

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАСС-АНАЛИЗАТОРОВ С ТРЕХМЕРНЫМИ МОНОПОЛЯРНЫМИ ВЧ ПОЛЯМИ С КВАДРАТИЧНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПОТЕНЦИАЛА

М.А. Хизирова, А.Т. Ахмедиярова, Д.Т. Касымова, Г.К. Нуртаева¹

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

¹*Казахский национальный медицинский университет им. С.Д.Асфендиярова, г. Алматы*

Исследованы экспериментальные масс-анализаторы с двух и трехмерными линейными монополярными ВЧ полями, определены их аналитические возможности и потребительские характеристики.

Из теории дифференциальных уравнений второго порядка с периодическими коэффициентами известно, что частным случаем общего решения уравнений Матье для границы I-й зоны стабильности $a_0(q)$ является периодическая функция нулевого порядка

$$ce_0(\xi, q) = 1 - \frac{1}{2}q \cos \xi + \frac{1}{32}q \cos 2\xi \dots, \quad (1)$$

где $\xi = \omega t/2$, $q = 4eV/r_0^2 \omega m$, e – заряд электрона, m – масса ионов, V , ω – амплитуда и частота ВЧ питающего напряжения, r_0 – радиус поля квадрупольного анализатора.

Функция $ce_0(\xi, q)$ с минимальным $c_{min} = ce_0(\pi, q)$ и максимальным $c_{max} = ce_0(\pi/2, q)$ значениями является единственной среди других периодических решений, удовлетворяющей условию $ce_0(\xi, q) > 0$ при всех ξ и q . Это свойство положено в основу масс-разделения ионов в монополярных гиперболических анализаторах с рабочей областью в полусфере $z \geq 0$.

Траектории ионов с нулевыми начальными скоростями и начальными координатами z_0 , с рабочими точками на границе стабильности $a_0(q)$, описываются функцией вида

$$z(\xi) = z_0 ce_0(\xi, q). \quad (2)$$

В анализаторе с рабочим пространством, ограниченным плоскостями $z = z_{01} > z_0 c_{max}$ и $z = z_{02} > z_0 c_{min}$, периодические траектории (2) являются устойчивыми. Для траекторий других масс $m \neq m_0$ справедливы выражения

$$\begin{aligned} z_1(\xi) &= z_0 ch \mu \xi \cdot ce_0(\xi, q), \quad m > m_0, \\ z_2(\xi) &= z_0 \cos \mu \xi \cdot ce_0(\xi, q), \quad m < m_0, \end{aligned} \quad (3)$$

где коэффициент μ зависит от параметров a и q . Так как огибающие колебаний в (3) $ch \mu \xi$ и $\cos \mu \xi$ являются нарастающими и убывающими функциями, ионы с массами $m \neq m_0$ в пространстве монополярного анализатора будут неустойчивыми и через некоторое число n_c периодов ВЧ поля будут введены из анализатора. Таким образом, реализуется режим масс-разделения ионов вдоль координаты Z в монополярном ВЧ поле с трехмерным квадратичным распределением потенциала.

Так как общее решение Матье состоит из двух частных решений, принадлежность рабочих точек анализируемых ионов границе $a_0(q)$ не является достаточным условием их устойчивости. Для получения режима периодических колебаний необходимо согласование начальных координат и скоростей ионов с начальной фазой ВЧ поля

$$v_0/z_0 = ce'_0(\xi_0)/ce_0(\xi_0). \quad (4)$$

Наиболее благоприятными являются условия при вводе ионов с нулевыми скоростями $v_{0y}=0$ и начальными координатами $z_0 < z_{01}$ или $z_0 < z_{01}/c_m$ в фазы ВЧ поля $\xi_{01}=0$ или $\xi_{02}=\pi/2$. Разброс начальных координат не изменяет характер колебаний, а влияет на их амплитуды. Практически фазовый ввод реализуется при импульсном ВЧ питании анализаторов.

Анализ колебаний ионов вблизи границ стабильности показывает, что для расчета аппаратных функций монополярных анализаторов с линейным ВЧ полями достаточно использовать огибающие траектории

$$\begin{aligned} Z_1(n) &= z_0 ch \omega_1 n + k_i v_0 sh \omega_1 n, \quad m > m_0, \\ Z_2(n) &= z_0 \cos \omega_1 n + k_i v_0 \sin \omega_1 n, \quad m < m_0, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\omega_1 = \sqrt{\gamma \Theta \Delta m/m}$, γ , Θ , зависят от параметров a , q и фазы ВЧ поля. С

помощью (5) для минимумов и максимумов траекторий построены области удержания ионов как зависимости граничных скоростей от масс частиц. Форма массовых линий монополярных гиперболоидных анализаторов рассчитывались путем интегрирования распределения тепловых скоростей ионов в пределах, определяемых границами областей удержания. Замкнутый характер областей удержания определяет конечную протяженность массовых пиков по нулевому уровню.

Выражение для числа ВЧ периодов масс-сепарации ионов в зависимости от разрешения $n_c = q_0 \sqrt{R}$ для трехмерных монополярных анализаторов совпадает с аналогичными выражениями для ФМ и ИЛ, но значение коэффициента q_0 оказывается в 2÷3 раза меньше. Поэтому скорость масс-разделения ионов вдоль одной координаты в монополярных анализаторах будет существенно выше.

При некоторых допущениях с использованием областей удержания ионов получена оценочная зависимость чувствительности монополярных гиперболоидных анализаторов от разрешающей способности при фазах $\xi_{01}=0$ и $\xi_{02}=\pi/2$

$$\eta = \eta_0 / \sqrt{R}. \quad (6)$$

Величина η_0 для фазы ξ_{01} оказывается в 2÷2,5 раза больше, чем для фазы ξ_{02} . Аналогичные (6) зависимости для ФМ и ИЛ имеют вид

$$\eta_{ФМ} = \eta_0 / R, \quad \eta_{ИЛ} = \eta_0 / R \sqrt{R}. \quad (7)$$

Сравнение (6) и (7) показывает, что чувствительность монополярных гиперболоидных анализаторов с увеличением разрешения снижается медленнее, чем у ФИ и ИЛ.

Результаты компьютерного моделирования и аналитических расчетов по (6), приведенные на рисунке, совпадают с точностью (5÷20)%. Погрешность объясняется допущениями, сделанными при получении аналитических выражений. В процессе компьютерного моделирования проведена оптимизация режима масс-разделения ионов вдоль координаты Z в монополярном ВЧ поле и определена область рабочих параметров анализатора.

Таким образом, исследованы экспериментальные масс-анализаторы с двух и трехмерными линейными монополярными ВЧ полями, определены их аналитические возможности и потребительские характеристики.

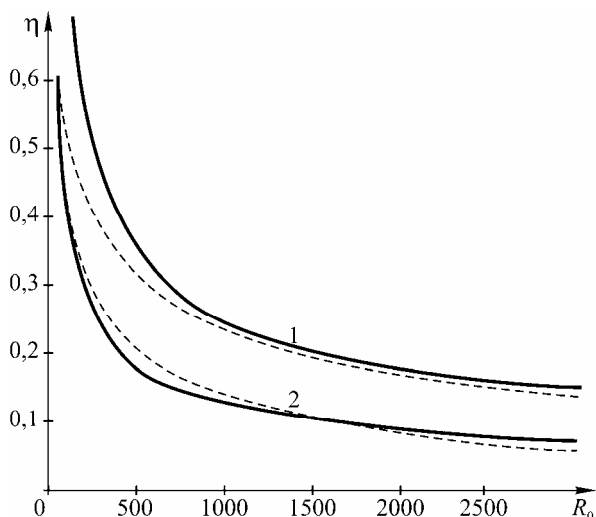


Рис. Зависимости относительной чувствительности от разрешающей способности монополярного гиперболического масс-анализатора $V=250 В, n_c=25$, 1 – $\xi = \xi_{02}$, 2 – ξ_{01} , сплошные линии расчет по формуле (2.53), пунктир – моделирование на ЭВМ

Литература

1. Мамонтов Е.В., Гуров В.С., Филиппов И.В., Дятлов Р.Н. Времяпролетное разделение ионов по удельному заряду в ВЧ полях с квадратичным распределением потенциала // ЖТФ.- 2007.- Т.77.- Вып.7.- С.139-142.
2. Мамонтов Е.В., Филиппов И.В., Дягилев А.А. Импульсный источник ионов для радиочастотного времяпролетного масс-анализатора // Вестник РГРТУ. Рязань, 2007.- Вып.22.- С.88-91.
3. Мамонтов Е.В. Радиочастотный времяпролетный масс-спектрометр с плоскими дискретными электродами // Труды III съезда ВМСО. Москва, 2007.
4. Дягилев А.А., Гуров В.С., Мамонтов Е.В., Филиппов И.В. Оптимизация параметров электродных систем с дискретным распределением потенциала//Тр. III съезда ВМСО. М., 2007.
5. Дягилев А.А., Мамонтов Е.В. Использование плоской электродной системы с дискретным распределением потенциала для формирования двумерного линейного поля // Электроника: межвуз. сборник науч. трудов. / Рязань, 2007.- С.61-63.
6. Гуров В.С., Мамонтов Е.В., Дягилев А.А. Электродные системы с дискретным линейным распределением ВЧ потенциала // Масс-спектрометрия.- 2007.- Т.4.№2.-С.139-142.
7. Гуров В.С., Мамонтов Е.В., Филиппов И.В., Дягилев А.А. Времяпролетный масс-спектрометр с линейным ВЧ полем // Вестник РГРТУ. Рязань, 2008. - Вып.23. - С.131-134.

ПОТЕНЦИАЛЫ КВАДРАТТЫ ТҮРДЕ ТАРАЛҒАН ҮШ ӨЛШЕМДІ МОНОПОЛЯРЛЫҚ ЖЖ ӨРІСКЕ ИЕ МАСС-АНАЛИЗАТОРЛАРДЫҢ СИПАТТАМАЛАРЫН ЗЕРТТЕУ

М.Ә. Қызырова, А.Т. Ахмедиярова, Д.Т. Қасымова, Ғ.К. Нұртаева

Екі және үш сызықты ЖЖ өрісі бар монополярлы масс-анализаторлар зерттелді. Мұнда олардың аналитикалық мүмкіндіктері мен қолдану аумақтары зерттелді.

RESEARCH OF CHARACTERISTICS OF WEIGHTS - ANALYZERS WITH THREE-DIMENSIONAL MONOPOLAR HF FIELDS WITH SQUARE-LAW DISTRIBUTION OF POTENTIAL

M.A. Hizirova, A.T. Ahmediyarova, D.T. Kasimova, G.K. Nurtaeva

Experimental mass analyzers from two are investigated and three-dimensional linear monopolar high-frequency fields, define their analytical possibilities and consumer characteristics.