

ФОКУСИРОВКА ИОННОГО ПУЧКА ПРИОСЕВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

В. С. Александров, Г. Г. Гульбекян, Н. Ю. Казаринов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

С целью повышения интенсивности пучка ионов, инжектируемых в циклотрон, исследуется возможность фокусировки пучка приосевым потенциальным электродом. Оцениваются влияние электрического поля электрода на эмиттанс пучка и потери частиц на электроде. Результаты численного моделирования сравниваются с теоретическими оценками.

For increasing of intensity of an ion beam injected in a cyclotron, possibility of focusing by axial potential electrode is investigated. Influence of electric field of an electrode on beam emittance and particle losses at electrode are estimated. Results of numerical simulation are compared with theoretical estimations.

PACS: 29.27.-a

ВВЕДЕНИЕ

В качестве источников ионов для циклотронов широкое распространение получили ЭЦР-источники. В пучках таких источников присутствуют ионы различных зарядностей. Поэтому полный ток пучка, как правило, значительно превышает ток ионов зарядности, требуемой для ускорения. Это приводит к тому, что собственное поле ионов препятствует увеличению интенсивности пучка из-за дефокусировки на участке между источником и магнитом-сепаратором. В работе исследуется возможность компенсации эффекта собственного поля пучка с помощью приосевого электрода, оценивается величина требуемого потенциала электрода, потери частиц на нем, а также влияние на эмиттанс пучка. Результаты получены применительно к пучку ионов аргона, извлекаемых из источника DECRIS-4 [1]. Моделирование движения пучка ионов производилось с помощью PIC-кода MCIB04 [2], учитывающего собственное поле пучка. Для вычисления внешних электрического и магнитного полей использовалась программа POISSON [3].

1. СОБСТВЕННОЕ ПОЛЕ ПУЧКА

Рассмотрим равномерно заряженный пучок ионов кругового сечения радиусом a , с током I . Пучок движется в заземленной трубе радиусом R . Потенциал собственного поля пучка имеет следующий вид:

$$\Phi_b = \begin{cases} U_b \left(\ln \frac{R}{a} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right), & r \leq a, \\ U_b \ln \frac{R}{r}, & a \leq r \leq R, \end{cases} \quad (1)$$

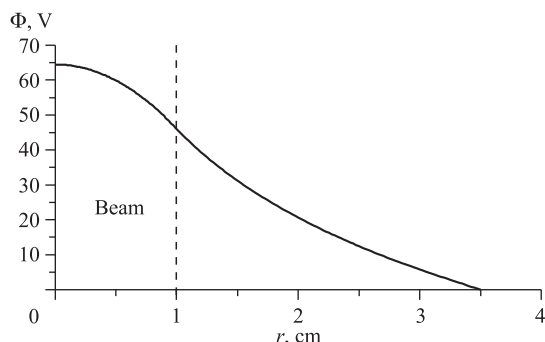


Рис. 1. Потенциал пучка

где $U_b = 2I/\beta c$, I — ток пучка; β — продольная скорость ионов, отнесенная к скорости света c .

Зависимость потенциала пучка ионов аргона, получаемого в DECRIS-4, от радиуса при $U_b = 38,6$ В, $a = 1$ см и $R = 3,5$ см показана на рис. 1.

2. ПОТЕНЦИАЛ ПРИОСЕВОВОГО ЭЛЕКТРОДА

Зависимость от радиуса потенциала Φ_e приосевого электрода радиусом r_0 имеет следующий вид:

$$\Phi_e = \frac{U_0 - \Phi_b(r_0)}{\ln(R/r_0)} \ln\left(\frac{R}{r}\right), \quad r_0 \leq r \leq R, \quad (2)$$

где U_0 — потенциал на поверхности электрода.

Как видно из (2), функциональная зависимость потенциала Φ_e такая же, как и потенциала пучка Φ_b вне его границы. Потребовав равенства (с обратным знаком) потенциалов электрода и пучка при $r \geq a$, получим

$$\Phi_e = -U_b \ln\left(\frac{R}{r}\right), \quad r_0 \leq r \leq R. \quad (3)$$

При таком определении напряжения на электроде потенциал суммарного электрического поля вне пучка равен нулю. Зависимость суммарного потенциала $\Phi_b + \Phi_e$ показана на рис. 2 сплошной кривой. Штриховыми кривыми на этом же рисунке показаны потенциалы электрода (2) с диаметром $\varnothing = 100$ мкм и пучка для указанных выше (1) параметров.

Радиальное электрическое поле на поверхности электрода E_s определяется формулой

$$E_s \cong -\frac{U_b}{r_0} \quad (4)$$

и для указанных выше параметров составляет величину 7,7 кВ/см.

Таким образом, приосевой электрод диаметром 100 мкм с приложенным напряжением на нем 250 В полностью компенсирует собственное поле пучка ионов аргона,

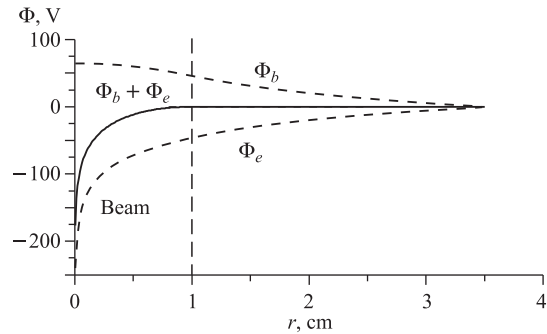


Рис. 2. Суммарный потенциал пучка и электрода ($\varnothing = 100$ мкм)

полученного в DECRIS-4. Поверхностное электрическое поле на электроде при этом не превышает 8 кВ/см. Уменьшение диаметра приосевого электрода нежелательно, поскольку приведет к увеличению поверхностного электрического поля.

3. УСТАНОВКА

Схема установки, для которой проводились расчеты, показана на рис. 3. Магнитное поле (рис. 4) создается тремя катушками DECRIS-4 и линзой, отстоящей от ионного источника на 403 мм. За начало координат принята точка экстракции пучка (12 см от центра источника). Область моделирования по продольной координате от 0 до 100 см, эмиттанс пучка вычислялся на выходе из магнитного поля. На оси установки помещен

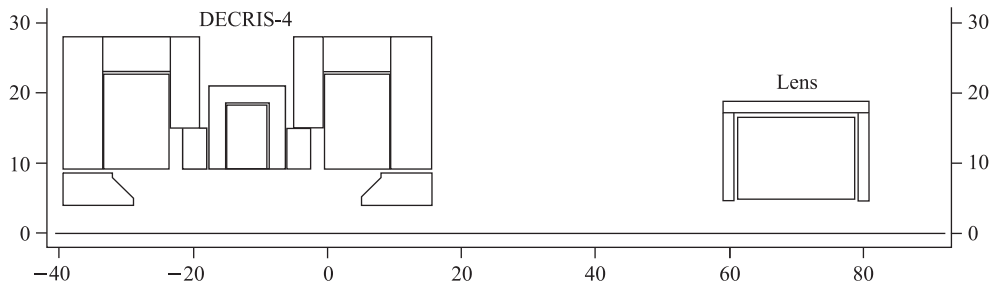


Рис. 3. Схема установки

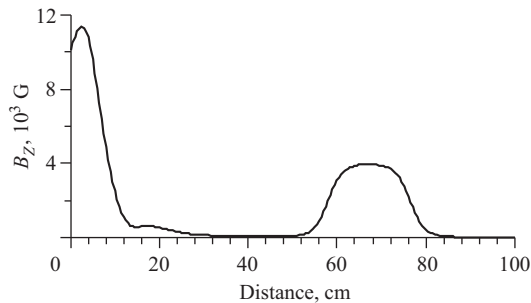


Рис. 4. Распределение магнитного поля на оси установки

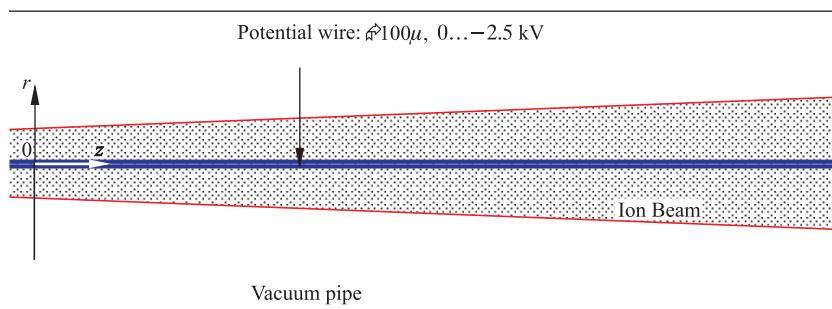


Рис. 5. Схема размещения приосевого электрода

приосевой электрод (рис. 5) диаметром 100 мкм, потенциал которого варьировался в пределах 0–2,5 кВ.

4. НАЧАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПУЧКА ИОНОВ

Параметры пучка, использованные при моделировании, приведены в таблице. Начальное распределение по зарядностям в пучке аргона показано на рис. 6.

Энергия ионов, кэВ/ q	20
Ток пучка, еА	0–12
Среднеквадратичный эмиттанс, $\pi \cdot \text{см} \cdot \text{рад}$	10^{-4}
α	0
β , см/рад	625
Радиус, см	0,25

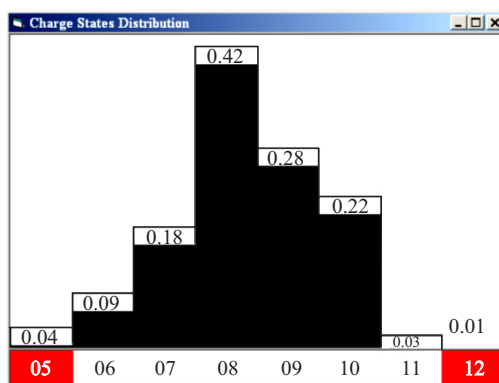


Рис. 6. Спектр пучка аргона

5. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В расчетах радиус вакуумной трубки был принят 5 см, чтобы избежать потерь ионов на ней и выделить потери на приосевом электроде. Количество макрочастиц от 5000 до 10000. На рис. 7–10 показаны характерные результаты для тока пучка 1,2 мА и значений потенциала электрода 0 и –250 В.

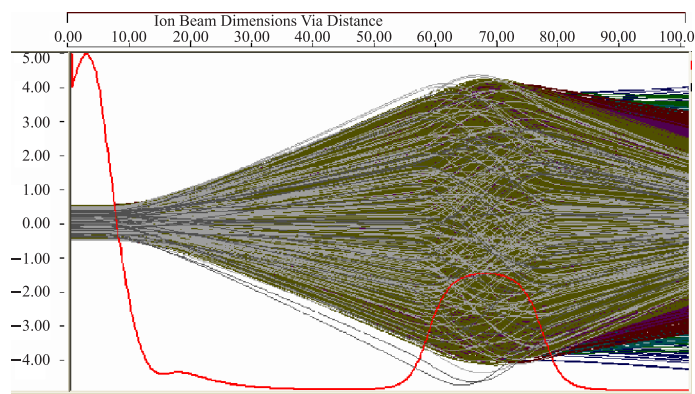


Рис. 7. Траектории частиц пучка и магнитное поле. $\Phi_e = 0$

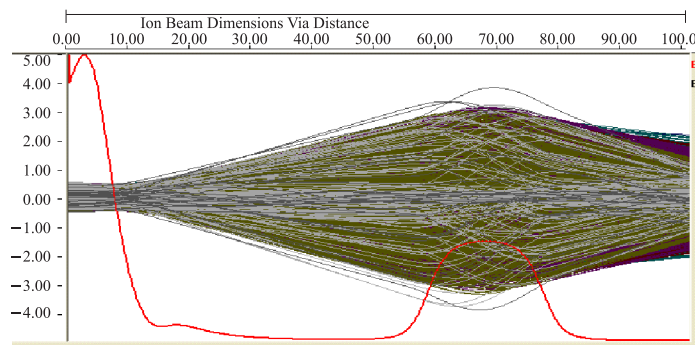


Рис. 8. Траектории частиц пучка и магнитное поле. $\Phi_e = 250$ В

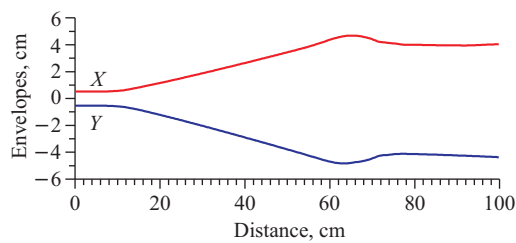


Рис. 9. Огибающие пучка, $\Phi_e = 0$

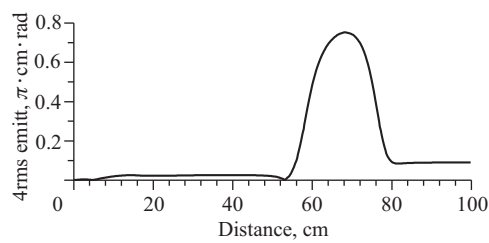


Рис. 10. Эмиттанс, $\Phi_e = 0$

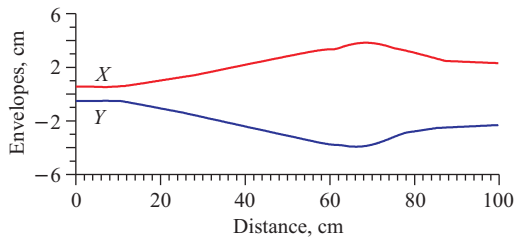


Рис. 11. Огибающие пучка, $\Phi_e = 250$ В

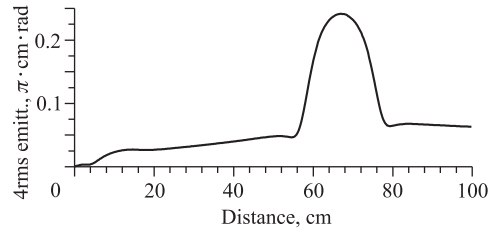
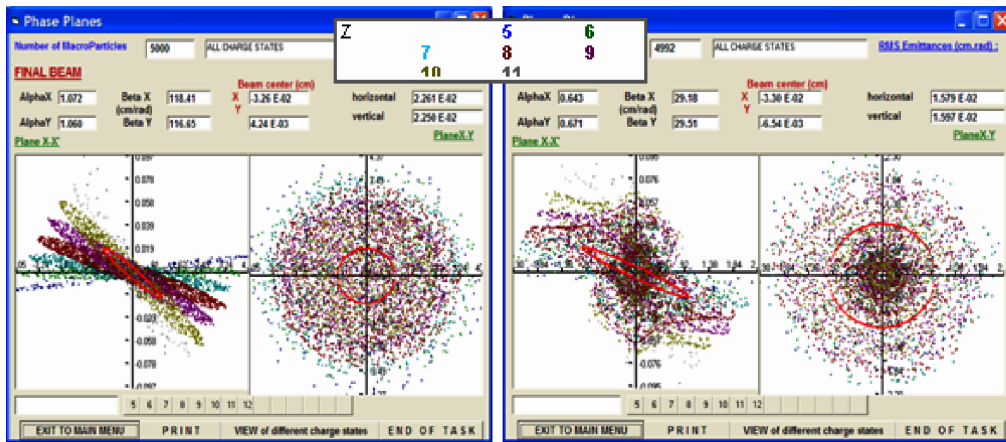


Рис. 12. Эмиттанс, $\Phi_e = 250$ В



$\Phi_e = 0$

$\Phi_e = 250$ В

Рис. 13. Финальные распределения ионов на плоскости XX' и сечении пучка. Цвета точек, изображающих разные заряды, показаны в табличке на рисунке

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получено хорошее согласие результатов численного моделирования с теоретическими оценками. Приосевой электрод дает возможность компенсировать собственное поле пучка ионов.

Для пучка аргона приведенных выше параметров

- эмиттанс пучка, начиная с некоторого значения потенциала приосевого электрода, выходит на уровень, который практически не зависит от тока пучка (в пределах 0–1,2 мА). Уровень эмиттанса составляет $\sim 0,05$ см · рад;
- существенных потерь на приосевом электроде не наблюдалось, для токов пучка 0–1,2 мА они составляли доли процента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Leporis M. et al. The New ECR Ion Source DECRIS-4 // Proc. of 10th Intern. Conf. on Ion Sources, Dubna, Sept. 8–13, 2003.
2. Aleksandrov V., Kazarinov N., Shevtsov V. Multi-Component Ion Beam Code — MCIB04 // Proc. of XIX Rus. Particle Accelerator Conf. (RuPAC-2004), Dubna, 2004. P. 201.
3. POISSON Program. Los Alamos Acc. Group, LA-UR-87-115. 1987.