

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЧКА НА ВХОДЕ В ИОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ТРАКТ СЕПАРАТОРА ИЗОТОПОВ ЦИКЛОТРОНА У-240

© 2010 А. Е. Вальков, А. К. Зайченко, А. И. Устинов

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

Предложен простой алгоритм определения параметров Твисса и эмиттанса пучка на входе в ионно-оптический тракт сепаратора изотопов циклотрона У-240.

Ключевые слова: ионно-оптический тракт, сепаратор изотопов, параметры Твисса, эмиттанс.

Введение

В работе [1] было показано, что магнит СП-017 монохроматора циклотрона У-240 может быть использован для разделения изотопов атомных ядер в широком диапазоне масс. В настоящее время на основе этого магнита в Институте ядерных исследований НАН Украины разрабатывается сепаратор стабильных изотопов [2]. В состав сепаратора входят также источник ионов, одиночная электростатическая линза, электростатический квадрупольный триплет, магнитная квадрупольная линза и приемник ионов. Все эти элементы разделены свободными промежутками.

Элементы сепаратора удобно разделить на систему формирования пучка и ионно-оптический тракт. Систему формирования пучка составляют одиночная линза, электростатический квадрупольный триплет и разделяющие их свободные промежутки. Квадрупольная линза, магнит СП-017 и три свободные промежутки образуют ионно-оптический тракт, предназначенный для разделения изотопов и транспортировки выделенных изотопов в приемное устройство.

Для определения оптимальных режимов работы сепаратора разрабатывается также система диагностики пучка и комплекс программ, необходимых для расчета входных значений параметров пучка и параметров отдельных элементов ионно-оптического тракта. В этой работе описывается методика расчета параметров Твисса и эмиттанса пучка на входе в ионно-оптический канал. Методика измерений будет описана в другой работе.

Описание пучка как целого

Расчет параметров оптических систем обычно выполняют в линейном приближении. В этом приближении в системах, состоящих из магнитных квадрупольных линз и поворотных магнитов, движения частиц в поперечных плоскостях независимы [3]. Для анализа поперечного движения частиц в таких системах обычно исполь-

зуют представление пучка на горизонтальной и вертикальной поперечных фазовых плоскостях  $(x, x')$  и  $(y, y')$  соответственно. Величины  $x$  и  $y$  в этом случае представляют поперечное смещение частицы относительно оси системы, а величины  $x'$  и  $y'$  определяют угол наклона траектории частицы.

В фазовых плоскостях пучок занимает области, ограниченные эллипсами. В плоскости  $(x, x')$ , например, область фазового пространства, занятая центральным пучком, ограничивается эллипсом [4]

$$\gamma x^2 + 2\alpha x x' + \beta x'^2 = \epsilon_x, \tag{1}$$

где  $\alpha, \beta$  и  $\gamma$  - параметры Твисса, связанные соотношением

$$\beta\gamma - \alpha^2 = 1, \tag{2}$$

а  $\epsilon_x$  - эмиттанс пучка в этой плоскости.

Параметр  $\alpha$  определяет наклон эллипса относительно системы координат. Значению  $\alpha = 0$  соответствует каноническое положение эллипса. При  $\alpha > 0$  большая ось эллипса располагается во втором и четвертом квадрантах. Такому положению эллипса соответствует сходящийся пучок. При  $\alpha < 0$  большая ось эллипса лежит в первом и третьем квадрантах. Пучок в этом случае расходится.

Параметры  $\beta$  и  $\gamma$  связаны с проекциями эллипса на пространственную и угловую оси координат соответственно. В частности, проекция наиболее удаленной от оси  $x'$  точки эллипса на горизонтальную ось  $x_{max}$  (полуширина пучка) равна

$$x_{max} = \sqrt{\beta\epsilon_x}, \tag{3}$$

а максимальное угловое отклонение в пучке определяется соотношением

$$x'_{max} = \sqrt{\gamma\epsilon_x}. \tag{4}$$

Аналогичные соотношения имеют место и в вертикальной плоскости.

Наиболее важным параметром при определении качества пучка заряженных частиц является поперечный эмиттанс. Приблизительно он равен произведению диаметра пучка на величину его углового раствора [5]. Для данного размера пучка чем меньше поперечный эмиттанс, тем более параллельны траектории частиц пучка и тем легче транспортировать и фокусировать пучок.

При прохождении пучка через отдельные элементы ионно-оптического тракта параметры Твисса изменяются соответственно линейному трехмерному преобразованию [3 - 6]. Следовательно, сформировав матрицы преобразования в квадрупольной линзе, отклоняющем магните и свободном промежутке, матрицу преобразования ионно-оптического тракта можно найти простым перемножением этих матриц. Тогда, измерив значения параметров Твисса на входе в тракт, нетрудно найти и значения этих параметров на входе в приемное устройство. Удобнее всего формировать параметры ионно-оптического тракта таким образом, чтобы на входе в приемное устройство пучок ионов выделенного изотопа имел кроссовер в горизонтальной плоскости, т. е. положение с наименьшей проекцией на горизонтальную ось.

Для измерения параметров Твисса и эмиттанса используется метод диафрагмирования пучка двумя взаимно перпендикулярными щелями. На расстоянии  $L \sim 1$  м от щелей установлены проволочные горизонтальный и вертикальный профилометры, позволяющие измерять параметры вырезаемых щелями частей пучка. Для обработки результатов измерений разработана программа EMITTANCE. Используя измеренные данные, программа определяет фазовый портрет пучка и рассчитывает входные значения параметров Твисса и эмиттанса пучка.

### Построение фазового портрета пучка

Каждому отклонению щели от оси ионно-оптического тракта, например, в горизонтальной плоскости соответствует пик в распределении токовых сигналов от проволочек (образ положения щели), описывающий распределение частиц в пучке, прошедшем через щель. Для построения фазового портрета пучка программа EMITTANCE определяет положение центра, стандартное отклонение, границы, площадь и угловые размеры каждого пика. Первые два параметра рассчитываются методом среднего взвешивания [7]. По ним определяются границы пика. Площадь пика находится суммированием токовых сигналов от отдельных проволочек.

Номер проволочки  $c_i$ , соответствующий цен-

тру  $i$ -го пика, определяется выражением

$$c_i = \sum_j n_j l_{i,j} / \sum_j l_{i,j}, \quad (5)$$

где  $l_{i,j}$  - ток проволочки  $n_j$ , а стандартное отклонение пика - выражением

$$\sigma_i = \sum_j (c_i - n_j)^2 l_{i,j} / \sum_j l_{i,j}. \quad (6)$$

Величина, стоящая в знаменателях этих формул, определяет площадь пика. Она пропорциональна суммарному току источника. В качестве левой и правой границ  $i$ -го пика в программе используются точки

$$l_i = c_i - 2\sigma_i \quad \text{и} \quad r_i = c_i + 2\sigma_i \quad (7)$$

соответственно. При нормальном распределении токов в проволочках в этих границах укладывается 95 % площади пика.

По найденным таким образом значениям  $l_i$  и  $r_i$  определяются отклонения границ  $i$ -го пика от оси ионно-оптического тракта

$$x_{i,1} = (l_i - n_c)h, \quad x_{i,2} = (r_i - n_c)h,$$

где  $n_c$  - номер проволочки, соответствующей оси ионно-оптического тракта;  $h$  - расстояние между проволочками. По этим значениям отклонений определяются угловые размеры пика

$$x'_{i,1} = (x_{i,1} - x_i)/L, \quad x'_{i,2} = (x_{i,2} - x_i)/L, \quad (8)$$

где  $x_i$  - смещение щели от оси тракта.

Точки  $x'_{i,1}$  и  $x'_{i,2}$ , полученные при различных значениях смещения щели  $x_i$ , образуют представляющую фигуру - фазовый портрет пучка на плоскости  $(x, x')$ . Эта фигура аппроксимируется эллипсом. Параметры Твисса и эмиттанс эллипса определяются методом наименьших квадратов.

Аналогично определяются характеристики пучка и в вертикальной плоскости.

### Определение параметров Твисса и эмиттанса

Будем считать, что в горизонтальной фазовой плоскости  $(x, x')$  эллипс описывается уравнением (1). Разделим его на  $\beta$  и введем обозначения

$$a = \alpha/\beta, \quad c = \gamma/\beta, \quad e = \varepsilon_x/\beta. \quad (9)$$

Тогда уравнение (1) примет вид

$$x'^2 + 2axx' + ex^2 - e = 0. \quad (10)$$

Составим функционал

$$S = \sum_i \left[ (x'^2_{1,i} + 2ax_i x'_{1,i} + cx^2_{1,i} - e)^2 + (x'^2_{2,i} + 2ax_i x'_{2,i} + cx^2_{2,i} - e)^2 \right]. \quad (11)$$

Если вместо точек  $x'_{1,i}$  и  $x'_{2,i}$  в этот функционал подставить точки эллипса, он будет равен нулю. Отличие функционала (11) от нуля обусловлено отличием точек  $x'_{1,i}$  и  $x'_{2,i}$  от точек эллипса. Следовательно, параметры  $a$ ,  $c$  и  $e$  могут быть найдены минимизацией функционала (11). Из условия минимума этого функционала

$$\frac{\partial S}{\partial p} = 0, \quad p = a, c, e$$

для определения параметров  $a$ ,  $c$  и  $e$  получим систему линейных неоднородных алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} \sum_i [x_{1,i}^2 + x_{2,i}^2 + 2ax_i(x'_{1,i} + x'_{2,i}) + 2(cx_i^2 - e)] &= 0, \\ \sum_i [x_{1,i}^2 + x_{2,i}^2 + 2ax_i(x'_{1,i} + x'_{2,i}) + 2(cx_i^2 - e)]x_i^2 &= 0, \\ \sum_i [(x_{1,i}^3 + x_{2,i}^3) + 2ax_i(x_{1,i}^2 + x_{2,i}^2) + (cx_i^2 - e)(x'_{1,i} + x'_{2,i})]x_i &= 0. \end{aligned}$$

Решив эту систему, найдем значения величин  $a$ ,  $c$  и  $e$ . Воспользуемся, далее, условием связи (2). Разделив его на  $\beta^2$ , для определения параметра  $\beta$  с учетом формул (9) получим выражение

$$\beta = 1/\sqrt{c - a^2}.$$

Определив из него значение  $\beta$ , из отношений (9) найдем и значения величин  $a$ ,  $\gamma$  и  $\varepsilon$ :

$$\alpha = \beta a, \quad \gamma = \beta c \quad \text{и} \quad \varepsilon_x = \beta e.$$

Такой метод определения параметров Твисса и эмиттанса используется в программе EMITTANCE. Он значительно проще известных методов (см., например, работы [8] и [9] и указанные в них ссылки).

Аналогично определяются характеристики пучка и в вертикальной плоскости.

Для обработки результатов измерений в процессе наладки сепаратора разработана и программа EMITTANCE\_2, позволяющая определять входные значения параметров Твисса и эмиттанса нецентрального пучка. В этом случае область фазового пространства, занятая пучком частиц в плоскости  $(x, x')$ , ограничивается эллипсом [3]

$$\gamma x^2 + 2\alpha x x' + \beta x'^2 + 2(\xi x + \eta x') + \delta = 0. \quad (12)$$

Центр этого эллипса определяется выражениями

$$\begin{aligned} \langle x \rangle &= (\alpha\eta - \beta\xi)/(\beta\gamma - \alpha^2), \\ \langle x' \rangle &= (\alpha\xi - \beta\eta)/(\beta\gamma - \alpha^2). \end{aligned} \quad (13)$$

В системе координат

$$u = x - \langle x \rangle, \quad u' = x' - \langle x' \rangle,$$

связанной с центром эллипса, уравнение эллипса принимает вид

$$\gamma u^2 + 2\alpha u u' + \beta u'^2 = \varepsilon,$$

где

$$\varepsilon = (\beta\xi^2 - 2\alpha\xi\eta + \gamma\eta^2)/(\beta\gamma - \alpha^2). \quad (14)$$

Параметры эллипса (12) определяются так же, как и параметры эллипса (1), после чего находятся координаты центра эллипса  $\langle x \rangle$  и  $\langle x' \rangle$  по формулам (13) и значение эмиттанса пучка по формуле (14).

Аналогично определяются характеристики пучка и в плоскости  $(y, y')$ .

### Тестирование метода

Ниже приведен пример определения характеристик пучка однозарядных ионов аргона с энергией 40 кэВ при токе 3 мА в вертикальной плоскости.

В ходе измерений характеристик этого пучка было получено 10 пиков в распределении токовых сигналов от проволочек, соответствующих 10 отклонениям щели от оси тракта. С помощью программы EMITTANCE были определены характеристики этих пиков, построен фазовый портрет пучка и рассчитаны значения параметров Твисса и эмиттанса пучка. В результате были получены следующие значения:

$$\begin{aligned} \alpha &= -1,84, \quad \beta = 3,02 \text{ мм/град}, \\ \gamma &= 1,46 \text{ мрад/мм} \quad \text{и} \quad \varepsilon = 304,8 \text{ мм} \cdot \text{мрад}. \end{aligned}$$

Однако сумма квадратов отклонений точек эллипса от точек представляющей фигуры при этих значениях параметров  $\alpha, \beta, \gamma$  и  $\varepsilon$  оказалась очень большой:  $S = 1612 \text{ мрад}^2$ . Расчет с помощью программы EMITTANCE\_2 дал значение  $S = 12,66 \text{ мрад}^2$  и показал, что центр пучка смещен от оси тракта в точку с координатами  $\langle y \rangle = 6,2 \text{ мм}$ ,  $\langle y' \rangle = -3,75 \text{ мрад}$ . Для учета смещения центра пучка в программе EMITTANCE был проведен поиск значения номера проволочки  $n_c$ , соответствующего оси тракта, при котором функционал (11) минимален. Оптимальным оказалось значение  $n_c = 19,55$  (в действительности оси тракта соответ-

ствует значение  $n_c = 24$ ). При этом значении  $n_c$  были получены следующие значения параметров  $\alpha, \beta, \gamma$  и  $\varepsilon$ :

$$\alpha = -7,76, \quad \beta = 10,14 \text{ мм/мрад}, \\ \gamma = 6,03 \text{ мрад/мм}, \quad \varepsilon = 243,95 \text{ мм}\cdot\text{мрад}.$$

Сумма квадратов отклонений точек эллипса от точек представляющей фигуры при этих значениях параметров уменьшилась более чем на два порядка:  $S = 13,76 \text{ мрад}^2$ .

Аналогичные результаты были получены и при обработке результатов ряда других измерений (во всех измерениях пучок оказывался нецентрированным). Это свидетельствует о том, что предложенный метод определения характеристик пучка достаточно эффективен и программа EMITTANCE может использоваться для определения параметров Твисса и эмиттанса центрального пучка на входе в ионно-оптический канал разрабатываемого сепаратора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вальков А.Е., Демьянов А.В., Долинский А.В. и др. Использование магнита монохроматора циклотрона У-240 для сепарации стабильных изотопов // 36. наук. праць Ін-ту ядерних досл. - 2005. - № 1 (14). - С. 160 - 168.
2. Dolinskii A., Demyanov A., Dolinska M. et al. Design study of the KINRIS isotope separator with a 270° wide aperture magnet // Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. - 2008. - Vol. В 266. - Р. 4188.
3. Карташев В.П., Котов В.И. Основы магнитной оптики. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 152 с.
4. Котов В.И., Миллер В.В. Фокусировка и разделение по массам частиц высоких энергий. - М.: Атомиздат, 1969. - 280 с.
5. Брук Г. Циклические ускорители заряженных частиц. - М.: Атомиздат, 1970. - 311 с.
6. Khiari F.Z., Abdel-Aal R.E., Muhammad R. Beam emittance reconstruction at the KFUPM 350 keV in accelerator // Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. - 1994. - Vol. A343. - Р. 383.
7. Брегадзе Ю.И., Степанов Э.К., Ярына В.П. Прикладная метрология ионизирующих излучений. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 264 с.
8. Долинская М.Э., Дорошко Н.Л., Зайченко А.К. Определение эмиттанса пучка репер-пот методом // 36. наук. праць Ін-ту ядерних досл. - 2002. - № 1 (7). - С. 182.
9. Казаринов Н.Ю., Казача В.И., Калагин И.В., Галл Ф. Методики измерения поперечного эмиттанса ионного пучка в канале инжекции циклотрона DC-72. - Дубна, 2002. - (Препр. / ОИЯИ; Р9-2002-120).

#### ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЧКА НА ВХОДІ В ІОННО-ОПТИЧНИЙ ТРАКТ СЕПАРАТОРА ІЗОТОПІВ ЦИКЛОТРОНА У-240

О. Е. Вальков, О. К. Зайченко, А. И. Устинов

Запропоновано простий алгоритм визначення параметрів Твісса та емітансу пучка на вході в іонно-оптичний тракт сепаратора ізотопів циклотрона У-240.

Ключові слова: іонно-оптичний тракт, сепаратор ізотопів, параметри Твісса, емітанс.

#### DETERMINATION OF THE BEAM CHARACTERISTICS AT THE ENTRANCE OF THE ION-OPTICAL TRACT OF THE CYCLOTRON U-240 ISOTOPE SEPARATOR

O. E. Valkov, O. K. Zaichenko, A. I. Ustinov

Simple algorithm for the determination of the Twiss parameters and emittance of the beam at the entrance of ion-optical tract of the cyclotron U-240 isotope separator is suggested.

Keywords: ion-optical tract, isotope separator, Twiss parameters, emittance.

Поступила в редакцию 01.03.10,  
после доработки - 14.04.10.