

УДК 537.533.33

М.А. Хизирова*, П.Т. Григорьева

Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева, Казахстан, г. Алматы

*E-mail: hizirova73@mail.ru

Исследование радиочастотных масс-спектрометров

Аннотация. В данной работе обсуждается вопрос о возможности устранения недостатков радиочастотных масс-спектрометров путем замены сеточных селекционирующих каскадов, одиночными линзами с большими фокусными расстояниями.

Ключевые слова: масс-спектрометр, линза, потеря ионов, чувствительность прибора.

Современная масс-спектрометрия является одним из основных средств качественного и количественного анализа состава вещества в различных состояниях. Из-за растущей сложности анализируемых веществ постоянно повышаются требования к чувствительности, селективности и скорости анализа. Наиболее распространенными в настоящее время являются масс-спектрометры динамического типа с квадрупольными анализаторами. Уникальные свойства линейных ВЧ-полей лежат в основе различных методов масс-разделения, удержания и транспортировки ионов, с их использованием создаются аналитические приборы и системы для фундаментальных и прикладных исследований и выполнения рутинных анализов в различных сферах современной жизни. По-прежнему актуальной задачей является углубленное изучение закономерностей и свойств колебаний заряженных частиц в линейных высокочастотных электрических полях и разработка на их основе новых эффективных методов и устройств масс-спектрометрического анализа вещества.

В данной работе обсуждается вопрос о возможности устранения указанных недостатков РЧМС путем замены сеточных селекционирующих каскадов одиночными линзами с большими фокусными расстояниями [1]. Предположим, что одиночные линзы состоят из трех диафрагм с диаметрами отверстий d , находящихся на равном расстоянии s друг от друга. Пусть потенциалы крайних электродов – U_1 , а среднего – U_2 . Совместим начало системы координат с левым крайним электродом ($z = 0$).

Предположим, что объемных зарядов нет и время пролета ионами промежутков между электродами не зависит от малого по амплитуде U_m переменного напряжения с начальной фазой ψ , поданного на средний электрод относительно крайних электродов:

$$U = U_m e^{j(\omega t + \psi)} \quad (1)$$

Распределение потенциала $\Phi(z)$ на оси системы может быть представлено кусочно-линейной функцией

$$\Phi(z) = \begin{cases} U_1 + \Delta U \cdot \frac{z}{s}, & \text{при } 0 \leq z \leq s, \\ U_2 + \Delta U \cdot \frac{(s-z)}{s}, & \text{при } s \leq z \leq 2s, \end{cases} \quad (2)$$

где

$$\Delta U = U_2 - U_1 \quad (3)$$

является малой величиной.

Тогда скорость частицы в промежутках между электродами можно представить в виде:

$$V = \begin{cases} V_1 = \sqrt{-\frac{2e}{m} \left(U_1 + \frac{\Delta U}{s} z \right)}, & \text{при } 0 \leq z \leq s, \\ V_2 = \sqrt{-\frac{2e}{m} \left(U_2 + \frac{\Delta U}{s} (s-z) \right)}, & \text{при } s \leq z \leq 2s, \end{cases} \quad (4)$$

Приращение энергии ионов ΔW , прошедших через одиночную линзу, может быть определено по формуле:

$$\Delta W = \int_0^t q U_m V e^{j(\omega t + \psi)} dt, \quad (5)$$

здесь величина q описывает линейный заряд ионов. При применении формулы (5) учтем, что при достижении ионом определенной массы m плоскости $z = s$, должно произойти изменение фазы высокочастотного напряжения на π :

$$\Delta W = \int_0^{s/v_1} q U_m V_1 e^{j(\omega t + \psi)} dt - \int_{s/v_2}^{2s/v_1} q U_m V_2 e^{j(\omega t + \psi)} dt. \quad (6)$$

Учтем, что величины q и U_m могут быть вынесены из-под интеграла, также, используя малость величины ΔU , применяя соответствующие разложения и пренебрегая малыми величинами высоких порядков, перепишем выражение (6) в следующем виде:

$$\Delta W = q U_m \sqrt{-\frac{2e}{m} U_1} \left(1 + \frac{\Delta U}{U_1} \frac{z}{s} \right) \left[\int_0^{s/v_1} e^{j(\omega t + \psi)} dt - \sqrt{\frac{U_2}{U_1}} \left(1 + \frac{\Delta U}{2U_2} \right) \int_{s/v_2}^{2s/v_1} e^{j(\omega t + \psi)} dt \right]. \quad (7)$$

В выражении (7) мы воспользовались значением средней скорости на полевом промежутке. После интегрирования выражения (7) получим приращение энергии в следующем виде

$$\Delta W = j \frac{q U_m}{w} \sqrt{-\frac{2e}{m} U_1} \left(1 + \frac{\Delta U}{2U_1} \frac{z}{s} \right) \left[e^{j\psi} - e^{j\left(\frac{\omega s}{v_1} + \psi\right)} - \sqrt{\frac{U_2}{U_1}} \left(1 + \frac{\Delta U}{2U_2} \right) \left(e^{j\left(\frac{\omega s}{v_2} + \psi\right)} - e^{j\left(\frac{2\omega s}{v_1} + \psi\right)} \right) \right]. \quad (8)$$

Максимальное значение выражения, заключенного в квадратной скобке, получим при выполнении условий

$$\begin{aligned} \frac{\omega s}{v_1} + \psi &= \pi, \\ \frac{\omega s}{v_2} + \psi &\approx \pi, \end{aligned} \quad (9)$$

которые в виду примерного равенства $v_2 \approx v_1$ могут быть согласованы между собой. Действи-

тельно, разность начальных фаз при этом не превышает величины $\frac{\Delta\psi}{\psi} \approx \frac{\Delta v}{v^2}$.

При этом получим для ΔW_{\max} следующее выражение

$$\Delta W_{\max} = j \frac{q U_m}{w} \sqrt{-\frac{2e}{m} U_1} \left(1 + \frac{\Delta U}{2U_1} \frac{z}{s} \right) \left[1 + e^{j\psi} + \sqrt{\frac{U_2}{U_1}} \left(1 + \frac{\Delta U}{2U_2} \right) \left(1 + e^{j\left(\frac{\omega s}{v_2} + \psi\right)} \right) \right]. \quad (10)$$

В частном случае, когда $U_1 = U_2$ ($\Delta U = 0$), максимальное значение приращения энергии записывается следующим образом

$$\Delta W_{\max} = j \frac{q U_m v}{w} \left(e^{j\psi} + e^{j\left(\frac{2\omega s}{v_1} + \psi\right)} + 2 \right), \quad (11)$$

что согласуется с известными результатами [2, 3].

Таким образом, если предположить, что коэффициент прозрачности каждой сетки селекционирующего каскада равен 0.9, то при прохождении через один каскад теряется примерно 30% ионов. Применение одиночной линзы практически устраняет потери ионов в анализаторе РЧМС, тем самым существенно может быть повышена чувствительность прибора. Сравнение выражений (10) и (11) показывает, что при $\Delta U > 0$ ($U_2 > U_1$) максимальное приращение энергии ионов получится при использовании одиночной линзы в ускоряюще-замедляющем режиме, т.е. появляется реальная возможность улучшения разрешающей способности РЧМС.

Литература

- 1 Кельман В.М., Явор С.Я. Электронная оптика. – М.: Наука, 1968. – 488 с.
- 2 Рик Г.Р. Масс-спектроскопия. – М.: Наука, 1953. – 225 с.
- 3 Дауменов Т., Дуйсебаева С., Тукибаева М., Якушев Е.М. Бессеточные анализаторы радиочастотных масс-спектрометров // Известия НАН. – 1997. – №4. – С. 58-62.
- 4 Мамонтов Е.В. Радиочастотный времяпролетный масс-спектрометр с плоскими дискретными электродами // Труды III съезда ВМСО. – Москва, 2007. – С. 102-104.

М.А. Қызырова, П.Т. Григорьева
Радиожиілікті масс-спектрометрлерді зерттеу

Бұл жұмыста радиожиілікті масс-спектрометрдегі кемшіліктерді торлы сұрыптаушы каскадтарды фокус аралығы үлкен жеке линзалармен алмастыру арқылы жою мүмкіншілігі туралы тапсырма талқыланады.

Түйін сөздер: масс-спектрометр, линза, иондарды жоғалту, құралдың сезімталдығы.

M.A. Khizirova, P.T. Grigor'eva
Research of radio-frequency weights – spectrometers

In this work was discussed a problem of possibility of removal of the pointed are defects of radiofrequency mass-spectrometers by replacing of the grid selective cascades by single lenses with along focus distance.

Keywords: mass spectrometer, lens, loss of ions, sensitivity of the device.