

01; 10

© 1990 г.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОЙ ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Ш. Бири, С. Л. Богомолов

Проведено моделирование электростатической аксиально-симметричной ионно-оптической системы (ИОС) для формирования ионного пучка, извлекаемого из ионного источника. Рассмотрено построение ИОС с распределением потенциала на оси, состоящим из линейного и косинусоидального членов. Из заданного распределения потенциала на оси определена форма электродов и их потенциалы. Проверка свойств построенной таким образом ИОС проведена с помощью программы ELENIS. Сравнением с известными из литературы ИОС показано, что построенные предложенным методом ИОС обеспечивают формирование пучка практически такого же качества. Описанный в работе метод построения ИОС не требует проведения большого объема численных расчетов.

Введение

Получение и формирование интенсивных ионных пучков хорошего качества являются актуальной задачей во многих областях науки и техники. Одной из таких задач является инжекция ионного пучка из внешнего ионного источника в циклотрон. В этом случае размер и угловая расходимость получаемого из инжектора ионного пучка определяют эффективность его транспортировки по тракту инжекции.

Начальное формирование ионного пучка, извлекаемого из ионного источника, производится электростатической ионно-оптической системой (ИОС). В большинстве случаев ИОС состоит из нескольких электродов, падающих под разными потенциалами. Проектирование ИОС заключается в нахождении геометрических параметров и потенциалов электродов, обеспечивающих получение минимальных размера и угловой расходимости пучка.

Как правило, эта задача решается путем численного моделирования различных вариантов ИОС при изменении геометрических параметров и потенциалов электродов (см., например, [1]). Такой способ требует рассмотрения значительного числа вариантов с целью выбора лучшего из них. Существуют также методы определения геометрических параметров и потенциалов электродов электростатических устройств путем решения обратной задачи, исходя из заданного на линии или поверхности электрического поля [2].

В настоящей работе описывается метод определения параметров ИОС, основанный на задании распределения потенциала на оси системы.

Расчет распределения потенциала в ионно-оптической системе

Ионно-оптические системы ионных источников, используемых для инжекции пучков в ускорители, выполняют две функции: ускорение ионов до энергии инжекции; получение параметров пучка (угловой расходимости, размера пучка и т. д.), необходимых для дальнейшей его транспортировки.

Одно из известных решений задачи транспортировки пучков с заданными свойствами с помощью электростатической системы заключается в формировании на оси системы косинусоидального распределения потенциала [3]

$$U(Z) = U_0 + U_c \cos(Z^*),$$

где $Z^* = (\pi/d)Z$, Z — расстояние вдоль оси пучка, U_0 — постоянный потенциал, U_c — амплитуда осевого изменения потенциала, d — полупериод изменения осевого потенциала.

Это дает хорошие результаты при транспортировке пучка без изменения его энергии.

Для ускорения пучка до некоторой энергии необходима разность потенциалов между ионным источником и последним электродом ИОС. В этом случае распределение потенциала будет представлять собой суперпозицию линейного и косинусоидального распределений. Запишем его в виде

$$U(Z) = U_c \cos(Z^*) + U_L(1 - Z/L), \quad (1)$$

где U_L — амплитуда линейного распределения, L — длина ИОС (расстояние между эмиттирующей поверхностью и последним электродом ИОС).

Для дальнейшего изложения нам потребуется величина, связанная с числом полупериодов косинусоидального распределения, уместающихся на длине L . Обозначим ее N и выразим в виде $N = (L - d/2)/d + 2$.

На рис. 1 приведено распределение потенциала на оси, описываемое уравнением (1), при разных отношениях U_c/U_L и $N=5$. Чтобы сформировать такое

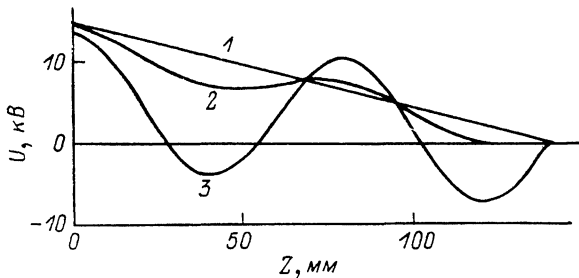


Рис. 1. Распределение потенциала на оси ИОС.

$$U_c: 1 - 0, 2 - 0.16 U_L, 3 - 1.4 U_L.$$

распределение потенциала, нужно знать потенциал вне оси. Для этого необходимо решить уравнение Лапласа с граничным условием на оси, заданным уравнением (1). Эта задача решается методом, описанным в работе [3]. Решение ищем в виде

$$U(R, Z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U(Z') d\alpha, \quad (2)$$

где $Z' = Z + iR \cos \alpha$, R — расстояние от оси пучка, $dU(R, Z)/dR = 0$ при $R=0$.

Подставив выражение (1) в (2) и выполнив интегрирование, получим

$$U(R, Z) = U_c \cos(Z^*) J_0(R^*) + U_L(1 - Z/L), \quad (3)$$

где $R^* = (\pi/d)R$, $J_0(R^*)$ — модифицированная функция Бесселя нулевого порядка.

Пусть R_0 — радиус апертуры электродов ИОС (в общем случае электроды могут иметь отличающиеся друг от друга апертуры). Источник ионов находится под потенциалом U_0 , следовательно, $U(R_0, 0) = U_0$. Подставляя значение $U(R_0, 0)$ в уравнение (3), получим

$$U_L = U_0 - U_c J_0(R_0^*) \quad (R_0^* = (\pi/d)R_0). \quad (4)$$

В выражении (3) для $U(R, Z)$ остаются неизвестными два параметра N и U_c . Эти величины могут принимать следующие значения: N — целое число больше двух, U_c может изменяться от 0 до некоторого максимального значения U_{cm} , определяемого из уравнения (4) при $U_L = 0$ (в этом случае распределение потенциала косинусоидальное).

Задача заключается в нахождении геометрии электродов и их потенциалов, которые создают распределение потенциала (3). Расчет ведем по методу, описанному в [3].

Возьмем число электродов, равное N , хотя это не является единственной возможностью. Полагаем, что первый электрод ИОС — это выходной электрод ионного источника, N -й электрод — последний электрод ИОС, находящийся под нулевым потенциалом.

Пусть внутренние поверхности электродов проходят через точки с координатами (R, kd) , где $k=0, 1, 2, \dots, N-2$ ($k=0$ соответствует первому электроду,

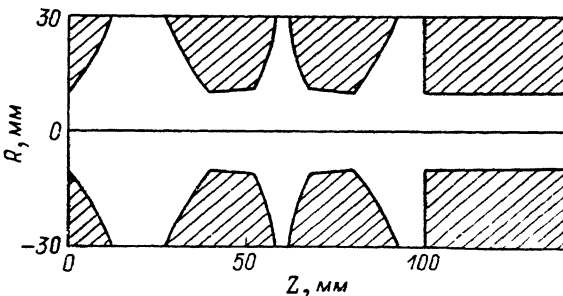


Рис. 2. Ионно-оптическая система.

$L=140$ мм, $N=4$, $R_0=10$ мм, $U_c=0.25 U_{cm}$, $U_0=15$ кВ.

$k=N-2$ — предпоследнему электроду ИОС). Потенциалы точек (R_0, kd) будут являться потенциалами электродов. Из уравнения (3) получим

$$U_k = (-1)^k U_c J_0(R_0^*) + U_L (1 - kd/L) \quad (5)$$

при $k=0, 1, 2, \dots, N-2$. Последний электрод ИОС проходит через точку $(R_0, (N-1.5)d)$ и его потенциал равен нулю.

Форма электродов совпадает с эквипотенциальными поверхностями, проходящими через точки (R_0, kd) . Из уравнения (3) получаем трансцендентные уравнения, описывающие геометрию электродов,

$$\cos(Z^*) = [FZ^* + G]/J_0(R^*), \quad (6)$$

где

$$F = [U_0 - U_c J_0(R_0^*)]/[LU_c],$$

$$G = (-1)^k J_0(R_0^*) + kd [U_0 - U_c J_0(R_0^*)]/[LU_c] \text{ при } k=0, 1, 2, \dots, N-2,$$

$$G = kd [U_0 - U_c J_0(R_0^*)]/[LU_c] \text{ при } k=N-1.5.$$

Используя заданные величины U_0, R_0, L и выбирая U_c, N , находим геометрию электродов из уравнений (6), которые решаем итерационным методом с помощью программы, поставленной на ПЭВМ «Правец-16».

На рис. 2 показана геометрия ИОС, рассчитанная описанным выше способом.

Влияние параметров ИОС на характеристики пучка.

Влияние параметров U_c и N на траектории частиц рассматривалось с помощью программы ELENŠ [4]. Программа рассчитывает распределение потенциала в системе аксиально-симметричных электродов с заданной геометрией и потенциалами и траектории частиц. Уравнение Лапласа решается на основе метода конечных разностей и метода верхней релаксации. Для вычисления траекторий частиц с учетом пространственного заряда используется квазигидродинамическое приближение. Поток заряженных частиц разбивается на некоторое конечное число трубок для вычисления кулоновских поправок. Плот-

ность ионного тока в плоскости, перпендикулярной пучку, постоянна. Уравнение траекторий решается методом Эйлера с уточнением.

Для упрощения расчетов предполагаем, что поверхность эмиттера является плоской и ее положение совпадает с эквипотенциальной плоскостью в непосредственной близости от эмиссионного отверстия ионного источника. Ионы эмиттируются в направлении, перпендикулярном плоскости эмиттера. Влияние тепловых скоростей ионов не учитывается.

Программа ELENS работает на ЭВМ БЭСМ-6, данные для расчета, содержащие геометрию и потенциалы электродов, готовились в виде файла на ПЭВМ «Правец-16» и передавались на БЭСМ-6 по терминальной сети. Результаты расчетов принимались на «Правец-16», где проводилось их редактирование и представление в виде графиков и таблиц. Исходные данные для расчета: $L=60-140$ мм (в зависимости от числа электродов); $R_0=10$ мм; $A/q=4$ (A — атомная

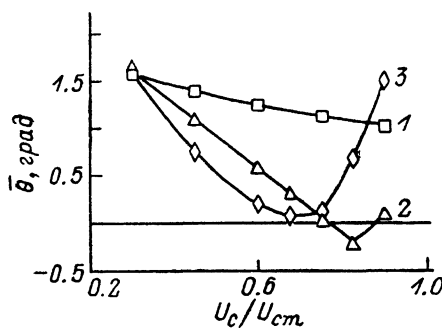


Рис. 3. Зависимость Θ от U_c/U_{cm} при различных значениях параметра N .
 N : 1 — 3, 2 — 4, 3 — 5; ток пучка 0.5 мА.

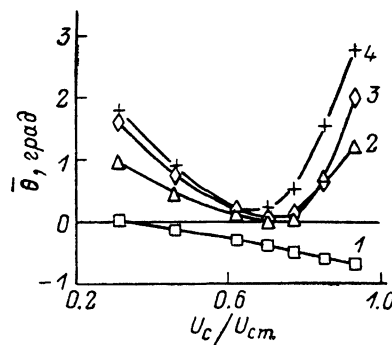


Рис. 4. Зависимость Θ от U_c/U_{cm} при различных токах пучка ($N=5$).
 I , мА: 1 — 0, 2 — 0.2, 3 — 0.5, 4 — 1.

масса, q — заряд иона в единицах элементарного заряда); ток пучка $i=0.2-1$ мА. Определялся угол Θ , который образует траектория частицы с оптической осью системы после прохождения ИОС. Из расчетов траекторий 10 частиц определялся средний угол Θ , который будем считать критерием качества пучка ($\Theta > 0$ соответствует расходящемуся пучку, $\Theta < 0$ — сходящемуся).

На рис. 3 представлена зависимость Θ от U_c/U_{cm} при $N=3, 4, 5$. Из рисунка видно, что с увеличением N возможно получение меньшей угловой расходимости. При $N=4$ и 5 с ростом U_c сначала происходит уменьшение угловой расходимости, а затем ее рост. Во избежание перефокусировки необходимо выбирать $U_c=(0.3-0.6) U_{cm}$. Следует также иметь в виду, что увеличение N ведет к усложнению системы.

На рис. 4 представлены зависимости Θ от U_c/U_{cm} для различных токов пучка. Из рисунка видно влияние пространственного заряда на траектории частиц.

Теперь предположим, что расстояние между электродами ИОС не одинаково, как это было до сих пор, а является, например, линейной функцией расстояния от источника. Тогда вместо d в уравнениях следует использовать $d^*=d+tZ$, где t — постоянная величина. Уравнения при этом изменяются, но ход расчетов остается прежним. При t , отличном от 0, изменяется форма электродов. Влияние параметра t на траектории частиц также рассматривалось с помощью программы ELENS. Расчеты показывают, что при заданных значениях U_0, L, N, d всегда можно найти величину t , обеспечивающую получение минимальной расходимости пучка. В большинстве случаев значение t находится в диапазоне $-0.2-0.2$ и почти всегда отрицательно.

Проведено сравнение ИОС, рассчитанной описанным методом, с экспериментальными результатами работ [5-7] и с данными обзорной работы [8]. Процедуру сравнения поясняет рис. 5.

По известной геометрии электродов и их потенциалам с помощью программы ELENS рассчитывалось распределение потенциала на оси системы. Затем определялись параметры уравнения (3) U_c , N , t , дающие наилучшее приближение к рассчитанному осевому потенциалу (в уравнение (3) вместо величины d входит величина d^*). Для рассмотренных систем значения этих параметров находятся в следующих диапазонах: $U_c = 0.2-0.4$, $t = -0.2-0.25$, $N = 3-5$.

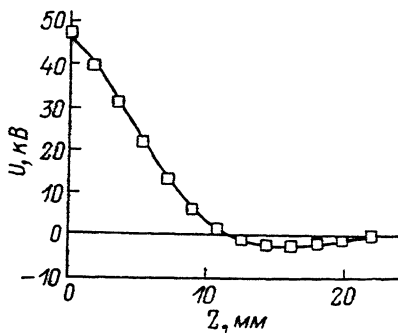


Рис. 5. Блок-схема процедуры сравнения ИОС, рассчитанных различными методами.

На рис. 6 показаны в качестве примера распределение потенциала на оси ИОС, описанной в работе [7], и распределение потенциала, описываемое уравнением (3) при значениях параметров уравнения $U_c = 0.35 U_{cm}$, $t = 0.25$, $N = 3$.

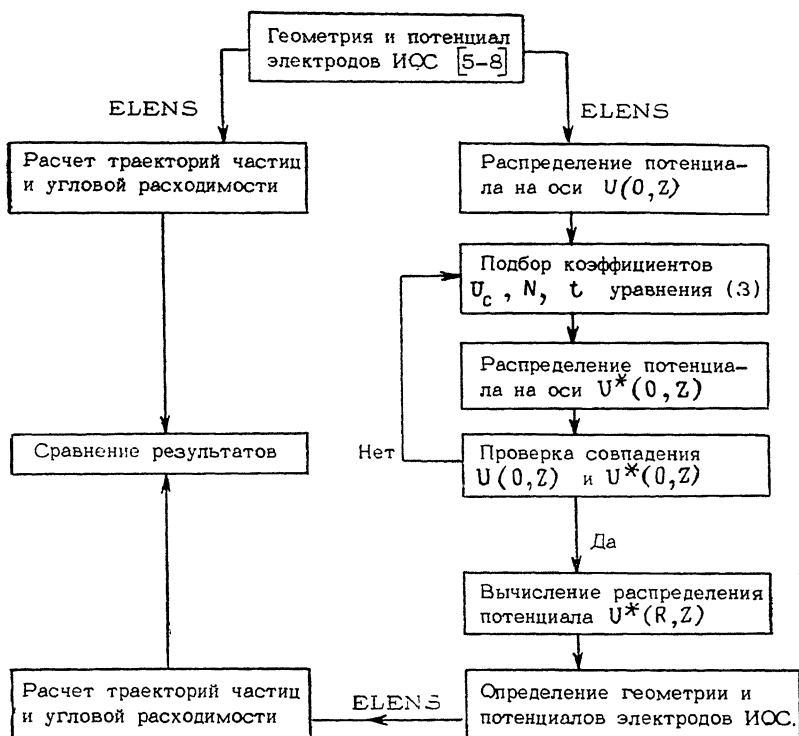


Рис. 6. Распределение потенциала на оси ИОС [7] (1) и распределение, рассчитанное в данной работе (2).

С использованием этих параметров найдены форма и потенциалы электродов ИОС. С помощью программы ELENS проведен расчет расходимости ионного пучка в ИОС [5-8] и в ИОС, построенной исходя из распределения осевого потен-

генциала. Расчет показал, что для обеих ИОС расходимость оказывается практически одинаковой в случае параксиальных пучков. Следует отметить, что при совпадении осевых потенциалов обеих ИОС, число электродов, их форма и потенциалы в случае построения ИОС описанным методом могут отличаться от ИОС, описанных в литературе [5-8].

Заключение

Рассмотрено построение ИОС с распределением потенциала на оси, состоящим из линейного и косинусоидального членов. Из распределения осевого потенциала определены форма электродов и их потенциалы. Рассмотрено влияние параметров уравнения осевого потенциала на расходимость пучка с учетом пространственного заряда. Определены оптимальные значения свободных параметров уравнения для получения минимальной угловой расходимости пучка.

Сравнением с известными из литературы ИОС показано, что предложенным методом можно построить ИОС, не прибегая к большому объему численных расчетов.

Авторы благодарят Н. И. Тарантина за ряд полезных замечаний, высказанных при рецензировании работы.

Список литературы

- [1] *Дитрих Ю.* ОИЯИ. № 9-80-495. Дубна, 1980. 10 с.
- [2] *Тарантин Н. И.* ОИЯИ. № Р9-88-149. Дубна, 1988. 16 с.
- [3] *Молоковский С. И., Сушков А. Д.* Интенсивные электронные и ионные пучки. Л.: Энергия, 1972. 272 с.
- [4] *Hornsby J. S.* CERN. 6600 Computer Center. Program Library. Geneve, 1965.
- [5] *Siebenlist F.* // NIM. 1987. Vol. A256. N 2. P. 207-218.
- [6] *Green T. S.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1976. Vol. NS-23. N 2. P. 918-928.
- [7] *Keller R., Nöhmayr F., Spädtke P., Shönenberg M.-H.* // Vacuum. 1984. Vol. 34. P. 31-43.
- [8] *Keller R.* Report GSI-87-76. GSI Darmstadt, 1987. 48 p.

Поступило в Редакцию

11 октября 1988 г.

В окончательной редакции

19 сентября 1989 г.