

УДК 621.384.8

© 3. 3. Латыпов

МОНОХРОМАТОР ДЛЯ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ

В работе рассмотрена возможность реализации нового типа монохроматора потока ионов, испускаемых масс-спектрометрическими ионными источниками с широким энергетическим распределением. Монохроматизация потока ионов осуществляется путем преобразования энергетического спектра частиц в высоком вакууме за счет ударного воздействия коротких электрических импульсов на ионы в пространственно неоднородном поле с последующим формированием пучка ионов в электростатическом поле иммерсионной линзы. Математическое моделирование работы модели монохроматора показывает ее реализуемость как компактного и эффективного устройства для решения проблемы монохроматизации в масс-спектрометрии.

Кл. сл.: источник ионов, энергетический монохроматор, функция распределения энергии, масс-спектрометрия

ВВЕДЕНИЕ

Транспортировка монохроматического по энергии пучка ионов на вход масс-анализатора является основным фактором, от которого зависят разрешающая способность, точность определения массы и пропускание масс-спектрометра, а также дискриминация ионов в источнике.

В ряде работ [1–3] предложены методы транспортировки ионов от источника к камере масс-анализатора, проведены теоретические и экспериментальные исследования методов. Эти методы базируются на использовании фокусирующего ионные пучки свойства радиочастотного (RF) поля мультипольных систем и диссипации энергии ионов при столкновениях с молекулами буферного газа, наполняющего объем этих систем. Указанные методы требуют использования дополнительных систем дифференциальной откачки масс-спектрометров. Транспортировка ионов в этих системах в высоковакуумную область масс-спектрометра производится газовым потоком или дополнительными постоянными электрическими потенциалами.

В работе [4] нами предложена идея метода монохроматизации ионного пучка путем преобразования энергетического спектра частиц в высоком вакууме за счет ударного воздействия электрических импульсов на ионы. Рассмотрен случай пространственно однородного импульсного поля. Показано, что путем воздействия серии импульсов электрического поля на ионы за время их движения в пространстве преобразования можно уменьшить разброс ионов по энергии в потоке

частиц. Однако геометрические размеры монохроматора, основанного на этом методе, превышают размеры монохроматоров на основе мультипольных радиочастотных систем, а реализация метода требует применения высоковольтного высокочастотного генератора коротких импульсов электрического напряжения достаточно большой мощности.

В настоящей работе предложено развитие этого метода на основе пространственно неоднородных импульсных полей. Проведенное математическое моделирование работы метода подтверждает его эффективность и возможность его реализации с высокими физико-техническими характеристиками.

МОДЕЛЬ МОНОХРОМАТОРА

В предлагаемом в данной работе монохроматоре сужение функции распределения частиц по энергии (монохроматизация) осуществляется за счет целенаправленного преобразования энергетического спектра частиц в высоком вакууме путем ударного воздействия серии коротких электрических импульсов напряжения на ионы в пространственно неоднородном поле [5]. Рассмотрено двумерное поле с плоскостью симметрии и гармоническим потенциалом $\Phi = \Phi_0 e^{-bx/l} \cos by/l$, где Φ_0 — значение потенциала в точке $x_0 = y_0 = 0$, b — безразмерный параметр, l — выбранный линейный масштаб. Эквипотенциалами этого поля являются цилиндрические поверхности с сечением в любой плоскости $z = \text{const} = C$ в виде "арки". В работе

рассматривается движение частиц вблизи плоскости симметрии, когда на отверстие входного электрода падает ленточный поток частиц в направлении X с малым поперечным угловым расхождением. Рассмотрим движение частиц выпущенных из точки x_0 вдоль оси X со скоростью U_0 под действием электрического поля, включающегося на короткие промежутки времени Δt (см. рисунок). Потенциал вдоль оси симметрии будет иметь вид $\Phi_{y=0} = \Phi_0 e^{-bx/l}$. Расстояние между входным и выходным электродами (эквипотенциалами) $x_{t=n\Pi} = L$, имеющими отверстия для пропуска потока ионов, частицы пройдут за время, равное n периодов Π , при этом конечная скорость и координата частиц зависят от числа периодов n , согласно

$$U_{t=n\Pi} = U_0 + \sum_{i=1}^n C' e^{-bx_{(n-1)\Pi+\Delta t}/l} \Delta t, \quad (4)$$

$$x_{t=n\Pi} = U_0 n \Pi + \sum_{i=1}^n C' e^{-bx_{(n-1)\Pi+\Delta t}/l} \Delta t (\Pi - \Delta t). \quad (5)$$

Здесь $C' = (qb / ml) \Phi_0$. По величине скорости частиц (4) находится их кинетическая энергия на выходе монохроматора.

При численном моделировании работы монохроматора безразмерный параметр выбран равным $b = 4$; линейный масштаб — равным $l = 3.82$ см; ширина "арки" — $H = l\pi / b = 3$ см; $L = 2$ см;

масса иона — $m = 200$ а.е.м.; потенциал входного электрода $\Phi_0 = 200$ В.

При моделировании приняты характеристики импульсов электрических потенциалов (длительность импульсов $\Delta t = 3 \cdot 10^{-8}$ с, период $\Pi = 5\Delta t = 1.5 \cdot 10^{-7}$ с и частота их поступления $f^* \sim 6.6 \cdot 10^6$ /с, амплитуды импульсов $200 < \Phi_0 < 1000$ В), выбранные на основе существующих и описанных в литературе высокочастотных и высоковольтных генераторов электрических импульсов [6–8]. Рассмотрено движение однозарядных ионов с массой $m = 200$ а.е.м. В гипотетической начальной функции распределения ионов по энергии минимальная энергии ионов принята равной $E_{s0} = 0.2$ эВ, максимальная энергия — $E_{f0} = 10$ эВ.

При выбранных характеристиках импульсного поля и геометрии электродной системы получены следующие результаты. "Медленная" частица испытает большее число ударов, чем "быстрая", что будет иметь результатом относительно большее изменение ее энергии и "сужение" кривой распределения частиц по энергии. Показано, что при пролете от входного до выходного отверстий "медленные" ионы испытают $n_1 \approx 105$, "быстрые" ионы — $n_2 \approx 14$ ударных воздействий поля и при этом разность конечных энергий существенно уменьшается: $E_f - E_s = 13 - 10 = 3$ эВ, т. е. произойдет эффективная монохроматизация потока ионов.

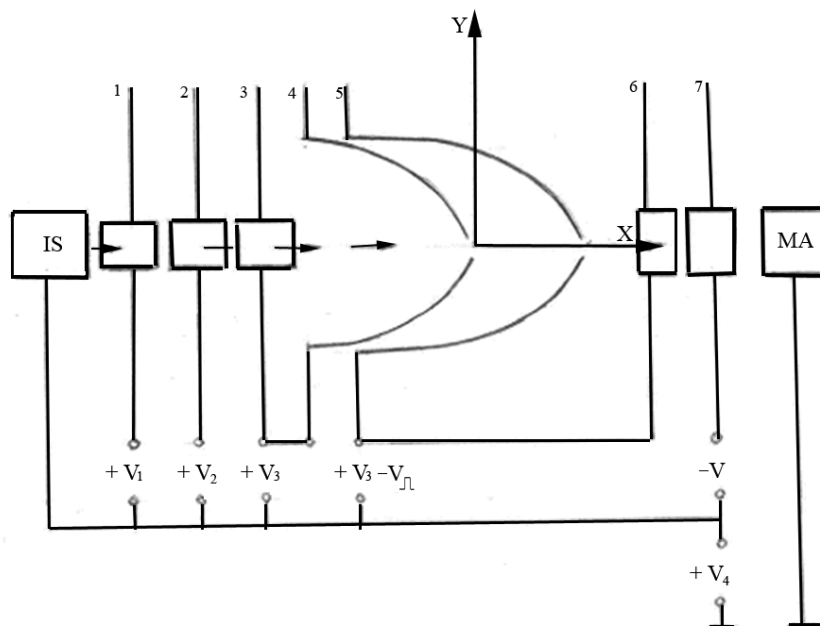


Схема встроенного в масс-спектрометр монохроматора.
IS — ионный источник; (1, 2) и (2, 3) — тормозящие иммерсионные линзы; (4, 5) — область преобразования энергии ионов; (6, 7) — ускоряющая иммерсионная линза; MA — масс-анализатор

Известно, что пучки ионов выходят из некоторых источников с энергией, имеющей значительный разброс по величине, который может составлять величину ~ 10 эВ. Представим начальную энергию частиц в потоке на выходе из источника в виде $E_{0i} = E_0 + \delta E_i$. Здесь E_0 — "постоянная" часть энергии ионов в потоке, δE_i — часть энергии, меняющаяся от иона к иону по определенному закону распределения. Для упрощения теоретических оценок и обеспечения эффективной экспериментальной реализации предлагаемого метода с относительно малыми геометрическими размерами "постоянную" часть энергии ионов на входе в монохроматор E_0 необходимо выбирать по возможности малой $E_0 < 1$ эВ. Поэтому составными частями монохроматора служат электростатическая тормозящая иммерсионная линза на входе и электростатическая ускоряющая иммерсионная линза на выходе области преобразования энергии монохроматора. Преобразование энергетического спектра ионов можно реализовать путем пропускания потока ионов на выходе из источника через межэлектродное пространство, к электродам которого приложена разность потенциалов в виде последовательности электрических импульсов $V(t)$.

На рисунке приведена схема одного из вариантов встроенного в масс-спектрометр (квадрупольный) монохроматора. Работа монохроматора в масс-спектрометре предполагает: 1) торможение потока ионов, выходящих из ионного источника (IS), до энергий $E_0 = qV_3 \approx 0.5$ эВ, соответствующих минимальному значению в кривой распределения, с одновременной фокусировкой пучка в иммерсионных линзах (1, 2) и (2, 3); 2) монохроматизацию потока ионов в области (4, 5) преобразования энергии; 3) ускорение потока ионов в иммерсионной линзе (6, 7) на выходе из монохроматора до энергий оптимальных для выбранного масс-анализатора (МА) с одновременной фокусировкой пучка на его вход.

Основные характеристики оптической системы монохроматора приведены ниже.

Тормозящие иммерсионные линзы (1, 2) и (2, 3) состоят из цилиндров диаметрами $D_1 = D_2 = D_3 = 6$ мм и длинами $l_1 = l_2 = 14$ мм, $l_3 = 6$ мм. Зазор между цилиндрами составляет 1 мм (см. рисунок). При отношении потенциалов цилиндров $V_2/V_1 = 4$ и $V_3/V_2 = 2$ (принято $V_1 = 5$ В) фокусные расстояния линз, отсчитываемые от плоскости, проведенной через зазор между цилиндрами, составят $f_1 \approx 4D \approx 24$ мм и $f_2 \approx 10D \approx 60$ мм. Ускоряющая иммерсионная линза состоит из двух цилиндров длиной $l_6 = l_7 = 14$ мм и диаметрами $D_6 = D_7 = 7$ мм.

Здесь мы пользуемся расчетами характеристик линз, приведенными в работе [9]. Эта система позволяет получать ускоренные пучки ионов для

различных типов масс-спектрометров, подбирая необходимые потенциалы.

Область монохроматизации потока ионов формируется электродами 4 и 5, имеющими форму эквипотенциалей, создающими выбранное двумерное поле. Размеры электродов в направлении оси Z, лежащей в плоскости симметрии, равны по величине ширине "арки" что обеспечивает отсутствие возмущения выбранного поля вблизи прохождения потока ионов. Полная длина всей системы монохроматизации составляет величину ~ 120 мм. Диаметры отверстий в электродах монохроматора имеют величину $d \approx 6$ мм. Из схемы видно, что для ускорения "охлажденного" в монохроматоре потока ионов необходимо системы питания тормозящей линзы и монохроматора поднять на потенциал ускоряющего напряжения выходных иммерсионных линз.

В данной работе подобраны необходимые условия для функционирования предложенного монохроматора: по характеристикам импульсов, частоте их поступления, величине амплитуды импульса электрического напряжения, величинам электрического потенциала для торможения и ускорения ионов в иммерсионных линзах, геометрическим размерам монохроматора.

Независимо от закона распределения ионов по энергии $F(E_{0,i})$ в пучке на выходе из источника многократное воздействие на ионы импульсов поля в области преобразования будет иметь результатом установление иного (более узкого) распределения на выходе монохроматора. Тогда закон распределения вероятностей для частиц иметь энергию в интервале от $E_{n,i}$ до $E_{n,i} + dE_{n,i}$ будет иметь вид

$$\frac{dN_i}{N_0} = F(E_{0,i}), \quad (7)$$

где dN_i и N_0 — доля и полное число ионов соответственно, $dE = 5 \cdot 10^{-2}$ эВ определяет (шаг) число точек в интервале энергий. Функцию $F(E_{0,i})$ предстоит найти теоретически в результате численного моделирования или экспериментально при решении конкретных практических задач.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена возможность реализации нового типа монохроматора потока ионов, испускаемых масс-спектрометрическими ионными источниками с широким энергетическим разбросом. Монохроматизация потока ионов осуществляется путем преобразования энергетического спектра частиц в высоком вакууме за счет ударного воздействия коротких электрических импульсов на ионы в пространственно неоднородном электриче-

ском поле с последующим формированием потока ионов электростатической иммерсионной линзой. Математическое моделирование работы монохроматора показывает его реализуемость как компактного и эффективного устройства для решения проблемы монохроматизации в масс-спектрометрии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dodonov A.F., Kozlovski V.I., Soulemenkov I.V.* High-resolution electrospray ionization orthogonal-injection time-of-flight mass spectrometer // *European Journal of Mass Spectrometry*. 2000. V. 6, N 6. P. 481–490.
2. *Tolmachev A.V., Chernushevich I.V., Dodonov A.F., Standing K.G.* A collisional focusing ion guide for coupling an atmospheric pressure ion source to mass spectrometer // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B*. 1997. V. 124. P. 112–119.
3. *Krutchinsky A.N., Laboda A.V., Spicer V.L., et al.* A collisional focusing ion guide for coupling a MULDI source to a mass spectrometer // *Rapid Comm. Mass Spectrom.* 1998. V. 12. P. 508–518.
4. *Latypov Z.Z., Golikov G.K.* Coupling an atmospheric pressure ion source to a mass spectrometer: A new method // *International Journal of Mass Spectrometry*. 2007. V. 264. P. 181–183.
5. *Латыпов З.З., Голиков Ю.К.* Новый метод моно-

- хроматизации ионных пучков масс-спектрометрических источников // *Научное приборостроение*. 2011. Т. 21, № 4. С. 70–74.
6. *Аристов Ю.В., Воронков Б.В., Грехов И.В. и др.* Полупроводниковые формирователи наносекундных импульсов высокого напряжения // *Приборы и техника эксперимента*. 2007. № 3. С. 72–74.
 7. *Воронков Б.В., Грехов И.В., Козлов А.К. и др.* Высокочастотный полупроводниковый генератор высоковольтных наносекундных импульсов // *Приборы и техника эксперимента*. 2007. № 3. С. 75–77.
 8. *Воронков Б.В., Грехов И.В., Козлов А.К. и др.* Полупроводниковый генератор высоковольтных наносекундных прямоугольных импульсов // *Приборы и техника эксперимента*. 2007. № 3. С. 78–80.
 9. *Кельман В.М., Явор С.Я.* Электронная оптика. М., Л.: Изд. АН СССР, 1963. С. 133–135.

*Институт аналитического приборостроения РАН,
г. Санкт-Петербург*

Контакты: *Латыпов Зайдель Зарифович,*
Zeidel@yandex.ru

Материал поступил в редакцию 11.01.2012.

NEW MONOCHROMATOR FOR THE MASS SPECTROMETRIC ION SOURCES

Z. Z. Latypov

Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint-Petersburg

In this work a new type of monochromator for ion sources producing the ion flux with a wide energy range distribution is proposed. The method is based on converting the ion energy spectrum by the electric field pulses shocks on ions in the nonuniform electric field. This is followed by ion beam formation in the electrostatic field of the accelerating immersion lens. The monochromator pattern operation simulated mathematically shows its realizability as a compact and effective device for solving monochromatization problems in mass spectrometry.

Keywords: ion source, energy monochromator, function of energy distribution, mass spectrometry