

10;12
©1994 г.

СФЕРИЧЕСКИЙ ОТРАЖАТЕЛЬ ДЛЯ МАСС-РЕФЛЕКТРОНА

В.Т.Коган, А.Д.Казанский, Г.Ю.Гладков

Проведен расчет фокусирующих свойств сферического отражателя. Определены условия фокусировки. Установлена зависимость между разрешающей способностью и величиной окна по энергии.

Введение

В настоящее время широко используются времяпролетные масс-спектрометры типа масс-рефлектров [1,2]. Они обладают большим геометрическим фактором благодаря глубокой пространственно-временной фокусировке исследуемых частиц по энергии. Эти приборы выгодно отличаются от масс-спектрометров других типов сравнительной простотой конструкции и широким спектром возможностей [1,3].

В качестве отражателя в масс-рефлектроне используется обычно плоское электростатическое зеркало, позволяющее получить высокую разрешающую способность, но уступающее криволинейным зеркалам в величине геометрического фактора. Преимущественное использование плоских отражателей объясняется тем, что, во-первых, известны способы увеличения эффективности использования ионного источника при плоском отражателе, во-вторых, изготовление отражателей более сложной формы — достаточно сложная техническая задача и, в-третьих, традиционные схемы анализа не позволяют в полной мере реализовать возможности таких отражателей. Тем не менее применение сферического отражателя в ряде случаев представляется чрезвычайно эффективным, например, для уменьшения влияния ионов основного компонента на примесные при плотных пакетах ионов на выходе источника или в случаях, когда недостаточно одномерной пространственно-временной фокусировки.

Настоящая работа посвящена расчету основных характеристик отражателя и определению соотношений для выбора его параметров. Схема сферического отражателя представлена на рис. 1.

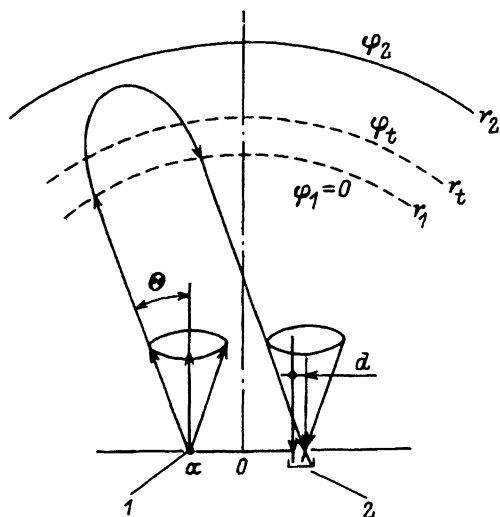


Рис. 1. Схема масс-рефлектора со сферическим отражателем. 1 — источник ионов, 2 — приемник ионов.

Фокусирующие свойства

Время пролета ионов от источника до приемника T в рассматриваемой схеме определяется путем интегрирования уравнения движения частиц в сферической системе координат в предположении, что отлична от нуля только радиальная компонента скорости. Задавая сферическое распределение потенциала между границами r_1 , r_t и r_2 , получаем

$$\begin{aligned}
 T = & \left(\frac{2m}{q}\right)^{1/2} \frac{r_1}{\left(\frac{E}{q}\right)^{1/2}} \left(1 + \frac{\frac{E}{qc_1}}{1 - \frac{E}{qc_1}} + \frac{\left(\frac{E}{qc_1}\right)^{1/2} \operatorname{arctg}\left(\frac{\frac{E}{qc_1}}{1 - \frac{E}{qc_1}}\right)}{\left(1 - \frac{E}{qc_1}\right)^{3/2}} - \right. \\
 & - \frac{\frac{(E_1 \cdot E)^{1/2} r_t}{qc_1 r_1}}{1 - \frac{E}{qc_1}} - \frac{\left(\frac{E}{qc_1}\right)^{1/2} \operatorname{arctg}\left(\frac{\frac{E_1}{qc_1}}{1 - \frac{E}{qc_1}}\right)^{1/2}}{\left(1 - \frac{E}{qc_1}\right)^{3/2}} + \\
 & \left. + \frac{\frac{(E_1 \cdot E)^{1/2} r_t}{qc_{11} r_1}}{1 - \frac{E}{qc_{11}}} + \left(\frac{E}{qc_{11}}\right)^{1/2} \frac{r_{11}}{r_1} \operatorname{arctg}\left(\frac{\frac{E_1}{qc_{11}}}{1 - \frac{E}{qc_{11}}}\right)^{1/2}\right), \quad (1)
 \end{aligned}$$

где m , eq , E — соответственно масса, заряд и энергия иона; φ_i — потенциал на поверхности r_i ; $\varphi_1 = 0$; $E_1 = E - eq\varphi_i$;

$$c_1 = \frac{e\varphi_t r_t}{r_t - r_1}, \quad c_{11} = \frac{e\varphi_t r_t}{r_t - r_{11}}, \quad r_{11} = \frac{r_t r_2 (\varphi_2 - \varphi_t)}{r_2 \varphi_2 - r_t \varphi_t}.$$

Условие пространственно-временной фокусировки ионов по трем составляющим скорости в настоящей работе получено путем численного расчета. Оно предполагает, что область фокусировки находится вблизи центра симметрии поверхностей сферического отражателя.

Из результатов проведенного расчета выведены соотношения, позволяющие обеспечить фокусировку.

а) Для двухсеточного сферического отражателя, $r_t = r_1$; $\varphi_t = 0$

$$\frac{E(T_{\min})}{q \cdot c} = 0.22, \quad (2)$$

где $E(T_{\min})$ — энергия частиц с минимальным временем пролета от источника до приемника.

Полученное соотношение является универсальным, поскольку для поля со сферическим распределением потенциала пространственное подобие траекторий исследуемых частиц обеспечивается постоянством величины C , равной $(\varphi_2 r_2)/(r_2 - r_1)$, а подобие по времени пролета — постоянством величины $(E(T_{\min}))/ (q \cdot c)$.

Значительно сложнее выразить в аналитическом виде условия фокусировки для трехсеточного отражателя. Приведенные далее выражения позволяют определить область значений параметров отражателя вблизи максимума разрешающей способности в диапазоне

$$0 < \frac{\Delta E}{E(T_{\min})} < 0.5,$$

где ΔE — окно по энергии. Точную настройку необходимо проводить регулировкой потенциала φ_t .

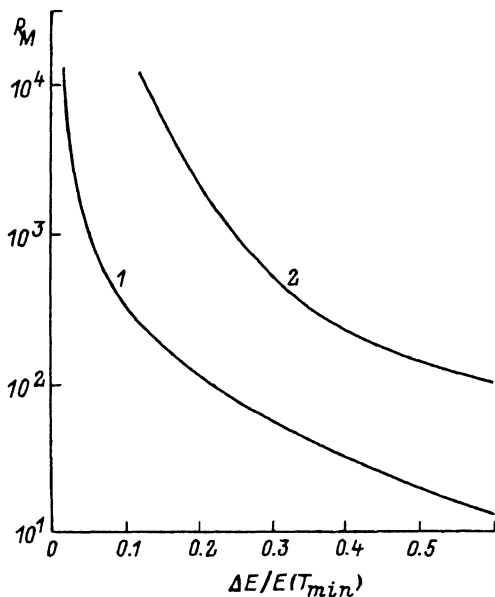


Рис. 2. Зависимость разрешающей способности масс-спектрометра по массе от величины относительного пропускания по энергии.

ΔE — величина окна по энергии; $E(T_{\min})$ — энергия ионов, при которой время пролета до приемника минимально; 1 — двухсеточный отражатель, 2 — трехсеточный.

б) Для трехсеточного отражателя условие фокусировки определяется сначала для случая $r_t = r_1$, $\varphi_t^* \neq 0$

$$\frac{E(T_{\min})}{qC_2} = 0.199, \quad (3)$$

где

$$C_2 = e \frac{(\varphi_2 - \varphi_t^*) \left(r_1 + (r_2 - r_t)^* \frac{\varphi_2}{\varphi_t^*} \right)}{(r_2 - r_t)^*},$$

(\cdot)^{*} — значение параметра при $r_t = r_1$, а затем уточняются значения $r_2 - r_t$ и φ_t , находящиеся в зависимости от реальной величины r_t ,

$$r_2 - r_t = \left(1 - 0.84 \frac{r_t - r_1}{r_1} \right) (r_2 - r_t)^*, \quad (4)$$

$$\varphi_t = \left(1 + 0.9 \frac{r_t - r_1}{r_1} - 0.27 \left(\frac{r_t - r_1}{r_1} \right)^2 \right) \varphi_t^*. \quad (5)$$

Выражения (1)–(5) справедливы при условии, что источник и приемник в приборе разнесены на расстояние $2a \ll r_1$.

Разрешающая способность и окно по энергии

В настоящей работе определены зависимости разрешающей способности масс-рефлектрона R_m с двух- и трехсеточным сферическими отражателями от диапазона энергий фокусируемых частиц (рис. 2). Эти зависимости получены из анализа результатов расчета по формуле (1). Основным критерием анализа было подобие кривых на графиках зависимости $T(E)$, где T — интервал времени пролета иона с энергией E от источника до приемника.

Из графика, представленного на рис. 2, следует, что преимущества трехсеточного отражателя становятся очевидными при использовании источника с широким распределением ионов по энергии, если протяженность ионных пакетов от источника ΔT мала $T/(\Delta T) > R_m$ и не ограничивает разрешающую способность масс-спектрометра.

Заключение

Сферический отражатель предназначен для работы с источником ионов, имеющим большие разбросы по углам и энергии. Он может быть эффективно использован на первой ступени анализа в тандемных времяпролетных схемах для определения состава компонент низкой распространенности. Фокусировка по трем составляющим скорости позволяет сформировать пакет ионов выделенного состава для последующего анализа [4].

Список литературы

- [1] Мамырин Б.А. Автореф. докт. дис. Л., 1966.
- [2] Шмикк Д.В., Дубенский В.М. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 5. С. 912-916.
- [3] Мамырин Б.А., Каратаев В.И., Шмикк Д.В., Загулин В.А. // ЖЭТФ. 1973. Т. 64. Вып. 1. С. 82-89.
- [4] Pavlov A.K., Kogan V.T., Gladkov G.Y. // Radiocardon. 1992. Vol. 34. N 2. P. 271.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе РАН
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
12 января 1993 г.
В окончательной редакции
21 апреля 1993 г.

