

УДК 621.384.8

ДИНАМИЧЕСКИЙ МАСС-АНАЛИЗАТОР НА ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СПЕКТРОВ

© Л.Н. Галль, З.З. Латыпов, Ю.К. Голиков, Н.А. Тимченко

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург

Поступила в редакцию 3 марта 1999 г.

В работе представлены результаты исследований характеристик предложенного нами ранее динамического масс-анализатора, основанного на ударном эффекте преобразования спектров в потоке частиц. Исследования проведены методом математического моделирования движения ионов в полях масс-анализатора, состоящего из ионного источника-преобразователя спектров с однородным импульсным полем и энергоанализатора с двумерным электростатическим полем и с плоскостью симметрии. Проведенные расчеты такого варианта масс-анализатора показали, что при максимальных габаритах масс-анализатора, не превышающих 300 мм, относительная разрешающая способность составляет величину не менее 1600. Определены также требования к генератору электрических импульсов, обеспечивающих работу масс-анализатора.

ВВЕДЕНИЕ

Ранее нами была показана возможность [1] создания динамического масс-спектрометра нового типа на базе новой теории сепарации масс, основанной на ударном эффекте преобразования спектров потока частиц. Суть этой теории заключается в том, что если на движущуюся частицу с массой m в течение короткого времени Δt в направлении движения действует сила F , то в результате ударной передачи импульса импульс частицы изменится на величину

$$A_i = F \cdot \Delta t \quad (1)$$

и конечная кинетическая энергия частицы будет равна

$$E = E_0 + A_i \sqrt{2E_0 / m} + A_i^2 / 2m = E_0 + \Delta E, \quad (2)$$

где E_0 – начальная энергия частицы, ΔE – изменение энергии, m – масса частицы. Видно, что изменение энергии зависит от массы частицы. Поэтому моноэнергетический поток частиц, распределенных по массе, можно преобразовать в энергетически диспергированный поток.

Это явление можно использовать для создания масс-спектрометра нового типа. Преобразование спектров ионов может производиться в специальном ионном источнике-преобразователе, где поток ускоренных ионов на выходе источника пропускается через межэлектродное пространство, например, плоского цилиндрического или сферического конденсатора, к электродам которого приложена разность потенциалов в виде импульса электрического напряжения $V(t)$. Далее пространственное разделение потока ионов осуществляется в поле

электростатического энергоанализатора, что дает возможность получения энергетического спектра ионов, однозначно связанного с их масс-спектром.

В работе [1] методами математического моделирования был исследован вариант такого масс-спектрометра, состоящего из источника-преобразователя сферической симметрии и осесимметричного электростатического энергоанализатора с высоким энергетическим разрешением (не менее 0,1%). Целью исследования было выяснение достижимых технических характеристик и причин, ограничивающих их, и перспективы технической реализации нового принципа в масс-спектрометрии. Было показано, что разрешающая способность и чувствительность масс-спектрометра существенно ограничиваются разбросом энергии ионов, появляющимся в процессе ударной передачи импульса в различных частях неоднородного поля сферического конденсатора источника-преобразователя. Так как каждый новый принцип, как правило, имеет свои особенности, в настоящей работе проведены дальнейшие исследования масс-спектрометра нового типа с учетом результатов работы [1].

МАСС-АНАЛИЗАТОР И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ

С целью исключения большого разброса по энергии ионов в процессе ударного воздействия на них импульсного поля выбран ионный источник-преобразователь с однородным полем плоского конденсатора. В данной работе для целей анализа частиц по энергии принято симметричное двумерное электростатическое поле, исследованное в [2, 3], со скалярным потенциалом

$$\varphi(x, z) = \frac{sh^2 2\pi \cdot x - \sin^2 2\pi \cdot z}{(ch2\pi \cdot x + \cos 2\pi \cdot z)^2} \quad (3)$$

и потенциалом вдоль оси x

$$f(x) = th^2 \pi \cdot x, \quad (3a)$$

идеально фокусирующее поток заряженных частиц с большим угловым разбросом в плоскости симметрии XOY . Так как поперечная фокусировка частиц в этом поле сравнительно слаба, угловой разброс в плоскости перпендикулярной оси z не превышает величины $\beta = \pm 2^\circ$. Это поле обладает большой линейной энергетической дисперсией, обеспечивающей энергетическое разрешение не менее $dE/E = 0,05\%$, и достаточно большой светосилой. В работах [2, 3] показано, что оптимальными углами для входа потока частиц в поле являются $76^\circ \leq \Theta \leq 80^\circ$ и $-2^\circ \leq \beta \leq +2^\circ$.

Уравнения движения ионов в безразмерных переменных в выбранном поле имеют вид:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \frac{4\pi \cdot sh2\pi \cdot x (\cos 2\pi \cdot z \cdot ch2\pi \cdot x + 1 + \sin^2 2\pi \cdot z)}{(ch2\pi \cdot x + \cos 2\pi \cdot z)^3}, \\ \ddot{z} &= \frac{4\pi \cdot \sin 2\pi \cdot z (\cos 2\pi \cdot z \cdot ch2\pi \cdot x + 1 - sh^2 2\pi \cdot x)}{(ch2\pi \cdot x + \cos 2\pi \cdot z)^3}, \\ \ddot{y} &= 0. \end{aligned}$$

Здесь \ddot{x} , \ddot{y} , \ddot{z} – вторые производные координат по времени τ . В этих уравнениях приняты безразмерные переменные: $x = X/l$, $y = Y/l$, $z = Z/l$, $\tau = t/a$, где l – линейный масштаб в метрах,

$$a = 1,01856 \cdot 10^{-4} \cdot l \cdot \sqrt{\frac{M}{\Phi_0}}, \quad (4)$$

a – масштаб времени в секундах,

$M = m/m_0$ – масса иона в атомных единицах,

m – масса иона в кг,

m_0 – масса протона в кг,

$\Phi = \Phi_0 \cdot \varphi(x, z)$ – потенциал поля в вольтах,

$\varphi(x, z)$ – безразмерная функция, задающая геометрию поля,

Φ_0 – максимальный потенциал поля в вольтах.

Преобразование начальных данных к безразмерным производится согласно выражениям:

$$\begin{aligned} x_{\tau=0} &= X_0/l, \quad y_{\tau=0} = Y_0/l, \quad z_{\tau=0} = Z_0/l, \quad \tau = t/a, \\ \dot{x}_{\tau=0} &= (a/l)dX_0/dt, \quad \dot{y}_{\tau=0} = (a/l)dY_0/dt, \\ \dot{z}_{\tau=0} &= (a/l)dZ_0/dt. \end{aligned}$$

Выражения для начальной энергии $E_0 = mv_0^2/2$

(здесь v_0 – начальная скорость), полной энергии E частиц (2) и для амплитуды импульсов напряжения $V(t)$, представленные также в безразмерных единицах, имеют вид соответственно:

$$W_0 = \frac{E_0}{q\Phi_0}, \quad (5)$$

где q – заряд иона,

$$W = \frac{E_0}{q\Phi_0} + \frac{\Delta E}{q\Phi_0} = W_0 + W_c, \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{V(t)}{\Phi_0}. \quad (7)$$

Условием выполнения соотношения (2) в наших экспериментальных условиях является требование, чтобы длительность импульса действующей силы Δt была меньше времени пролета t_f области преобразования энергии ионов

$$\Delta t < 0,7197 \cdot 10^{-4} \cdot L \cdot \frac{\sqrt{M}}{\sqrt{U_0 + 0,5\sqrt{V}}}, \quad (8)$$

где: L – расстояние между электродами конденсатора в метрах, M – масса иона в атомных единицах, величины U_0 (постоянное напряжение, ускоряющее ионы в источнике), V – в вольтах, Δt в секундах. В дальнейшем в вычислительном эксперименте было определено, что оптимальным является соотношение $\Delta t = 0,7 \cdot t_f$.

Для определения характеристик рассматриваемого типа масс-анализатора проведено математическое моделирование движения ионов в системе ионный источник – энергоанализатор. На рис. 1 (вид на масс-анализатор сбоку) и на рис. 2 (вид на электродную систему анализатора с торца со стороны ионного источника) схематически приведены схемы расположения электродов масс-анализатора: 1 и 2 – внешний и внутренний электроды энергоанализатора; 3 – заземленный электрод конденсатора-преобразователя, содержащий прямоугольную выходную щель размерами $\sim 0,2 \times 4$ мм², расположенную длинной стороной параллельно оси Z ; 4 – электрод конденсатора-преобразователя, на который подается последовательность импульсов напряжения; 5 – ионный источник; 6 – коллектор ионов; 7 и 8 – входная и, соответственно, выходная щели анализатора.

В настоящей работе механизм образования ионов не рассматривался, но предполагалось, что ионы имеют начальный разброс по энергии до 5 эВ. При расчетах принималось, что ионы испускаются из выходной щели ионного источника размерами $\sim 0,2 \times 4$ мм². Ионы, ускоренные в ионном

источнике потенциалом U_0 , попадают в зазор конденсатора 3–4 с импульсным потенциалом $+V(t)$ на электроде 4, где приобретают добавочную энергию. В работе не учитывалось влияние неоднородности поля конденсатора 3–4 из-за наличия диафрагм конечных размеров на движение ионов, так как в эксперименте это влияние можно свести к минимуму.

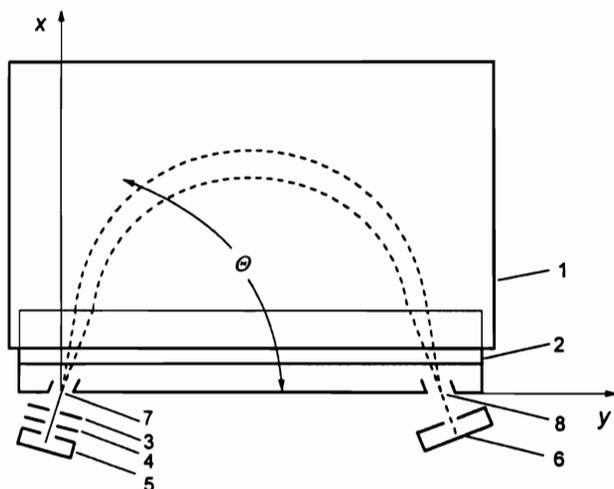


Рис. 1. Электродная система масс-анализатора (вид на масс-анализатор сбоку).

1 и 2 – внешний и внутренний электроды энергоанализатора, 3 и 4 – электроды конденсатора-преобразователя, 5 – ионный источник, 6 – коллектор ионов, 7 и 8 – входная и выходная щели анализатора

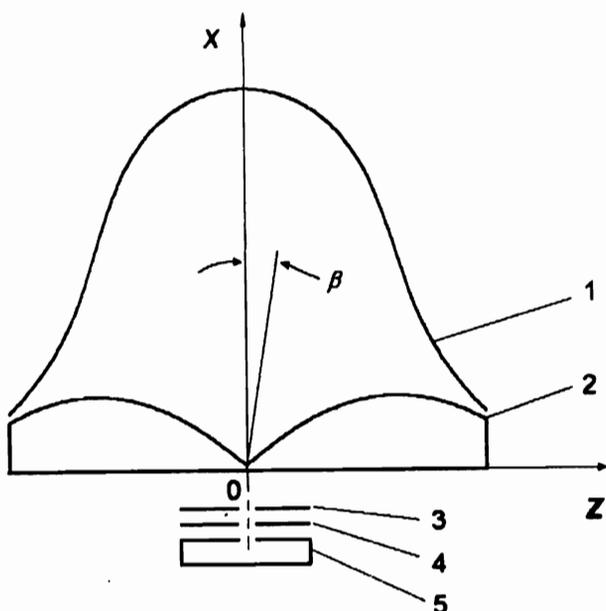


Рис. 2. Электродная система масс-анализатора (вид с торца со стороны ионного источника-преобразователя). 1 и 2 – внешний и внутренний электроды энергоанализатора, 3 и 4 – электроды конденсатора-преобразователя, 5 – ионный источник, 6 – коллектор ионов, 7 и 8 – входная и выходная щели анализатора

Численно решались уравнения движения частиц в ионном источнике, в поле энергоанализатора, и в пространстве, свободном от поля между выходной щелью 8 и коллектором. Вычисления проводились с вариацией всех величин, влияющих на движение частиц: расстояния L между электродами 3 и 4; расстояния между электродом 3 и щелью 7; размеров щелей 3, 7, 8; координат эмиссии ионов из плоскости щели источника 5; углов β и Θ ; амплитуды $V(t)$, длительности Δt и частоты ν поступления импульсов. При вычислениях линейный масштаб выбран равным $l = 100$ мм, расстояние между входной 7 и выходной 8 щелями выбран равным l . Электроды энергоанализатора 1 и 2 соответствуют эквипотенциалам $C_1 = 0,97$ и $C_2 = 0$ потенциала (3), (3а).

В численных экспериментах с монохроматическими пучками ионов выбирались исходные параметры, которые уточнялись в ходе экспериментов с учетом особенностей решаемой проблемы: размеры щели 3 – $0,2 \times 4$ мм, щели 7 – $0,3 \times 4$ мм, $L = 6$ мм, расстояние между щелями 3 и 7 – 6 мм, $U_0 = 500$ В, $\Phi_0 = 2500$ В, $V(t) \sim 2000$ В, $\Delta t \sim 10^{-7}$ с, $W = 1,1$. При указанных параметрах пучок заряженных частиц с массой $M = 300$ и полной энергией $W = 1,099$ фокусируется вблизи щели 8 и проходит на коллектор.

Целью численных экспериментов было:

- Нахождение параметров ионного источника-преобразователя, обеспечивающих максимальный коэффициент трансформации в соответствии с (2), и минимальный разброс по энергии частиц одной и той же массы;
- нахождение условий работы системы ионный источник – преобразователь-энергоанализатор, обеспечивающих ее максимально достижимую дисперсию по массе;
- нахождение положения и размеров выходной щели 8, обеспечивающих выделение пучка ионов выбранной массы и оптимальную разрешающую способность по массам.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Так как характеристики масс-анализатора существенно зависят от энергетического разброса ионов в ионном источнике-преобразователе, была исследована максимальная вероятная его величина δE , появляющаяся в процессе импульсного воздействия на ионы поля конденсатора 3–4. Вычисления показали, что величина δE в поле плоского конденсатора пренебрежимо мала.

Показателем величины ΔE является функция $u(\tau_0)$, где u – координата точки пересечения траектории ионов с плоскостью ZOY , τ_0 – начальная фаза или время прихода ионов в зазор конденсатора (3–4) в единицах периода повторения импульсов напряжения $V(t)$.

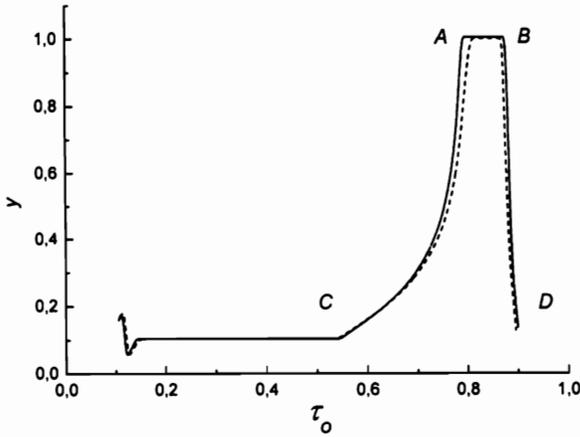


Рис. 3. График функции $y(\tau_0)$ для ионов с массой 300:
 — для случая прямоугольных импульсов,
 - - - для случая импульсов с фронтами $1 \cdot 10^{-8}$ с

На рис. 3 в качестве примера приведен график функции $y(\tau_0)$ для иона с массой 300, вычисленный при условиях: $\gamma = 1,099$, $\Delta t = 1,5 \cdot 10^{-7}$ с, $v = 10^6$ с⁻¹, $U_0 = 500$ В, $\Phi_0 = 2500$ В, $\Theta = 78^\circ$, $\beta = 0$, $L = 6$ мм, импульсы $V(t)$ — прямоугольные, ионы вылетают из центра эмиттера. Горизонтальная часть графика ниже $y = 0,2$ относится к ионам, попавшим в анализатор при значении амплитуды импульсов $\gamma = 0$. Часть графика в виде пика $ABCD$, соответствует ионам, ускоренным импульсным полем. Высота пика пропорциональна добавочной энергии, полученной ионами, то есть:

$$y(A) - y(C) \sim \Delta E \quad (9)$$

горизонтальная плоская вершина AB пика соответствует ионам, получившим максимальную добавочную энергию. Разность координат

$$\tau_0(A) - \tau_0(B) \sim \Delta \tau_0 \quad (10)$$

определяет полезно используемую часть ионного тока. Она позволяет определить пропускание масс-анализатора, а следовательно, и чувствительность. По проведенным оценкам величина пропускания не ниже 0,1 и может быть существенно увеличена за счет увеличения длительности импульса при выполнении условия (8) и оптимального выбора частоты поступления импульсов u .

Итак, функция $y(\tau_0)$ в оптимальном случае должна иметь максимальные значения $\Delta E(M)$ и $\Delta \tau_0$. Эти характеристики подбираются с использованием данных численного эксперимента по зависимости $y(\tau_0)$ от величин v , Δt , γ , L и т. д.

Дисперсия по массе растет с ростом величины

ΔE . Поэтому исходные параметры при вычислениях выбирались такими, чтобы вклад начальной энергии ионов W_0 в полную энергию (6), приводящую ионы на выходную щель 9 был мал. При выбранном положении щели 8 величина полной энергии ионов должна быть раной $W = 1,099$ и изменение дисперсии возможно лишь при изменении относительного вклада W_c в полную энергию. В ходе моделирования работы масс-анализатора как оптимальное найдено соотношение $W_0 \leq 0,2$.

Выражение (2) для полной энергии ионов позволяет найти зависимость разрешающей способности масс-анализатора R_m от разрешающей способности примененного в системе энергоанализатора R_E . Эта зависимость имеет вид

$$R_m = \frac{1}{1 + \alpha} R_E, \quad (11)$$

где $\alpha = \frac{2mE_0 + A\sqrt{2mE_0}}{A^2 + A\sqrt{2mE_0}} < 1$ из-за выбранного условия $\Delta E > E_0$ в выражении (2). Таким образом, предельным значением разрешения по массе является разрешение по энергии при увеличении величины ΔE . В рассматриваемом здесь случае $R_E = 2000$.

В рассматриваемом здесь случае $R_E = 2000$.

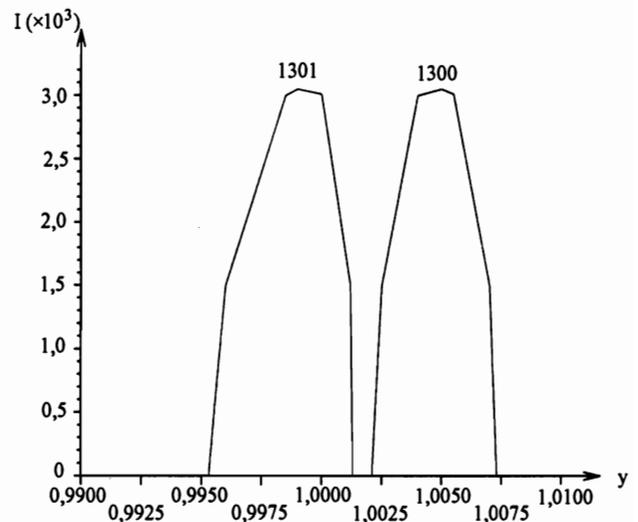


Рис. 4. Интенсивности пиков (в произвольных единицах) ионов с массами 1300 и 1301

На рис. 4 приведены результаты вычислений интенсивностей пиков ионов с массами 1300 и 1301, достигающих плоскости ZOY при условии, что ионы с $M = 1300$ попадают на выходную щель 8. Вычисления проведены при условиях: $\gamma = 1,425$, $\Delta t = 3,122 \cdot 10^{-7}$ с, $v = 10^6$ с⁻¹, $U_0 = 200$ В, $\Phi_0 = 2500$ В в угловом диапазоне $76^\circ \leq \theta \leq 80^\circ$. Эти результаты позволяют найти разрешающую способ-

ность масс-анализатора, ширину коллекторной щели, форма же полученных пиков зависит от объема вычислений (числа точек на пике, где проведены вычисления интенсивностей).

Относительная разрешающая способность масс-анализатора, вычисленная на основе полученных результатов по формуле:

$$R = (M_1 + M_2) L_0 / (M_1 - M_2) (L_1 + L_2)$$

составляет величину не менее 1600 (здесь M_1, M_2 – массовые числа, L_0 – расстояние между осями симметрии линий (пиков), L_1 и L_2 – ширины линий по их основанию. Коллекторная щель имеет криволинейную форму и расположена симметрично относительно оси Y с центром на расстоянии l от входной щели 7.

Развертка масс-спектра в рабочем диапазоне масс 1-1500 может быть произведена двумя способами: изменением длительности импульсов и изменением амплитуды импульсов в ионном источнике-преобразователе.

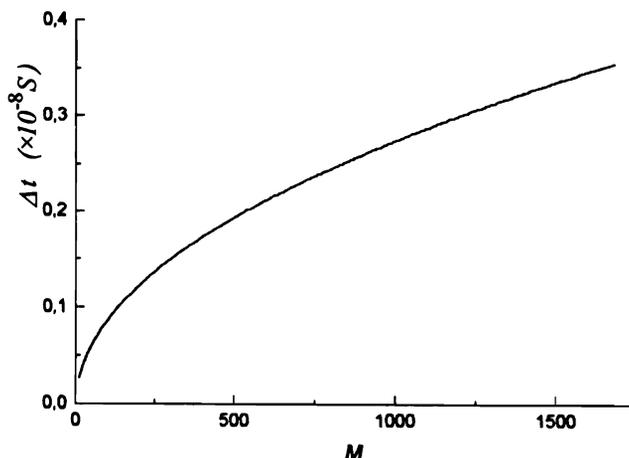


Рис. 5. Зависимость параметра развертки Δt от массы M

На рис. 5 приведена вычисленная кривая зависимости Δt от M при параметрах масс-анализатора: $\gamma = 1,099$, $\nu = 1 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$, $U_0 = 500 \text{ В}$, $\Phi_0 = 2500 \text{ В}$, $\Theta = 78^\circ$, $\beta = 0$, $L = 6 \text{ мм}$, импульсы — прямоугольные. Эта кривая аппроксимируется полиномом

$$\Delta t = -0,3217 \cdot 10^{-10} + 0,8670 \cdot 10^{-8} \cdot M^{1/2} - 0,7096 \cdot 10^{-12} \cdot M + 0,1238 \cdot 10^{-13} \cdot M^{3/2}. \quad (12)$$

На рис. 6 приведены вычисленные зависимости γ от M при выбранных параметрах масс-

анализатора: $\nu = 1 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$, $U_0 = 500 \text{ В}$, $\Phi_0 = 2500 \text{ В}$, $\Theta = 78^\circ$, $\beta = 0$, $L = 6 \text{ мм}$, (для $10 < M < 60$), $\Delta t = 6 \cdot 10^{-8} \text{ c}^{-1}$ (для $60 < M < 200$), $\Delta t = 1 \cdot 10^{-7} \text{ c}^{-1}$ (для $200 < M < 500$), $\Delta t = 2,3 \cdot 10^{-7} \text{ c}^{-1}$ (для $500 < M < 1700$), импульсы — прямоугольные.

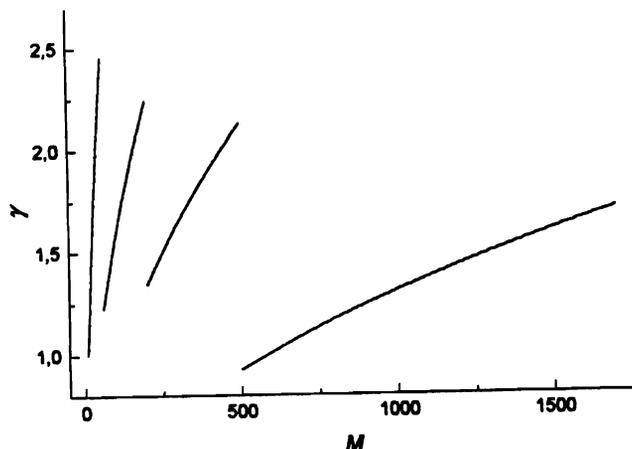


Рис. 6. Зависимость параметра развертки γ от массы M

Эти кривые аппроксимируются полиномами:

$$\gamma = 0,0108 + 0,3115 \cdot M^{1/2} + 0,982 \cdot 10^{-3} M - 0,5498 \cdot 10^{-4} M^{3/2} \quad (13)$$

для $10 < M < 60$,

$$\gamma = 1,207 - 0,2032 M^{1/2} + 0,03513 \cdot M - 0,1101 \cdot 10^{-2} M^{3/2} \quad (14)$$

для $60 < M < 200$,

$$\gamma = 0,191 + 0,06135 \cdot M^{1/2} + 0,1957 \cdot 10^{-2} M - 0,3702 \cdot 10^{-6} M^{3/2} \quad (15)$$

для $200 < M < 500$,

$$\gamma = -0,2181 \cdot 10^{-2} + 0,0417 M^{1/2} - 0,1058 \cdot 10^{-4} + 0,1227 \cdot 10^{-6} \cdot M^{3/2} \quad (16)$$

для $500 < M < 1700$.

Первый способ развертки масс-спектра представляется предпочтительным из-за возможности выбора меньших амплитуд импульсов генератора, чем при развертке вторым способом.

ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСОВ

В проблеме технической реализации рассматриваемого типа масс-спектрометра заметное место занимает разработка релаксационного генератора

(с малым коэффициентом заполнения) коротких импульсов электрического напряжения. Принципиальные вопросы физики нового метода масс-спектрометрии были исследованы с использованием прямоугольных импульсов. Были определены соответствующие требования к генератору. Разработка генератора прямоугольных импульсов с частотами поступления импульсов $\sim 1 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$, длительностями $\sim 1 \cdot 10^{-7} \text{ с}$ и амплитудами $\sim 2000 \text{ В}$ — проблема непростая. Поэтому с целью оценки влияния степени отклонения формы импульсов от прямоугольной на характеристики масс-анализатора проведены расчеты для импульсов, имеющих форму равнобедренной трапеции с длительностью переднего и заднего фронтов $1 \cdot 10^{-8} \text{ с}$. На рис. 3 пунктирной линией приведен график $y(\tau_0)$ для этого случая. Видно, что длительность плоской вершины немного сокращается. Вычисления спектров показывают, что наличие указанных фронтов не сказывается на разрешающей способности анализатора.

Как случай, кардинально отличающийся от рассмотренных выше, проведено моделирование работы масс-анализатора с импульсами в виде прямоугольного треугольника с крутым передним фронтом и с длительностью у основания равной длительности прямоугольного импульса. Полученные результаты соответствуют предсказанию теории: величина сообщенной частице дополнительной энергии ΔE зависит от величины A_i — изменения импульса частицы (1) или от $V \cdot \Delta t$ и не зависит от формы импульса. Следовательно, характеристики масс-анализатора также определяются величиной A_i .

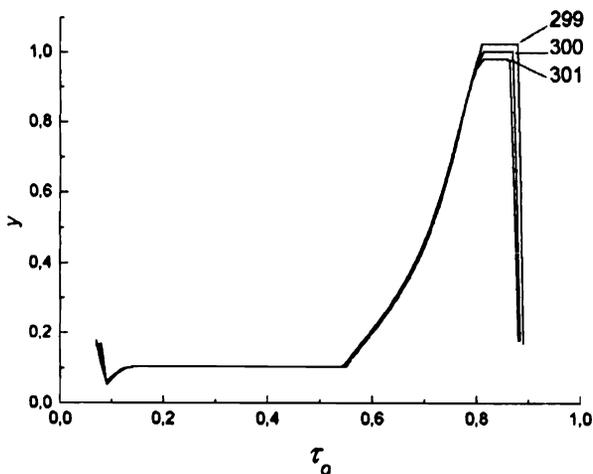


Рис. 7. График функции $y(\tau_0)$ для ионов с массами 299, 300 и 301 для случая треугольных импульсов

На рис. 7 приведена вычисленная характеристика $y(\tau_0)$ для ионов с массами 299, 300 и 301 для

случая треугольных импульсов, практически совпадающая с результатами на рис. 3. Таким образом, разрешающая способность системы по массе и характеристика $y(\tau_0)$ в этом случае — такие же как и для прямоугольных импульсов, но амплитуда импульса в два раза выше, как и ожидалось. Развертка масс-спектра по параметру Δt совпадает с зависимостью (12), при развертке по амплитуде импульсов должны использоваться зависимости (13)-(16) с амплитудой равной 2γ .

Итак, предлагаемый тип масс-анализатора может функционировать с релаксационными генераторами коротких импульсов любой формы, отвечающих требованиям (2), (6) и (8), что открывает возможности выбора и существенно упрощает решение проблемы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как отмечалось в разделе Введение, в работе [1] была исследована возможность создания масс-анализатора нового типа на базе осесимметричного светосильного энергоанализатора высокого разрешения [4] с потенциалом поля

$$\Phi = \Phi_0 \left(\ln \frac{R}{l} - \frac{R^2}{2l^2} + \frac{Z^2}{l^2} \right),$$

где: Φ_0 — характерная величина потенциала; l — характерная длина электростатической системы, выбранная как линейный масштаб; R, Z — цилиндрические координаты. В вычислительном эксперименте было показано, что в этой системе можно достигнуть в рабочем диапазоне масс 1-1000 разрешающей способности 1000 при максимальных габаритах системы 450 мм и величине светосилы, близкой к светосиле масс-анализатора на базе симметричного двумерного поля (3), (3а). Однако для реализации масс-анализатора в осесимметричном поле требовался ионный источник со сферической симметрией сложной конструкции. Кроме того, в случае сферической симметрии сложно добиться уменьшения разброса по энергии в ионном пучке, возникающем в процессе преобразования энергии в сильно неоднородном электрическом поле сферического конденсатора, при этом коэффициент использования ионного тока источника (т.е. чувствительность масс-спектрометра) оказывается меньше, чем в рассматриваемом в данной работе двумерном электрическом поле. Таким образом, системы с плоскостью симметрии являются предпочтительными и по стоимости и конструктивности, и по достижимым параметрам.

В результате вычислительных экспериментов определены оптимальные параметры источника-преобразователя энергии ионов и ориентировочные характеристики релаксационного генератора импульсов электрического напряжения, кото-

рые позволяют при габаритах масс-анализатора, не превышающих 300 мм получать разрешающую способность 1600 по основанию в рабочем диапазоне масс 1-1600 а.е.м.. Эти параметры следующие:

- расстояние L между электродами конденсатора-преобразователя – 6 мм,
- диапазон частоты повторения импульсов ν – $1 \cdot 10^5$ - $1 \cdot 10^6$ с⁻¹,
- диапазон амплитуды прямоугольных импульсов V – 500-2500 В,
- диапазон амплитуды импульсов формы прямоугольного треугольника – 1000-5000 В,
- диапазон длительности импульсов Δt – $3 \cdot 10^{-8}$ - $5 \cdot 10^{-7}$ с.

Приведен график функции $y(\tau_0)$ для ионов с массами 299, 300 и 301 для случая треугольных импульсов. Увеличение параметра L позволяет пропорционально увеличить длительность импульсов Δt и соответственно уменьшить амплитуды V импульсов, что упрощает техническую реализацию масс-анализатора.

Масс-анализатор может использоваться и как энергоанализатор, что позволяет совмещать в одном устройстве как масс-спектрометрические, так и электронно-спектрометрические методы исследования вещества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Галль Л.Н., Голиков Ю.К., Латыпов З.З., Тимченко Н.А. // Научное приборостроение. 1998. Т.8, № 1-2. С.3-8.
2. Голиков Ю.К. Способ расчета энергоанализаторов с плоскостью симметрии. // Всесоюзная конференция по масс-спектрометрии. Кн. 1974. Ленинград. Наука..С.324.
3. Галль Л.Н., Галль Р.Н., Голиков Ю.К., Уткин К.Г. Электростатический анализатор. Авторское свидетельство № 544307 от 28.09. 1974г.
4. Siegbahn K., Kholine N., Golikov G. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research (Section A). 1997. N 384. P.563-574.

DYNAMIC MASS ANALYZER BASED ON CONVERSION OF SPECTRA

L.N. Gall, Z.Z. Latypov, Yu.K. Golikov, N.A. Timchenko

Institute for Analytical Instrumentation RAS, St. Petersburg

The study presents the results of numerical investigations of mass analyzer parameters. The principle of mass analyzer operation is based on the shock mechanism of the ion beam spectra conversion. Mathematical simulation is carried out for the ion motion in the fields of the mass analyzer consisting of an ion source-converter and energy analyzer with a two-dimensional electrostatic field and a plane of symmetry. It is shown that the parameters of variation of the mass analyzer are: 1-1600 u — operational mass range, ~1600 — relative mass resolution, ~ 300 mm — the maximum dimension of the mass analyzer. The general requirements to the electric pulse generator best suited to the mass analyzer under study have also been established.