока ионного пучка в вакуумных дуговых источниках ионов составляет около 1 А, площадь поперечного сечения пучка от 10 до 100 см² при ускоряющем напряжении около 100 кВ [4]. Зарядовые состояния ионов плазмы материала катода и, соответственно,

Николаев Алексей Геннадьевич¹, с.н.с., к.т.н.

E-mail: nik@opee.hcei.tsc.ru

Фролова Валерия Петровна^{1,2}, н.с., доцент, к.т.н.

Юшков Георгий Юрьевич¹, гл.н.с., д.т.н.

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН.

Россия, 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/3.

² Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 40.

Статья поступила в редакцию 06 мая 2022 г.

© Николаев А. Г., Фролова В. П., Юшков Г. Ю., 2022

сформированного на её основе ионного пучка, не превышают значение 5+, а средняя зарядность ионного пучка находится в пределах от 1+ для углерода до 3+ для тяжелых металлов [5]. Повышение зарядовых состояний ионов плазмы вакуумной дуги позволяет обеспечить увеличение энергии ионов в генерируемом пучке без соответствующего увеличения ускоряющего напряжения, либо наоборот, позволяет получить пучки ионов с требуемой энергией при существенно меньшей величине ускоряющего напряжения. Первое – приводит к расширению диапазона энергии ионного пучка источника, а второе – позволяет сделать его более компактным, недорогим в изготовлении и радиационно безопасным.

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 [6]; принудительная импульсная модуляция тока дуги [7]; инжекция в плазму дуги дополнительного пучка электронов [8]; дополнительный нагрев электронов плазмы микроволновым излучением гиротрона в условиях электронного-циклотронного резонанса [9, 10] и наконец, использование импульсного вакуумного дугового разряда с амплитудой тока в единицы килоампер при длительности в единицы микросекунд [11, 12]. Объединяющим фактором всех этих методов является то, что повышение зарядности ионов

плазмы, а, следовательно, и ионного пучка, обеспечено увеличением температуры плазменных электронов, вклад которых в ионизационные процессы является доминирующим. Именно поэтому наиболее простым и эффективным подходом к достижению высокой зарядности ионов в вакуумной дуговой плазме ионного источника оказалась реализация сильноточной дуги с килоамперным диапазоном амплитуды тока разряда с короткой длительностью уровня единиц микросекунд. Этот метод обеспечил наибольшее увеличение зарядности ионов, при котором, в случае пучка ионов тантала, максимальное зарядовое состояние составило 11+ при средней зарядности 8+ [13]. В этих работах была найдена зависимость увеличения зарядности ионов различных металлов при сокращении длительности импульса дуги. В настоящей статье представлены исследования по генерации пучков ионов тантала при субмикросекундной длительности импульса тока дуги. В результате были получены рекордные по зарядовым состояниям для вакуумного дугового источника пучки ионов тантала содержащие ионы вплоть до Ta^{13+} при средней зарядности ионов тантала в пучке около 11+.

Экспериментальное оборудование

Принципиальная схема экспериментальной установки, примененной в этой работе, приведена на рис. 1.

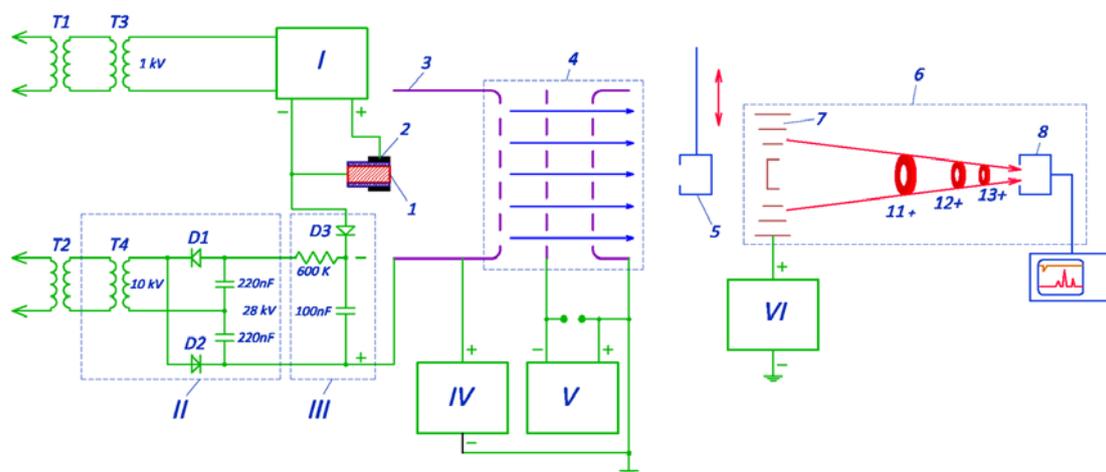


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – катод; 2 – поджигающий электрод; 3 – полый анод; 4 – ионно-оптическая система; 5 – цилиндр Фарадея для измерения ионного тока; 6 – время-пролётный масс-спектрометр; 7 – затвор спектрометра; 8 – цилиндр Фарадея спектрометра. Источники питания: I – генератор импульсов поджига; II – удвоитель напряжения; III – цепь питания импульса дуги; IV – источник питания ускоряющего напряжения; V – источник питания отсечки; VI – генератор отклоняющих импульсов затвора спектрометра

Был использован вакуумный дуговой ионный источник типа Mevva-5.Ru [4, 14] со специальным разработанным катодным узлом для получения плазмы многозарядных ионов в субмикросекундных импульсах. Источник размещался на торце вакуумной камеры объемом $0,7 \text{ м}^3$, которая откачивалась криогенным насосом до давления 2×10^{-7} Торр, чтобы исключить влияние остаточной атмосферы вакуумной камеры на масс-зарядовый состав ионов, а также для снижения загрязнения ионного пучка паразитными примесями. Особенности конструкции ионного источника заключались в следующем. Катод 1 представлял собой стержень диаметром 6,5 мм, выполненный из тантала или висмута. Он располагался внутри керамической трубки с внешним диаметром 12 мм, на торце которой располагался металлический анод поджигающего разряда 2. Катод и поджигающий электрод были размещены на катододержателе, который представлял собой высоковольтный низкоиндуктивный двухэлектродный вакуумный ввод. Этот ввод располагался на конусообразном катодном фланце, размеры которого были подобраны таким образом, чтобы рабочая поверхность катода была расположена на оси полого анода 3 таким образом, чтобы расстояние до ближайшей стенки полого анода составляло не менее 5 см. Это было необходимо, чтобы снизить эффект повышения давления в области катода, происходящего за счет десорбции остаточного газа со стенок полого анода во время импульса горения дуги. Таким образом существенно снижалась вероятность перезарядки ионов на нейтралах остаточного газа, что является одним из основных процессов снижения зарядовых состояний многозарядных ионов материала катода в плазме дуги.

Формирование ионного пучка происходило с помощью ионно-оптической системы 4, состоящей из трех одинаковых электродов диаметром 10 см. Каждый из них был толщиной 4 мм и имел 199 отверстий диаметром 5 мм. Отверстия во всех электродах были юстированы относительно друг друга. Первый, эмиссионный, электрод был расположен на торце полого анода и через отверстия в нем осуществлялось извлечение ионов. На второй, отсекающий, электрод подавалось отрицательное напряжение величиной несколько ки-

ловольт для подавления вторичных электронов, выбитых с электродов ионно-оптической системы и образующихся в области транспортировки ионного пучка в результате ионно-электронной эмиссии. Формирование ионного пучка происходило при приложении ускоряющего напряжения между эмиссионным и третьим, ускоряющим, электродом, который был заземлен.

Для измерения тока ионного пучка использовался перемещаемый магнито-изолированный цилиндр Фарадея 5 с площадью коллимирующего отверстия 10 см^2 , расположенный на расстоянии 80 см от ионного источника.

На другом торце вакуумной камеры, на расстоянии 1,4 метра от ионного источника располагался модернизированный времяпролетный масс-спектрометр 6 для анализа масс-зарядового состава ионного пучка. Затвор спектрометра 7 представлял собой пять пар концентрических колец, к которым прикладывался отклоняющий ионы импульс напряжения [15]. Центральная часть затвора была закрыта металлическим диском, предотвращающим прохождение ионного пучка в цилиндр Фарадея спектрометра 8 в отсутствие отклоняющего импульса затвора. Расстояние между ним и затвором являлось базой спектрометра, т. е. промежутком, на котором происходит разделение ионов с различным отношением заряда Q к массе M . Для представляемых экспериментов спектрометр был модернизирован для лучшей расшифровки спектров, содержащих высокозарядные ионы уровня 10+ и выше. Модернизация заключалась в том, что пролетная база спектрометра, которая обычно составляет 1 м [15], была увеличена до 1,5 м, а также была проведена соответствующая перенастройка генератора отклоняющих импульсов.

Блоки схемы электропитания экспериментальной установки были расположены на высоковольтной изолированной платформе и питались через разделительные трансформаторы $T1$ и $T2$ (рис. 1), изолированные на напряжение более 60 кВ. Инициирование вакуумной дуги осуществлялось пробоем по поверхности керамики при подаче высоковольтного импульса напряжением 14 кВ и током несколько десятков ампер между катодом 1 и поджигающим электродом 2. Генератор им-

пульсов поджига *I* срабатывал при открытии тиристора, который управлялся от многоканального генератора импульсов, соединенного с высоковольтной платформой через оптическую развязку.

Схема питания вакуумной дуги не имела коммутирующих элементов и срабатывала при подаче поджигающего импульса. Она включала в себя схему удвоения напряжения *II*, которая питалась от повышающего трансформатора *T4*, выдающего напряжение 10 кВ и была сделана на базе низкоиндуктивных конденсаторов емкостью 0,22 мкс с собственной индуктивностью около 20 нГн. На выходе схемы удвоения была расположена цепь питания импульса дуги *III*, включающая разрядный низкоиндуктивный конденсатор емкостью 0,1 мкФ, который определял амплитудное значение тока дуги и длительность дугового импульса. Также, чтобы отсечь колебания тока дуги обратной полярности, возможные при перезарядке разрядного конденсатора, в цепь дуги был добавлен диод *D3*. Общая индуктивность схемы питания, высоковольтного вакуумного ввода и электродов разрядной системы составляла, по оценкам, около 150 нГн. Это позволило сформировать импульс тока дуги с длительностью на полувысоте менее 0,5 микросекунд при токе дуги несколько килоампер.

Формирование ионного пучка происходило при подаче на эмиссионный электрод постоянного ускоряющего напряжения величиной +10–60 кВ от источника питания *IV*. На отсекающий электрод подавалось постоянное отрицательное напряжение величиной 2 кВ. Для защиты источника питания отсечки *V* от

скачков высокого напряжения, возможных при пробое ускоряющего промежутка, на выходе схемы установлен разрядник.

Генератор отклоняющих импульсов затвора спектрометра *VI* формировал отклоняющий импульс напряжения длительностью 100 нс, который регулировался в пределах 0–6 кВ. Такая регулировка была необходима для точной фокусировки ионного пучка в центр цилиндра Фарадея спектрометра *8* при изменении длины пролетной базы. Генератор отклоняющих импульсов был синхронизован с генератором импульсов поджига, при этом время срабатывания спектрометра относительно поджигающего импульса могло изменяться в широких пределах с шагом 5 нс.

Результаты экспериментов и их обсуждение

При использовании разрядного конденсатора емкостью 0,1 мкФ и при приложении к разрядному промежутку напряжения 10–14 кВ были получены импульсы тока дуги с длительностью менее 0,5 мкс на полувысоте и амплитудой 1–5 кА, при этом импульсная мощность, выделяемая в разряде, может достигать 10 мегаватт. В экспериментах было показано, что существуют оптимальные параметры импульса вакуумной дуги, при которых увеличение зарядовых состояний ионов тантала максимально. Импульсы тока вакуумной дуги, напряжения на разрядном промежутке, а также расчётная мощность разряда в случае оптимальных параметров импульса дугового разряда представлены на рис. 2.

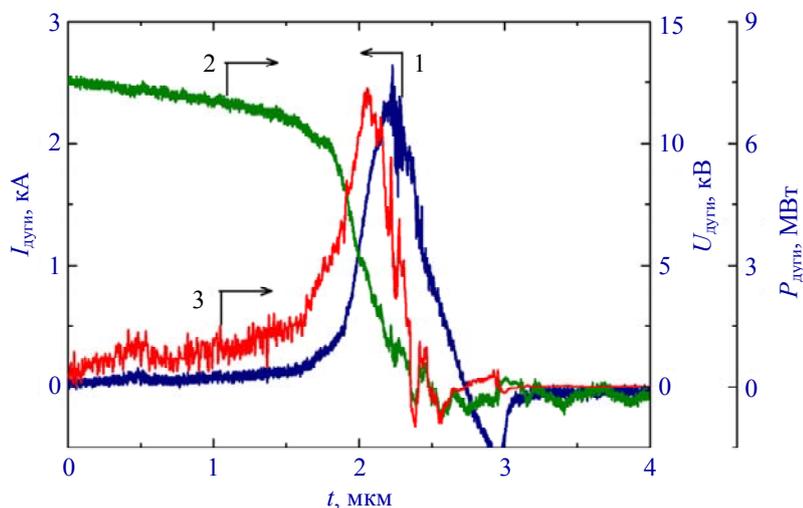


Рис. 2. Осциллограммы импульсов тока дуги (1), напряжения на разрядном промежутке (2) и мощности разряда (3). Разрядный конденсатор 0,1 мкФ был заряжен до 12 кВ

На рис. 3 также показан импульс тока дуги и соответствующий ему импульс тока ионного пучка, измеренный магнитоизолированным цилиндром Фарадея ионного тока площадью 10 см^2 , расположенным на оси пучка на расстоянии $0,8 \text{ м}$ от ионного источника. Главная особенность этих осциллограмм является то, что длительность импульса ионного тока составляет 7 мкс на полувысоте, что почти в 15 раз больше длительности тока дугевого разряда. Это связано с тем, что ионы плазмы вакуумной дуги имеют широкое распределение по скоростям и направлениям движения, в результате чего плазменный поток при движении из области катода в область

извлечения ионов существенно расширяется в пространстве.

При оптимальных параметрах импульса вакуумной дуги, показанных на рис. 4, т. е. при амплитуде импульса тока дуги $2,5 \text{ кА}$, длительности импульса дуги $0,48 \text{ мкс}$, импульсной мощности 7 МВт , а также при остаточном давлении в вакуумной камере около $2 \times 10^{-7} \text{ Торр}$ были получены пучки ионов тантала с зарядовыми состояниями вплоть до $13+$ (рис. 4). При этом минимальное наблюдаемое зарядовое состояние ионов – $\text{Ta}9+$, наиболее вероятное зарядовое состояние ионов – $\text{Ta}11+$, средняя зарядность ионов тантала в пучке достигает значения около $11+$.

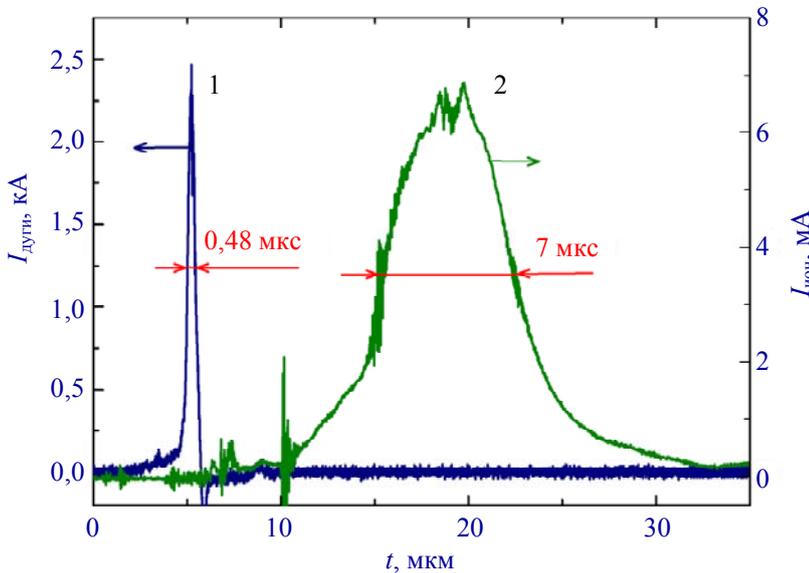


Рис. 3. Импульс тока дуги (1) и соответствующий ему импульс на цилиндр Фарадея ионного тока (2). Ускоряющее напряжение – 40 кВ , катод – тантал, рабочее давление – $2 \times 10^{-7} \text{ Торр}$

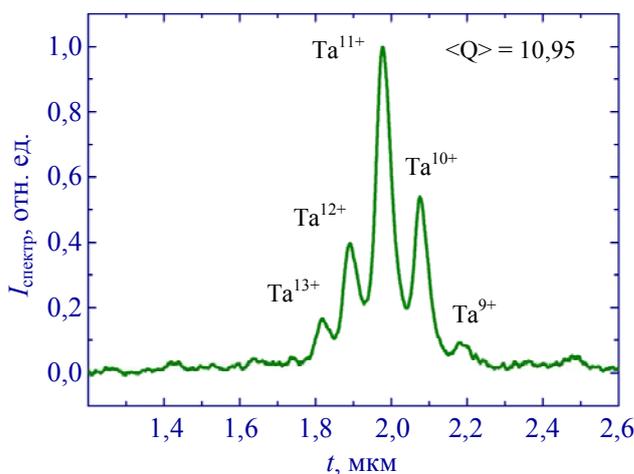


Рис. 4. Зарядовые состояния ионов тантала в ионном пучке, измеренные времяпролетным масс-спектрометром. Ускоряющее напряжение – $47,5 \text{ кВ}$, параметры импульса дуги соответствуют рис. 3

Ранее наибольшее максимальное зарядовое состояние ионов тантала, достигнутое при использовании сильноточной дуги микросекундной длительности, составило $11+$ при

средней зарядности $8+$ [13]. Таким образом, полученные в этой работе зарядности ионов тантала в пучке, извлеченном из плазмы вакуумной дуги, являются рекордными для исследова-

дуемого материала и для данного класса ионных источников, а метод увеличения зарядности ионов металлов за счет использования плазмы вакуумно-дугового разряда с килоамперными токами и субмикросекундной длительностью представляется относительно простым для реализации и достаточно эффективным, поэтому является привлекательным для практического использования.

Заключение

Были проведены эксперименты по генерации многозарядных пучков ионов в ионном источнике на основе вакуумной дуги. Получение высоких зарядовых состояний осуществлялось методом использования сильноточного вакуумного дугового разряда субмикросекундной длительности. При оптимальных параметрах дуги: ток 2,5 кА, длительность импульса 480 нс, мощность разряда 7 МВт были получены пучки ионов тантала с максимальным зарядовым состоянием до 13+ при средней зарядности ионов в извлеченном пучке около 11+. Полученные результаты являются рекордными для вакуумных дуговых ионных источников с танталовым катодом и могут найти применение при решении различных фундаментальных и прикладных задач.

Работа была выполнена при поддержке гранта Российского Научного Фонда № 22-29-00118.

ЛИТЕРАТУРА

1. Reich H., Spaedtke P. and Oks E. M. // Rev. Sci. Instrum. 2000. Vol. 71. P. 707.
2. Adonin A., Hollinger R. // Rev. Sci. Instrum. 2018. Vol. 89. P. 052304.
3. Nikolaev A., Oks E. M., Savkin K., Yushkov G. Yu., Brenner D. J., Johnson G., Randers-Pehrson G., Brown I. G., MacGill R. A. // Surf. Coat. Technol. 2007. Vol. 201. P. 8120.
4. Nikolaev A. G., Oks E. M., Savkin K. P., Yushkov G. Y., Brown I. G. // Rev. Sci. Instrum. 2012. Vol. 83. P. 02A501.
5. Anders A. // Phys. Rev. E. 1997. Vol. 55. P. 969.
6. Николаев А. Г., Окс Е. М., Юшков Г. Ю. // ЖТФ. 1998. Т. 68. № 5. С. 39.
7. Yushkov G., Oks E., Anders A., Brown I. // J. Appl. Phys. 2000. Vol. 87. P. 8345.
8. Бугаев А. С., Гушенец В. И., Юшков Г. Ю., Окс Е. М., Андерс А., Браун Я., Гершкович А., Шнедеке П. // Изв. Вузов. Физика. 2001. Т. 44. № 9. С. 15.
9. Vodopyanov A. V., Golubev S. V., Khizhnyak V. I., Mansfeld D. A., Nikolaev A. G., Oks E. M., Savkin K. P., Vizir A. V., Yushkov G. Yu. // Rev. Sci. Instrum. 2008. Vol. 79. P. 02B304
10. Водопьянов А. В., Голубев С. В., Мансфельд Д. А., Николаев А. Г., Окс Е. М., Разин С. В., Савкин К. П., Юшков Г. Ю. // ЖТФ. 2005. Т. 75. № 9. С. 101.
11. Yushkov G. Yu., Anders A. // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 92. P. 041502.
12. Yushkov G. Yu., Frolova V. P., Nikolaev A. G., Oks E. M. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2019. Vol. 47. P. 3586.
13. 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.
14. Nikolaev A. G., Yushkov G. Yu., Savkin K. P., Oks E. M. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. Vol. 41. P. 1923.
15. Бугаев А. С., Гушенец В. И., Николаев А. Г., Окс Е. М., Юшков Г. Ю. // Изв. Вузов. Физика. 2000. Т. 43. № 2. С. 21.

PACS: 52.80.Vp

Generation multiply charged tantalum ion beams in a vacuum arc ion source with a submicrosecond pulse duration

A. G. Nikolaev¹, V. P. Frolova^{1,2}, and G. Yu. Yushkov¹

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

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

Received May 06, 2022

In vacuum arc ion sources operating at an arc current pulse amplitude of hundreds of amperes and a pulse duration of more than tens of microseconds, the average charge of the cathode

material ions in the ion beam ranges from 1+ for carbon to about 3+ for heavy metals. An increase in the charge states of the vacuum arc plasma ions makes it possible to increase the ion energy in the extracted beam without a corresponding increase in the accelerating voltage, or vice versa, to obtain ions with a given energy at a significantly lower accelerating voltage. This expands the possibilities of ion sources in solving problems of science and practice. The charge states of the ions can be significantly increased in the case of a vacuum arc with a submicrosecond pulse duration. This article presents a study of the processes of generation of beams of multiply charged heavy metal ions using the example of tantalum ions. By reducing the duration of the arc current pulse to a submicrosecond level, charge states record for tantalum up to 13+ were obtained at an average charge of tantalum ions in the beam 11+.

Keywords: vacuum arc ion source, high charge state ions, heavy metal ions, ion beam.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-3-30-36

REFERENCES

1. H. Reich, P. Spaedtke, and E. M. Oks, Rev. Sci. Instrum. **71**, 707 (2000).
2. A. Adonin and R. Hollinger, Rev. Sci. Instrum. **89**, 052304 (2018).
3. A. Nikolaev, E. M. Oks, K. Savkin, G. Yu. Yushkov, D. J. Brenner, G. Johnson, G. Randers-Pehrson, I. G. Brown, and R. A. MacGill, Surf. Coat. Technol. **201**, 8120 (2007).
4. A. G. Nikolaev, E. M. Oks, K. P. Savkin, G. Y. Yushkov, and I. G. Brown, Rev. Sci. Instrum. **83**, 02A501 (2012).
5. A. Anders, Phys. Rev. E **55**, 969 (1997).
6. A. G. Nikolaev, E. M. Oks, and G. Yu. Yushkov, Technical Physics **43**, 514, (1998).
7. G. Yushkov, E. Oks, A. Anders, and I. Brown, J. Appl. Phys. **87**, 8345 (2000).
8. A. S. Bugaev, V. I. Gushenets, G. Y. Yushkov, E. M. Oks, A. Anders, I. Brown, A. Gershkovich, and P. Spadke, Rus. Phys. J. **44**, 912 (2001).
9. A. V. Vodopyanov, S. V. Golubev, V. I. Khizhnyak, D. A. Mansfeld, A. G. Nikolaev, E. M. Oks, K. P. Savkin, A. V. Vizir, and G. Yu. Yushkov, Rev. Sci. Instrum. **79**, 02B304 (2008).
10. 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, Technical Physics **50**, 1207 (2005).
11. G. Yu. Yushkov and A. Anders, Appl. Phys. Lett. **92**, 041502 (2008).
12. G. Yu. Yushkov, V. P. Frolova, A. G. Nikolaev, and E. M. Oks, IEEE Trans. Plasma Sci. **47**, 3586 (2019).
13. 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).
14. A. G. Nikolaev, G. Yu. Yushkov, K. P. Savkin, and E. M. Oks, IEEE Trans. Plasma Sci. **41**, 1923 (2013).
15. A. S. Bugaev, V. I. Gushenets, A. G. Nikolaev, E. M. Oks, and G. Y. Yushkov, Russ. Phys. J. **43**, 96 (2000).