

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА СЕПАРАТОРА
СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ ЦИКЛОТРОНА У-240

© 2011 А. Е. Вальков, А. В. Дубинин, А. К. Зайченко

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

Описан метод измерения параметров пучка на входе в ионно-оптический тракт сепаратора стабильных изотопов циклотрона У-240.

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

Введение

В Институте ядерных исследований НАН Украины (ИЯИ) разрабатывается сепаратор стабильных изотопов [1, 2]. В состав сепаратора входят источник ионов, одиночная электростатическая линза, электростатический квадрупольный триплет, магнитная квадрупольная линза, анализирующий магнит СП-017 с неоднородным полем и приемник ионов. Все эти элементы разделены свободными промежутками.

Разделение изотопов и транспортировка их в приемное устройство осуществляются анализирующим магнитом СП-017.

Одиночная электростатическая линза, электростатический квадрупольный триплет и магнитная квадрупольная линза образуют ионно-оптический тракт, осуществляющий согласование эмиттанса пучка с аксептансом анализирующего магнита, необходимое для получения требуемых характеристик пучка ионов выделенного изотопа на входе в приемное устройство.

Для расчета оптимальных режимов работы элементов согласующего тракта и решения задачи согласования эмиттанса пучка с аксептансом анализирующего магнита нужно знать пространственно-угловые параметры пучка на входе в тракт. Параметры пучков заряженных частиц определяются распределением плотности частиц пучка в поперечных фазовых плоскостях. Эти распределения измеряют щелевым, градиентным или реррег-рот методом (см. например, работы [3 - 7] и указанную в них литературу). Одним из наиболее просто аппаратно-реализуемых и в то же время достаточно оперативных и точных методов является метод диафрагмирования пучка с частичным интегрированием [3]. Он является одной из реализаций щелевого метода. В этом методе измерение распределения фазовой плотности частиц пучка производится двумя разнесенными вдоль оси ионпровода (оси z) подвижными диафрагмами со щелями, вытянутыми вдоль поперечной оси x или y . Одной из щелей в плоскости измерений фиксируют координату поперечного смещения ионов, например вдоль

оси x , а с помощью второй щели в плоскости детектирования определяют диапазон угловых отклонений частиц в диафрагмированном пучке, прошедшем через первую щель при этом смещении. Для определения угловых отклонений производится сканирование второй щелью вдоль оси x . Частицы пучка, прошедшие через обе щели, регистрируются измерителем тока (обычно цилиндром Фарадея).

В этой работе описывается метод измерения параметров пучка в разрабатываемом сепараторе, являющийся модификацией метода диафрагмирования пучка с частичным интегрированием, а также система диагностики, с помощью которой производится измерения профиля, параметров Твисса и эмиттанса пучка.

Метод измерений

Параметры пучка на входе в согласующий тракт разрабатываемого сепаратора определяются по распределению плотности частиц пучка в поперечных фазовых плоскостях. Это распределение измеряется поочередно двумя подвижными диафрагмами с взаимно перпендикулярными щелями. Одна из щелей выделяет часть пучка в узкой полосе поперечного сечения пучка вдоль оси x , а другая – вдоль оси y . Диапазон угловых отклонений частиц в пучке, прошедшем через ту или иную щель, измеряется профилометром с горизонтальными и вертикальными молибденовыми проволочными нитями, установленным на расстоянии $L = 1091$ мм от щелей.

Такой метод не требует сканирования второй щели при каждом фиксированном отклонении первой щели. Сканирование щелей производится независимо. Это позволяет оперативнее, чем в методе диафрагмирования с частичным интегрированием, определять параметры пучка.

Система диагностики

Структурная схема системы диагностики пучка приведена на рис. 1.

Основными элементами системы диагностики являются два пробника со щелевыми диафрагма-

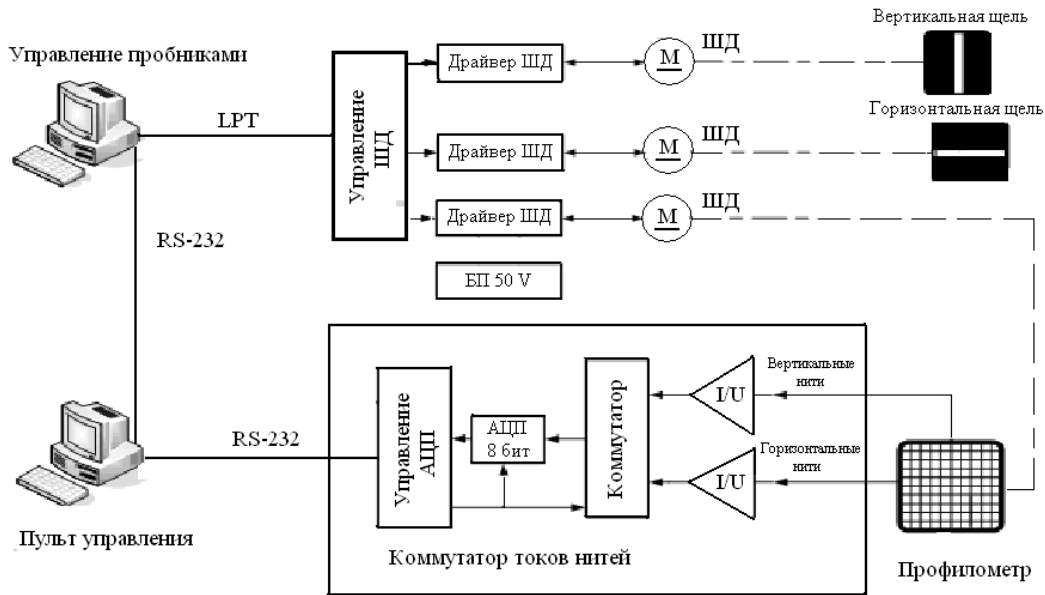


Рис. 1. Структурная схема системы диагностики пучка.

ми и пробник с профилометром. Пробники с диафрагмами установлены в крестовине ионопровода, расположенной между электростатическим триплетом и магнитной квадрупольной линзой (рис. 2). Пробник с профилометром установлен во второй крестовине, расположенной между магнитной квадрупольной линзой и анализирующим магнитом СП-017. Позиционирова-

ние пробников осуществляется электроприводами на основе шаговых двигателей (ШД) с датчиками начального положения (ДНП). Расстояние до центра ионопровода от ДНП вертикальной щели 120 мм, а от ДНП горизонтальной щели 136 мм. Диапазон перемещения электроприводов 200 мм, скорость перемещения от 0,5 до 2 мм/с.

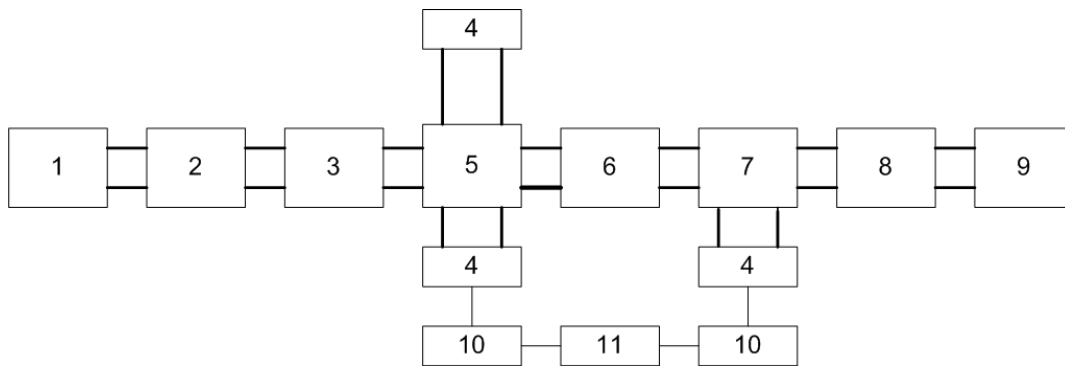


Рис. 2. Схема размещения элементов системы диагностики пучка в ионно-оптическом тракте сепаратора: 1 - ионный источник; 2 - одиночная электростатическая линза; 3 - электростатический квадрупольный триплет; 4 - крестовины с пробниками; 5 - пробники с диафрагмами; 6 - магнитная квадрупольная линза; 7 - пробник с профилометром; 8 - магнит СП-017; 9 - приемник ионов; 10 - электроприводы; 11 - блок управления и обработки измеряемых величин.

Управление шаговыми двигателями пробников производится по стандартному каналу LRT отдельного компьютера, выполняющего функции контроллера. Этот компьютер по последовательному каналу RS-232 передает данные о текущем положении пробников на компьютер обработки и мониторинга измеряемых величин, находящийся на пульте оператора.

Шаговые двигатели перемещают диафрагмы и профилометр в плоскости, перпендикулярной оси ионопровода. Диаметр ионопровода 150 мм.

Диафрагмы представляют собой изолированные медные пластины толщиной 5 мм со щелями размером 120×2 мм, охлаждаемые деионизированной водой с удельным сопротивлением не менее 1 Мом, поступающей от установки CODB-047.

Профилометр представляет собой сборку из двух металлических пластин с квадратными отверстиями размером 104×4 мм, расположенных перпендикулярно к оси ионопровода. На каждой из пластин закреплено по 50 молибденовых нитей диаметром 0,1 мм: на одной – горизонтальных, на другой – вертикальных. Нити крепятся на расстоянии 2 мм друг от друга. Они изолированы друг от друга и от «земли». В системе диагностики профилометр служит измерителем тока.

Каждая нить профилометра подключена к отдельному преобразователю «ток – напряжение» (I/U). Выходные напряжения преобразователей поочередно передаются электронным коммутатором на вход восьмиразрядного аналогоцифрового преобразователя (АЦП). С выхода АЦП цифровые значения токов по последовательному каналу RS-232 передаются схемой управления на компьютер обработки и мониторинга измеряемых величин, находящийся на пульте оператора.

Для проведения измерений профилометр устанавливается в положение, при котором его центр совпадает с осью ионопровода.

Измерение профиля пучка

При прохождении пучка через профилометр токовые сигналы, снимаемые с нитей профилометра, пропорциональны количеству частиц, попадающих на эти нити, поэтому сигналы с горизонтальных нитей характеризуют вертикальный профиль пучка, а сигналы с вертикальных нитей – горизонтальный профиль.

С помощью преобразователей «ток – напряжение» токовые сигналы с нитей преобразуются в напряжения. Выходные напряжения преобразователей поочередно передаются электронным коммутатором на вход АЦП, с выхода которого цифровые значения напряжений по последовательному каналу передаются схемой управления на компьютер обработки и мониторинга измеряемых величин, находящийся на пульте оператора. По этим значениям рассчитываются положение центра, ширина пучка и суммарные токи с горизонтальных и вертикальных нитей. Вычисления проводятся с помощью программы PROFILE.

Вертикальный и горизонтальный профили пучка отображаются на экране дисплея компьютера, находящегося на пульте оператора. По ним оператор может визуально оценить форму и положение центра пучка и при необходимости внести коррективы в работу системы управления ионным источником.

Измерение параметров Твисса и эмиттанса

Для измерения параметров Твисса и эмиттанса пучка на входе в согласующий тракт сепаратора в поперечной плоскости ионопровода поочередно сканируют вертикальную и горизонтальную щелевые диафрагмы. В процессе измерений диафрагма с горизонтальной щелью перемещается с шагом от 2 до 4 мм по сечению ионопровода сверху вниз, а диафрагма с вертикальной щелью – слева направо с тем же шагом. Во время остановки диафрагмы производится измерение токов с нитей профилометра. После проведения измерений диафрагма и профилометр выводятся из рабочей части ионопровода.

Каждому отклонению горизонтальной (вертикальной) щели от оси тракта соответствует пик в распределении токовых сигналов от горизонтальных (вертикальных) нитей профилометра, описывающий распределение частиц в пучке, прошедшем через щель. Эти распределения через преобразователи «ток – напряжение» каждой нити и АЦП передаются схемой управления на компьютер обработки и мониторинга измеряемых величин. По этим значениям с помощью программы «EMITTANCE» рассчитываются параметры Твисса и эмиттанса пучка в плоскости сканирования диафрагм (плоскости измерений). Метод расчета описан в работе [8]. Там же приведен и пример определения параметров пучка однозарядных ионов аргона с энергией 40 кэВ по измеренным распределениям плотности частиц пучка в вертикальной фазовой плоскости. После вычисления параметров пучка в плоскости измерений производится расчет параметров пучка на входе в согласующий тракт сепаратора.

При проведении измерений параметров Твисса и эмиттанса пучка элементы согласующего тракта не используются, и согласующий тракт можно рассматривать как свободный промежуток с длиной l , равной расстоянию от ионного источника до плоскости измерений. Если пучок проходит этот промежуток без потерь частиц, величина эмиттанса пучка сохраняется. Изменяются только параметры Твисса. Значения параметров Твисса α , β и γ в плоскости измерений связаны со значениями этих параметров α_0 , β_0 и γ_0 на входе в согласующий тракт матричным уравнением [9]

$$\begin{pmatrix} \gamma \\ \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -l & 1 & 0 \\ l^2 & -2l & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma_0 \\ \alpha_0 \\ \beta_0 \end{pmatrix}.$$

Из этого уравнения следует, что значения параметров Твисса на входе в согласующий тракт равны

$$\gamma_0 = \gamma, \alpha_0 = \alpha + l\gamma_0, \beta_0 = \beta - l^2\gamma_0 + 2l\alpha_0.$$

По этим формулам и рассчитываются значения параметров Твисса на входе в тракт. Полученные значения можно использовать для расчета параметров элементов согласующего тракта, обеспечивающих согласование эмиттанса пучка с аксептансом анализирующего магнита.

Таким образом, к настоящему времени на сепараторе стабильных изотопов ИЯИ выполнены следующие работы:

разработан метод измерения параметров пучка на входе в ионно-оптический тракт сепаратора;

сконструирована и изготовлена система диагностики пучка, предназначенная для измерения распределения плотности частиц пучка в поперечных фазовых плоскостях;

разработаны программы, позволяющие определять профиль, параметры Твисса и эмиттанс пучка на входе в согласующий тракт сепаратора по результатам измерений;

проведены предварительные измерения распределения плотности пучка однозарядных ионов аргона с энергией 40 кэВ в вертикальной фазовой плоскости;

рассчитаны значения параметров Твисса и эмиттанса пучка по измеренным распределениям.

В настоящее время разрабатываются источники ионов химических элементов, изотопы которых нужно разделить.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вальков А. Е., Демьянов А. В., Долинский А. В. и др. Использование магнита монохроматора циклотрона У-240 для сепарации стабильных изотопов // Зб. 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. - P. 4188 - 4191.
3. Москалев В. А., Сергеев В. И., Шестаков В. Г. Измерение параметров пучков заряженных частиц. - М.: Атомиздат, 1980. - С. 145 - 146.
4. Rhee M. J., Schneider R. F. The root-mean-square emittance of an axisymmetric beam with a Maxwellian velocity distribution // Particle Accelerators. - 1986. - Vol. 20, No. 2. - P. 133 - 141.
5. Казаринов Н. Ю., Казача В. И., Калагин И. В., Галл Ф. Методики измерения поперечного эмиттанса ионного пучка в канале инжекции циклотрона DC-72 // Сообщение ОИЯИ Р9-2002-120. - Дубна, 2002.
6. Долинская М.Э., Дорошко Н.Л., Зайченко А. К. Определение эмиттанса пучка реперг-пот методом // Зб. наук. праць Ін-ту ядерних досл. - 2002. - № 1 (7). - С. 182 - 188.
7. Казаринов Н. Ю., Казача В. И. Восстановление функции распределения частиц в четырехмерном фазовом пространстве по результатам измерений методом реперг-пот // Письма в ЭЧАЯ. - 2010. - Т. 7, № 2 (158). - С. 242 - 250.
8. Вальков А. Е., Зайченко А. К., Устинов А. И. Определение характеристик пучка на входе в ионно-оптический тракт сепаратора изотопов циклотрона У-240 // Ядерна фізика та енергетика. - 2010. - Т. 11, № 2. - С. 199 - 202.
9. Карташев В. П., Котов В. И. Основы магнитной оптики. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - С. 80.

МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ВХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ ПУЧКА СЕПАРАТОРА СТАБІЛЬНИХ ІЗОТОПІВ ЦИКЛОТРОНУ У-240

О. Є. Вальков, О. В. Дубінін, О. К. Зайченко

Описано метод вимірювання параметрів пучка на вході в іонно-оптичний тракт сепаратора стабільних ізотопів циклотрону У-240.

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

METHOD OF MEASURING ENTERING BEAM PARAMETERS OF THE CYCLOTRON U-240 STABLE ISOTOPE SEPARATOR

O. E. Valkov, O. V. Dubinin, O. K. Zaichenko

Method of measuring of the beam parameters at the entrance of the ion-optical tract of the cyclotron U-240 stable isotope separator is described.

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

Поступила в редакцию 16.11.10,
после доработки - 09.03.11.