

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 621.039.8 : 621.384.8

© Л. Н. Галль, В. Д. Саченко, В. А. Леднев, А. С. Бердников, В. А. Васильев, А. П. Иванов, В. А. Калашников

ИОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА БАЗОВОЙ МОДЕЛИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗОТОПНЫХ МАСС-СПЕКТРОМЕТРОВ

Представлены результаты синтеза и оптимизации новой ионно-оптической схемы базового магнитного масс-анализатора для изотопного анализа соединений урана и трансуранов. Методом математического моделирования проведено сравнение фокусирующих и транспортирующих свойств нового масс-анализатора с масс-анализатором МИ1201 и показаны преимущества нового.

ВВЕДЕНИЕ

Масс-спектрометрический контроль является неотъемлемой частью технологии ядерно-топливного цикла, начиная с получения UF_6 в сублимационном производстве и контроля процесса обогащения урана в разделительном производстве и кончая разработкой ТВЭЛов и их переработкой. Он также является единственным аналитическим методом контроля и сертификации готовой продукции разделительного производства. Во всех случаях при масс-спектрометрическом изотопном анализе урана и его соединений как в виде паров труднолетучей жидкости (UF_6), так и в виде твердых веществ (окислов и солей) требования к основным параметрам используемых масс-спектрометров: диапазону масс, разрешающей способности, пропусканию, величине дисперсии по массе, а также требования к их аналитическим характеристикам: абсолютной и изотопической чувствительности, точности определения изотопных отношений, величине "памяти" и др., очень близки. При создании нового комплекса специализированных изотопных масс-спектрометров, предназначенных для решения задач аналитического контроля в технологиях ядерно-топливного цикла, это позволяет в соответствии с общими принципами построения высокоточных изотопных масс-спектрометров поставить задачу о создании единой базовой части для всей номенклатуры разрабатываемых приборов. Базовая часть комплекса масс-спектрометров при этом представляет собой универсальный магнитный статический масс-анализатор, сконструированный в виде отдельного модуля, в состав которого кроме анализирующего магнита, камеры анализатора и вакуумной системы входят также пульт управления, силовые блоки питания магнита и вакуумных насосов и система контроля вакуума в масс-анализаторе.

Основные требования к ионно-оптическим свойствам масс-анализатора определяются требованиями изотопного анализа урана (и трансуранов): диапазон масс не более 400, пик ионного тока с плоской вершиной и малым абберрационным уширением, разрешающая способность порядка 1000, высокий коэффициент использования пробы и высокая изотопическая чувствительность. Особое место среди аналитических требований занимает требование к точности определения изотопных отношений: от 0.02 до 0.001 %. Такую точность очень сложно обеспечить в режиме развертки спектра, т.е. при последовательной записи ионных пучков различных изотопов на единый коллектор. Аналитический опыт уже давно показал, что эта проблема наиболее просто решается при одновременной регистрации всех разделенных в масс-анализаторе ионных пучков на стационарные отдельные коллекторы, размещенные в плоскости фокусировки. Очевидно при этом, что дисперсия масс-анализатора по массе должна быть достаточно велика для того, чтобы такие коллекторы могли быть размещены на линии фокусов. Поскольку отличие по массе для изотопов урана в гексафториде UF_6 (регистрируемый ион UF_5^+) составляет 0.3 %, а минимальный поперечный размер коллектора составляет 2–2.5 мм, дисперсию по массе желательно иметь порядка 6–7 мм на 1 % $\Delta M/M$.

До разработки нового поколения специализированных изотопных масс-спектрометров для решения задач прецизионного изотопного анализа соединений урана в России используются два типа приборов: основную часть аналитического парка составляют масс-спектрометры типа МИ1201АГ, -АГМ, -Т фирмы SELMI (Украина); для сертификации продукции используются также масс-спектрометры MAT261, -262, -281 фирмы FINNIGAN MAT (Германия). На сегодняшний

день все указанные приборы являются импортными, стоимость приборов фирмы FINNIGAN MAT очень велика, а аналитические возможности более дешевых приборов фирмы SELMI уже не полностью отвечают возрастающим требованиям к точности анализов, особенно при сертификации готовой продукции. Тем не менее, поскольку именно указанные приборы в настоящее время обеспечивают аналитические потребности технологий ядерно-топливного цикла, ионно-оптические параметры новой ионно-оптической схемы будут даны в сравнении с ними.

ИОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА

Были определены следующие основные критерии выбора ионно-оптической схемы масс-анализатора:

- удовлетворение требований технического задания;
 - максимальный аксептанс (пропускание) масс-анализатора, для чего угол наклона входной границы магнитного анализатора принят равным 26.5° (входное плечо равно двум радиусам);
 - радиус центральной траектории ионов в магнитном поле 250 мм, что хорошо обеспечивает требуемый диапазон масс (не менее 400) при ускоряющем напряжении 8 кВ;
 - с целью обеспечения требуемой величины дисперсии по массе ($7.2\text{--}7.4 \text{ мм}/\% \Delta M/M$), достаточной для размещения индивидуальных коллекторов Фарадея в области масс 330, ионно-оптическая схема масс-анализатора должна быть несимметричной с удлиненным выходным плечом;
 - угол наклона линии фокусов должен быть "конструктивным", т.е. удобным для размещения коллекторов Фарадея в многоколлекторном приемнике ионов вдоль линии фокусов (около 45°);
 - для обеспечения устойчивости ионно-оптической схемы (запаса по разрешающей способности масс-спектрометра) должны быть максимально скорректированы aberrации второго порядка, для чего может быть использовано искривление входной и выходной границ магнитного поля;
 - ионно-оптическая схема, расчет которой проведен с учетом краевых полей магнита, должна быть дополнительно скорректирована после измерения реальных краевых полей, измеренных на макете электромагнита.
- Дополнительные конструктивные параметры и требования:
- высота зазора магнита $h = 15 \text{ мм}$;
 - угол поворота ионов в магнитном поле $\varphi_m = 90^\circ$;
 - дисперсия по массе в плоскости фокусировки $\approx 7.5 \text{ мм}$;

- угол наклона линии фокусов $\psi_m \approx 45^\circ$.

Для выбора и оптимизации ионно-оптической схемы была применена новая компьютерная программа синтеза масс-анализаторов, разработанная в Институте аналитического приборостроения РАН. Программа позволяет одновременно проводить оптимизацию как фокусирующих свойств, так и пропускания масс-анализатора с учетом эмиттанса анализируемого ионного пучка и эффектов краевых полей магнита. Ионно-оптическая схема базового масс-анализатора представлена на рис. 1. В таблице даны основные ионно-оптические параметры, абберационные коэффициенты и величины разрешающей способности для указанного масс-анализатора нового комплекса приборов, получивших наименование МТИ350, а также для сравнения и масс-анализаторов типа МИ1201 ($R_m = 200 \text{ мм}$) и МАТ262 ($R_m = 230 \text{ мм}$).

Для удобства сравнения ионно-оптических возможностей новой ионно-оптической схемы все размерные величины в миллиметрах, приведенные в таблице, даны для зазора магнита 15 мм и одинакового эмиттанса входящего пучка ионов.

В таблице приняты следующие обозначения:

- L_1, L_2, R_m — плечи фокусировки и радиус поворота ионов в магнитном поле;
 - E_1, E_2, R_1, R_2 — углы наклона и радиусы кривизны входной и выходной границ магнитного секторного поля соответственно;
 - D — дисперсия на 100 % изменения массы;
 - M — геометрическое увеличение объекта (объектом является ширина выходной щели источника ионов);
 - γ — угол наклона линии фокусов (угол отсчитывается от ионно-оптической оси);
 - $X_{\alpha\alpha}, X_{\beta\beta}, X_{\beta h}, X_{hh}$ — величины (в мм) абберационных коэффициентов второго порядка, где α и β — горизонтальный и вертикальный углы расходимости пучка ионов, а h — его высота на выходе из источника ионов;
 - $S_{\text{ист}}, S_{\text{пр}}$ — ширины щелей источника и приемника ионов, при которых данная ионно-оптическая схема обеспечивает разрешающую способность 500 с плоской вершиной, составляющей 1/3 от ширины пика.
- Дана также величина предельного эмиттанса ионного пучка [$\text{мм}^2 \cdot \text{мрад}^2$], при котором ионно-оптическая схема обеспечивает получение требуемой разрешающей способности.
- В таблице приведены наиболее значимые aberrации. Остальные aberrации в результате оптимизации в значительной степени скорректированы и заметного вклада в уширение изображения не дают.

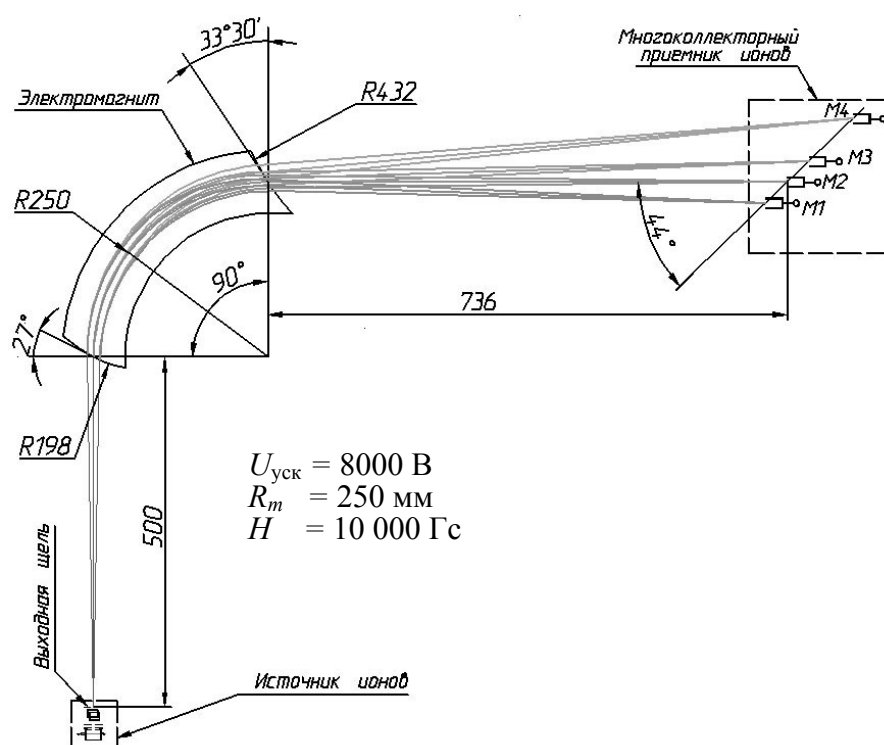


Рис. 1. Схема ионно-оптической системы масс-анализатора МТИ350. Выходное плечо магнитного анализатора скорректировано на реальное краевое поле магнита

Сравнение характеристик базового варианта масс-анализатора МТИ350Г и масс-анализаторов МАТ262 и МИ1201АГМ

Параметр	МТИ350Г	МИ1201АГМ	МАТ262
R_m , мм	250.0	200.0	230.0
E_1 , град.	27.0	26.565	26.565
E_2 , град.	34.5	26.565	32.645
R_m / R_1	1.2626	0.0000	0.8712
R_m / R_2	-0.5787	0.0000	-0.2527
L_1 , мм	500.00	273.68	460.00
L_2 , мм	744.64	640.00	640.00
D , мм на 100 % $\Delta M/M$	741.15	640.00	580.00
M	-1.468	-1.9000	-1.3913
$X_{\alpha\alpha}$, мм	0.002	-3.7	-0.0022
X_{hh} , мм	-0.00075	-0.031	-0.087
$X_{\beta h}$, мм	-0.0125	0.484	0.085
$X_{\beta\beta}$, мм	-0.052	-0.47	-0.51
$S_{\text{пр}}$, мм	1.000	0.967	0.927
$S_{\text{ист}}$, мм	0.2	0.066	0.172
Эмиттанс пучка	3.02	0.553	2.82
γ , град.	44.5	22.6	28.6

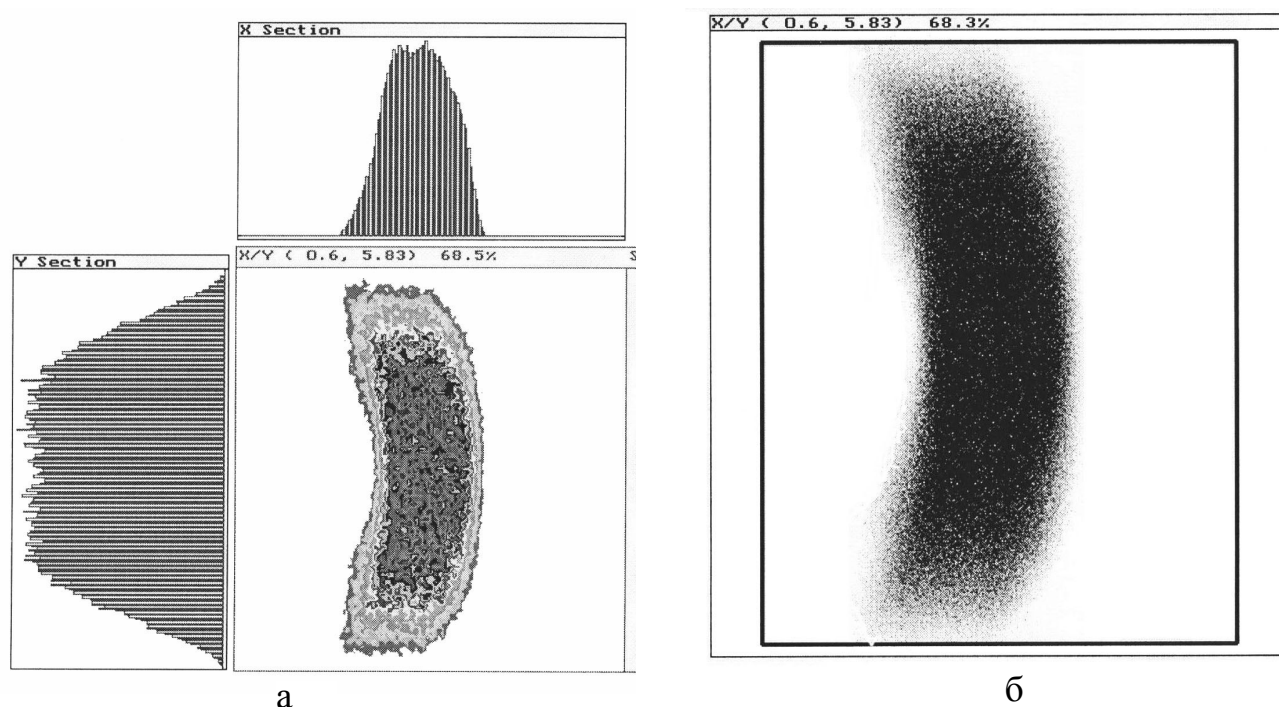


Рис. 2. Распределение интенсивностей в проекции на оси OX и OY (а) и форма выходного пятна ионного тока в плоскости фокусировки для одной массовой линии (МТИ350) (б)

Из данных, приведенных в таблице, видны преимущества новой ионно-оптической схемы: требуемая разрешающая способность при требуемой форме пика получается при большей чувствительности (эмиттансе пучка), чем у приборов сравнения.

Фокусирующие и диспергирующие свойства выбранного масс-анализатора в сравнении с масс-анализатором прибора МИ1201, а также транспортировка (пропускание) ионного пучка, форма линии и форма пика в плоскости фокусировки и распределение интенсивности в пучке исследовались методом математического моделирования с использованием разработанной в ИАиП РАН программы. Программа для анализа ионно-оптической системы масс-спектрометра предусматривает учет абберационных коэффициентов вплоть до третьего порядка и моделирование прохождения траекторий заряженных частиц внутри системы на основе абберационной модели и разработана на базе программы ISIOS [1]. Ионно-оптические схемы масс-спектрометров МИ1201 и МТИ350 исследовались при одном и том же эмиттансе пучка ионов в плоскости выходной щели источника ионов. В качестве моделей распределения интенсивности ионов в 5-мерном фазовом пространстве были приняты следующие: по углам и координатам вылета в горизонтальном и вертикальном направлениях — равномерные, по энергии — максвелловское, ограниченное величи-

ной 0.3 эВ. На рис. 2–3 представлены результаты численного моделирования ионно-оптических свойств нового масс-анализатора МТИ350, а на рис. 4–5 — МИ1201. На рис. 2, а и 4, а представлены распределения интенсивностей в ионном пучке и гистограммы интенсивностей в проекции на оси OX и OY в плоскости фокусировки для масс-анализаторов МТИ350 и МИ1201, а на рис. 2, б и 4, б — вид выходного пятна ионного пучка в той же плоскости. Из сравнения рисунков видно, что и фокусировка, и пропускание масс-анализатора МТИ350 значительно выше, чем МИ1201. На рис. 3 и 5 представлены четыре линии, соответствующие четырем измеряемым изотопам урана, в плоскостях фокусировки сравниваемых масс-анализаторов. На рис. 3, б и 5, б линия, соответствующая изотопу U^{235} , совмещена с входной целью приемника ионов.

Из сравнения гистограмм рис. 3, а и 5, а видно, что в масс-анализаторе МИ1201 существует существенное изменение разрешающей способности даже в пределах четырех близких изотопов урана на массах 329–333, обусловленное сильно наклоненной и искривленной линией фокусов. Это означает, что использование этого анализатора в изотопных приборах в широком диапазоне анализируемых веществ приводит к дополнительным искажениям их масс-спектров.

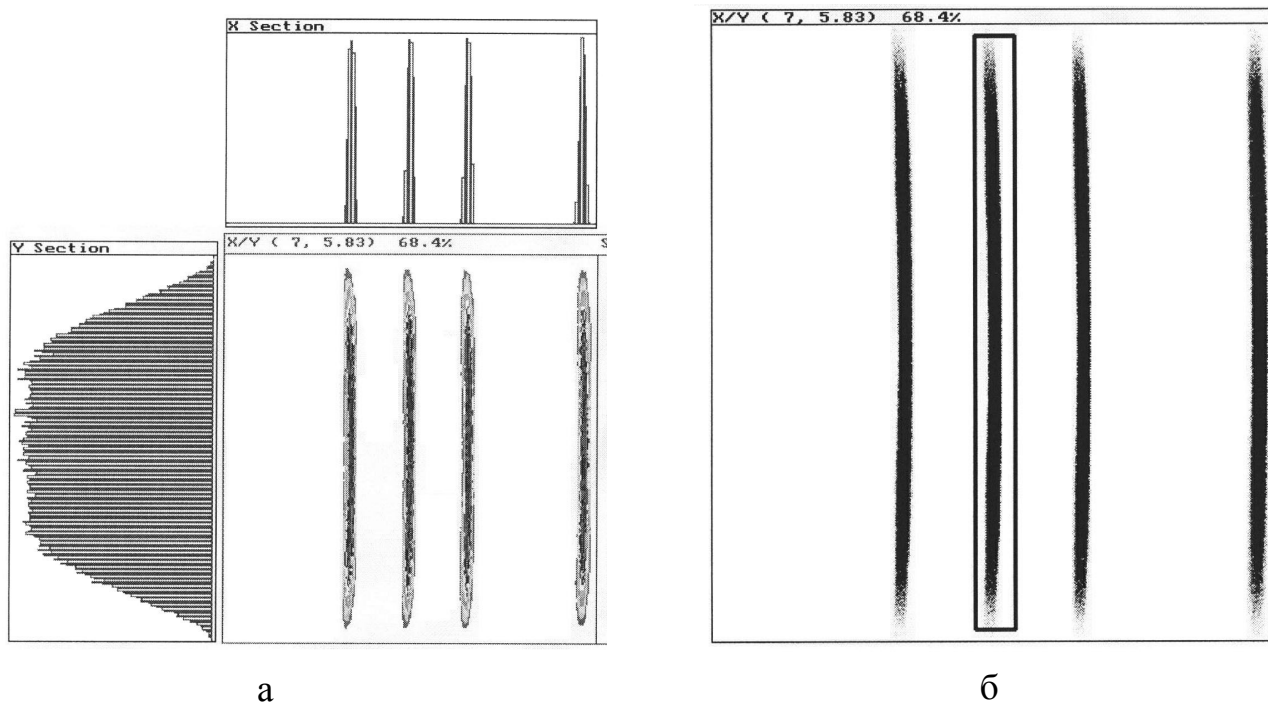


Рис. 3. Распределение интенсивностей в проекции на оси ОХ и ОУ (а) и форма выходных пятен в плоскости фокусировки для четырех массовых линий изотопов урана в виде гексаборида UF_6 (МТИ350) (б)

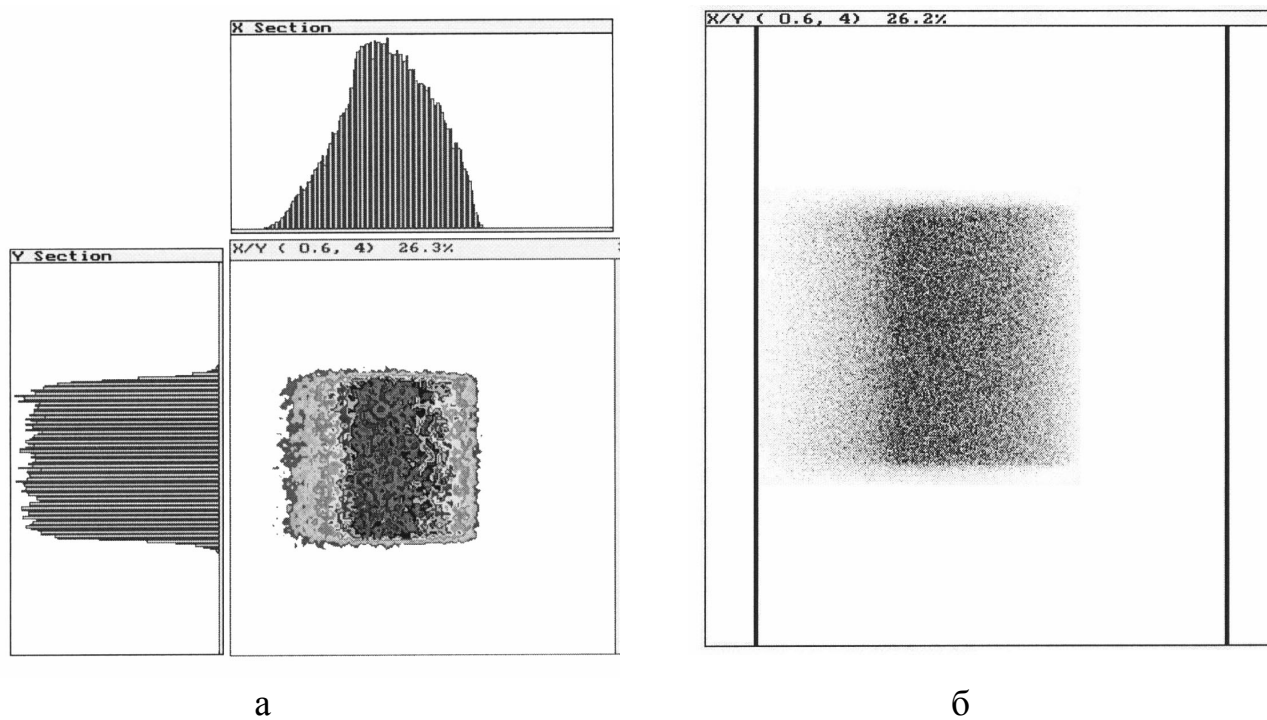


Рис. 4. Распределение интенсивностей в проекции на оси ОХ и ОУ (а) и форма выходного пятна ионного тока в плоскости фокусировки для одной массовой линии (МИ1201) (б)

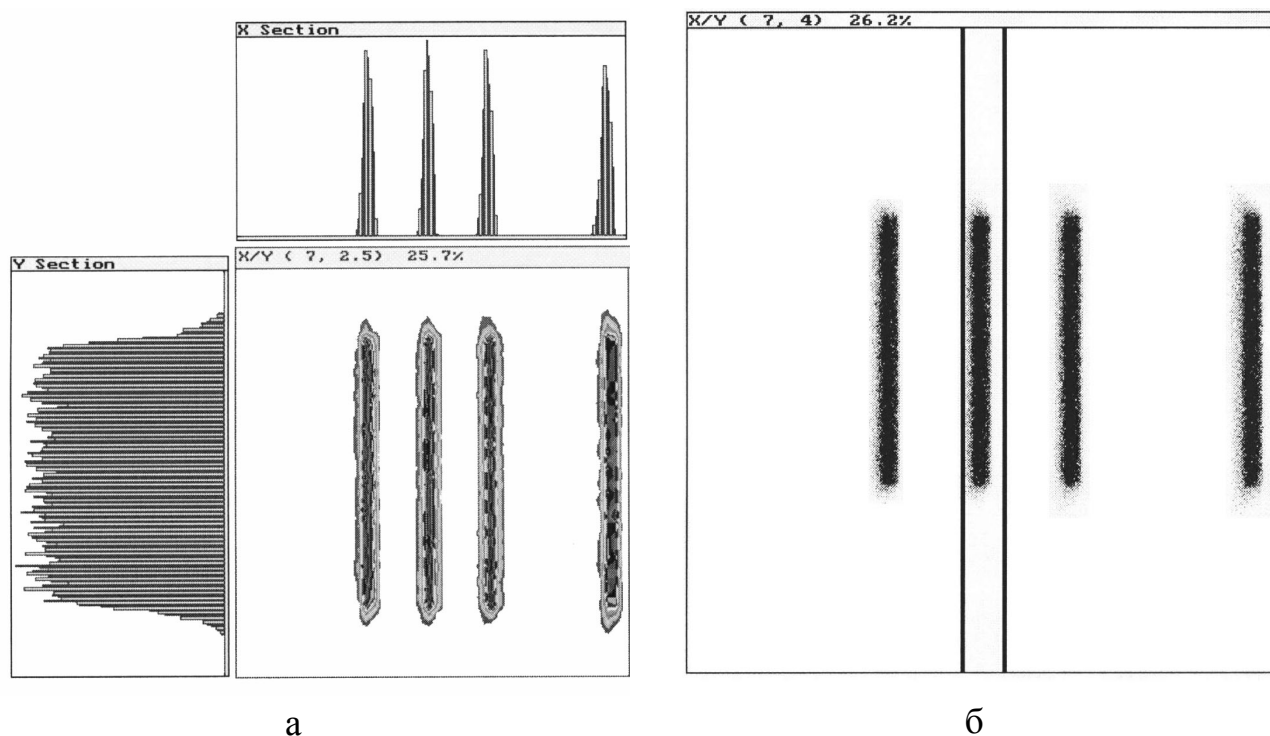


Рис. 5. Распределение интенсивностей в проекции на оси OX и OY (а) и форма выходных пятен в плоскости фокусировки для четырех массовых линий изотопов урана в виде гексафторида UF_6 (МИ1201) (б)

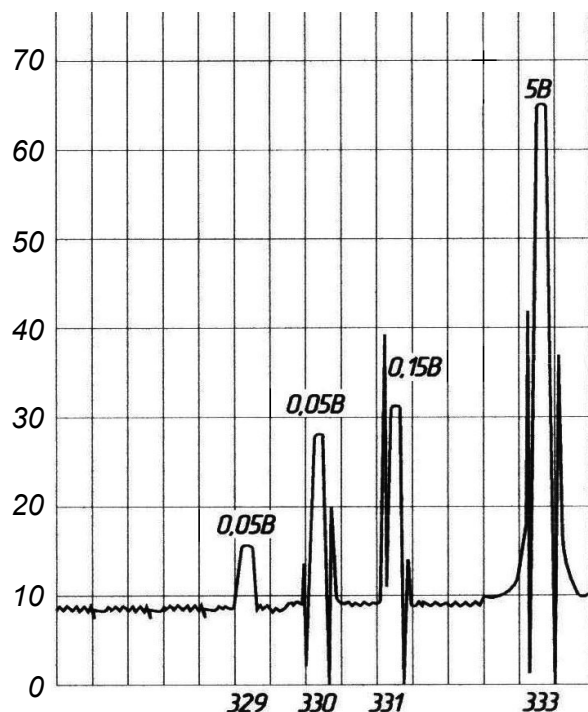


Рис. 6. Масс-спектр урана, полученный на макете масс-спектрометра МТИ350Г

Новый масс-анализатор МТИ350 со скомпенсированными аберрациями и улучшенным пропусканием позволяет регистрировать изотопный масс-спектр без искажений интенсивности, с отличной формой линии и с высокой разрешающей способностью.

Масс-спектр изотопов урана (ион UF_5^+), полученный на макете масс-спектрометра МТИ350Г, представлен на рис. 6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ионно-оптическая схема нового однокаскадного магнитного масс-спектрометра МТИ350 удовлетворяет всей совокупности аналитических и конструктивных требований, предъявляемых к базовой части специализированных масс-спектрометров для изотопного анализа урана и трансуранов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yavor M.I., Berdnikov A.S. ISIOS: a program to calculate imperfect static charged particle optical systems // Nuclear instruments & methods in physics research. A. 1995. N 363. P. 416–422.

*Институт аналитического приборостроения РАН,
Санкт-Петербург (Л. Н. Галль, В. Д. Саченко,
А. С. Бердников, В. А. Васильев)*

*ЗАО "СКБ СПЕКТРОН-АНАЛИТ", Санкт-Петербург
(В. А. Леднев, А. П. Иванов)*

*Уральский электрохимический комбинат Минатома
РФ (В. А. Калашников)*

Материал поступил в редакцию 08.10.2001.

ION-OPTICAL SCHEME OF THE BASIC MODEL OF NEW GENERATION HIGH-PRECISION ISOTOPE MASS SPECTROMETERS

**L. N. Gall, V. D. Sachenko, V. A. Lednev¹, A. S. Berdnikov, V. A. Vasiliev,
A. P. Ivanov¹, V. A. Kalashnikov²**

Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg;

¹ZAO "SKB SPEKTRON-ANALIT", Saint-Petersburg;

²The Urals Electrochemical Complex, Ministry of Atomic Energy of the Russian Federation

The paper presents the results on synthesis and optimization of a new ion-optical scheme of the basic magnetic mass analyzer for isotopic analysis of uranium and transuranium compounds. The focusing and transporting properties of the new mass analyzer are compared with those of the mass analyzer MI1201 using mathematical modeling, and the advantages of the former are demonstrated. The paper presents the results on synthesis and optimization of a new ion-optical scheme of the basic magnetic mass analyzer for isotopic analysis of uranium and transuranium compounds. The focusing and transporting properties of the new mass analyzer are compared with those of the mass analyzer MI1201 using mathematical modeling, and the advantages of the former are demonstrated.