

УДК 629.78+621.384.8

ГАЗОВЫЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТР С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЛИНЕЙНОГО ИОННОГО ЗЕРКАЛА

© 2011 И. В. Пияков, Д. В. Родин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

В статье приведено краткое описание существующих методов фокусировки ионов во времяпролётных масс-спектрометрах, производится сравнение масс-спектрометров с применением ионных зеркал с линейным и нелинейным распределением осевого потенциала. Рассматриваются основные соотношения для расчёта ионно-оптических систем, приводятся результаты моделирования спектрометров двух типов, результаты расчётов зависимости разрешающей способности приборов от массы и начального энергетического разброса ионов. На основе полученных данных даются выводы о преимуществах масс-спектрометров с применением ионного зеркала с нелинейным распределением осевого потенциала.

Газовый масс-спектрометр, ионное зеркало, масс-рефлектор, фокусировка ионов по энергии второго порядка, компенсация энергетического разброса.

Времяпролётные масс-спектрометры находят широкое применение не только в земных, но и в космических условиях. Достоинствами времяпролётных масс-спектрометров по сравнению с приборами других принципов действия являются: малые габариты, высокая чувствительность и способность определять состав космических пылевых частиц, имеющих случайный характер взаимодействия с прибором.

Возможности использования времяпролётных масс-спектрометров для решения ряда исследовательских задач, таких как изучение космического пространства, химического состава космической пыли, собственной атмосферы космических аппаратов и т.д., ограничены свойствами ионно-оптических систем пространственного и временного фокусирования ионных пакетов. Традиционные методы временной фокусировки с применением линейных ионных зеркал обеспечивают разрешающую способность приборов ($R > 500$) при дисперсии энергии ионов до 15 % [1-2]. И хотя существуют пути улучшения характеристик масс-рефлектора за счёт оптимального выбора потенциала центральной сетки отражателя [3], тем не менее, фокусирующей системе с однородным полем присущ принципиальный недостаток – рост ошибок компенсации по времени пролета с увеличением энергетического разброса ана-

лизируемых ионных пакетов. Это обстоятельство является существенным фактором, ограничивающим область применения времяпролётных масс-спектрометров с линейным ионным зеркалом, так как для одновременного удовлетворения требованиям по обеспечению высокой разрешающей способности и ограничениям, обусловленным реальной пропускной способностью аппаратуры приёма и обработки масс-спектров, приходится создавать крупногабаритные анализаторы с ускоряющими потенциалами в сотни и тысячи вольт либо ограничивать энергетический спектр ионов, что может быть неприемлемым.

В работе [4] предложен метод расчёта распределения нелинейного осевого потенциала электростатического ионного зеркала, обеспечивающий независимость суммарного времени дрейфа ионов от их начальной энергии. Метод основан на том, что ионам с различной начальной энергией соответствуют свои уникальные эквипотенциалы отражения, продольные координаты которых монотонно возрастают с увеличением энергий соответствующих ионов. Таким образом, ионы с большей энергией проходят больший путь внутри ионного зеркала, что и обеспечивает компенсацию начального энергетического разброса ионов.

Предположим, что распределение потенциала в отражателе вдоль траектории ионов на участках торможения и ускорения описывается монотонной функцией $\Phi(z)$ с медленно изменяющейся вдоль траектории первой производной $E(z)$. Будем полагать также, что ионы движутся вдоль продольной оси симметрии отражателя и траектории торможения и ускорения совпадают. В этом случае время движения ионов в отражателе определяется интегралом

$$t = 2 \sqrt{\frac{m}{2q}} \int_{z_0}^{z^*} \frac{dz}{\sqrt{\Phi(z) + \Delta\Phi}}, \quad (1)$$

где $\frac{m}{q}$ – отношение массы иона к заряду; $q\Phi$ – начальная энергия ионов; z^* – точка касания траектории иона к эвипотенциалу отражателя.

Здесь и далее условно считаем ускоряющий потенциал положительным.

Осуществляя замену переменных, запишем (1) в следующем виде:

$$t = 2 \sqrt{\frac{m}{2q}} \int_{\Delta\Phi}^0 \frac{d\Phi}{E(\Phi)\sqrt{\Delta\Phi}}. \quad (2)$$

Разобьем пределы интегрирования в (2) на N интервалов и, учитывая, что $E(z)$ – функция медленно изменяющаяся, получим

$$t = 4 \sqrt{\frac{m}{2q}} \sum_{i=1}^N \frac{\sqrt{\Phi_i} - \sqrt{\Phi_i - h}}{E_i}, \quad (3)$$

где E_i – некоторое значение функции $E(z)$ в пределах i -го интервала интегрирования; h – шаг интегрирования; Φ_i – потенциал в начале i -го интервала интегрирования.

Потребуем неизменности суммарного времени дрейфа ионов от источника до приёмника для ионов с начальной энергией $q\Delta\Phi = qih$, $i = 1, 2, 3, \dots, N$. После ряда преобразований с учётом (3) данное требование сводится к системе уравнений:

$$\begin{cases} T(0) - T(h) = \sqrt{\frac{8m}{qh}} x_1, \\ T(0) - T(2h) = \sqrt{\frac{8m}{qh}} [x_1(\sqrt{2}-1) + x_2], \\ \dots \\ T(0) - T(Nh) = \sqrt{\frac{8m}{qh}} [x_1(\sqrt{N}-\sqrt{N-1}) + x_2(\sqrt{N-1}-\sqrt{N-2}) + \dots + x_N], \end{cases} \quad (4)$$

где $T(\Delta\Phi)$ – суммарное время пролёта ионов; x_i – геометрическая ширина участков отражателя, соответствующих интервалам интегрирования.

Решая относительно вектора размеров \vec{X} систему линейных уравнений (4), получаем распределение осевого потенциала отражателя в виде таблицы

$$\begin{cases} \Phi(K) = Kh, \\ Z(K) = \sum_{i=1}^K x_i. \end{cases} \quad (5)$$

Решение системы (4) не представляет сложности при использовании ЭЦВМ и не требует значительных затрат машинного времени. Это позволяет выбирать шаг решения достаточно малым для того, чтобы приблизить полученное решение к искомому непрерывному.

Данный метод использовался для расчёта распределения потенциала ионного зеркала спектрометра (рис. 1). Эмиттируемый источником ионный пакет с энергией $q\Delta\Phi$ ускоряется между сетками C_1 и C_2 до энергии $q(\Delta\Phi + \Phi_0)$, движется между сетками C_2 и C_3 в бесполовом дрейфовом пространстве, тормозится между сетками C_3 и C_4 до энергии $q(\Delta\Phi + \Phi_1)$ и отражается в нелинейном ионном зеркале между сетками C_4 и C_5 , далее пролетает между сеткой C_4 и приёмником, где и регистрируется.

Для сравнения полученных результатов был рассчитан спектрометр аналогичной компоновки с применением линейного ионного зеркала по методу, описанному в [1]. Основные соотношения системы следующие:

$$\hat{O}_1 = \frac{2}{3} \cdot \hat{O}_0, \quad \hat{O}_m = \left(\frac{\Delta\hat{O} + \hat{O}_0}{\hat{O}_0} - \frac{2}{3} \right) \cdot \hat{O}_0,$$

$$l_4 = \frac{l_2 + l_5}{4\sqrt{3}} \cdot \frac{\hat{O}_4}{\hat{O}_0},$$

l_3 выбирается минимальным, исходя из допустимой прочности конструкции. Расчёт производился для длины бесполового пространства l_2 , равной 20 см, и ускоряющего потенциала \hat{O}_0 , равного 100 В. Результаты расчёта разрешающей способности спектрометров для температур 300 К и 1000 К приведены на рис. 2 и 3. На рис. 4 приведены нор-

мированные зависимости времени пролёта ионов $\frac{\Delta t}{t_0}$ (здесь t_0 – время пролёта ионов с нулевой начальной энергией $\Delta \hat{O} = 0$) от $\frac{\Delta \hat{O} + \hat{O}_0}{\hat{O}_0}$ для системы с линейным (линия 1) и нелинейным (линия 2) ионным зеркалом.

Полученные результаты моделирования позволяют сделать вывод о превосходстве масс-спектрометра с применением нелинейного зеркала над традиционным масс-рефлектроном, в отдельных случаях дости-

гающем 2..3 раз. Также следует отметить, что выигрыш в разрешении увеличивается с ростом начального энергетического разброса ионов и позволяет разрешать массы до нескольких тысяч, сохраняя при этом высокую разрешающую способность (>100) в диапазоне масс до 150 а.е.м. даже для температур порядка 1000 К, тогда как масс-спектрометр с применением линейного зеркала, при том же температурном разбросе, имеет разрешение >100 только в диапазоне масс до 25 а.е.м.

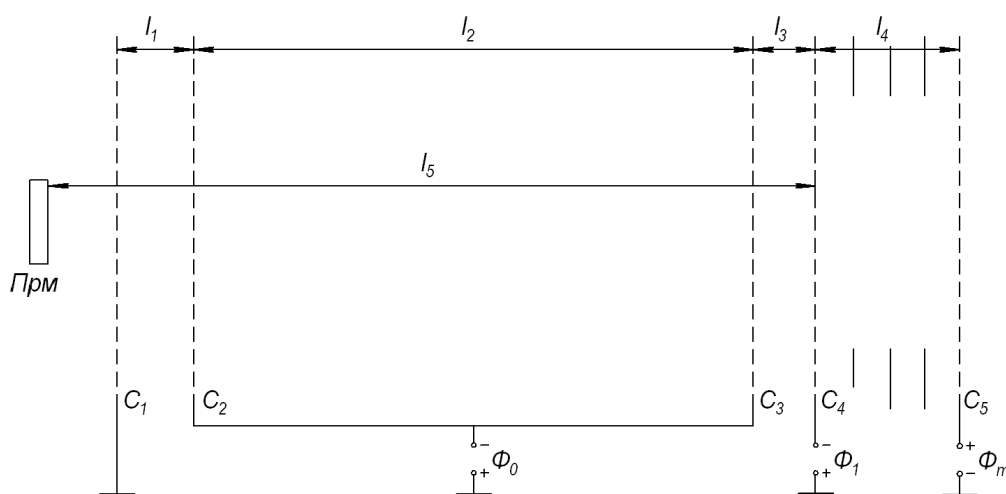


Рис. 1. Схема ионно-оптической системы масс-спектрометра

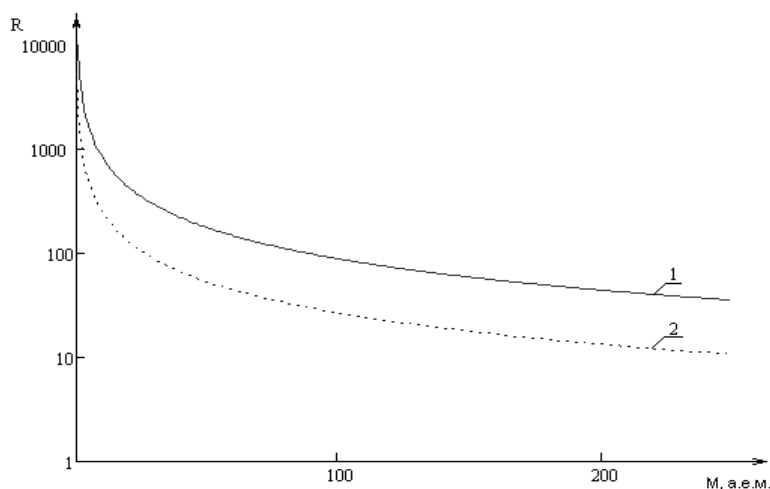


Рис. 2. Зависимость разрешающей способности от массы для схемы с линейным электростатическим зеркалом: 1 – 300К; 2 – 1000К

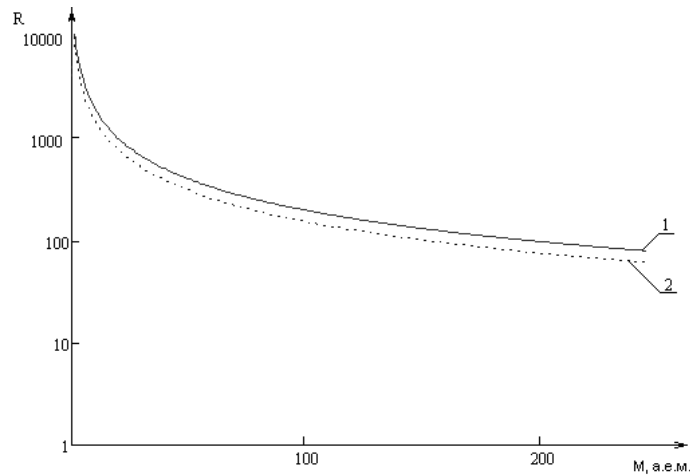


Рис. 3. Зависимость разрешающей способности от массы для схемы с нелинейным электростатическим зеркалом: 1 – 300; 2 – 1000К

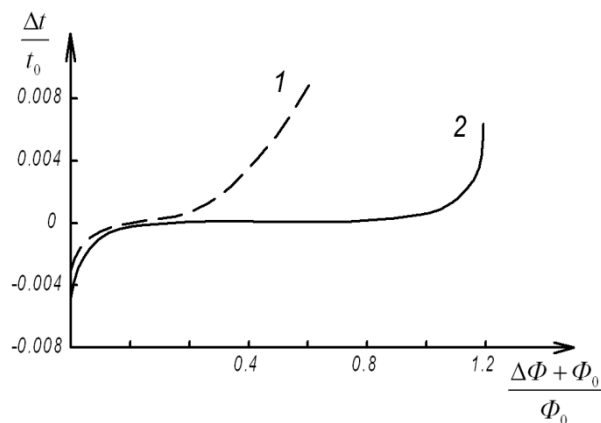


Рис. 4. Нормированные зависимости времени пролёта от начального энергетического разброса

Библиографический список

1. Картаев, В. И. Новый принцип фокусировки ионных пакетов во времяпролётных масс-спектрометрах [Текст] / В. И. Картаев, Б. А. Мамырин, Д. В. Шмикк // ЖТФ. – 1971. – Т.41. – Вып.7. – С. 1498 – 1501.

2. Картаев, В. И. Новый безмагнитный времяпролётный масс-спектрометр с высокой разрешающей способностью [Текст] / В. И. Картаев, Б. А. Мамырин, Д. В. Шмикк, В. А.

Загулин // ЖТФ. – 1973. – Т.64. – Вып. 1. – С. 82 – 89.

3. Шмикк, Д. В., Отражатель масс-рефлектрона [Текст] / Д. В. Шмикк, Б. Н. Дубенский // ЖТФ. – 1984. – Т.58. – Вып.1. – С. 912 – 916.

4. Глащенко, В. П. Расширение энергетического диапазона фокусируемых ионов во времяпролётном масс-спектрометре [Текст] / В. П. Глащенко, Н. Д. Сёмкин //ЖТФ. – 1985. – Т55. – Вып.5. – С. 904 – 907.

GAS MASS SPECTROMETER WITH A NON-LINEAR ION MIRROR

© 2011 I. V. Pijakov, D. V. Rodin

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

This article provides a brief description of existing TOF ion focusing methods in mass spectrometers, we compare the mass spectrometer using ion mirrors with linear and nonlinear distribution of axial potential. Researchers have considered the basic equations for the calculation of the ion-optical systems, the results of simulations of two types of spectrometers, the results of calculations depending on the resolution of the instruments of mass and initial energy spread of ions. We derive the advantages of mass spectrometers with nonlinear distribution of axial potential ion mirrors based on these obtained data.

Gas mass spectrometer, ion mirror, mass reflectron, second-order energy focusing, compensation of the energy spread.

Информация об авторах

Пияков Игорь Владимирович, докторант, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, к.т.н., Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: pijakov@mail.ru. Область научных интересов: масс-спектрометрия, космическое приборостроение.

Родин Дмитрий Владимирович, аспирант кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, инженер института космического приборостроения, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: rodin.ssau@mail.ru. Область научных интересов: масс-спектрометрия, космическое приборостроение.

Piyakov Igor Vladimirovich, assistant professor of design and production radio-electronic means department, Ph.D., Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: pijakov@mail.ru. Area of research: mass spectrometry, space devices development.

Rodin Dmitry Vladimirovich, post-graduate student faculty of radio engineering and medical diagnostic systems, the engineer of the institute of space device engineering, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: rodin.ssau@mail.ru. Area of research: mass spectrometry, space devices development.