

4. West H. I.// Jr. Calculation of Ion Charge-State Distribution in ECR Ion Source. UCRL-53391/Lawrence Livermore National Laboratory. University of California, 1982.
5. Chan-Tung N. Thèse de doctorat. — Grenoble, 1980.
6. Shirkov G.// Plasma sources science and technology. 1993. V. 2. № 4. P. 250—257.
7. Shirkov G.// Review of scientific instruments. 2000. V. 71. № 2. P. 850—852.
8. Philippov A. V., Shirkov G. D., Tokareva N. A. Multicomponent consideration of electron fraction and numerical simulation of the bremsstrahlung emission from the ECR source in afterglow mode. JINR Commun. E9-2001-21. — Dubna, 2001. P. 15.
9. Shirkov G., Zschornack G.// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. B. 1995. V. 95. P. 527—532.
10. Dougar-Jabone V. D., Kondratov B. A., Umnov A. M.// Review of Scientific Instruments. 1992. V. 63. № 4. P. 2864—2866.
11. Dougar-Jabone V. D., Umnov A. M.// Ibid. P. 2869—2871.
12. Dougar-Jabone V. D., Umnov A. M., Kutner V. B.// Ibid. 1996. V. 67. № 3. P. 1152—1154.
13. Dougar-Jabone V. D., Chacon Velasco A. J., Umnov A. M., Kariaka V. I.// Physica Scripta. 1999. V. 60. P. 250—252.
14. Pastukhov V. P.// Nuclear Fusion. 1974. V. 14. № 3. P. 3—6.
15. Пастухов В. П.// Вопросы теории плазмы: Сб. ст. — М.: Энергоатомиздат. 1984. Вып. 13. С. 160—204.
16. Rognlien T. D., Catler T. A.// Nuclear Fusion. 1980. V. 20. P. 1003—1011.
17. Langmuir I., Compton K. T. // Review of Modern Physics. 1931. V. 3. № 2. P. 191—257.
18. Consoli F., Philippov A. V., Shirkov G. D. et al.// Proc. of 33rd European physical society conference on plasma physics, Rome, Jun. 19—23. 2006. V. 301. P-2.067.
19. Кадомцев Б. Б.// ЖТЭФ. 1961. Т. XXXI. Вып. 10. С. 1209—1219.

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.

Development of the balance equations model for calculation of ion charge-state distribution in ECR ion sources

A. V. Philippov, G. D. Shirkov

Joint Institute for Nuclear Research, Particle Physics Laboratory, Dubna, Russia

F. Consoli, S. Gammino, G. Ciavola, L. Celona

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali del Sud, Catania, Italy

S. Barbarino

Università degli Studi di Catania, Dipartimento di Fisica e Astronomia, Catania, Italy

The investigation of the widespread model for the calculation of ion charge-state distributions (CSD) in electron cyclotron-resonance ion source based on the set of balance equations is given. The modification of this model that allows one to describe the confinement and accumulation processes of highly charged ions in ECR plasma for gas mixing case more precisely is discussed. The discussion of the calculation technique for the time confinement of ions and electrons based on the theory of Pastukhov is given, viz. — calculation of confinement times during two stage minimization of the special type functionals. The results obtained by this approach have been compared with available experimental data.

УДК 537.534.3

О фокусирующих свойствах ограниченного в осевом направлении электронного цилиндра

Г. А. Ковальский

Московский институт радиотехники, электроники и автоматики, Москва, Россия

Показано, что ограниченный по длине аксиально-симметричный электронный цилиндр обладает фокусирующими свойствами по отношению к пучкам ионов. Приведен пример расчета параметров системы для фокусировки интенсивного пучка ионов гелия.

Введение

Трудности фокусировки ионных пучков связаны, как известно, с большой плотностью их объемного заряда даже при небольших интенсивностях.

Сохранение определенного диаметра пучка возможно лишь при нейтрализации объемного заряда электронами за счет ионизации остаточных газов. По этой причине невозможно использовать для фокусировки обычные электростатические линзы,

поскольку их применение ведет к нарушению нейтральности пучка и, как следствие, к разрушению его формы объемным зарядом. Магнитные линзы, действие которых зависит от отношения заряда частицы к ее массе, обладают слабой оптической силой по отношению к ионам. В ряде теоретических и экспериментальных работ [1—5] по этой тематике была показана возможность эффективной фокусировки ионных пучков с помощью определенной комбинации электрических и магнитных полей. В первых работах предлагаемые конструкции линз отличались большой сложностью и требовали использования многоэлектродных систем. В более поздних системах число электродов удавалось уменьшить [6, 7], но, наряду с радиальным электрическим, всегда оставалась фактически бесполезной для достижения эффекта фокусировки аксиальная составляющая напряженности электрического поля. В данной работе предлагается простая по конструкции фокусирующая система, не содержащая аксиального электрического поля.

Фокусирующая система и ее анализ

В качестве фокусирующего элемента используется ограниченный по длине аксиально-симметричный электронный цилиндр, помещенный в аксиальное магнитное поле. Ниже приводится аналитическое рассмотрение системы цилиндр—аксиальное магнитное поле.

Если плотность объемного заряда электронов в цилиндре обозначим ρ , то радиальная напряженность электрического поля равна

$$E = \frac{\rho r}{2\varepsilon_0},$$

где r — радиус цилиндра;

ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума.

Если параллельно оси цилиндра Z движется ион с массой M и скоростью u , то уравнение для радиального движения этого иона может быть записано в виде

$$M \frac{d^2}{dt^2} r = eE = \frac{e\rho r}{2\varepsilon_0}.$$

Учитывая, что r является функцией Z , можно левую часть представить в виде

$$u^2 \frac{d^2}{dZ^2} r.$$

Уравнение движения примет вид

$$\frac{d^2}{dZ^2} r + \frac{e\rho r}{2Mu^2\varepsilon_0} = 0.$$

Решение уравнения имеет вид

$$r = C_1 \cdot \cos(\sqrt{k} \cdot Z) + C_2 \cdot \sin(\sqrt{k} \cdot Z).$$

Учитывая известное соотношение $\frac{Mu^2}{2} = eV$, где V — потенциал ускорения ионов, можно записать

$$k = \frac{e\rho e}{2Mu^2\varepsilon_0} = \frac{\rho e}{4V\varepsilon_0}.$$

Если начало координат системы совместить с передней плоскостью цилиндра, то при $Z = 0$ $C_1 = r_0$

$$r = r_0 \cdot \cos(\sqrt{k} \cdot Z) + C_2 \cdot \sin(\sqrt{k} \cdot Z).$$

Если в начале координат пучок движется параллельно оси Z , то

$$\frac{d}{dZ} r = 0 \quad \text{и} \quad C_2 = 0.$$

Окончательное выражение для траектории иона в цилиндре, учитывая

$$\sqrt{k} = \sqrt{\frac{\rho e}{4V\varepsilon_0}},$$

принимает вид

$$r = r_0 \cdot \cos(\sqrt{k} \cdot Z).$$

Если длина цилиндра равна L , то на выходе пучка из цилиндра величина его радиуса составит

$$r_L = r_0 \cdot \cos(\sqrt{k} \cdot L).$$

Тангенс угла наклона траектории иона к оси Z в указанном месте определяется выражением

$$\frac{d}{dZ} r = r_0 \cdot \sin(\sqrt{k} \cdot L) \cdot \sqrt{k}.$$

Расстояние от координаты $Z = L$ выхода пучка из цилиндра до пересечения траекторией иона оси Z составит

$$F_Z = r_0 \frac{\cos(\sqrt{k} \cdot L)}{r_0 \cdot \sin(\sqrt{k} \cdot L) \cdot \sqrt{k}} = \frac{1}{\sqrt{k} \cdot \operatorname{tg}(\sqrt{k} \cdot L)}$$

и не зависит от радиуса входа иона в цилиндр, т. е. имеет место фокусировка ионных траекторий в точке $Z = L + F_Z$. Величина F_Z является по существу фокусным расстоянием линзы и, соответственно, оптическая сила линзы равна

$$\frac{1}{F_Z} = \sqrt{k} \cdot \operatorname{tg}(\sqrt{k} \cdot L).$$

Для удержания электронного цилиндра в пределах заданного диаметра можно использовать продольное магнитное поле, т. н. "поле Бриллюэна".

В этом случае величина необходимого поля B_z определяется, как известно, из равновесия действующих на цилиндр радиальных сил: центробежной, расталкивающей и центростремительной (возникающей в результате вращения цилиндра в поле B_z).

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 r + \eta_e E_r = \eta_e B_z r \left(\frac{d\theta}{dt}\right),$$

где η_e — отношение заряда электрона к его массе;

$\frac{d\theta}{dt}$ — скорость вращения электронного цилиндра, равная $\eta_e \frac{B_z}{2}$, откуда

$$(B_z)^2 = \frac{4\rho_e}{\eta_e \epsilon_0} = 16 \frac{kV}{\eta_e}.$$

Потенциал цилиндрического электрода с радиусом R , окружающего электронный цилиндр, будет

$$V_R = \int_0^R E_r dr = \int_0^R \rho_e \frac{r}{2\epsilon_0} dr = \frac{\rho_e R^2}{4\epsilon_0}.$$

В качестве приложения приводится таблица основных параметров предложенной системы для фокусировки пучка ионов гелия диаметром 0,05 м.

Заключение

Представленные результаты расчетов показывают, что ограниченный по длине аксиально-симметричный электронный цилиндр обладает фокусирующими свойствами по отношению к пучкам ионов.

Параметры фокусирующих систем с использованием электронного цилиндра

F_z , м	$1/F_z$, 1/м	l , м	K , 1/м ²	$\rho \cdot 10^{-4}$, кул/м ³	R , м	$U_R \cdot 10^3$, В	B_z , Тл	$U_z \cdot 10^4$, В	I , А	M	$\rho_i \cdot 10^{-5}$, кул/м ³
0,5	2	0,20	266,27	4,7	0,025	8,3	0,024	3,0	0,02	4	1,2
		0,30	122,50	2,17	0,025	3,8	0,017	3,0	0,02	4	1,2
		0,40	71,16	1,26	0,025	2,2	0,013	3,0	0,02	4	1,2
1,0	1,0	0,20	256,6	4,54	0,025	8,0	0,024	3,0	0,02	4	1,2
		0,30	116,2	2,06	0,025	3,64	0,015	3,0	0,02	4	1,2
		0,40	66,57	1,18	0,025	2	0,012	3,0	0,02	4	1,2
1,5	0,667	0,20	253,4	4,485	0,025	7,92	0,024	3,0	0,02	4	1,2
		0,30	114,1	2,02	0,025	3,565	0,016	3,0	0,02	4	1,2
		0,40	65,0	1,15	0,025	2,03	0,012	3,0	0,02	4	1,2

Литература

1. Морозов А. И.: Докл. АН СССР. 1965. Т. 163. № 6. С. 1363.
2. Лебедев С. В., Морозов А. И.// ЖТФ. 1966. № 36. С. 960.
3. Жуков В. В., Морозов А. И., Щепкин Г. Я.// Письма в ЖЭТФ. 1969. № 9. С. 14.
4. Морозов А. И., Лебедев С. В.// ЖТФ. 1974. № 44. С. 1548.

5. Лебедев С. В., Морозов А. И.// Там же. 1976. № 46. С. 1571.

6. Ковальский Г. А. и др.// Радиотехника и электроника. 1978. № 1. С. 218.

7. Booth R. and Lefevre H. W.// Nucl. Instr. and Methods. 1978. № 151. P. 143.

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.

About focal properties of the electron cylinder restricted in an axial direction

G. A. Kovalsky

Moscow Institute of Radio-Technics, Electronic and Automatic, Russia

It is shown that restricted long axially-symmetrical electron cylinder has focal properties in relation to ion beams. The calculation of system parameters for to focus an intensive ion beams of helium is given.