

04;09;10;12

## Генерация многозарядных ионов тугоплавких металлов в электронно-циклотронном резонансном разряде в прямой магнитной ловушке

© А.В. Водопьянов,<sup>1</sup> С.В. Голубев,<sup>1</sup> Д.А. Мансфельд,<sup>1</sup> А.Г. Николаев,<sup>2</sup> Е.М. Окс,<sup>2</sup> С.В. Разин,<sup>1</sup>  
К.П. Савкин,<sup>2</sup> Г.Ю. Юшков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН,  
603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055 Томск, Россия  
e-mail: avod@appl.sci-nnov.ru

(Поступило в Редакцию 15 декабря 2004 г.)

Продемонстрирована возможность дополнительной ионизации ионов тугоплавких металлов плазмы вакуумной дуги, инжектируемой в магнитную ловушку, за счет дополнительного нагрева электронов СВЧ излучением в условиях электронно-циклотронного резонанса. Использование в экспериментах мощного коротковолнового электромагнитного излучения гиротронов позволило работать с большой (порядка  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ) концентрацией плазмы и обеспечить параметр удержания на уровне  $3 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}$  при достаточной для многократной ионизации температуре электронов.

### Введение

Ряд задач дальнейшего развития ядерной и атомной физики, таких, например, как синтез новых химических элементов, требует вследствие высокого энергетического порога ядерных реакций и низкого сечения процесса этих реакций создания сильноточных пучков многозарядных ионов тяжелых элементов. Поскольку энергия ускоренных ионов возрастает с увеличением их заряда, а выход ядерных реакций пропорционален току пучка этих ионов, то проблема синтеза новых элементов напрямую связана с развитием сильноточных источников многозарядных ионов тяжелых элементов. Использование в ионных источниках электронно-циклотронного резонансного (ЭЦР) разряда в магнитной ловушке позволило обеспечить генерацию пучков ионов газов со значительным током и высокой средней зарядностью. Так, в работе [1] был продемонстрирован пучок  $\text{Xe}^{20+}$  с током 0.6 mA.

ЭЦР источники многозарядных ионов способны обеспечить генерацию пучков ионов газа, но все элементы периодической системы тяжелее ксенона в нормальных условиях находятся в твердом агрегатном состоянии. Тем не менее в целом ряде ЭЦР источников получены многозарядные ионы более тяжелых элементов [1], которые в нормальных условиях находятся в твердом состоянии, но обладают сравнительно низкими температурами плавления и кипения. При этом для ввода нейтральных атомов в ЭЦР источник используются различные тигли, в которых рабочее вещество нагревается и испаряется. ЭЦР пробой в этой ситуации происходит в парах металла практически так же, как и в случае работы с газами. Существенным недостатком этой схемы является трудность работы с тугоплавкими элементами (с температурами плавления более 1500 градусов).

С точки зрения получения многозарядных ионов тугоплавких металлов необходимо обеспечить локальное испарение материала, которое может быть реализовано под действием мощного импульса лазерного излучения [2] или при использовании вакуумного дугового разряда с катодным пятном [3]. Использование вакуумного дугового разряда в данном случае представляется наиболее целесообразным из-за его простоты и эффективности. Источники плазмы на основе вакуумной дуги могут обеспечивать генерацию пучков ионов металлов с током до нескольких ампер как в импульсном, так и в непрерывном режиме работы [3]. Ионный состав плазмы определяется материалом катода, который может быть выполнен из любого проводящего, в том числе и тугоплавкого, материала. Средний заряд ионов в плазме такого источника составляет 1.5–2 для широкого диапазона материалов катода [3]. С помощью специальных методов, таких как наложение магнитного поля на прикатодную область, подача дополнительных импульсов тока дугового разряда, инжекция в плазму вакуумной дуги электронного пучка, возможно повышение среднего заряда ионов, однако увеличение средней зарядности ионов происходит при этом только в 2 раза [4,5].

Логичной представляется идея использования вакуумно-дугового плазмогенератора для инжекции плазмы тугоплавких металлов в ЭЦР источник с целью дальнейшего повышения кратности ионизации металлических ионов в магнитной ловушке при нагреве электронов на электронно-циклотронном резонансе с волной накачки.

Ранее были предприняты попытки инжекции плазмы вакуумной дуги в разрядную систему на основе ЭЦР [6,7], но существенного эффекта дополнительной обдирки ионов плазмы вакуумной дуги в этих работах достигнуто не было. Это было связано, на наш взгляд, с

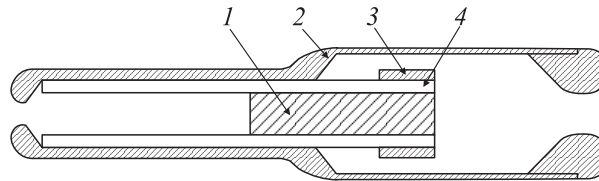
тем, что параметр удержания  $N_e \tau_i$  ( $N_e$  — концентрация электронов,  $\tau_i$  — время жизни ионов в ловушке), определяющий возможность образования многозарядных ионов, не достигал необходимого для многократной ионизации значения. Действительно, для нагрева плазмы в указанных работах использовались традиционные для ЭЦР источники многозарядных ионов генераторы СВЧ излучения с длинами волн сантиметрового диапазона. Соответственно концентрация электронов  $N_e$  в этих экспериментах не превышала  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$  [8,9].

При инжекции плазмы вакуумной дуги в магнитную ловушку время жизни ионов в ней оказывается относительно невелико. Дело в том, что торможение плазменной струи или захват ионов вакуумно-дугового разряда в магнитную ловушку является трудноразрешимой задачей и  $\tau_i$ , по-видимому, определяется размером ловушки и скоростью потока плазмы, истекающей из вакуумно-дугового разряда. Поскольку скорость потока ионов приблизительно равна  $10^6 \text{ cm/s}$  [3], то параметр удержания  $N_e \tau_i$  для 100-сантиметровой ловушки в экспериментах, описанных в предыдущих работах [6,7], не превышал  $10^8 \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}$ , а этого значения параметра удержания явно недостаточно для образования многозарядных ионов [10]. По-видимому, именно этот факт был ответствен за отсутствие заметного увеличения зарядности ионов в экспериментах, представленных в работах [6,7]. Вместе с тем время жизни ионов в магнитной ловушке в традиционных ЭЦР источниках при работе с газами достигает нескольких миллисекунд, а значение параметра удержания превышает  $10^9 \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}$ .

Настоящая работа посвящена исследованию генерации многозарядных ионов тугоплавких металлов в плазме с существенно большей плотностью, что достигается как за счет использования более мощного, до 100 kW, гиротрона, так и за счет более коротковолнового,  $f = 37.5 \text{ GHz}$ , излучения. Отметим, что для поддержания на оптимальном для образования многозарядных ионов уровне температуры электронов в разряде необходима, согласно оценкам, проведенным по методике работы [11], интенсивность СВЧ излучения на уровне десятков  $\text{kW/cm}^2$ . Достижение такой интенсивности вполне реально при использовании современных гиротронов [12].

## 1. Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на экспериментальном стенде в Институте прикладной физики РАН. Для исследований дополнительной ионизации многозарядных ионов металлов вакуумно-дугового разряда в магнитной ловушке с нагревом электронов в условиях ЭЦР в Институте сильноточной электроники СО РАН был изготовлен специальный миниатюрный плазмогенератор, конструкция которого схематично показана на рис. 1. Вакуумно-дуговой разряд, инициируемый вспомогательным разрядом по поверхности диэлектрика, генерирует



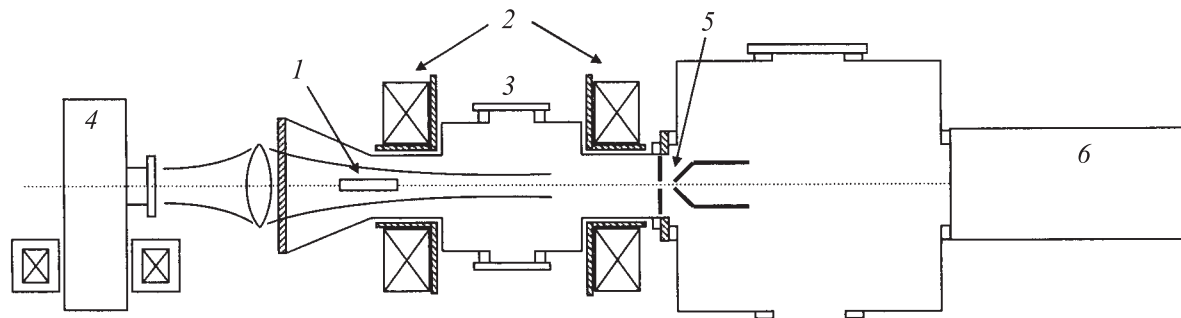
**Рис. 1.** Схема вакуумно-дугового плазмогенератора: 1 — катод, 2 — полый анод, 3 — поджигающий электрод, 4 — керамический изолятор.

плазму материала катода 1, которая заполняет полый анод 2. Катод изготовлен из платины. В качестве диэлектрика использована тонкая керамическая трубка 4, которая размещается между катодом 1 и анодом вспомогательного разряда 3. При межэлектродном расстоянии вспомогательного разряда  $\sim 1 \text{ mm}$  для возбуждения катодных пятен и инициирования вакуумной дуги достаточно приложения между катодом и поджигающим электродом импульса напряжения величиной 7 kV и длительностью 10–30  $\mu\text{s}$ .

Общая схема установки приведена на рис. 2. Плазмогенератор 1 устанавливался на оси системы вблизи одной из пробок магнитной ловушки, образуемой двумя катушками 2. Источник питания генератора плазмы обеспечивал импульс тока дугового разряда длительностью  $\sim 100 \mu\text{s}$ , а величина тока могла варьироваться от 80 А до 3 кА. Источник питания был помещен на высоковольтную платформу, так как на анод плазмогенератора, соединенный с разрядной камерой, подавалось ускоряющее ионы напряжение до 10 kV. Разрядная вакуумная камера 3, помещенная внутри магнитной ловушки, имела тефлоновое окно, через которое излучение гиротрона 4 вводилось в область разряда (частота излучения 37.5 GHz, мощность до 100 kW, длительность импульса 1.5 ms). СВЧ излучение, взаимодействуя с электронами плазмы в условиях ЭЦР, значительно увеличивало их энергию, что в свою очередь приводило к дополнительной ионизации ионов электронным ударом. На расстоянии 14 см за второй пробкой магнитной ловушки был установлен двухэлектродный экстрактор 5, предназначенный для ускорения ионов. Сформированный ионный пучок поступал в магнитостатический анализатор 6, где осуществлялось измерение спектра ионов по зарядностям.

## 2. Оценка параметра удержания плазмы в магнитной ловушке

Одним из основных параметров, определяющих эффективность генерации многозарядных ионов в рассматриваемой системе, является скорость ионов плазмы вакуумно-дугового разряда. Эта скорость при фиксированном размере магнитной ловушки определяет время взаимодействия горячих электронов с ионами металла и



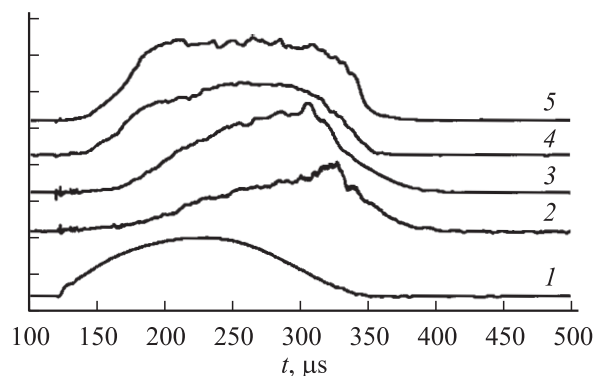
**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки: 1 — плазмогенератор; 2 — магнитная ловушка, длина 27 см, пробочное отношение 5, поле в пробках до 3 Т; 3 — разрядная вакуумная камера на высоковольтной платформе; 4 — гиротрон; 5 — двухэлектродный экстрактор, апертура 1 мм, напряжение экстракции до 10 кВ; 6 — магнитостатический анализатор ионных пучков, разрешение по параметру заряд/масса иона составляет 15–20.

соответственно кратность ионизации этих ионов. Другим важным параметром работы системы является концентрация плазмы, попадающей в магнитную ловушку из плазмогенератора. Для определения этих параметров были проведены предварительные эксперименты.

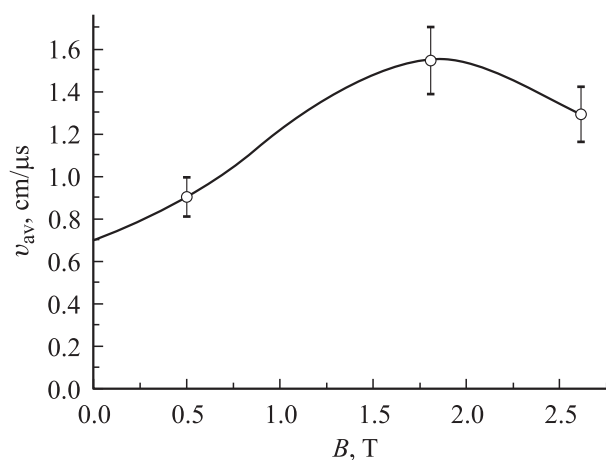
Известно, что наличие в катодной области вакуумно-дугового разряда магнитного поля приводит к росту напряжения горения разряда и соответственно скорости ионов, эмиттируемых катодными пятнами [13]. Оценка времени взаимодействия горячих электронов с плазмой вакуумно-дугового разряда осуществлялась на основании анализа осциллограмм токов экстракции при различных величинах магнитного поля ловушки (рис. 3), из которого следует, что при большей напряженности магнитного поля в области вакуумно-дугового разряда скорости ионов выше. Полученная из этих осциллограмм зависимость скоростей ионов от величины магнитного поля приведена на рис. 4. Как и в [13], в нашем эксперименте также было зафиксировано значительное увеличение напряжения горения вакуумной дуги с увеличением магнитного поля (рис. 5), что косвенно также свидетельствует об увеличении скорости ионов в плазменной струе, испускаемой катодными пятнами при горении вакуумно-дугового разряда. Как следует из проведенных измерений, влияние магнитного поля на напряжение горения вакуумной дуги и на скорость ионов в плазменной струе имеет тенденцию к насыщению при магнитных полях более 1.5 Т, поэтому для оценок можно считать среднюю скорость ионов платины  $V_{Pt} \approx 1.5 \cdot 10^6$  см/с. Таким образом, время взаимодействия ионов платины с горячими электронами в ловушке составляет  $\tau_i = L_{trap}/V_{Pt} \approx 18 \mu s$ , где  $L_{trap} = 27$  см — длина ловушки.

Оценить концентрацию плазмы вакуумно-дугового разряда в магнитной ловушке можно по абсолютной величине тока извлеченных из плазмы ионов. Так, при токе вакуумной дуги 115 ампер через отверстие плазменного электрода экстрактора диаметром  $d_{extr} = 1$  мм (т.е. через площадь  $S_{extr} = 7.8 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>) проходит ток  $I_{extr} = 2.5$  мА, следовательно, концентрация плазмы со-

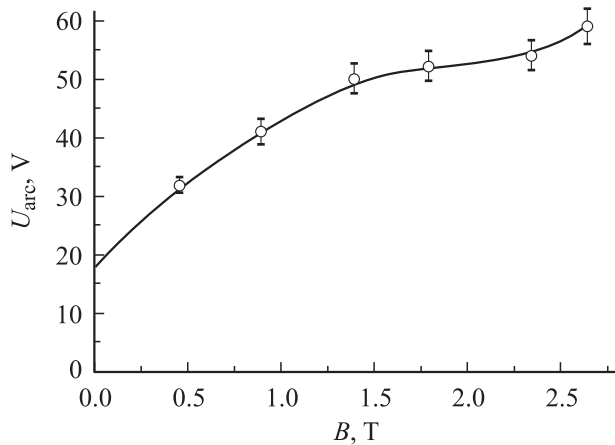
ставляет  $N_e \approx I_{extr}/(V_{Pt} \cdot e \cdot S_{extr}) \approx 1.3 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>, где  $e$  — заряд электрона. Если предположить, что распространение плазмы от плазмогенератора до экстрактора происходит только по силовым линиям магнитного поля,



**Рис. 3.** Осциллограммы: 1 — ток вакуумно-дугового разряда, 2–5 — токи экстракции ионов при магнитных полях 0, 1.5, 1.8, 2.6 Т в пробках магнитной ловушки соответственно. Величина тока дуги в максимуме составляет 150 А.



**Рис. 4.** Средняя скорость потока плазмы вакуумно-дугового разряда в зависимости от напряженности магнитного поля в пробках ловушки. Ток дуги 150 А.



**Рис. 5.** Напряжение горения дуги в зависимости от напряженности магнитного поля в пробках ловушки. Ток дуги 150 А.

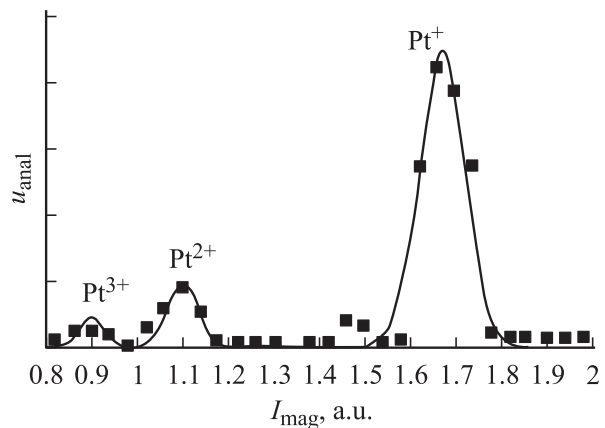
то концентрация плазмы в области пробок ловушки будет составлять  $N_e \approx 3.7 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ .

В то же время за счет изменения тока вакуумной дуги концентрация плазмы может изменяться в широких пределах. Если считать оптимальной для ЭЦР нагрева концентрацией критическую для частоты СВЧ излучения 37.5 GHz, равную  $1.7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , то параметр удержания  $N_e \cdot \tau_i \approx 3 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}$ . Такой параметр удержания ионов позволяет надеяться на существенную дополнительную ионизацию металлических ионов при условии, что температура электронов окажется достаточной.

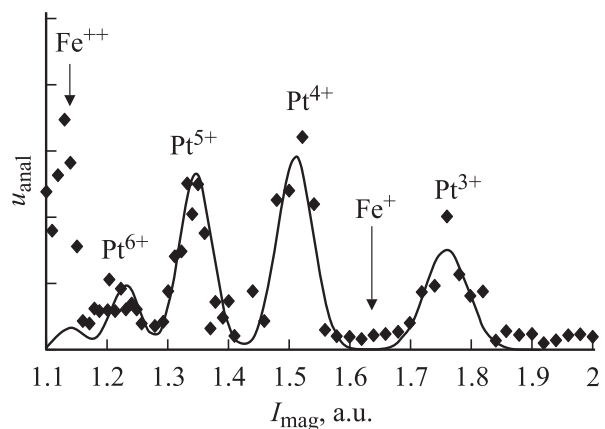
### 3. Генерация многозарядных ионов металлов в магнитной ловушке с нагревом электронов в условиях ЭЦР

Эксперименты по дополнительной ионизации ионов тугоплавких металлов плазмы вакуумно-дугового разряда в магнитной ловушке с нагревом электронов излучением гиротрона в условиях ЭЦР проводились с катодом, выполненным из платины. Температура плавления платины составляет  $1600^\circ\text{C}$ . Для регистрации распределения ионов по кратностям ионизации в системе устанавливался экстрактор и использовался анализатор ионного пучка. На разрядную камеру подавалось напряжение, обычно равное +3.5 kV. При таком значении ускоряющего напряжения разрешающая способность анализирующей системы,  $(q/m)/\Delta(q/m)$ , где  $q$  и  $m$  — заряд и масса иона соответственно, уже достаточно велика и составляет около 15. В то же время ионы исследуемых тяжелых элементов, начиная с заряда +3, остаются в рабочем диапазоне поворачивающего пучка электромагнита (максимальный ток электромагнита определяется возможностями стабилизированного источника постоянного тока).

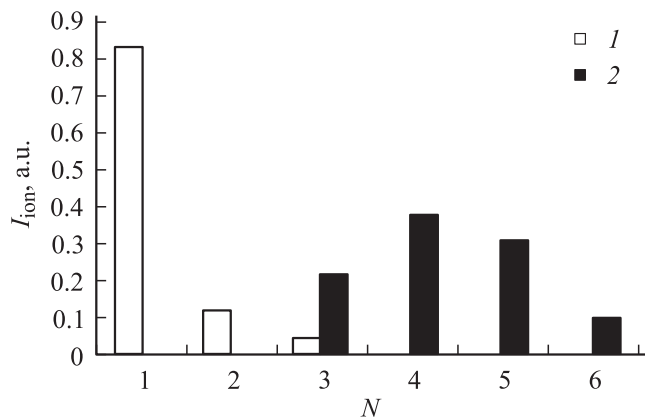
При проведении исследований осуществлялось варьирование следующих параметров: тока вакуумно-дугового разряда, величины магнитного поля ловушки и мощности СВЧ излучения. Распределение ионов платины по кратностям ионизации без СВЧ накачки приведено на рис. 6. Величина среднего заряда при этом составляет 1.2. Для того чтобы получить максимальный средний заряд ионов платины, в эксперименте с ЭЦР нагревом потребовалось уменьшить ток вакуумно-дугового разряда до минимально возможного значения и подобрать оптимальную СВЧ мощность. Максимальная средняя зарядность, равная 4.3 для ионов платины, была получена при токе вакуумной дуги 80 А, магнитном поле в пробках ловушки 2.6 Т и вводимой СВЧ мощности на уровне 60 kW (рис. 7). Для удобства сравнения на рис. 8 представлена гистограмма, на которой эти два спектра сведены вместе.



**Рис. 6.** Распределение по зарядовым состояниям ионов платины плазмы вакуумно-дугового разряда в магнитном поле ловушки. Ток дуги 140 А, магнитное поле в пробках ловушки 1.3 Т.



**Рис. 7.** Зарядовый спектр платины при оптимальных параметрах: ток вакуумной дуги — 80 А, магнитное поле в пробках ловушки — 2.6 Т, вводимая СВЧ мощность — 63 kW.



**Рис. 8.** Зарядовые спектры ионов платины плазмы вакуумно-дугового разряда. 1 — без СВЧ накачки, 2 — с СВЧ накачкой.  $N$  — кратность ионизации.

## Обсуждение

Нагрев электронов металлической плазмы СВЧ волной в условиях ЭЦР приводит к дополнительной обдирке ионов и к повышению концентрации плазмы. Как следует из проведенной выше оценки, плазмогенератор при токе дуги 115 А заполняет магнитную ловушку плазмой с концентрацией на уровне  $4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ , при этом удается добиться увеличения заряда ионов в 4 раза, причем во столько же раз увеличивается и концентрация электронов плазмы. В результате концентрация плазмы в ловушке может превосходить критическое значение, соответствующее частоте СВЧ накачки ( $1.7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ), при этом нагрев электронной компоненты плазмы происходит уже не так эффективно, как в случае с докритической плотностью [14]. Поэтому снижение тока вакуумно-дугового разряда до уровня 80 А является оптимальным для формирования многозарядных металлических ионов.

Увеличение мощности СВЧ накачки приводит, с одной стороны, к увеличению температуры электронов и улучшает тем самым условия образования многозарядных ионов. С другой стороны, разряд начинает развиваться во все более удаленных от оси областях магнитной ловушки, что в свою очередь приводит к сильному возрастанию концентрации плазмы за счет примесей, десорбированных со стенок вакуумной камеры, а это может приводить к понижению температуры электронов. Возможно, этим и объясняется существование в экспериментах оптимума по мощности СВЧ излучения.

Анализ масс-зарядовых спектров показывает, что в плазме присутствует довольно большое количество примесей. В основном это ионы (Fe, Ni, Cr) — составляющие нержавеющей стали, из которой был выполнен анод плазмогенератора, и газовые ионы (H, O, N). Ионы Fe, Ni, Cr попадают в плазму главным образом вследствие эрозии анода, а газы — из остаточной атмосферы за счет адсорбции на поверхности катода между импульсами

разряда вследствие относительно невысокой частоты следования разрядных импульсов [15], которая в экспериментах составляла  $1/20 \text{ s}^{-1}$ .

Вместе с тем достигнутое в эксперименте значение параметра удержания  $N_e \tau_i = 3 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$  приблизительно соответствует полученному максимальному среднему заряду ионов [10]. Плотность тока ионного пучка, который можно извлечь из такой плазмы, составляет  $J_e = e \cdot N_e \cdot V_{\text{Pl}} \approx 4 \text{ eA/cm}^2$ . На данный момент, по нашим данным, не существует источников, способных генерировать многозарядные ионы тугоплавких металлов с достигнутой в наших экспериментах кратностью ионизации, а плотность тока ионного пучка, который можно извлекать из такой плазмы, на несколько порядков превосходит существующие в настоящее время в источниках многозарядных ионов.

Данная работа была частично поддержана грантами РФФИ (№ 05-02-16256), АФГИР (№ ТО-016-02) и президента РФ (№ МД-148.2203.02).

## Список литературы

- [1] Thuillier T., Bouly J., Curdy J. et al. // Proc. 15<sup>th</sup> Intern. Workshop on ECR Ion Sources. Finland: Juvaskyla, 2002. P. 13–16.
- [2] Gammino S., Torrisi L., Giavola G. et al. // J. Appl. Phys. 2004. Vol. 96. N 5. P. 2961–2967.
- [3] Месяц Г.А., Баренгольц С.А. // УФН. 2002. Т. 172. № 10. С. 1113–1130.
- [4] Oks E.M. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2002. Vol. 30. N 1. P. 202–207.
- [5] Batalin V.A., Bugaev A.S., Gushnets V.I. et al. // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 92. N 5. P. 2884–2889.
- [6] Cavenago M., Kulevoy T., Vassiliev A. // Rev. Sci. Instrum. 1998. Vol. 69. N 2. P. 795–797.
- [7] Spadtke P. GSI-Darmstadt. Unpublished Private Communication.
- [8] Geller R. Electron Cyclotron Resonance Ion Sources and ECR Plasmas. Bristol: Institute of Physics, 1996.
- [9] Geller R. // Rev. Sci. Instrum. 1998. Vol. 69. N 3. P. 1302–1310.
- [10] Головановский К.С. // ПТЭ. 1985. № 5. С. 7–26.
- [11] Semenov V., Skalyga V., Smirnov A., Zorin V. // Rev. Sci. Instrum. 2002. Vol. 73. N 2. P. 635–637.
- [12] Goldenberg A.L., Litvak A.G. // Phys. Plasmas. 1995. Vol. 2. N 6. Pt. 2. P. 2562–2572.
- [13] Anders A., Yushkov G.Yu. // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 91. N 8. P. 4824–4832.
- [14] Стукс Т. Теория плазменных волн. Атомиздат, 1965.
- [15] Yushkov G.Yu., Anders A. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 1998. Vol. 26. N 2. P. 220–226.