

УДК 587.584.3:621.384.8

Расчет ионно-оптической схемы изотопного масс-спектрометра высокой чувствительности МИ3304. Галль Р. Н., Корочкин А. М., Леднев В. А., Саченко В. Д., Трубачев Г. М. — В кн.: Приборы для научных исследований и автоматизации эксперимента. Л., «Наука», 1982, с. 104—108.

Приведены результаты расчета ионно-оптической схемы масс-спектрометра МИ3304 с двойной фокусировкой, созданного на основе масс-спектрометра МИ1320 с одинарной фокусировкой. Ионно-оптическая схема построена по типу М—Э. Магнитный анализатор — секторный, с однородным полем и нормальными круговыми границами; электростатический анализатор — цилиндрический конденсатор. Расчет ионно-оптической схемы выполнен с учетом конструктивных требований. Приведены ионно-оптические коэффициенты. Рассмотрен вопрос о влиянии смещения центров кривизны границ магнитного анализатора на смещение фокуса. Обосновывается выбор схемы юстировки масс-спектрометра. Лит. — 7 назв., ил. — 2, табл. — 3.

*Р. Н. Галль, А. М. Корочкин, В. А. Леднев,
В. Д. Саченко, Г. М. Трубачеев*

**РАСЧЕТ ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ
ИЗОТОПНОГО МАСС-СПЕКТРОМЕТРА
ВЫСОКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МИЗ304**

Для решения ряда задач изотопного анализа в геологии, геохимии и ядерной физике масс-спектрометр должен обладать высокой разрешающей способностью (порядка 15 000—20 000) и высокой абсолютной чувствительностью (порядка 10^{-4} ион/атом).

Отечественная промышленность выпускает серийный высокочувствительный масс-спектрометр МИ1320 [1], который, однако, будучи однокаскадным прибором, имеет максимальное значение разрешающей спо-

способности 2000—2500. Разрешающая способность масс-спектрометра может быть повышена путем использования схемы с двойной фокусировкой. Поэтому в основу масс-спектрометра МИ3304 с двойной фокусировкой был положен масс-спектрометр МИ1320 с одинарной фокусировкой, имеющий высокую чувствительность. Расчет ионно-оптической схемы масс-спектрометра МИ3304 осуществлялся исходя из требований высокой разрешающей способности (15 000) и совместимости ионно-оптических схем масс-спектрометра МИ1320 с одинарной фокусировкой и прибора с двойной фокусировкой. Совместимость предполагает сохранение величины входного плеча и угла поворота магнитного анализатора.

В работе [2] были сформулированы общие условия реализации так называемых развязанных масс-спектрометрических систем — двухкаскадных анализаторов заряженных частиц с двойной фокусировкой, в которых исключение важнейших aberrаций изображения достигается при простой геометрии полежащих элементов. Наиболее удачным вариантом таких систем является сочетание секторного магнитного анализатора с однородным полем и нормальными круговыми границами и цилиндрического электростатического анализатора. Для такого сочетания путем введения одной только кривизны границ магнитного анализатора удается исключить аксиальные и сферическую aberrации изображения.

Ионно-оптические коэффициенты

Расчет ионно-оптической схемы для масс-спектрометра МИ3304 осуществляется в три этапа. На первом этапе были определены параметры схемы и aberrационные коэффициенты в предположении, что оба каскада являются симметричными и без учета поправок на конкретную форму спада поля.

Далее, поскольку в качестве первого каскада используется магнитный анализатор масс-спектрометра МИ1320, в котором угол сектора $\psi_m = \pi/2$, но плечи превосходят радиус r_{0m} , на втором этапе производилась соответствующая коррекция первоначальной схемы.

Наконец, на третьем, последнем этапе были введены поправки на конкретную форму спада рассеянных полей и проведена корректировка схемы в связи с конструктивным требованием о минимальной величине выходного плеча электростатического анализатора (не менее 130 мм). Развернутая характеристика проведенной работы дана в табл. 1. Здесь ψ — угол сектора, l_i и r_i — плечи и радиусы кривизны границ анализатора, r_0 — радиус кривизны осевой траектории, M — коэффициент увеличения, Y_i , Z_i и $Y_{i,j}$ — ионно-оптические коэффициенты, χ^0 — угол наклона линии фокусов. Индекс i при l и r принимает два значения: 1 — для входной, 2 — для выходной области; знак r_i положительный для вогнутых границ. Тильдой (\sim) отмечены величины, относящиеся к двухкаскадной системе; \tilde{Y}_i и $\tilde{Y}_{i,j}$ — коэффициенты радиальной фокусировки I и II порядков, \tilde{Z}_i — коэффициенты аксиальной фокусировки; все коэффициенты выражены в единицах r_0 для магнита. Индексы i, j при коэффициентах Y и Z соответствуют шести малым параметрам пучка α_i : α_1 и α_2 — половины углов радиальной и аксиальной расходимости пучка, α_3 и α_4 — полуширина и полувысота щели источника, α_5 и α_6 — относительные разбросы по энергиям и массам. χ_α^0 — угол наклона линии фокусов по углам, χ_v^0 — по энергиям; для ортогональной к оси пучка линии фокусов $\chi^0 = 0$; при положительных χ^0 более тяжелые массы фокусируются дальше от выходной границы анализатора.

Поправки на конкретную форму спада поля вводились по методике Герцога—Вольника—Мауды [3—5], а также с учетом результатов работы [6]. Для магнитного поля рассчитывался вариант бесконечно

толстой, для электростатического — бесконечно тонкой диафрагмы. Геометрия краевого поля электростатического анализатора выбиралась из условия совпадения эффективной границы с краем пластин конден-

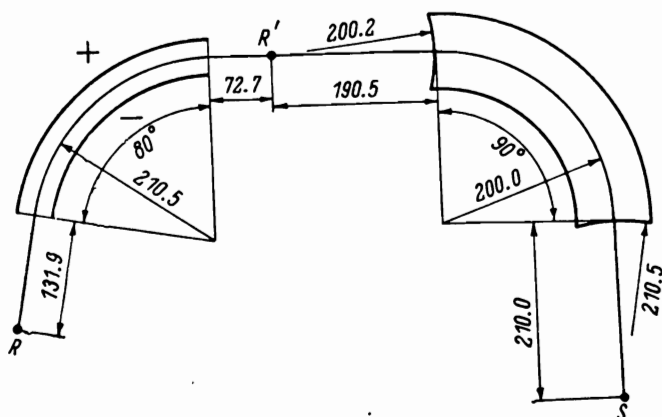


Рис. 1. Ионно-оптическая схема масс-спектрометра МИ3304.

S — источник ионов; R' — промежуточный коллектор; R — приемник ионов.

сатора. Зазор в магните принимался равным 13 мм, в конденсаторе — 20 мм.

Окончательная ионно-оптическая схема масс-спектрометра МИ3304 изображена на рис. 1.

Таблица 1
Характеристики анализаторов на этапах оптимизации

Тип анализатора	Параметры	Этап 1	Этап 2	Этап 3
Магнитный анализатор	ψ	90°	90°	90°
	l_1 , мм	200	210	210
	l_2 , мм	200	190.5	190.5
	r_1 , мм	200	210	210.5
	r_2 , мм	200	190.5	200.2
	r_0 , мм	200	200	200
	M	-1	-0.9524	-
Электростатический анализатор	ψ	84°51'	84°51'	80°
	l_1 , мм	81.7	73.7	72.7
	l_2 , мм	81.7	90.2	131.9
	r_0 , мм	200	200.2	210.5
	M	-1	-1.052	-
Параметры I порядка	\tilde{Y}_1	0	0	0
	\tilde{Y}_3	1	1.0013	1.1450
	\tilde{Y}_5	0	0	0.0003
	\tilde{Y}_6	-1	-1.0263	-1.1732
	\tilde{Z}_2	5.8683	5.8752	6.2853
	\tilde{Z}_4	1	1	1.1304
	Параметры II порядка	\tilde{Y}_{11}	0	0
\tilde{Y}_{15}		2.2247	2.143	2.4047
\tilde{Y}_{55}		-0.7374	-0.6134	-0.6235
\tilde{Y}_{22}		0	0	-0.0262
\tilde{Y}_{24}		0	0	0.0006
\tilde{Y}_{44}		0	0	0.0000
$\tilde{\chi}_\alpha^0$		73°50'	73°04'	75°10'
$\tilde{\chi}_\beta^0$		73°50'	73°00'	73°20'

Юстировка

Влияние смещения центров кривизны границ. Использование криволинейных границ магнитного анализатора приводит к постановке вопроса о точности, с которой должны быть выдержаны положения центров кривизны границ. Важность этого вопроса связана также с тем, что ошибки при введении поправок на конкретную форму спада рассеянного поля сводятся в конечном итоге к ошибкам в установлении положения центров кривизны.

В табл. 2 приведены значения параметров Δy_j и Δx_{ij} , характеризующих «чувствительность» фокуса к смещениям центров кривизны.

Таблица 2
Параметры Δy_j и Δx_{ij} для ионно-оптической
схемы прибора МИ3304

δ_j	Δy_j	Δx_{ij}	
		α_1	α_5
p_1	1	$2 + \sqrt{6}$	$2 + \frac{4}{2 + \sqrt{6}}$
p_2	1	$4 + \sqrt{6}$	$2\sqrt{6}$
q_1	0	1	0
q_2	0	1	$-\frac{2}{2 + \sqrt{6}}$

Здесь δ_j — псевдопараметры, характеризующие смещения центров кривизны (рис. 2); Δy_j и Δx_{ij} — поперечные и продольные смещения фокуса для единичного δ_j ; индекс i при Δx принимает два значения: 1 — для фокуса по углам, 5 — для фокуса по энергиям. Расчет выполнен для симметричных каскадов, т. е. на уровне этапа 1. По данным табл. 2, продольные смещения фокуса примерно в 5 раз превосходят продольные смещения центров кривизны.

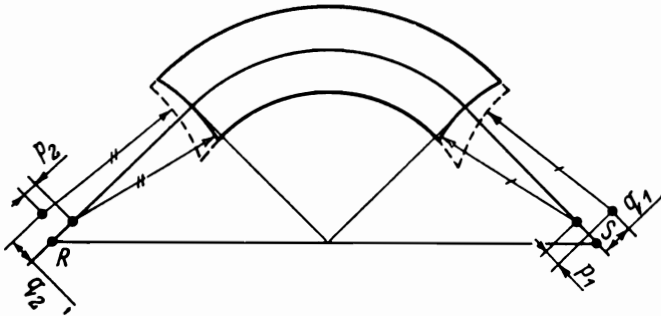


Рис. 2. Смещение центров кривизны границ магнитного анализатора масс-спектрометра.

Схема юстировки. Если при изготовлении или сборке узлов двухкаскадного анализатора были допущены ошибки, ширина изображения β_3 запишется в виде

$$\beta_3 = \sum_i \tilde{Y}_i \alpha_i + \sum_i \tilde{Y}_{\delta_i} \delta_i + \sum_{i \geq j} \tilde{Y}_{i,j} \alpha_i \alpha_j + \sum_{i \geq j} \tilde{Y}_{i,\delta_j} \alpha_i \delta_j + \dots$$

где δ_i — произвольный псевдопараметр. Суть юстировки заключается в обращении в нуль трех сумм: $\sum_i \tilde{Y}_{\delta_i} \delta_i$ (компенсация поперечного смещения

пучка), $\sum_i \tilde{Y}_{1\delta_i} \delta_i$ (компенсация продольного смещения фокуса по углам) и $\sum_i \tilde{Y}_{5\delta_i} \delta_i$ (компенсация продольного смещения фокуса по энергиям). Для этого среди всех δ_i мы выделяем три активных псевдопараметра Δ_i . Тогда условие юстировки примет вид

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^3 \tilde{Y}_{\Delta_i} \Delta_i + \sum_j \tilde{Y}_{\delta_j} \delta_j &= 0, \\ \sum_{i=1}^3 \tilde{Y}_{1\Delta_i} \Delta_i + \sum_j \tilde{Y}_{1\delta_j} \delta_j &= 0, \\ \sum_{i=1}^3 \tilde{Y}_{5\Delta_i} \Delta_i + \sum_j \tilde{Y}_{5\delta_j} \delta_j &= 0. \end{aligned}$$

Если определитель этой системы уравнений отличен от нуля, юстировка возможна. Рассмотрим четыре активных псевдопараметра (рис. 2): Δy — смещение магнита по траектории сектора; $\Delta \omega$ — поворот второго каскада относительно промежуточного фокуса; $\check{\eta} = \Delta H/H$ и $\check{\epsilon} = \Delta E/E$.

Соответствующие коэффициенты \tilde{Y}_{Δ_i} , $\tilde{Y}_{1\Delta_i}$ и $\tilde{Y}_{5\Delta_i}$, определенные для ионно-оптической схемы с симметричными анализаторами без учета поправок на конкретную форму спада поля (т. е. на уровне этапа 1 расчета), сведены в табл. 3.

Расчеты показывают, что оптимальными в плане юстировки являются следующие наборы псевдопараметров: Δy , $\Delta \omega$, $\check{\eta}$ либо Δy , $\Delta \omega$, $\check{\epsilon}$.

Таблица 3
Коэффициенты \tilde{Y}_{Δ_i} , $\tilde{Y}_{1\Delta_i}$ и $\tilde{Y}_{5\Delta_i}$

Δ_i	\tilde{Y}_{Δ_i}	$\tilde{Y}_{1\Delta_i}$	$\tilde{Y}_{5\Delta_i}$
Δy	$-\sqrt{2}$	$2(\sqrt{2} + \sqrt{3})$	$-\frac{3\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}(\sqrt{2} + \sqrt{3})$
$\Delta \omega$	0	4	$-\left(2 + \sqrt{\frac{3}{2}}\right)$
$\check{\eta}$	2	$-2(1 + \sqrt{6})$	$4 + 3\sqrt{\frac{3}{2}}$
$\check{\epsilon}$	-1	$\sqrt{\frac{3}{2}}$	$-\left(\frac{7}{4} + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{3}{2}}\right)$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По описанной выше ионно-оптической схеме в 1977 г. был создан масс-спектрометр МИЗ304 [7]. В ходе испытаний на этом приборе была достигнута разрешающая способность порядка 18 000—20 000 и абсолютная чувствительность около $7 \cdot 10^{-4}$ ион/атом. Это говорит о состоятельности положений ионно-оптической теории, использованной для расчета оптики анализатора масс-спектрометра МИЗ304.

ЛИТЕРАТУРА

1. Галль Р. Н., Соколов Б. Н., Трубняков Ю. И., Научные приборы, 1978, № 15, с. 19.
2. Малов А. Ф., Трубачев Г. М., ЖТФ, 1977, т. 47, с. 2043.
3. Herzog R., Phys. Z., 1940, Bd 41, S. 18.
4. Wollnik H., Nucl. Instr. Meth., 1965, v. 34, p. 213.
5. Matsuda H., Matsuo T., Intern. J. Mass Spectrom. Ion Phys., 1971, v. 6, p. 385.
6. Александров М. Л., Галль Л. Н., Саченко В. Д., Научные приборы, 1976, № 12, с. 26.
7. Галль Р. Н., Леднев В. А., Соколов Б. Н., Холодов А. И., Научные приборы, 1978, № 17, с. 7.