

Физическая аппаратура и её элементы

УДК 533.9.082.74

Мониторинг масс-зарядового состава пучковой плазмы модернизированным квадрупольным анализатором в форвакуумной области давлений

А. В. Тюньков, Ю. Г. Юшков, А. С. Климов

Представлена конструкция и принцип работы модернизированного квадрупольного анализатора остаточной атмосферы. Модернизация анализатора заключалась в замене ионизатора устройства на извлекающий ионы узел. Учитывая особенности генерации пучковой плазмы и специфику форвакуумного диапазона давлений данная замена в сочетании с подачей на коллектор электронного пучка положительного относительно земли потенциала позволила проводить мониторинг масс-зарядового состава такой плазмы. Показаны результаты исследований масс-зарядового состава ионов пучковой плазмы различных газов, генерируемой непрерывным электронным пучком с током порядка 30 мА при давлении в области его распространения до 10 Па. Установлено, что в пучковой плазме генерируемой форвакуумным электронным источником наблюдаются только однократно ионизированные атомы напускаемых и остаточных газов независимо от энергии и тока электронного пучка.

PACS: 52.70.Ds

Ключевые слова: плазменный источник электронов, форвакуумная область давлений, диагностика пучковой плазмы, масс-зарядовый состав ионов плазмы.

Введение

Измерение масс-зарядового состава ионов плазмы, создаваемой электронным пучком в форвакуумной области давлений (1—100 Па) [1], имеет важное практическое значение, поскольку такая плазма может являться универсальным и эффективным «инструментом» для осуществления процессов обработки поверхности [2] или реализации разнообразных плазмохимических реакций.

Вместе с тем, масс-спектрометрические измерения пучковой плазмы в указанных условиях имеют свою специфику. Длина свободного пробега ионов плазмы составляет единицы миллимет-

ров. Именно поэтому применение стандартного масс-спектрометрического оборудования для измерения состава такой плазмы затруднено.

Для исследования масс-зарядового состава ионов пучковой плазмы и измерения ее параметров в форвакуумной области давлений ранее нами был создан инверсный времяпролетный спектрометр [3]. Несмотря на ряд преимуществ времяпролетной методики, использование такого спектрометра для исследования пучковой плазмы в форвакуумной области давлений не позволило достичь необходимого разрешения по изотопам отдельных элементов, либо разделения элементов, отличающихся на 1 а.е.м. [4].

В настоящее время квадрупольный масс-спектрометр остается наиболее универсальным и широко используемым анализатором остаточного газа. Траектории ионов в полях анализатора имеют колебательный характер, что позволяет при ограниченных размерах масс-анализаторов удерживать их в рабочем объеме достаточно длительное время. Это существенно сокращает массогабаритные параметры устройства и обеспечивает высокую разрешающую способность [5]. Кроме использования его в качестве анализатора остаточных газов и обнаружения течей, квадруполь-

Тюньков Андрей Владимирович, доцент¹.

Юшков Юрий Георгиевич, научный сотрудник^{1,2}.

Климов Александр Сергеевич, ст. научный сотрудник¹.

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

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

Тел. 8 (905) 990-52-41. E-mail: klimov@main.tusur.ru

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Статья поступила в редакцию 28 октября 2015 г.

© Тюньков А. В., Юшков Ю. Г., Климов А. С., 2016

ный масс-спектрометр широко применяется для исследования плазмы как самостоятельно [6], так и в составе энергоанализаторов типа HIDEN [7].

Цель данной работы заключалась в модификации квадрупольного анализатора для обеспечения возможности измерения масс-зарядового состава ионов плазмы, создаваемой электронным пучком в форвакуумной области давлений (1—10 Па).

Квадрупольный масс-анализатор

Внешний вид спектрометра и схема всей экспериментальной установки представлены на рис. 1 и 2 соответственно.



Рис. 1. Внешний вид модифицированного масс-анализатора.

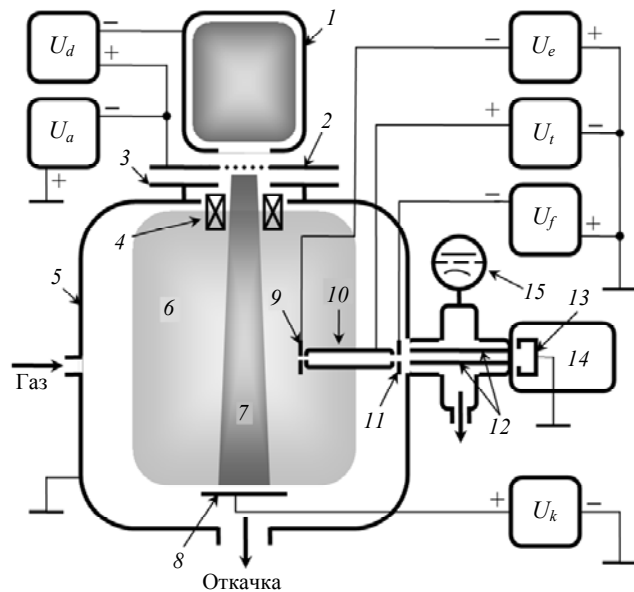


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 — полый катод, 2 — анод с перфорированным электродом, 3 — ускоряющий электрод, 4 — фокусирующая система, 5 — вакуумная камера, 6 — пучковая плазма, 7 — пучок электронов, 8 — коллектор, 9 — извлекающий электрод, 10 — труба дрейфа, 11 — фокусирующий электрод, 12 — квадрупольные стержни фильтра масс, 13 — цилиндр Фарадея, 14 — блок управления анализатором, 15 — ионизационная лампа. Источники питания: U_d — разряда с полым катодом, U_a — ускоряющего напряжения, U_e — извлекающего электрода, U_i — трубы дрейфа, U_f — фокусирующего электрода, U_k — коллектора.

Система регистрации ионов представляет собой модифицированный квадрупольный масс-анализатор RGA-100, в состав которого входит (см. рис. 2) система извлечения (электроды 9—11), фильтр масс 12, блок управления 14, ионизационная лампа 15, стационарная система откачки, включающая в себя диафрагменный и турбомолекулярные насосы. Модернизация анализатора заключалась в демонтаже ионизатора с последующим замещением его на извлекающий ионы узел, который представляет собой трехэлектродную систему извлечения 9—11. Модернизация анализатора остаточной атмосферы позволяет, в отличие от исходной конструкции, извлекать и анализировать ионы непосредственно из пучковой плазмы без потери разрешающей способности исходного устройства.

Первым электродом системы является извлекающий электрод 9, представляющий собой диск толщиной 2 мм с апертурой $\varnothing 0,7$ мм в центральной части, обеспечивающий перепад давления между вакуумной камерой и откачиваемым объемом масс-анализатора. Данное конструктивное решение обусловлено необходимостью поддержания давления в откачиваемом объеме спектрометра на уровне, не превышающем $1 \cdot 10^{-2}$ Па для нормальной работы устройства, тогда как в вакуумной камере давление, как правило, на 2—3 порядка выше. Размещается извлекающий электрод непосредственно в области генерации плазмы. Труба дрейфа 10 размещается в центральной части извлекающего узла. Длина электрода составляет 160 мм, внешний и внутренний диаметр 16 и 10 мм соответственно. Поскольку давление внутри вакуумной камеры достаточно высоко для транспортировки ионов без перезарядки, то данный откачиваемый до высокого вакуума электрод в первую очередь предназначен для транспортировки ионного потока из области генерации плазмы в область масс-фильтра 12 и цилиндра Фарадея. Фокусирующий электрод 11 установлен за электродом 10 и является заключительным элементом извлекающего узла. В центральной части пластины выполнено отверстие диаметром 5 мм, служащее для транспортировки ионов в область фильтрации спектрометра 12. Поскольку давление в области транспортировки и фильтрации ионов является ключевым фактором, влияющим на разрешающую способность прибора, то во время экспериментов контроль за давлением внутри анализатора осуществляется по показаниям ионизационной лампы 15.

Поскольку цилиндр Фарадея 13 находится под потенциалом земли, то коллектор 8 помещается под положительный относительно земли потенциал величиной $U_k = 30$ В, в результате чего возникает градиент потенциала между коллекто-

ром и цилиндром Фарадея спектрометра, направляющий ионный поток к месту регистрации. Для направления ионного потока в область сепарации на извлекающий электрод 9 подается отрицательный относительно земли потенциал, не превышающий $U_e = -30$ В. Труба дрейфа 10 находится под небольшим положительным потенциалом $U_t = 2,5$ В для фокусировки ионного потока на оси системы. Ионы, извлекаемые из плазмы отрицательным потенциалом извлекающего электрода, дополнительно ускоряются в поле, созданном разностью потенциалов между электродами 9 и 11 (потенциал фокусирующего электрода относительно земли $U_f = -60$ В), и направляются в сепарирующую часть спектрометра (область квадрупольных стержней). Потенциалы стержней задаются автоматически и программировались заводом-изготовителем. Потенциалы на электродах извлекающего узла и коллектора являются оптимальными с точки зрения величины амплитуды сигнала.

Применение масс-анализатора для исследования пучковой плазмы

Объектом исследования масс-зарядового состава ионов являлась пучковая плазма, генерируемая плазменным электронным источником (рис. 2) на основе тлеющего разряда с полым ка-

тодом [8]. Рабочий диапазон давлений электронного источника лежит в интервале 5—20 Па. В зависимости от рода газа напряжение тлеющего разряда U_d с полым катодом составляло 300—500 В при токе разряда $I_d = 130$ —200 мА. В экспериментах ток пучка составлял $I_a = 30$ мА, а энергия электронов, задаваемая ускоряющим напряжением U_a — 3 кэВ. Давление газа в области генерации плазмы составляло 2—10 Па, внутри масс-фильтра спектрометра — не более $1 \cdot 10^{-2}$ Па. В качестве рабочих газов использовались азот, кислород, воздух. Характерные спектры масс-зарядового состава ионов пучковой плазмы соответствующих газов представлены на (рис. 3).

Представленные спектры свидетельствуют о возможности детального анализа пучковой плазмы различных газов. При напуске азота и кислорода в спектре регистрируются как атомарный азот и кислород, так и молекулярный, причем соотношение между пиками меняется в зависимости от энергии и тока пучка. Наличие в спектрах пика воды наибольшей амплитуды связано с диапазоном рабочих давлений. Скорости форвакуумного насоса недостаточно для устранения паров воды даже при длительной откачке. Ситуация меняется когда производится напуск газов, способных реагировать с водой при зажигании плазмы. При напуске кислорода преобладают пики напускаемого газа.

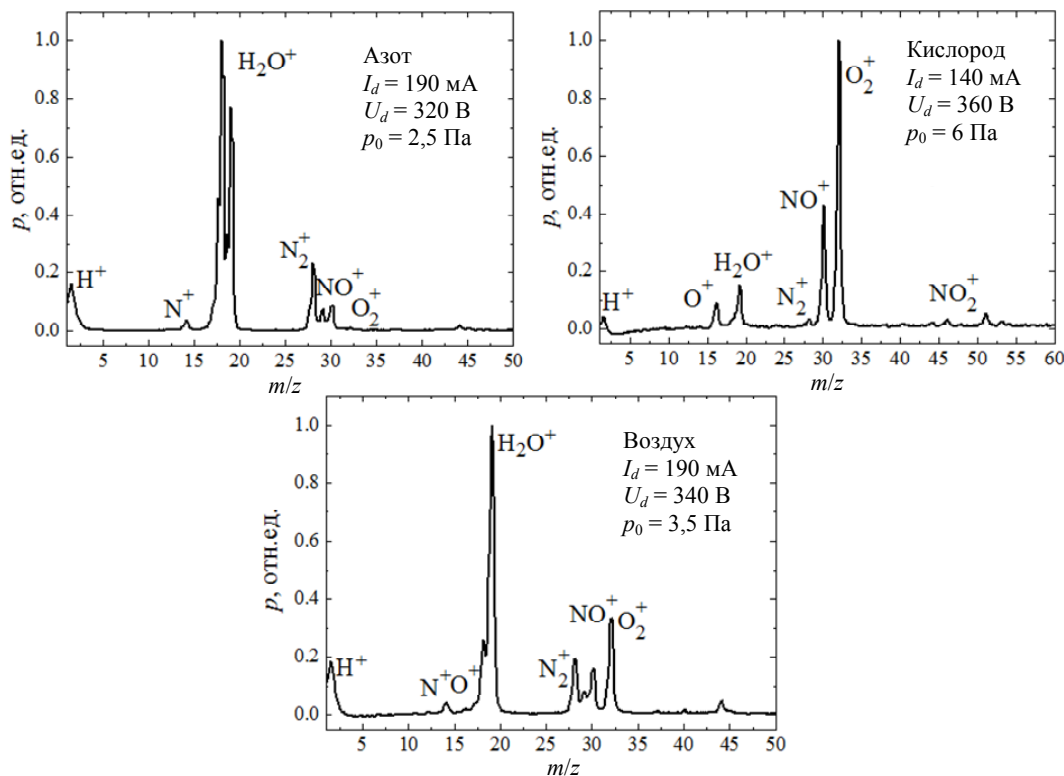


Рис. 3. Масс-спектры ионов пучковой плазмы.

Заклучение

Проведенные измерения масс-зарядового состава ионов пучковой плазмы показали, что модифицированная конструкция квадрупольного анализатора остаточной атмосферы RGA-100 позволяет проводить детальный масс-зарядовый анализ ионов пучковой плазмы основных газов, применяемых в работе электронного форвакуумного источника. Кроме этого, устройство способно различать и изотопы металлов. Стоит заметить, что конструкция спектрометра позволяет без каких-либо изменений проводить измерения масс-зарядового состава ионов плазмы, генерируемой в области более высокого вакуума.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 14-08-31090 мол_а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Burdovitsin V. A., Oks E. M. // Laser and Particle Beams. 2008. No. 04. P. 619.
2. Бурдовицин В. А., Окс Е. М., Скробов Е. В. и др. // Перспективные материалы. 2011. № 6. С. 1.
3. Gushenets V. I., Vizir A. V., Tyunkov A. V., et al. // Rev. Sci. Instrum. 2014. Vol. 85. P. 02A738.
4. Yushkov Yu. G., Oks E. M., Tyunkov A. V., et al. // Rev. Sci. Instrum. 2014. Vol. 85. P. 083306.
5. Пауль В. // Успехи физических наук. 1990. Т. 160. № 12. С. 109.
6. Paternoster C., Zhirkov I., Delplancke-Ogletree M. // Surface & Coatings Technology. 2013. Vol. 227. P. 42.
7. Соловьев А. А., Сочугов Н. С., Оскомов К. В. и др. // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 5. С. 443.
8. Бурдовицин В. А., Жирков И. С., Окс Е. М. и др. // ПТЭ. 2005. № 6. С. 66.

Monitoring the mass-charge spectrum of a beam plasma by means of the modernized quadrupole analyzer in the forevacuum pressure range

A. V. Tyunkov¹, Yu. G. Yushkov^{1,2}, and A. S. Klimov¹

¹ Tomsk State University of Control System and Radioelectronics
40 Lenin av. Tomsk, 634050, Russia
E-mail: klimov@main.tusur.ru

² National Research Tomsk Polytechnic University
30 Lenin av. Tomsk, 634050, Russia

Received October 28, 2015

The design and operation of the modernized quadrupole analyzer of a residual atmosphere are presented. Modernization of the analyzer was made by replace the ionizer device on extracting ions node and applying a positive potential on the electron beam collector. Taking into consideration the characteristics of the beam plasma generation and specificity of forevacuum pressure range, this replacement allows monitoring the mass charge composition of such plasma. Presented are the results of investigations of mass-charge composition of ion beam plasma of various gases generated by the continuous electron beam with a current of about 30 mA at a pressure in its distribution up to 10 Pa. It was found that in the beam plasma generated by an electron beam at forevacuum pressure range have been observed only once ionized atoms of residual and the injection gases independently of the energy and the electron beam current.

PACS: 52.70.Ds

Keywords: plasma electron source, forevacuum pressure range, beam plasma diagnostic, mass charge spectrum of the plasma ions.

REFERENCES

1. V. A. Burdovitsin and E. M. Oks, Laser and Particle Beams, No. 04, 619 (2008).
2. V. A. Burdovitsin, E. M. Oks, E. V. Scrobov, et al., Perspekt. Materialy, No. 6, 1 (2011).
3. V. I. Gushenets, A. V. Vizir, A. V. Tyunkov, et al., Rev. Sci. Instrum. **85**, 02A738 (2014).
4. Yu. G. Yushkov, E. M. Oks, A. V. Tyunkov, et al., Rev. Sci. Instrum. **85**, 083306 (2014).
5. V. Paul, Phys. Usp. **160** (12), 109 (1990).
6. C. Paternoster, I. Zhirkov, and M. Delplancke-Ogletree, Surface & Coatings Technology. **227**, 42 (2013).
7. A. A. Solov'ev, N. S. Sychugov, K. V. Oskomov, et al., Plasma Phys. Rep. **35**, 443 (2009).
8. V. A. Burdovitsin, I. S. Zhirkov, E. M. Oks, et al., Instrum. Exp. Tech., No. 6, 66 (2005).