

Краткие сообщения

04;10;12

Расчет зарядового состава пучка ионов источника E-Mevva

© К.П. Артемов, В.В. Рыжов

Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия
e-mail: artyomov@to.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 4 февраля 2003 г.)

В рамках модели последовательной ионизации ионов плазмы вакуумной дуги электронами пучка рассчитан зарядовый состав ионов источника E-Mevva. Исследовано влияние начальных параметров плазмы на зарядовый состав пучка ионов. Для элементов, не исследованных на установке (более 30), рассчитан возможный зарядовый состав. Проведен расчет зарядового состава ионов для предельных значений плотности тока электронного пучка.

Одним из методов генерации многозарядных ионов является метод, основанный на ионизации ионов плазмы электронным пучком [1]. Этот метод использован в ионном источнике на основе вакуумного дугового разряда E-Mevva (Electron-beam Metal-vapor vacuum-arc) — модификации установки Mevva-V — для получения многозарядных ионов металлов. В ионизационной камере установки в результате горения вакуумной дуги нарабатывается плазма плотностью $n \approx 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, в которую через отверстие в катоде инжектируется электронный пучок с плотностью тока $j_b \approx 120 \text{ A/cm}^2$, энергией $E_e = 20 \text{ keV}$, длительностью импульса $\tau_p = 100 \mu\text{s}$ и транспортируется в магнитном поле через плазму. На данной установке проведены эксперименты по повышению зарядности ионов Cd, In, Sn, Sm, Pb и Bi. Для двух последних элементов получены рекордные для источников ионов такого типа значения максимального заряда генерируемых ионов Pb^{7+} и Bi^{8+} [2–4].

Расчеты, проведенные по программе KARAT [5], показали, что в процессе инжекции электронного пучка медленные электроны плазмы покидают область транспортировки, так что пучок транспортируется в условиях полной зарядовой компенсации. В таких условиях в области транспортировки процессы рекомбинации и перезарядки могут идти только с участием электронов пучка. Характерные времена этих процессов для исследуемых условий намного больше длительности электронного пучка τ_p . Поэтому основным процессом, ответственным за генерацию ионов, является последовательная ионизация ионов плазмы электронами пучка.

Поскольку средний путь электрона пучка в камере установки даже при учете влияния внешнего продольного магнитного поля превышает длину камеры (40 см) в несколько раз, то слой плазмы, через который движутся электроны, можно считать „слоем одного столкновения“ и для описания процесса генерации ионов использовать

систему уравнений кинетики [1]

$$\frac{dn_i}{dt} = v_e \sigma_{i-1 \rightarrow i} n_e n_{i-1}; \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (1)$$

где m — максимальный заряд генерируемых ионов; $\sigma_{i-1 \rightarrow i}$ — сечение ионизации иона из $(i-1)$ -состояния в i -е электронами с энергией 20 keV; n_{i-1} — концентрация ионов в $(i-1)$ -состоянии, n_i — концентрация ионов в i -м состоянии; v_e — скорость электронов пучка.

Для расчета сечений ионизации многозарядных ионов можно использовать формулу Лютца [6]

$$\sigma_i = 4.5 \cdot 10^{-14} \sum_{i=1}^N \frac{r_i}{E_e I_i} \ln \left(\frac{E_e}{I_i} \right), \quad (2)$$

где σ_i — сечение ионизации ионов в i -м состоянии электронами пучка с энергией E_e , I_i — потенциал ионизации i -го подуровня, r_i — число электронов на i -м подуровне, N — заряд ядра.

Система (1) решалась численно, в качестве начальных данных использовались экспериментально измеренные распределения ионов по зарядностям, полученные на установке Mevva-V [4] для различных режимов горения дуги. Расчеты подтвердили (рис. 1), что использование плазмы вакуумной дуги (а не паров металла) в качестве начальной среды позволяет увеличить средний заряд ионов при заданном параметре пучка $j_b \tau_p$. Как следует из [1], для получения плазмы такого же зарядового состава из паров металла необходимо использовать электронный пучок с плотностью тока в 3 раза выше, чем на установке E-Mevva.

Разработанная модель и данные распределений ионов по зарядностям, измеренных на установке Mevva-V, позволяют оценить возможности использования электронного пучка для получения многозарядных ионов металлов на этой установке [7]. На рис. 2 представлена зависимость среднего заряда ионов от их атомного номера. Сплошной кривой показаны расчетные данные

при воздействии электронного пучка на плазму вакуумной дуги, горящей в сильном магнитном поле (в этом режиме проводились измерения распределений ионов по зарядностям для Bi и Pb), штриховой — для режима без поля. Здесь же приведены экспериментальные значения средних зарядов ионов Cd, In, Sn, Pb и Bi при воздействии на плазму вакуумной дуги электронным пучком, полученные на установке E-Mevva. Расчеты показали, что для элементов, как Ni, Ge, Mo, W, Ir, Th, на установке E-Mevva можно получить положительные ионы с максимальным зарядом 9–10.

Дальнейшее увеличение зарядности ионов возможно при увеличении плотности тока электронного пучка j_b . Предельная плотность тока электронного пучка, ко-

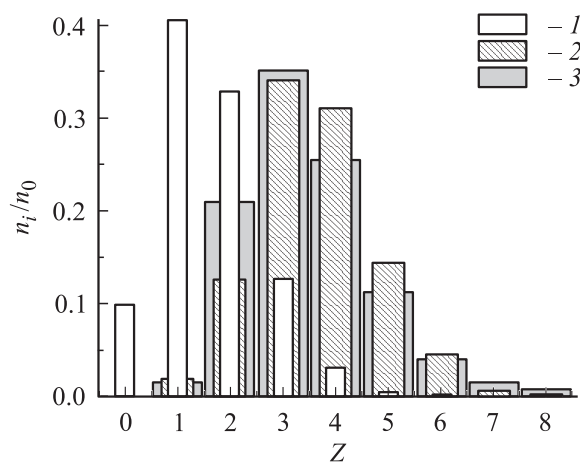


Рис. 1. Распределения ионов Bi по зарядностям при ионизации паров металла (1); ионизации плазмы вакуумной дуги (2) и экспериментальные данные (3).

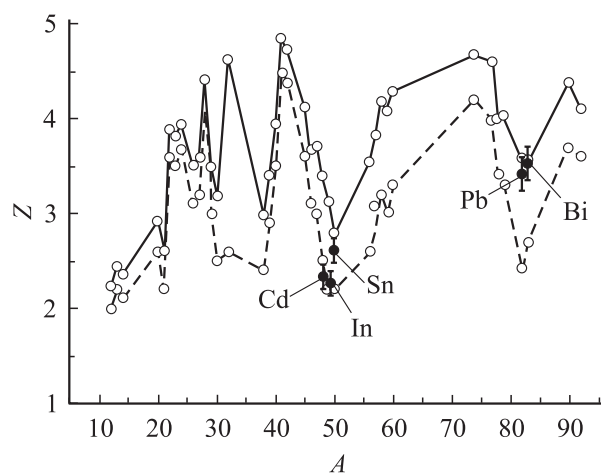


Рис. 2. Зависимость среднего заряда ионов от их атомного номера: сплошная кривая — расчетные данные при воздействии электронного пучка на плазму вакуумной дуги, горящей в сильном магнитном поле; штриховая — для режима без поля. Значки — экспериментальные значения средних зарядов ионов Cd, In, Sn, Pb и Bi.

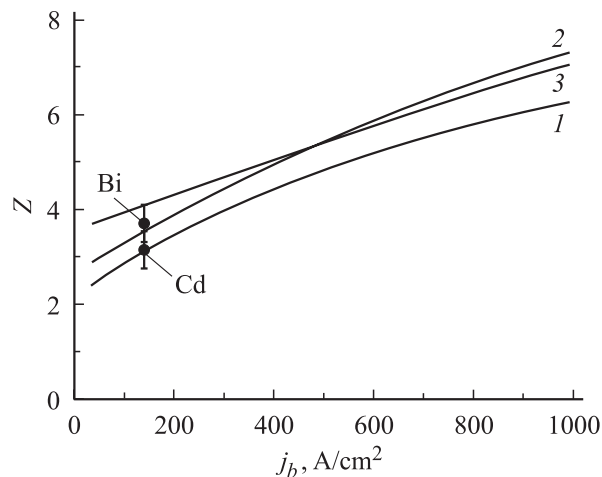


Рис. 3. Зависимость среднего заряда генерируемых ионов In (1), Bi (2) и U (3) от j_b . Значки — экспериментальные данные для In и Bi, полученные при $j_b = 120 \text{ A/cm}^2$.

торый может пропустить ионизационная камера установки, определяется концентрацией плазмы и величиной внешнего магнитного поля. Расчет по программе KARAT показал, что максимальная плотность тока, проходящего через камеру установки при концентрации плазмы $n = 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ и величине внешнего магнитного поля $B_{in} = 3 \text{ kGs}$, может достигать $j_b \sim 700\text{--}800 \text{ A/cm}^2$. На рис. 3 приведена зависимость среднего заряда ионов In, Bi и U от j_b . Для установки E-Mevva технически достижима плотность тока электронного пучка 350–400 A/cm^2 , которая может быть получена путем увеличения полного тока пучка или напряженности внешнего магнитного поля. Расчеты, проведенные для $j_b = 400 \text{ A/cm}^2$, показали, что на данной установке возможна генерация ионов U^{9+} .

Список литературы

- [1] Донец Е. // Физика и технология источников ионов. Пер. с англ. / Под ред. Я. Браун. М.: Мир, 1998. С. 267–304.
- [2] Bugaev A., Gushenets V., Yushkov G. // Appl. Phys. Lett. 2001. Vol. 79. P. 919.
- [3] Batalin V.A., Bugaev A.S., Gushenets V.I. // Rev. Sci. Instrum. 2002. Vol. 73. P. 702–705.
- [4] Anders A., Yushkov G., Oks E. // Rev. Sci. Instrum. 1998. Vol. 69. N 3. P. 1332–1335.
- [5] Tarakanov V.P. User's manual for code Karat. Springfield, VA: Berkeley Research Associate. Inc, 1992.
- [6] Grandall D.H. // Phys. Scripta. 1981. Vol. 23. N 23. P. 153–162.
- [7] Артемов К.П., Рыжов В.В. // Proc. 6th Intern. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. 2002. P. 635.