

02;04;10

Многократная ионизация ионов металлов вакуумной дуги в магнитной ловушке с нагревом мощным СВЧ-излучением

© А.В. Водопьянов, С.В. Голубев, Д.А. Мансфельд, А.Г. Николаев,
Е.М. Окс, В.И. Хижняк, Г.Ю. Юшков

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

Поступило в Редакцию 6 декабря 2006 г.

Приведены результаты экспериментов по многократной ионизации ионов тугоплавких металлов плазмы вакуумной дуги, инжектируемой в магнитную ловушку, за счет дополнительного нагрева плазмы мощным СВЧ-излучением миллиметрового диапазона длин волн. Увеличение частоты излучения мощного электромагнитного излучения гиротрона с 37.5 до 75 GHz позволило работать с большей концентрацией плазмы при достаточной для многократной ионизации температуре электронов. На примере платины показано, что в результате СВЧ-нагрева плазмы удается повысить средний заряд ионов с 2 до 7. При этом максимальное зарядовое состояние ионов платины достигало 10. Полный ток ионного пучка составил 300 mA.

PACS: 52.50.Dg, 52.50.Sw, 29.25.Ni

В настоящей работе развивается метод получения многозарядных ионов металлов, в том числе и тугоплавких, в котором плазма вакуумно-дугового разряда впрыскивается в магнитную ловушку и нагревается СВЧ-излучением. Главным преимуществом такого подхода является возможность повышать степень ионизации плазмы за один пролет ионов сквозь магнитную ловушку. В исследованиях, проведенных нами ранее, была продемонстрирована возможность дополнительной ионизации ионов плазмы вакуумно-дугового разряда, инжектируемой в магнитную ловушку [1]. В этих экспериментах для нагрева плазмы использовалось СВЧ-излучение импульсного гиротрона с частотой 37.5 GHz и мощностью 60 kW. Для разрядной системы со свинцовым катодом было продемонстрировано существенное повышение среднего заряда ионов в плазме вакуумной дуги. Эффективность данного метода

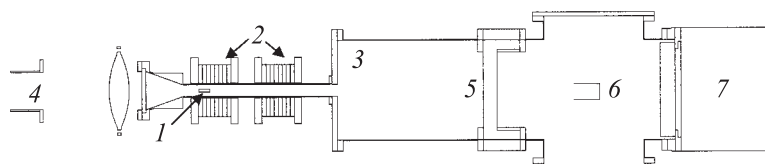


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — вакуумно-дуговой плазмo-генератор, 2 — магнитные катушки, 3 — плазменная камера, 4 — выходное окно гиротрона, 5 — двухсеточный экстрактор, 6 — цилиндр Фарадея, 7 — времяпролетный анализатор ионов.

генерации многозарядных ионов подтвердилась и для плазмы тугоплавких металлов [2,3]. Дальнейшее увеличение кратности ионизации плазмы предполагает соответствующий рост так называемого параметра удержания, напрямую связанного с максимальной плотностью плазмы, при которой еще возможен эффективный СВЧ-нагрев. Реализация же эффективного нагрева более плотной плазмы требует соответствующего увеличения частоты микроволнового излучения.

В статье приведены результаты экспериментальных исследований по генерации многозарядных ионов металлов, в которых для нагрева плазмы вакуумного дугового разряда использовалось излучение гиротрона с большей частотой (75 GHz) и с более высокой мощностью (до 200 kW).

Эксперименты проводились на экспериментальном стенде SMIS 75 в Институте прикладной физики. Для исследований дополнительной ионизации многозарядных ионов металлов вакуумно-дугового разряда в магнитной ловушке с нагревом электронов микроволновым излучением в Институте сильноточной электроники был изготовлен специальный миниатюрный плазмoгенератор, конструкция и принцип работы которого подробно описаны в [3]. Общая схема установки приведена на рис. 1. Плазмoгенератор 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 A до 1 kA, соответственно концентрация плазмы в ловушке была от $2 \cdot 10^{12}$ до $5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Источник питания размещался на изолированной платформе, что позволяло ускорять ионы напряжением до 20 kV. Разрядная вакуумная камера 3, помещенная внутрь магнитной ловушки (длина 16 см, магнитное поле в пробке

до 5 Т), имела тефлоновое окно, через которое излучение гиротрона 4 вводилось в область разряда, частота излучения 75 GHz, мощность до 200 kW, интенсивность в зоне нагрева до 100 kW/cm^2 , длительность импульса до $150 \mu\text{s}$. СВЧ-излучение, взаимодействуя с электронами плазмы, значительно увеличивало их энергию, что, в свою очередь, приводило к дополнительной ионизации ионов электронным ударом. На расстоянии 55 см за второй пробкой магнитной ловушки был установлен двухсеточный экстрактор 5, предназначенный для ускорения ионов. На таком расстоянии плотность потока плазмы спадает примерно в 1000 раз и становится приемлемой для формирования ионного пучка. Дополнительное уменьшение плотности потока плазмы осуществлялось изменением коэффициента прозрачности эмиттерной сетки экстрактора. В описываемых экспериментах этот коэффициент равнялся 0.3. Ток ионного пучка и его зарядовое распределение измерялись соответственно с помощью передвижного цилиндра Фарадея 6 и времяпролетного масс-анализатора 7 [4].

Для определения условий, при которых возможна дополнительная ионизация ионов вакуумной дуги, был проведен предварительный оценочный расчет зарядового состава плазмы. В расчетах принималось, что скорость V пролета ионами сквозь ловушку фиксирована и равна $1.5 \cdot 10^6 \text{ cm/s}$ [3,5]. Также считались постоянными температура электронов T_e и поток плазмы из плазмогенератора. В расчете принимались во внимание следующие процессы: заполнение ловушки плазмой с фиксированным зарядовым распределением, ступенчатая ионизация ионов электронным ударом, потери плазмы из ловушки с фиксированным временем жизни. Система уравнений выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{dN_0}{dt} = F_0 - k_0 N_0 N_e - \frac{N_0}{\tau}, \\ \frac{dN_1}{dt} = F_1 + k_0 N_0 N_e - k_1 N_1 N_e - \frac{N_1}{\tau}, \\ \dots \\ \frac{dN_i}{dt} = F_i + k_{i-1} N_{i-1} N_e - k_i N_i N_e - \frac{N_i}{\tau}, \\ N_e = \sum_{i=1} N_i, \end{cases}$$

где N_0, N_1, N_2, \dots — концентрации атомов и ионов с соответствующим зарядом; N_e — плотность плазмы; τ — время пролета ионами длины

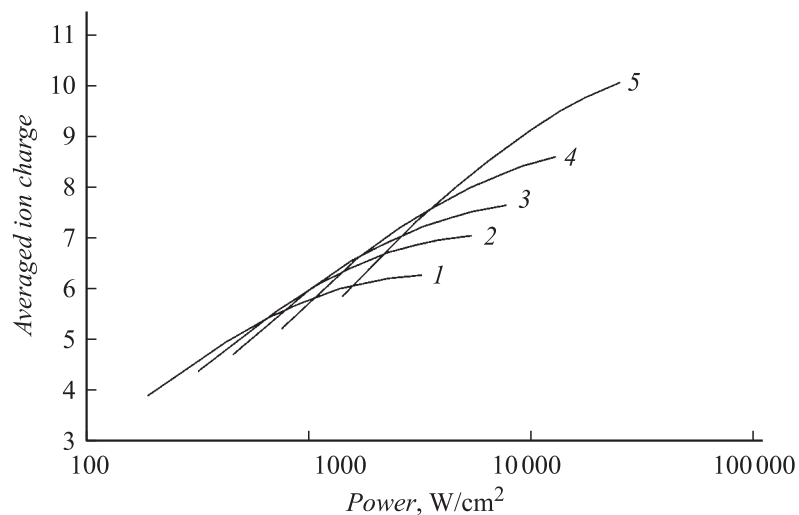


Рис. 2. Расчет среднего заряда ионов платины в плазме. Ток вакуумной дуги: 1 — 100 А, 2 — 150 А, 3 — 200 А, 4 — 300 А, 5 — 500 А.

ловушки, в расчетах принято равным $1.13 \cdot 10^{-5}$ s; $F_0, F_1, F_2 \dots$ — плотности потока инжектируемых плазмoгенератором в магнитную ловушку атомов и ионов платины. Начальный средний заряд ионов в инжектируемом потоке составлял 1.5. Задача решалась с нулевыми начальными условиями. Плотность потока энергии, необходимой для поддержания температуры плазмы, т.е. мощность СВЧ-излучения, поглощаемого плазмой, вычислялась как сумма выносимой электронами энергии и затрат на ионизацию. Зависимость стационарного значения средней зарядности ионов от вводимой в плазму мощности СВЧ-излучения представлена на рис. 2. Каждая отдельная кривая на графике соответствует определенному значению тока вакуумно-дугового плазмoгенератора. Увеличение мощности СВЧ-излучения при постоянном токе разряда вакуумной дуги приводит к увеличению температуры электронов, а вместе с ней увеличивается и средний заряд ионов. Обращает на себя внимание факт существования оптимального тока разряда для получения заданной зарядности при минимальной мощности СВЧ-нагрева. В реальных экспериментах увеличение концентрации плазмы в ловушке ограничено значением, соответствующим

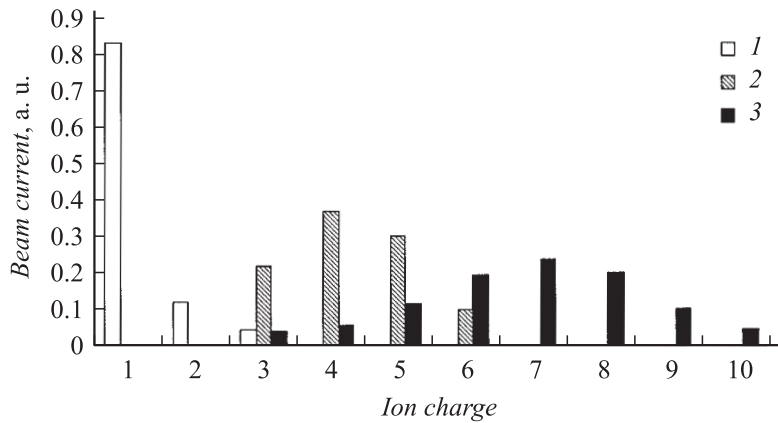


Рис. 3. Распределение ионов платины по кратностям ионизации при оптимальных условиях: 1 — без СВЧ-нагрева [3], 2 — нагрев излучением с частотой 37 GHz, мощностью 65 kW [3], 3 — нагрев излучением с частотой 75 GHz, мощностью 200 kW.

критическому для заданной частоты греющего поля. По-видимому, при достижении критической концентрации эффективность нагрева плазмы снижается из-за рефракции СВЧ-волны. Результаты расчетов показывают, что в условиях наших экспериментов можно надеяться на достижение средней зарядности ионов, близкой к 8+.

В эксперименте максимальной эффективности дополнительной ионизации, а следовательно и наиболее высокого зарядового состояния ионов в плазме, удалось достичь при следующих основных параметрах установки: мощность СВЧ 200 kW, ток вакуумной дуги 120 A, величина магнитного поля в пробке ловушки 1.4 T. На гистограмме, представленной на рис. 3, показано распределение ионов платины по кратностям ионизации в оптимальных для величины среднего заряда условиях. На спектре виден значительный сигнал иона Pt^{10+} . Для наглядности на этом же рисунке приведены спектры ионов, полученные в [3]. Долю примесей в спектре в нашем эксперименте удалось снизить до уровня менее 10% за счет повышения частоты повторения разрядных импульсов до 1 Hz. Полный ток пучка в этом эксперименте составил 300 mA. Измерение тока ионного пучка с помощью передвижного

цилиндра Фарадея продемонстрировало, что поперечное распределение плотности тока — однородное с точностью 10%.

Отметим, что, в отличие от ранее проведенных исследований [1–3], величина магнитного поля была снижена до величины меньшей, чем значение, при котором реализуются условия электронного циклотронного резонанса (ЭЦР). Частота греющего СВЧ-излучения составляла 75 GHz, величина магнитного поля соответствующего ЭЦР равняется 2.7 Т, в то время как максимальный средний заряд ионов платины в экспериментах был зафиксирован при величине магнитного поля в пробке ловушки, равной 1.4 Т. Предварительные оценки показывают, что нагрев плазмы может быть обеспечен из-за достаточно высокой частоты столкновений электронов. Слой плазмы с толщиной, равной длине ловушки при $N_e = 3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, $T_e = 100 \text{ eV}$, мощности излучения 200 kW, поглощает более 5 kW, что оказывается достаточным для поддержания разряда с такими параметрами.

Таким образом, повышение частоты и мощности СВЧ-нагрева обеспечивает увеличение кратности ионизации ионов плазмы вакуумно-дугового разряда. При этом одновременно повышается эмиссионная способность плазмы, и соответственно возрастает ток ионного пучка. Перспективы дальнейшего роста среднего заряда ионов металлов связаны с удлинением магнитной ловушки и с оптимизацией условий нагрева плазмы СВЧ-излучением.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранты № 05-02-16256, 06-02-16438.

Список литературы

- [1] *Vodopyanov A.V., Golubev S.V., Razin S.V., Zorin V.G., Vizir A.V., Nikolaev A.G., Oks E.M., Yushkov G.Yu.* // Review of Scientific Instruments. 2004. V. 75. P. 1888.
- [2] *Vodopyanov A.V., Golubev S.V., Mansfeld D.A., Nikolaev A.G., Oks E.M., Razin S.V., Savkin K.P.* // AIP Conference Proceedings. 2005. V. 749. P. 116.
- [3] *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. В. 9. С. 101.
- [4] *Gushenets V.I., Nikolaev A.G., Oks E.M. et al.* // Review of Scientific Instruments. 2006. V. 77. P. 063301.
- [5] *Anders A., Yushkov G.Yu.* // Journal of Applied Physics. 2002. V. 91. P. 4824.