

УДК 621.38:533.9

А.В. Тюньков, Ю.Г. Юшков, Д.Б. Золотухин, К.П. Савкин

## Генерация ионов магния в пучковой плазме форвакуумного электронного источника

Экспериментально продемонстрирована возможность получения ионов магния в плазме, создаваемой пучком форвакуумного электронного источника. Генерация производилась при испарении магниевого порошка из нагреваемого электронным пучком тигля с последующей ударной ионизацией атомов магния пучком ускоренных электронов. Приведены результаты исследования состава пучковой плазмы, полученные с применением модифицированного квадрупольного масс-спектрометра RGA-100.

**Ключевые слова:** плазменный источник электронов, пучковая плазма, ионы металлов, стабильные изотопы, квадрупольный масс-спектрометр, форвакуумный диапазон давления.

Форвакуумные источники электронов [1] находят применение в современных технологиях обработки поверхности различных материалов [2], а также сварки и пайки деталей [3]. Особенностью таких источников является способность генерации электронного пучка в форвакуумном диапазоне давлений (1–100 Па). При этом в области транспортировки пучка образуется плотная газовая плазма, которая может быть использована, например, для нейтрализации поверхностного заряда при обработке поверхности керамики [4] или стерилизации поверхностей от патогенных микроорганизмов [5]. В настоящей работе представлены результаты исследования возможности применения электронного пучка и пучковой плазмы для генерации ионов порошкового магния. Это может расширить технологические перспективы применения электронных источников и обеспечит их использование, например, для нанесения тонких пленок или осуществления плазмохимических реакций с участием ионов металла, включая радиоактивные изотопы этого металла.

**Методика эксперимента.** Пучковая плазма создавалась в изготовленной из нержавеющей стали вакуумной камере 8 объемом 0,04 м<sup>3</sup> в результате ионизации газа ускоренным до энергий 3–7 кэВ электронным пучком 5, генерируемым форвакуумным плазменным источником на основе тлеющего разряда с полым катодом [6, 7]. Давление рабочего газа – воздуха – поддерживалось на уровне 2,5 Па безмасляным спиральным насосом со скоростью откачки 1000 л/мин и регулировалось натекателем.

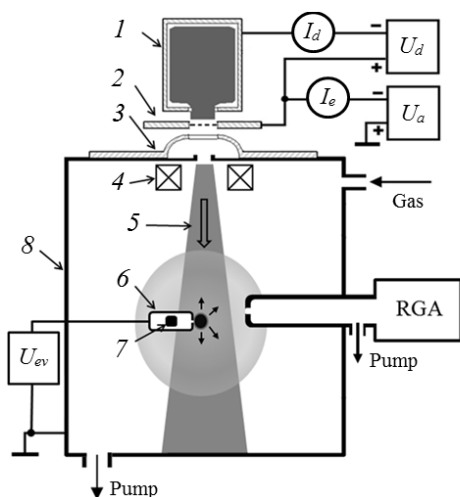


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – полый катод; 2 – анод с перфорированным электродом; 3 – ускоряющий электрод; 4 – фокусирующая система; 5 – пучок электронов; 6 – тигель; 7 – фрагмент распыляемого металла; 8 – вакуумная камера

Источник устанавливался на верхнем фланце вакуумной камеры. В источнике разряд зажигался между полым катодом 1 и анодом 2, ток разряда  $I_d$  варьировался от 100 до 400 мА, при этом напряжение горения  $U_d$  изменялось в пределах 300–500 В. В рабочей области давлений 2,5 Па при ускоряющем напряжении  $U_a$  в от 3 до 7 кВ, приложенном между анодом 2 и ускоряющим электродом 3, плазменный источник обеспечивал генерацию непрерывного электронного пучка 5 с током эмиссии  $I_e$ , равным 80–100 мА. Пучок извлекался из плазмы разряда через перфорированный электрод в аноде 2 и фокусировался магнитным полем катушки 4. Диаметр пучка составлял 8–10 мм. При ускоряющем напряжении 6 кВ и токе пучка порядка 100 мА плотность мощности в пучке составляла величину порядка 60 Вт/см<sup>2</sup>. Этого было достаточно для плавления и испарения легкоплавкого ме-

талла – магния и для последующей ионизации испаренных атомов пучком. Часть пучка электронов попадала на танталовый тигель 6, выполненный в виде полого тонкостенного цилиндра с выходным отверстием диаметром 1 мм в одном из торцов. В полость тигля помещался порошок магния, который при нагреве являлся источником пара, ионизируемого электронами пучка. Для измерения состава плазмы использовался модифицированный квадрупольный масс-спектрометр RGA-100, входное отверстие которого находилось на расстоянии 6 см от выходного отверстия тигля. Входное отверстие спектрометра и выходное отверстие тигля были смещены относительно друг друга по вертикали на 1 см, для уменьшения прямого потока нейтральных атомов металла из тигля в анализатор.

Модернизация спектрометра RGA-100 заключалась в демонтаже ионизатора спектрометра с последующим замещением его на извлекающий ионы узел, который представлял собой трехэлектродную систему (рис. 2).

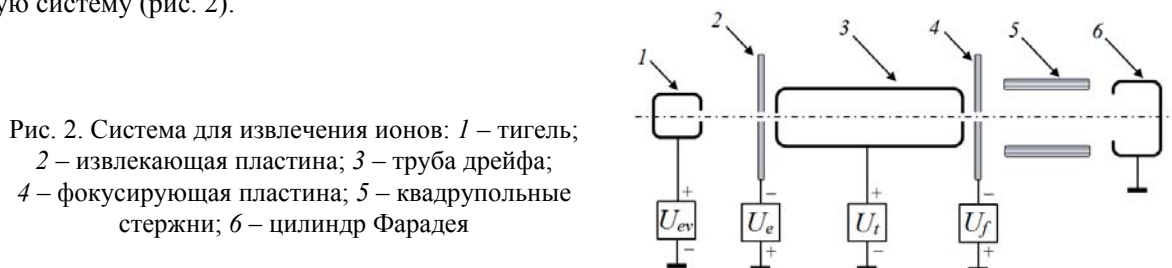


Рис. 2. Система для извлечения ионов: 1 – тигель; 2 – извлекающая пластина; 3 – труба дрейфа; 4 – фокусирующая пластина; 5 – квадрупольные стержни; 6 – цилиндр Фарадея

Система состояла из извлекающей пластинки 2, трубы дрейфа 3 и фокусирующей пластины 4 спектрометра. Для исследования масс-спектров на тигель 1, служивший коллектором электронного пучка, подавалось напряжение  $U_{ev} = +30$  В, на извлекающую пластинку  $U_e = -30$  В, трубу дрейфа  $U_t = +2,5$  В, фокусирующую пластину  $U_f = -90$  В относительно заземленного электрода (стенки камеры). Ионы, извлекаемые из плазмы отрицательным потенциалом пластины 2, дополнительно ускорялись в поле, созданном разностью потенциалов между трубой дрейфа 3 и фокусирующей пластиной 4, и направлялись в сепарирующую часть спектрометра (область квадрупольных стержней 5), а затем попадали в цилиндр Фарадея 6.

**Результаты экспериментов и их обсуждение.** Типичный масс-зарядовый спектр ионов из пучковой плазмы представлен на рис. 3. Особого внимания заслуживает тот факт, что сигнал спектрометра для ионов металла превышает сигнал ионов газа. Это означает, что концентрация ионов испаряемого металла в пучковой плазме выше, чем концентрация ионов газа. Таким образом, представленный в работе метод генерации ионов позволяет получить поток ионов металла, достаточный для применения в технологиях.

Как можно заметить, в спектре (рис. 3) присутствуют все существующие в природе стабильные изотопы магния [8]. Максимальное различие в распределении долей изотопов в плазме для ионов магния составляет 3%. Таким образом, точность измерения ионов металлов спектрометром составляет единицы процентов. Можно предположить, что отличие полученного экспериментально изотопного состава магния (таблица) от состава, известного из литературы [8], может быть связано с индивидуальными особенностями месторождения фрагмента магния, который использовался в настоящем исследовании.

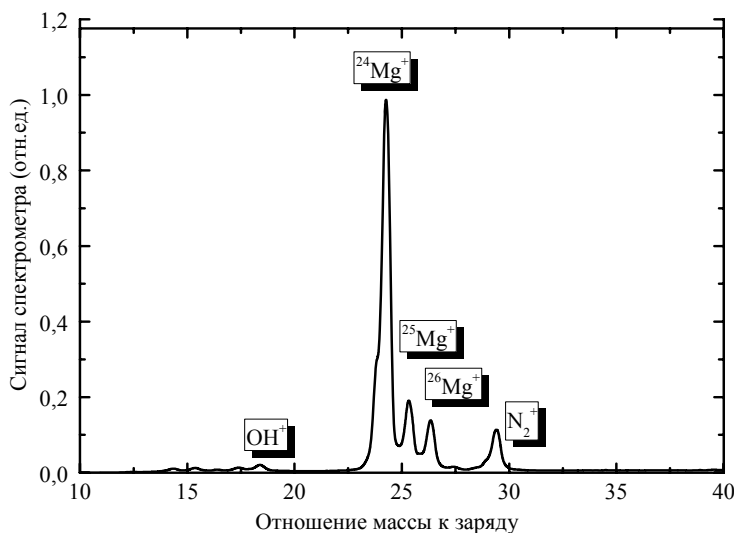


Рис. 3. Масс-зарядовый спектр ионов магния. Параметры эксперимента:  $I_d = 390$  мА;  $U_d = 770$  В;  $U_a = 6$  кВ;  $I_e = 80$  мА; рабочий газ – воздух

**Изотопный состав ионов металлов**

Изотоп	В плазме, %	В природе, % [8]
$^{24}\text{Mg}$	75	78
$^{25}\text{Mg}$	13	11
$^{26}\text{Mg}$	12	11

**Заключение.** Продемонстрирован метод генерации ионов магния посредством нагрева, испарения и ионизации паров металлов электронным пучком в форвакуумном диапазоне давлений. Метод может применяться для нанесения тонких металлических пленок или осуществления плазмохимических реакций с участием металлов в пучковой плазме.

Работа выполняется при поддержке проекта РФФИ 14-08-31090 мол\_а.

#### *Литература*

1. Форвакуумный плазменный источник импульсных электронных пучков / Ю.Г. Юшков, В.А. Бурдовицин, А.В. Медовник, Е.М. Окс // Приборы и техника эксперимента. – 2011. – №2. – С. 85–88.
2. Модификация поверхности керамики импульсным электронным пучком, генерируемым форвакуумным плазменным источником / В.А. Бурдовицин, Е.М. Окс, Е.В. Скрябин, Ю.Г. Юшков // Перспективные материалы. – 2011. – № 6. – С. 1–6.
3. Электронно-лучевая обработка керамики / А.В. Медовник, В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, Е.М. Окс // Физика и химия обработки материалов. – 2010. – № 3. – С. 39–44.
4. Потенциал диэлектрической мишени при ее облучении импульсным электронным пучком в форвакуумной области давлений / В.А. Бурдовицин, А.В. Медовник, Е.М. Окс, Е.В. Скрябин, Ю.Г. Юшков // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82, № 10. – С. 103–108.
5. Золотухин Д.Б. Параметры плазмы, создаваемой электронным пучком в форвакууме / Д.Б. Золотухин, А.С. Климов, А.А. Зенин // Доклады ТУСУРа. – 2013. – Т. 30, №4, ч. 4. – С. 79–82.
6. Расширение рабочего диапазона форвакуумных плазменных источников электронов в область более высоких давлений / В.А. Бурдовицин, А.К. Гореев, А.С. Климов, А.А. Зенин, Е.М. Окс // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82, вып. 8. – С. 62–66.
7. Особенности формирования сфокусированного пучка электронов форвакуумным плазменным источником при повышенных давлениях / Е.М. Окс, Ю.А. Бурачевский, В.А. Бурдовицин, А.А. Гришков, А.А. Зенин, А.С. Климов // Успехи прикладной физики. – 2013. – Т. 1, №1. – С. 60–64.
8. The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties / G. Audi, O. Bersillon, J. Blachot, A.H. Wapstra // Nuclear Physics. – 2003. – A 729, 3. – P. 128.

---

#### **Тюньков Андрей Владимирович**

Канд. техн. наук, доцент каф. физики ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-33-69

Эл. почта: andrew71@sibmail.com

#### **Юшков Юрий Георгиевич**

Канд. техн. наук, науч. сотрудник каф. физики ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-33-69

Эл. почта: Yuyushkov@sibmail.com

#### **Золотухин Денис Борисович**

Аспирант каф. физики ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-33-69

Эл. почта: zolotukhinden@gmail.com

#### **Савкин Константин Петрович**

Канд. техн. наук, науч. сотрудник ИСЭ СО РАН

Тел.: (382-2) 49-17-76

Эл. почта: savkin@opee.hcei.tsc.ru

Tyunkov A. V., Yushkov Yu. G., Zolotukhin D. B., K. P. Savkin

#### **Generation of magnesium ions using fore-vacuum plasma electron source**

The possibility of generation of magnesium ions using fore-vacuum plasma electron source at fore-vacuum pressures is investigated. Metal ions were generated by electron beam ionization of magnesium vapor which was produced by electron beam heating. The experimental results of the study of gas-metal plasma composition were obtained using a modified quadrupole mass spectrometer RGA-100.

**Keywords:** plasma electron source, beam plasma, metal ions, stable isotopes, quadrupole mass spectrometer, fore-vacuum pressure range.