

10

Сепарация ионов по заряду при транспортировке пучка в плоском зазоре

© В.А. Шкляев, С.Я. Беломытцев, В.В. Рыжов

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

E-mail: shklaev @to.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 29 декабря 2004 г.

Решена задача о транспортировке пучка ионов различной зарядности в плоском эквипотенциальном вакуумном зазоре. Получены значения критических плотностей токов для такого пучка и зависимости плотности тока и среднего заряда пучка, прошедшего через зазор, от плотности тока, среднего заряда и начальной энергии инжектируемого пучка ионов. Найдены режимы, при которых происходит эффективная сепарация двухзарядных и однозарядных ионов.

В ряде экспериментальных работ [1–3] показано, что при транспортировке пучка ионов с различной зарядностью через эквипотенциальную камеру дрейфа зарядовый состав пучка изменяется на выходе из камеры транспортировки. Однако полного теоретического описания этого эффекта нет, что затрудняет его использование для сепарации пучка ионов по заряду.

Рассмотрим одномерную стационарную задачу транспортировки многокомпонентного пучка ионов в плоском эквипотенциальном вакуумном зазоре. Многокомпонентным пучком будем называть пучок, состоящий из ионов одинаковой массы M , но имеющих различный заряд. Для простоты учтем в пучке только одно- и двухзарядные ионы. Пусть ионы пучка транспортируются с одинаковыми кинетическими энергиями ε_0 в области гидродинамического расширения [4], после чего пучок попадает в ускоряющий зазор, к которому приложено напряжение U . В реальных экспериментальных установках ускоряющий зазор необходим для отражения электронов при получении ионных пучков из плазмы [1–3]. Пучок ускоренных ионов инжектируется в эквипотенциальный вакуумный зазор с энергиями $eU + \varepsilon_0$ и $2eU + \varepsilon_0$ однозарядных и двухзарядных ионов соответственно.

Для решения задачи о транспортировке такого пучка применим подход, использованный при решении задачи о транспортировке пучка однозарядных частиц в плоском зазоре [5,6] и основанный на решении уравнения Пуассона. Уравнение Пуассона, описывающее распределение потенциала в зазоре в нерелятивистском случае для многокомпонентного пучка, запишется в виде

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = -4\pi \left[j^{(1)} + j^{(2)} \left(\frac{\varphi}{2\varphi - \varepsilon_0/e} \right)^{1/2} \right] \sqrt{\frac{M}{2e}} \frac{1}{\varphi^{1/2}}, \quad (1)$$

где $j^{(1)}$ и $j^{(2)}$ — парциальные плотности тока одно- и двухзарядных ионов, причем прямые и обратные токи в области отражения складываются; φ — электростатический потенциал, соответствующий кинетической энергии однозарядных ионов; $\frac{V^{(1)}}{V^{(2)}} = \left(\frac{\varphi}{2\varphi - \varepsilon_0/e} \right)^{1/2}$ — отношение скоростей однозарядных и двухзарядных ионов в зазоре. Для определения зарядового состава пучка введем понятие среднего заряда, который будем определять по долям плотности тока одно- и двухзарядных ионов в пучке $K = (j^{(1)} + 2j^{(2)}) / (j^{(1)} + j^{(2)})$. Путем численного интегрирования уравнения (1) для граничных условий, выбранных таким образом, что нулевой потенциал в зазоре соответствует нулевой энергии однозарядных ионов, были получены значения критических плотностей токов инжектируемого пучка и зависимость плотности тока пучка j_{out} , прошедшего через зазор, от плотности тока инжекции j_{in} . Поскольку пучок состоит из одно- и двухзарядных ионов, при решении задачи получено четыре значения критических плотностей токов, а не два, как в случае однокомпонентного пучка, которые удобно нормировать на плотность первого критического тока для пучка однозарядных ионов $I = j/j_{cr1}$, где

$$j_{cr1} = \frac{1}{9\pi} \left(\frac{2eZ}{M} \right)^{1/2} \frac{(U + \varepsilon_0/e)^{3/2}}{(L/2)^2}. \quad (2)$$

Кроме того, для удобства представления результатов введем параметр α :

$$\alpha = \frac{\varepsilon_0/2}{eU + \varepsilon_0}. \quad (3)$$

На рис. 1 приведен пример зависимости плотности тока пучка, прошедшего через зазор, от плотности тока инжекции, полученный численным интегрированием уравнения Пуассона (1). На рис. 1 можно выделить

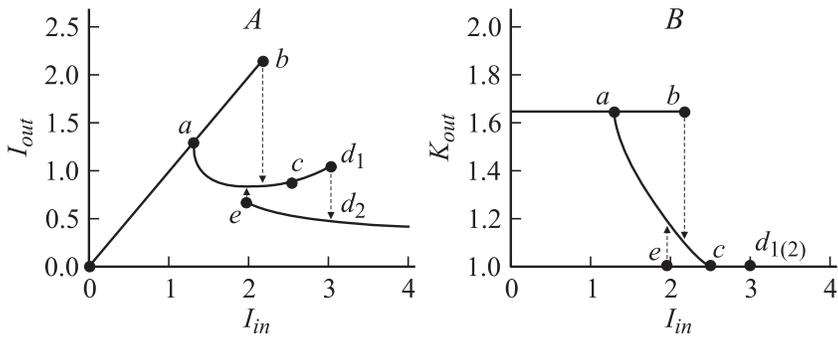


Рис. 1. Кривая токопрохождения (A) — зависимость плотности тока I_{out} многокомпонентного пучка ионов, прошедшего через зазор, от плотности тока инжекции; зависимость среднего заряда K_{out} этого пучка, от плотности тока инжекции (B). $K_{in} = 1.65$, $\alpha = 0.119$ ($\varepsilon_0 = 47$ eV, $U = 150$ V).

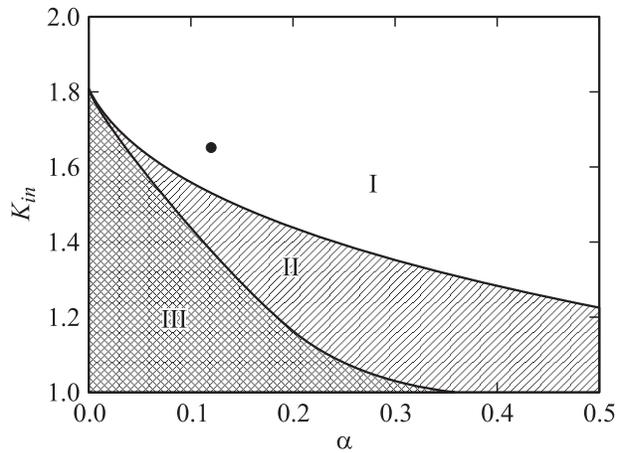


Рис. 2. Области параметров инжектируемого пучка ионов, при которых реализуются различные типы кривых токопрохождения. Точкой обозначены параметры инжектируемого пучка, кривая токопрохождения которого изображена на рис. 1.

четыре состояния, в которых может находиться пучок ионов. Первое — однопотоковое состояние (прямая $0-b$ на рис. 1), когда все ионы пучка беспрепятственно проходят через зазор. При превышении плотности тока инжектируемого пучка значения $I_{cr2}^{(2)}$ — плотности второго критического тока для двухзарядных ионов (точка b), пучок переходит из однопотокового состояния в двухпотоковое, т.е. в зазоре образуется виртуальный анод (ВА), который отражает часть двухзарядных ионов в сторону плоскости инжекции. Второе состояние (кривая $a-c$) характеризуется ВА, образованным двухзарядными ионами. При этом однозарядные ионы беспрепятственно проходят через зазор. Поскольку часть двухзарядных ионов инжектируемого пучка отражается от ВА, средний заряд пучка, прошедшего через зазор K_{out} , падает. При превышении плотности тока инжектируемого пучка значения I_s — плотности тока сепарации (точка c), ВА, образованный двухзарядными ионами, становится плоскостью их полного отражения (отражательный ВА). При этом пучок переходит в третье состояние (прямая $c-d_1$), когда только однозарядные ионы проходят через зазор не отражаясь (режим эффективной сепарации). Средний заряд пучка, прошедшего через зазор, $K_{out} = 1$, а плотность тока $I_{out} = I_{in}^{(1)}$. При превышении плотности тока инжектируемого пучка значения $I_{cr2}^{(1)}$ — плотности второго критического тока для однозарядных ионов (точка d_1), пучок переходит в четвертое состояние (кривая $e-d_2$) с двумя ВА, разделенными в пространстве. Первый ВА — это плоскость отражения двухзарядных ионов, второй — ВА, отражающий часть однозарядных ионов в сторону плоскости инжекции. Средний заряд пучка, прошедшего через зазор, $K_{out} = 1$, а плотность тока $I_{out} < I_{in}^{(1)}$. В зависимости от параметров инжектируемого пучка ионов: среднего заряда K_{in} , энергии перед ускорением ε_0 и ускоряющего напряжения U , — значения плотностей токов могут меняться относительно друг друга. В таблице указаны значения плотностей вторых критических токов для одно- и двухзарядных ионов и плотности тока сепарации в зависимости от параметров пучка, полученные численным интегрированием уравнения (1).

Исходя из соотношения между вторыми критическими плотностями токов для одно- и двухзарядных ионов $I_{cr2}^{(1)}$, $I_{cr2}^{(2)}$ и плотностью тока сепарации I_s можно выделить три области параметров инжектируемого пучка (рис. 2), при которых реализуются различные типы кривых токопрохождения. Первая область параметров (I) — при увеличении плотности инжектируемого тока пучок последовательно пройдет все

Значения плотностей вторых критических токов и тока сепарации в зависимости от параметров инжектируемого пучка.

K_{in}		α				
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
1.8	$I_{cr2}^{(2)}$	2.28	1.97	1.66	1.35	1.05
	I_s	3.7	3.83	3.7	3.41	3.01
	$I_{cr2}^{(1)}$	4.39	5.37	6.18	6.89	7.54
1.6		2.19	1.95	1.69	1.41	1.21
		2.29	2.35	2.24	2.05	1.79
		2.64	3.12	3.49	3.81	4.09
1.4		2.11	1.94	1.73	1.48	1.22
		1.81	1.89	1.80	1.64	1.42
		2.05	2.36	2.58	2.76	2.91
1.2		2.04	1.94	1.79	1.60	1.36
		1.71	1.76	1.69	1.54	1.34
		1.79	1.996	2.13	2.23	2.31

четыре состояния. Вторая область (II) — пучок из первого (однопоточкового) состояния, после образования ВА, переходит в третье, характеризующееся отражательным ВА для двухзарядных ионов. Третья область (III) — пучок из первого переходит сразу в четвертое состояние с двумя ВА.

Таким образом, изменение среднего заряда при транспортировке многокомпонентного пучка ионов связано с образованием виртуального анода в камере транспортировки и отражением ионов потенциалом объемного заряда виртуального анода. Кроме того, потенциал, необходимый для полной остановки двухзарядных ионов, на $\varepsilon_0/2e$ меньше, чем для однозарядных. Численное решение уравнения Пуассона (1) показало, что частичная сепарация пучка ионов по заряду [3,7] происходит в том случае, когда пучок находится во втором состоянии (рис. 1, кривая $a-c$). Найдены параметры инжектируемого пучка, при которых происходит полная сепарация, т. е. все ионы пучка, прошедшего через зазор, являются однозарядными [1,2]. Показано, что существует

режим эффективной сепарации (рис. 1, прямая $c-d_1$), когда только все однозарядные ионы проходят через зазор.

Список литературы

- [1] *Humphries Jr.* et al. // J. Appl. Phys. 1986. V. 59. P. 1790.
- [2] *Humphries Jr., Rutkowsky H.* // J. Appl. Phys. 1990. V. 67. P. 3223.
- [3] *Oks E., Yushkov G., Litovko I.* et al. // Rev. Sci. Instrum. Feb 2002. V. 73. N 2.
- [4] *Бугаев А.С., Гушенец В.И., Николаев А.Г., Окс Е.М., Юшков Г.Ю.* // ЖТФ. 2000. Т. 70. В. 9.
- [5] *Миллер Р.* Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц / Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 432 с.
- [6] *Гвоздовер С.Д.* Теория электронных приборов сверхвысоких частот. М.: Гостехиздат, 1956.
- [7] *Shklaev V.A., Belomyttsev S.Ya., Ryzhov V.V.* // Proceedings of the 13th Symposium on High Current Electronics. Russia, Tomsk, July 25–29, 2004. P. 80–82.