

УДК 533.9.07

## Масс-зарядовый состав ионов плазмы дугового разряда форвакуумного широкоапертурного источника электронов

А. В. Тюньков, В. А. Бурдовицин, А. В. Казаков, А. В. Медовник, Е. М. Окс

*Проведены исследования масс-зарядового состава ионов плазмы импульсного дугового разряда, реализуемого в разрядной системе широкоапертурного форвакуумного плазменного источника электронов. Показано, что давление рабочего газа и ток разряда оказывают существенное влияние на соотношение ионов металла (материала катода) и газа в плазме. Характерной особенностью форвакуумного диапазона давлений является появление в дуговой плазме заметной доли ионов газа без использования магнитного поля, причем при определенных условиях плазма дугового разряда содержит только газовые ионы.*

PACS: 29.25.-t, 52.70.-m

*Ключевые слова:* импульсный дуговой разряд, масс-зарядовый состав, форвакуумный диапазон давлений, плазменный катод, широкоапертурный источник электронов.

### Введение

Электронные пучки большого сечения находят применение в электронно-лучевых и плазменных технологиях обработки материалов, при возбуждении активных сред газовых лазеров, иницировании реакций окисления и азотирования, а также в плазмохимии органических и неорганических соединений [1]. Генерация импульсных электронных пучков большого сечения плазменными источниками в форвакуумном диапазоне давлений (1—100 Па) [2, 3] обеспечивает возможность обработки поверхности керамических [4] и полимерных материалов [5]. Формирование эмиссионной плазмы в таких источниках дуговым разрядом с катодным пятном [6] позволяет (по сравнению с источником электронов на основе тлеющего разряда [7]) существенно повысить параметры электронного пучка.

В дуговом разряде с катодным пятном, функционирующим в области низких давлений (от  $10^{-4}$  до  $10^{-1}$  Па) изменение давления газа оказывает влияние на масс-зарядовый состав ионов плазмы. Это влияние проявляется в снижении доли

многозарядных ионов металлов материала катода с ростом давления и появлении ионов газов [8, 9]. При этом заметная доля ионов газа наблюдается лишь в присутствии в разрядном промежутке магнитного поля. Очевидно, что в области более высоких давлений форвакуумного диапазона давление газа должно представлять собой ключевой фактор, определяющий в дуговом разряде состав и параметры плазмы, а, следовательно, и ее эмиссионные свойства.

Как было показано нами ранее [10], в форвакуумном диапазоне давлений для импульсного дугового разряда характерны две стадии (режима) горения. Первая стадия реализуется при более высоком давлении (свыше 15 Па). Она характеризуется относительно высоким значением напряжения горения дугового разряда (40—45 В) и превалированием в оптическом спектре дуговой плазмы газовых линий ( $N_2$ ,  $O_2$ , Ar). Для второго режима при малых давлениях (единицы Па) напряжение горения дуги заметно ниже (15—20 В), а в оптическом спектре наибольшая интенсивность наблюдается для линий материала катода (Cu).

Результаты исследований оптических спектров дают во многом качественную картину процессов. Для более детального и более точного исследования плазмы дугового разряда, функционирующего в форвакуумной области давлений, результаты оптических измерений необходимо верифицировать альтернативными экспериментальными методиками. К таким методикам следует отнести, прежде всего, электрометрическую масс-зарядовую спектроскопию.

В настоящей работе представлены результаты исследований влияния давления и рода рабочего газа, материала катода и тока дугового разряда

---

Тюньков Андрей Владимирович, доцент.  
Медовник Александр Владимирович, доцент.  
Казаков Андрей Викторович, младший научный сотрудник.  
Бурдовицин Виктор Алексеевич, профессор.  
Окс Ефим Михайлович, профессор, зав. кафедрой.  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.  
Тел. 8 (952) 884-35-11. E-mail: andrew71@sibmail.com

Статья поступила в редакцию 2 июля 2015 г.

© Тюньков А. В., Медовник А. В., Казаков А. В., Бурдовицин В. А., Окс Е. М., 2015

на масс-зарядовый состав ионов плазмы импульсной дуги, используемой в разрядной системе форвакуумного плазменного источника широкоапертурных электронных пучков.

### Методика и техника эксперимента

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Для генерации плазмы в экспериментах использовалась разрядная ячейка форвакуумного плазменного источника электронов на основе импульсной дуги. Для сокращения длины транспортировки ионов плазмы в область анализа их масс-зарядового состава дуговой разрядный промежуток размещался в вакуумной камере в непосредственной близости от системы регистрации ионов. Вакуум в камере обеспечивался безмасляным спиральным насосом со скоростью откачки 500 л/мин. Конструкция разрядной системы включала в себя стержневой катод 1 диаметром 5 мм и полый цилиндрический анод 2. Диаметр и высота анода составляли 100 и 80 мм соответственно. Керамический электрод 3 обеспечивал электрическую изоляцию катода и ограничивал его рабочую поверхность торцевой частью. На противоположном от катода основании анода выполнено эмиссионное окно диаметром 90 мм, перекрытое мелкоструктурной сеткой из нержавеющей стали. В центральной части сетчатого электрода выполнялось отверстие диаметром 5 мм.

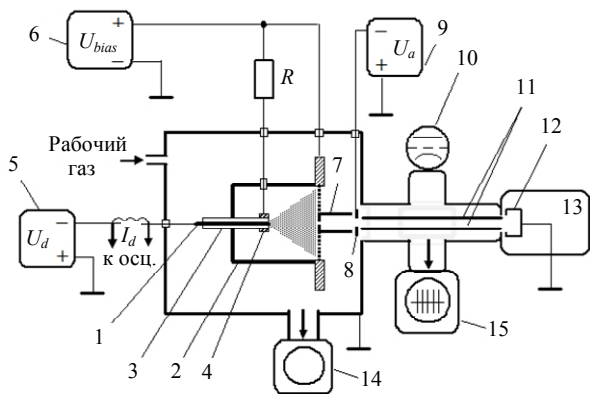


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — катод; 2 — анод; 3 — керамический изолятор; 4 — поджигающий электрод; 5 — блок питания разряда; 6 — блок потенциала смещения; 7 — эмиссионный электрод; 8 — ускоряющий электрод; 9 — блок питания ускоряющего электрода; 10 — ионизационная лампа; 11 — фильтр масс; 12 — цилиндр Фарадея; 13 — блок управления спектрометром; 14 — сухой спиральный насос; 15 — турбомолекулярный насос

Зажигание дугового разряда обеспечивалось вспомогательным разрядом по поверхности керамики между катодом 1 и поджигающим электродом 4. Этот метод инициирования наиболее часто используется для импульсной дуги. Питание дуго-

вого разряда осуществлялось импульсным блоком питания на основе искусственной формирующей линии 5, которая обеспечивала ток разряда  $I_d$  в пределах от 20 до 160 А с длительностью импульса  $\tau_d = 200$  мкс. Частота следования импульсов  $\nu$  составляла 20 Гц. Давление в разрядной системе в диапазоне от 3 до 25 Па регулировалось непосредственным напуском рабочего газа (аргона, гелия) в вакуумную камеру. В качестве материала катода были выбраны медь и магний.

Измерения масс-зарядового состава ионов дуговой плазмы осуществлялись с использованием модернизированного квадрупольного масс-спектрометра RGA-100 [11]. Аналогично работам [12, 13], модернизация спектрометра заключалась в замещении ионизатора на извлекающий ионы узел (электроды 7 и 8). Эмиссионный электрод 7 — тонкостенный цилиндр, выполненный из дюралюминия, с внутренним диаметром 10 мм. Один из торцов цилиндра, обращенный к катоду дугового разряда, вакуумно-плотно перекрывался диском с апертурой диаметром 1 мм в центральной части. Данная конструкция электрода обеспечила необходимый перепад давления между областями горения дугового разряда и регистрации ионов. Эмиссионный электрод 7 электрически соединялся с анодом дугового разряда 2. Для ускорения ионов, проникающих из плазмы через апертуру в область между разрядной ячейкой и масс-анализатором, на эмиссионный электрод подавался дополнительный положительный потенциал смещения  $U_{bias}$  величиной 60 В. Ускоряющий электрод 8, представляющий из себя диск, выполненный из дюралюминия с апертурой в центральной части диаметром 5 мм, размещался за эмиссионным электродом. На ускоряющий электрод подавался отрицательный относительно земли потенциал  $U_a$  величиной 60 В. За ускоряющим электродом располагались фильтр масс 11 и цилиндр Фарадея 12.

Так как цилиндр Фарадея находится под потенциалом земли, то подачей смещений  $U_{bias}$  и  $U_a$  обеспечивалось ускорение ионов в промежутке между эмиссионным и ускоряющим электродами и их транспортировка. Контроль давления в области транспортировки и фильтрации ионов осуществлялся ионизационной лампой 10. Извлекаемые ионы, прошедшие фильтр масс, регистрировались цилиндром Фарадея. Потенциалы квадрупольных стержней задавались автоматически блоком управления 13.

### Результаты экспериментов

Типичные спектры масс-зарядового состава ионов плазмы дугового разряда в форвакуумном диапазоне давлений в атмосфере аргона представ-

лены на рис. 2. При использовании меди в качестве материала катода в масс-спектрах наблюдаются только однозарядные ионы меди и ионы остаточных газов, ( $H_2O$ ,  $N_2$ ), а также ионы рабочего газа ( $Ar$  или  $He$ ). При горении дугового разряда на магниевом катоде наблюдается небольшое количество двукратно ионизованных ионов магния, однако при давлениях свыше 10 Па пик двукратно ионизованного магния исчезал. Следует отметить, что в измерениях наблюдаются все стабильные изотопы меди ( $^{63}Cu$ ,  $^{65}Cu$ ) и магния ( $^{24}Mg$ ,  $^{25}Mg$ ,  $^{26}Mg$ ). Процентное соотношение между изотопами близко к их составу в природе.

Так же как в экспериментах по исследованию оптического спектра дуговой плазмы [10, 14, 15], в области давлений в единицы паскалей в плазме доминируют ионы материала катода. При этом, как и в области давлений, менее 1 Па [16—18], доля ионов остаточного газа не превышает единиц процентов (рис. 3). Аналогично [14, 15], по мере увеличения давления газа в ионном спектре

наблюдалось заметное уменьшение ионов металла. Однако в отличие от этих работ, с уменьшением содержания ионов металлов наблюдалось соответствующее увеличение доли ионов рабочего газа. Обратим внимание на тот факт, что, в отличие от [9], эффективная генерация ионов газа происходила без использования магнитного поля, а, в отличие от [17], ионы газа наблюдались во всем исследуемом диапазоне давлений. При напуске в вакуумную камеру более тяжелого газа ( $Ar$ ) значительное превалирование доли ионов газа над ионами металла наблюдалось уже при давлении 10 Па, а при давлении выше 18 Па в спектрах присутствовали только ионы напускаемого газа. Замена аргона на более легкий гелий обеспечивает одновременное содержание в плазме ионов газов и металлов вплоть до давления 25 Па. В то же время следует учесть, что ионы металла появляются преимущественно в катодном пятне, в то время как возникновение газовых ионов возможно в любой области плазмы.

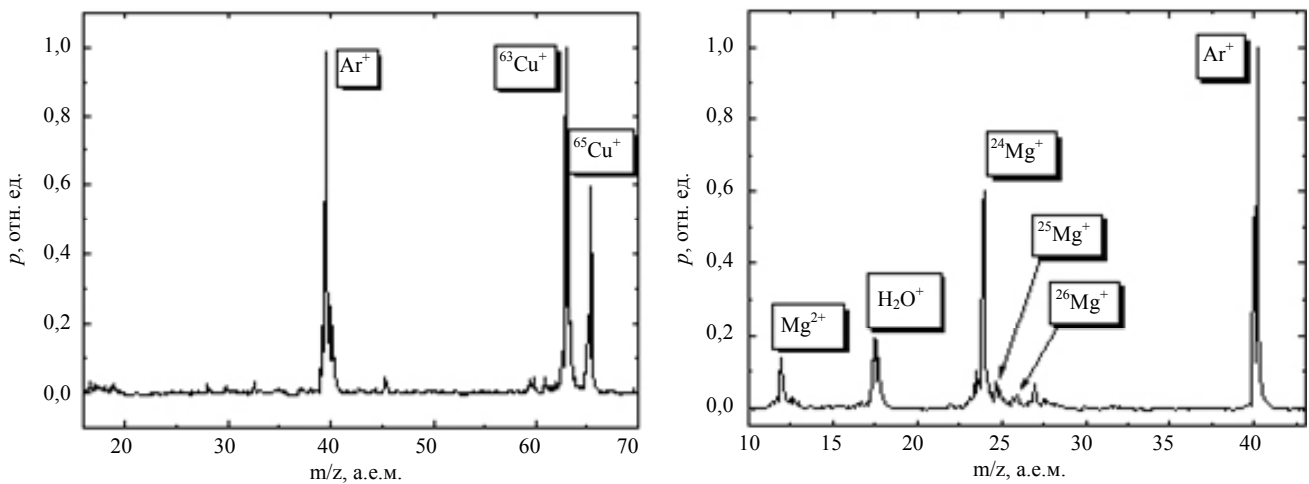


Рис. 2. Масс-спектры ионов плазмы дугового разряда. Материал катода: слева — медь, справа — магний; рабочий газ — аргон

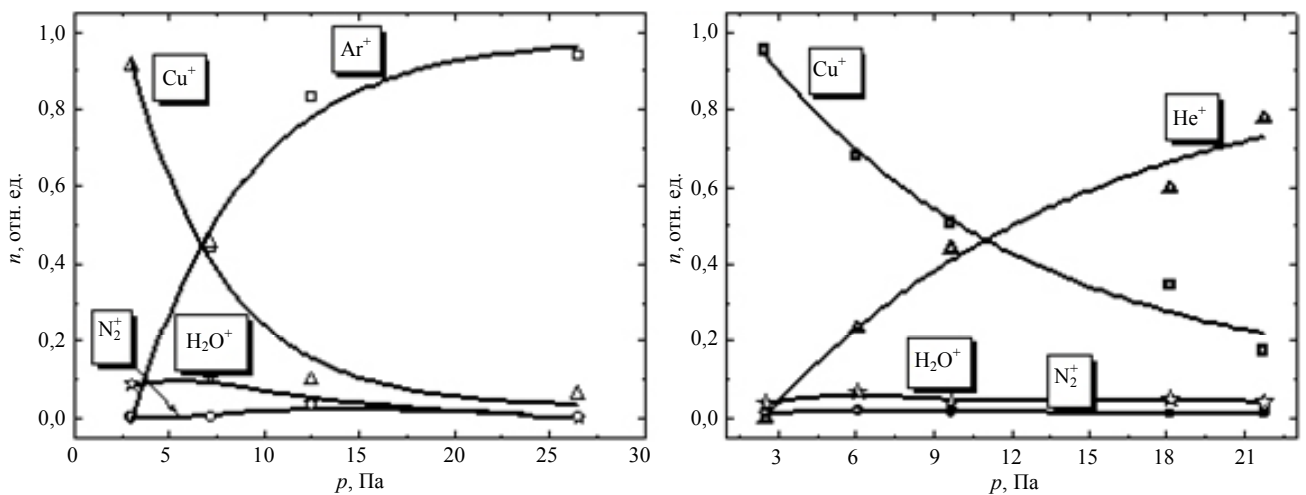


Рис. 3. Влияние давления рабочего газа на долю металлических и газовых ионов в плазме дугового разряда для различных газов,  $I_d = 30 A$

На соотношение газового и металлического компонентов плазмы существенное влияние оказывает при прочих равных условиях и ток разряда (рис. 4). С увеличением тока разряда наблюдается рост доли металлического компонента плазмы и уменьшение доли газовых ионов. Причем доля ионов металла при определенных условиях может значительно превышать долю ионов газа даже в области больших давлений (более 10 Па), что обуславливается увеличением локальной температуры катода, а, следовательно, и его эффективного испарения с дальнейшим образованием однократно ионизованных атомов материала катода [16].

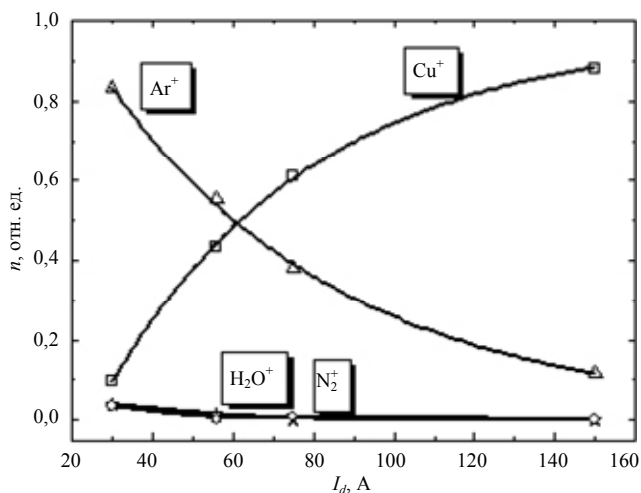


Рис. 4. Влияние тока разряда на долю металлических и газовых ионов в плазме дугового разряда,  $p = 12$  Па

### Заключение

Электрометрические исследования масс зарядового состава ионов в плазме импульсной дуги, функционирующей в форвакуумной области давлений, подтвердили ранее полученные результаты измерений этой плазмы оптическими методами. Кроме этого, данный подход позволил определить количественные соотношения долевого состава ионов плазмы с более высокой точностью. При горении дуги в форвакуумной области давлений ионы газа наблюдаются без использования магнитного поля и при определенных условиях их доля

может достигать 100 %. Отмеченные особенности характерны для форвакуумного диапазона давлений. Результаты проведенных исследований позволяют более обоснованно подходить к выбору режимов горения импульсной дуги в форвакуумных плазменных источниках широкоапертурных электронных пучков.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 14-08-00047 и Минобрнауки № 3.49.2014/К.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бугаев С. П., Крейнделъ Ю. Е., Щанин П. М. Электронные пучки большого сечения. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Manheimer W. M., Fernster R. F., Lampe M., et al. // Plasma Sources Sci. Technol. 2000. V. 9. P. 370.
3. Oks E., Burdovitsin V., Medovnik A., et al. // Review of Scientific Instruments. 2013. V. 84. Issue 2. P. 023301.
4. Бурдовицин В. А., Климов А. С., Окс Е. М. // Письма в ЖТФ. 2009. Вып. 11. С. 61.
5. Казаков А. В., Смаилов А. С., Бурдовицин В. А. и др. // Доклады ТУСУРа. 2014. № 4 (34). С. 56.
6. Казаков А. В., Бурдовицин В. А., Медовник А. В. и др. // ПТЭ. 2013. № 6. С. 1.
7. Юшков Ю. Г., Бурдовицин В. А., Медовник А. В. и др. // ПТЭ. 2011. № 2. С. 85.
8. Spadtke P., Emig H., Wolf B. H., et al. // Review of Scientific Instruments. 1994. V. 65. № 10. P. 3113.
9. Николаев А. Г., Окс Е. М., Юшков Г. Ю. // ЖТФ. 1998. Т. 68. № 9. С. 24.
10. Казаков А. В., Бурдовицин В. А., Медовник А. В. и др. // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 2. С. 55.
11. Tyunkov A. V., Yushkov Yu. G., Zolotukhin D. B., et al. // Physics of Plasma. 2014. V. 21. P. 123115.
12. Gavrilov N. V., Mesyats G. A., Nikulin S. P., et al. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1996. V. 14. No. 3. P. 1050.
13. Gavrilov N. V., Bureyev O. A. / Proc. of 16<sup>th</sup> International Symposium on High-Current Electronics. 2010. P. 35.
14. Sakaki M., Sakakibara T. // IEEE Transactions on Plasma Science. 1991. V. 19. No. 1. P. 25.
15. Sakaki M., Sakakibara T. // IEEE Transactions on Plasma Science. 1994. V. 22. No. 6. P. 1049.
16. Аксенов И. И., Аксенов Д. С., Белоус В. А. Техника осаждения вакуумно-дуговых покрытий. — Харьков: ННЦ ХФТИ, 2014.
17. Nikolaev A. G., Savkin K. P., Yushkov G. Yu. et al. // Review of Scientific Instruments. 2014. V. 85. P. 02B501.
18. Martin P. J. et al. // Thin Solid Films. 1987. V. 153. P. 91.

## Mass-to-charge ion composition of arc discharge plasma in a forevacuum wide-aperture electron source

A. V. Tyunkov, V. A. Burdovitsin, A. V. Kazakov, A. V. Medovnik, and E. M. Oks

Tomsk State University of Control System and Radioelectronics  
40 Lenin av., Tomsk, 634050, Russia  
E-mail: andrew71@sibmail.com

Received July 2, 2015

**Research of mass- spectrum of ion composition in the plasma of pulsed arc discharge operating in the fore-vacuum plasma broad electron beam source is presented. It is shown that the working gas pressure and the discharge current considerably effect on the ratio of metal ions (cathode material) and gas ions in the discharge plasma. In the fore-vacuum pressure range, there is significant part of the gas ions in the discharge plasma. These gas ions appear without an application of a magnetic field, and under special conditions, almost only gas ions are detected in the arc discharge plasma.**

PACS: 29.25.-t, 52.70.-m

**Keywords:** mass-to-charge composition, pulse arc discharge, forevacuum range of pressure, wide-aperture electron source.

### REFERENCES

1. S. P. Bugaev, Yu. E. Kreindel', P. M. Shchanin, *Wide-Aperture Electron Beams* (Energoatomizdat, Moscow, 1984) [in Russian].
2. W. M. Manheimer, R. F. Fernsler, M. Lampe, et al., *Plasma Sources Sci. Technol.* **9**, 370 (2000).
3. E. Oks, V. Burdovitsin, A. Medovnik, et al., *Review of Scientific Instruments* **84**, 023301 (2013).
4. V. A. Burdovitsin, A. S. Klimov, and E. M. Oks, *Tech. Phys. Lett.* No. 11, 61 (2009).
5. A. V. Kazakov, A. S. Smailov, V. A. Burdovitsin, et al., *Dokl. TUSUR*, No. 4 (34), 56 (2014).
6. A. V. Kazakov, V. A. Burdovitsin, A. V. Medovnik, et al., *Instrum. Exp. Tech.*, No. 6, 1 (2013).
7. Yu. G. Yushkov, V. A. Burdovitsin, A. V. Medovnik, et al., *Instrum. Exp. Tech.*, No. 2, 85 (2011).
8. P. Spadtke, H. Emig, B. H. Wolf, et al., *Review of Scientific Instruments* **65**, 3113 (1994).
9. A. G. Nikolaev, E. M. Oks, and Yu. G. Yushkov, *Tech. Phys.* **68** (9), 24 (1998).
10. A. V. Kazakov, V. A. Burdovitsin, A. V. Medovnik, et al., *Tech. Phys.* **85** (2), 55 (2015).
11. A. V. Tyunkov, Yu. G. Yushkov, D. B. Zolotukhin, et al., *Physics of Plasma* **21**, 123115 (2014).
12. N. V. Gavrilov, G. A. Mesyats, S. P. Nikulin, et al., *J. Vac. Sci. Technol. A.* **14**, 1050 (1996).
13. N. V. Gavrilov and O. A. Bureyev, in *Proc. 16<sup>th</sup> International Symposium on High-Current Electronics* (2010). P. 35.
14. M. Sakaki and T. Sakakibara, *IEEE Transactions on Plasma Science* **19**, 25 (1991).
15. M. Sakaki and T. Sakakibara, *IEEE Transactions on Plasma Science* **22**, 1049 (1994).
16. I. I. Aksenov, D. S. Aksenov, and V. A. Belous, *Methods of Deposition of the Vacuum-Arc Layers* (KhFTI, Kharlov, 2014) [in Russian].
17. A. G. Nikolaev, K. P. Savkin, G. Yu. Yushkov, et al., *Review of Scientific Instruments* **85**, 02B501 (2014).
18. P. J. Martin et al., *Thin Solid Films* **153**, 91 (1987).