

УДК 537.534.3:621.384.8

Симметричный призмный масс-спектрометр высокого разрешения для химического анализа. Ионно-оптическая система, основы расчета и параметры. Печалина Е.Э., Фридлянский Г.В.//Научное приборостроение. Электронно-ионная оптика. Л.:Наука, 1989, с.95-98.

Показаны преимущества симметричных призмных ионно-оптических систем с трансаксиальными линзами и изложены основы расчета такой системы для построения масс-спектрометра высокого разрешения для химического анализа. Рассмотрена методика расчетов магнитной призмы, трансаксиальных линз и телескопических электростатических систем и ионно-оптической системы в целом с объемной фокусировкой пучка. Получены значения всех геометрических параметров системы и потенциалов электродов. Лит. - 3 назв., ил. - 1.

# СИММЕТРИЧНЫЙ ПРИЗМЕННЫЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТР ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА. ИОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА, ОСНОВЫ РАСЧЕТА И ПАРАМЕТРЫ \*

В отличие от секторных приборов характерной особенностью призмённых ионно-оптических систем является разделение диспергирующих и фокусирующих элементов, что позволяет наилучшим способом использовать свойства последних. Для получения дисперсии по массам применяются магнитные призмы с двухмерными полями, обладающие угловой дисперсией, определяемой углом входа пучка и не зависящей от размеров магнита [1]. Вследствие этого габариты магнитного анализатора определяются только средним радиусом траектории в магнитном поле, т.е. по существу верхним пределом требуемого диапазона масс при номинальном ускоряющем напряжении. В качестве коллиматорной и фокусирующей линз используются малоабберационные трансаксиальные устройства, работающие в режиме анаморфота [2]. Призмённые системы обладают следующими существенными достоинствами: а) в средней плоскости аберрации призмённых отклоняющих систем отсутствуют; б) при определенных условиях может быть получено прямолинейное изображение выходной щели и осуществлена вертикальная фокусировка пучка; в) удельная дисперсия (отношение дисперсии к длине траектории) может значительно превышать аналогичный параметр секторных приборов; г) теория органически учитывает реальное распределение полей рассеяния, не требуя введения каких-либо допущений; д) линия фокусов перпендикулярна средней траектории. Высокая дисперсия в сочетании с пространственной фокусировкой пучка и малостью аберраций создает достаточные основания для построения светосильных масс-спектрометров с весьма высокой разрешающей способностью.

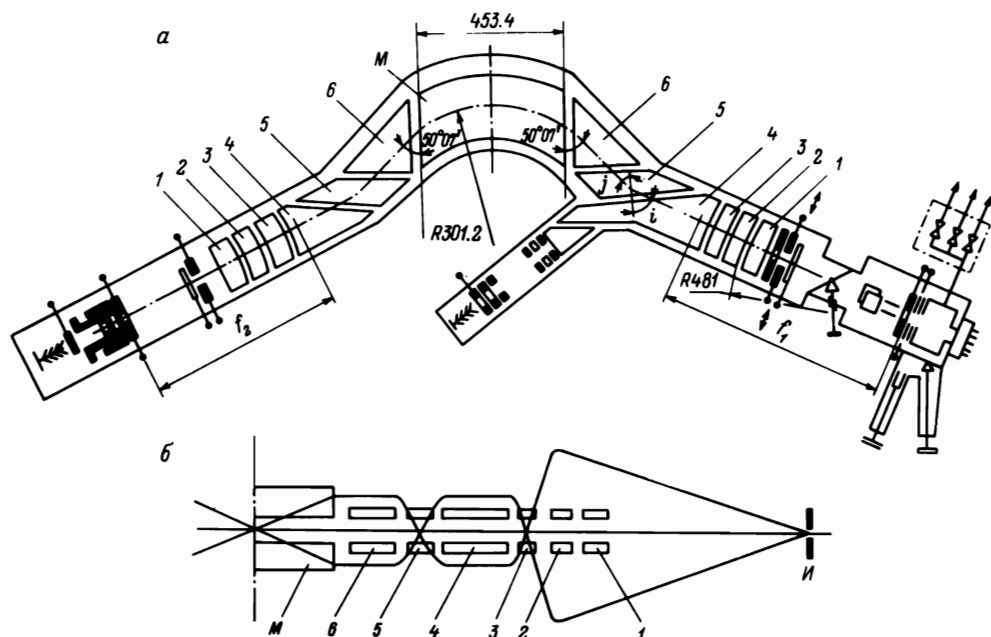
В призмённых масс-спектрометрах, построенных по симметричной схеме [2], за счет второй электростатической отклоняющей системы, расположенной после магнитной призмы, происходит дополнительное увеличение дисперсии и значительное расширение возможностей прибора при анализе метастабильных ионов.

## Расчет ионно-оптической системы масс-спектрометра

Ионно-оптическая схема (ИОС) масс-спектрометра и ход лучей в вертикальной плоскости показаны на рисунке. Центральной ее частью является магнитная призма М. К призме с обеих сторон примыкают два симметричных электростатических анализатора (ЭСА), в каждый из которых входит трансаксиальная линза, образованная электродами 1, 2, 3, 4 и телескопическая система, состоящая из электродов 4, 5, 6.

### Магнитная призма

В основу расчета магнитной призмы положено распределение относительной напряженности магнитного поля  $h(z)$ , аналогичное измеренному на приборе МХ1310 со сходной конфигурацией магнитных экранов. Численными методами определялось значение угла падения ионного пучка на магнитную призму, удовлетворяющее условию телескопичности магнитной призмы, и эффективная ширина полюсных наконечников магнита  $S_{эф}$ , при которой радиус кривизны траекторий ионов  $\rho$  в области однородного поля



Призмный масс-спектрометр: а - ионно-оптическая схема; б - ход лучей в вертикальной плоскости

был бы равен  $\sim 300$  мм.

В рассматриваемом случае условие телескопичности может быть записано следующим образом [2]:

$$\operatorname{ctg} \Theta_1 = \Theta_1 [1 - (1 + 2 \operatorname{tg}^2 \Theta_1) \tau],$$

где  $\tau = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} h(x)(1-h(x))dx}{\int_{-\infty}^{\infty} h(x)dx},$

эффективная ширина полюсов  $S_{\text{эф}} = \int_{-\infty}^{\infty} h(x)dx.$

Радиус кривизны связан с  $S_{\text{эф}}$  соотношением  $\rho = \frac{S_{\text{эф}}}{2 \sin \Theta_1}.$

В результате расчета были получены следующие значения:  $\Theta_1 = 50^\circ 07'$ ,  $S_{\text{эф}} = 462,3$  мм,  $\rho = 301,2$  мм.

После изготовления магнитной призмы были произведены измерения краевого поля и расчеты повторены на основе истинного распределения. При этом получены следующие значения указанных параметров:  $\Theta_1 = 50^\circ 03'$ ,  $S_{\text{эф}} = 461,4$  мм,  $\rho = 301,2$  мм.

Таким образом, отклонения в распределении магнитного поля от принятого распределения не повлияли существенным образом на значения угла  $\Theta_1$  и  $S_{\text{эф}}$  и внесения каких-либо изменений в конструкцию прибора не потребовалось.

Телескопические системы  
электростатических цилиндрических линз

Ионно-оптические параметры телескопических систем цилиндрических электростатических линз выбирались таким образом, чтобы масс-анализатор в целом представлял

собой ахроматичную систему, в которой отсутствовало бы искривление изображения.

Условие ахроматичности всей отклоняющей системы имеет вид  $\tan \Theta_1 = (1 - V_6/V_4) \tan j$  [2], где  $V_6$  и  $V_4$  – потенциалы на электродах, соответственно, 6 и 4, отсчитанные от потенциала того места, где скорость ионов равна нулю,  $j$  – угол преломления ионного пучка в первой телескопической системе, связанной с углом падения  $i$  соотношением  $\frac{\sin i}{\sin j} = \sqrt{\frac{V_6}{V_4}}$ .

При  $\Theta_1 = 50^\circ 07'$  получим  $i = 64^\circ 56'$ ,  $j = 32^\circ 04'$ ,  $\frac{V_6}{V_4} = 2,91$ .

Расчет кардинальных элементов телескопической системы выполнялся в предположении бесконечно узкого зазора между электродами, что является традиционным при расчете призматических систем. При этом расчет ионно-оптических параметров электростатической системы цилиндрических линз проводился следующим образом: по заданному отношению потенциалов на крайних электродах  $\frac{V_6}{V_4}$  находились такие значения эффективной длины среднего электрода  $L^*$  и потенциала на нем  $V_5$ , чтобы система удовлетворяла условию телескопичности и условию отсутствия искривления изображения  $H = -1$ , где  $H$  – увеличение системы в направлении, перпендикулярном к средней плоскости. Вслед за этим определялись значения всех остальных параметров телескопической системы. Фактическая длина среднего электрода, заложенная в конструкцию прибора, определялась из равенства  $L = L^* - r$ . Здесь  $r$  – реальная величина зазора между электродами в приборе, равная в данном случае 2 мм.

Результатом расчета ионно-оптических параметров трехэлектродной телескопической системы явились следующие значения:  $L^* = 54$  мм ( $L = 52$  мм);  $V_5/V_4 = 1,58$ ;  $Z_0 = -15$  мм;  $H = -1,00$ ;  $f = -25,2$  мм;  $Z_f = -15,5$  мм. Здесь  $Z_0$  – положение эффективной плоскости преломления,  $f$  – фокусное расстояние цилиндрических линз;  $Z_f$  – положение линейного фокуса.

Величины  $Z_0$  и  $Z_f$  отсчитываются от центра среднего электрода электростатической телескопической системы.

Ввиду того, что наличие зазора является необходимым условием реализации расчетной схемы масс-анализатора прибора, представляется крайне важным исследовать влияние величины  $r$  на значения основных параметров прибора. Поскольку результаты этого исследования рассмотрены в отдельной статье [3], приведем лишь некоторые наиболее существенные выводы. Так, например, оказалось, что при  $r = 2$  мм, вертикальное увеличение в масс-анализаторе составляет  $H = -0,86$ , что приводит к заметным абберациям второго порядка малости. В режимах высокой и сверх-высокой разрешающих способностей их влияние становится весьма ощутимым (при  $h_{\text{гор}} = 1$  мм,  $h_{\text{верт}} = 1$  мм, дополнительное уширение пучка составляет  $\sim 8$  мкм).

Точное выполнение условий телескопичности и равенства  $H = -1$  возможно при небольшом изменении параметров существующей системы. В частности, это достигается путем увеличения длины среднего электрода до 54 мм (вместо 52 мм).

#### Трансаксиальные линзы

В основу расчета трансаксиальной линзы положено требование сохранения нулевого потенциала на щелях источника и приемника и в области, занятой магнитным полем. Это условие, невыполнение которого чрезвычайно осложняет конструкцию прибора, может быть удовлетворено, если отношение потенциалов на крайних электродах линзы  $V_4/V_1$  будет равно обратному отношению потенциалов на крайних электродах телескопической системы  $V_6/V_4$ , т.е.  $V_4/V_1 = 0,344$ .

При расчете ионно-оптических параметров трехэлектродной трансаксиальной линзы, работающей в режиме анаморфота, учитывалось дополнительное требование  $600 \text{ мм} \leq f_t \leq 700 \text{ мм}$ , где  $f_t$  — фокусное расстояние линзы.

Указанным условиям можно удовлетворить, выбрав значения радиусов кривизны электродов линзы и отношения потенциалов  $V_3/V_4$ . В результате получены следующие значения:

радиус середины зазора между электродами 4 и 5 — 210 мм;

радиус между электродами 1 и 2 — 480 мм;

отношение  $V_3/V_4 = 2,19$ ;

эффективный радиус кривизны  $R_{эф} = 255 \text{ мм}$ ;

переднее фокусное расстояние линзы  $f_t = 616 \text{ мм}$ .

При этом линейная дисперсия системы  $D_A = f_t \frac{\cos \theta}{\cos i} \tan \theta = 1470 \text{ мм}$ , т.е.  $14,7 \text{ мм/1 \% } \frac{\Delta M}{M}$ . Это приблизительно в пять раз выше дисперсии секторных масс-спектрометров со средним радиусом траектории в магнитном поле 300 мм. Полученные расчетные значения положены в основу конструкции масс-спектрометра высокого разрешения для химического анализа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кельман В.М., Родникова И.В.//ЖТФ, 1962. Т.32, № 3.—С.269.
2. Кельман В.М. и др. Электронно-оптические элементы призматических спектрометров заряженных частиц. — Алма-Ата: Наука, 1979.
3. Печалина Е.Э., Фридлянский Г.В.//Научное приборостроение. Приборы и средства автоматизации для научных исследований. Л.: Наука, 1987.—С.21.