

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P7-88-596

**Д.Д.Богданов, П.Г.Бондаренко, В.П.Гусев,
Д.В.Петров, А.М.Родин, С.И.Сидорчук,
С.В.Степанцов, Г.М.Тер-Акопян, В.А.Тимаков**

**ИЗУЧЕНИЕ
ИОННО-ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
МАСС-СПЕКТРОМЕТРА ЛИДИА**

1988

1. ВВЕДЕНИЕ

Проект ультрачувствительного масс-спектрометра ЛИДИА был предложен в 1982 году^{/1/} для осуществления нового инструментально-го подхода в экспериментах по поиску сверхтяжелых элементов в природе (см. обзорные статьи^{/2,3/}). Несмотря на то, что в настоящее время вероятность обнаружения сверхтяжелых элементов в природе представляется маловероятной^{/4,5/}, реализация проекта "ЛИДИА" остается актуальной задачей. Ультрачувствительный масс-спектрометр может существенно изменить подход к экспериментам по идентификации нового долгоживущего природного спонтанно делящегося нуклида, обнаруженного в каменных метеоритах^{/6/} и в гидротермах^{/7/}. Такой масс-спектрометр может быть также полезным для чувствительного локального анализа элементного состава пород, минералов и синтетических материалов.

Целью проекта "ЛИДИА" является достижение чувствительности определения по концентрации 10^{-14} ат./ат. для примеси тяжелого элемента в образце, основу которого составляют легкие элементы. При абсолютной чувствительности 10^6 атомов определяемого элемента минимальный вес пробы составит около 10 мг. Поэтому при выборе схемы работы масс-спектрометра ставилась задача достижения сравнительно высокой эффективности использования вещества пробы (регистрации в фокальной плоскости 10^{-5} - 10^{-3} доли числа атомов пробы). Для получения высокой эффективности представляется допустимым снижение уровня разрешения прибора по массе до величины $M/\Delta M \approx 300$.

Низкое разрешение и низкий концентрационный предел обнаружения влекут за собой необходимость применения специальных мер для подавления фона молекулярных ионов и фона рассеянных ионов основных массовых линий образца. Эти два источника фона обычно ограничивают предел чувствительности масс-спектрометрического анализа. Лазерный плазменный источник отличается по возможности значительного подавления фона молекулярных ионов. В работе^{/8/} описан источник, который по ионной проводимости химически неэффективный анализ проб и обеспечивает очень низкий фон молекулярных ионов (поток молекулярных ионов не превышает 10^4 от полного числа ионов в пучке источника). Для дальнейшего уменьшения этого фона, по видимому, удастся достичь за счет отбора двух или трех ионных пучков из лазерной плазмы, пере

зарядки на мишени и масс-спектрометрического анализа ионов, испытывавших перезарядку $2^+ \rightarrow 1^+$ или $3^+ \rightarrow 1^+$ /9/.

Для подавления фона рассеянных и перезаряженных ионов основы образца масс-спектрометр должен обеспечить двух- или трехступенчатое выделение массовых линий искомым тяжелым элементам. Это требование существенно влияет на выбор ионно-оптической системы масс-спектрометра. Необходимость получения нужной величины эффективности использования пробы наряду со специфическими особенностями лазерного источника (высокой плотностью и температурой плазмы, большим пространственным зарядом пучка) определяет выбор системы сравнительно больших размеров и накладывает ограничение на минимальную величину ее аксептанса.

В данной работе описываются общая схема ионно-оптической системы масс-спектрометра, ее конструкция, результаты магнитных измерений и экспериментов по трассировке пучка α -частиц. Проводится сравнение с расчетными характеристиками, полученными в работе /10/.

2. ИОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА УСТАНОВКИ

Схематически масс-спектрометр показан на рис.1. Два дипольных магнита M1 и M2 и четыре магнитных квадрупольных линзы Q1-Q4 образуют ахроматическую зеркально-симметричную систему с промежуточным изображением θ_2 . Основное назначение этой системы состоит в преобразовании источника масс-спектрометра из положения θ_1 в положение θ_3 и в выделении из всего массового спектра ионного пучка ограниченного диапазона масс, определяемого импульсным аксептансом установки. Дипольный магнит M3 и квадрупольная линза Q5 создают в фокальной плоскости θ_4 изображение массовых линий, прошедших через ахроматическую систему.

Стigmatическая фокусировка 1-го порядка в плоскостях изображения θ_2 , θ_3 и θ_4 достигается соответствующим возбуждением квадрупольных линз Q1-Q5. Более тонкая настройка системы осуществляется с помощью трех α -катушек, создающих области магнитного поля с распределенным градиентом в радиальном направлении (x).

Анализ, проведенный в работе /10/, показал, что наиболее существенной aberrацией в горизонтальной плоскости (плоскости дисперсии) в фокусе ахроматической системы θ_3 является хроматическая ($x/x \cdot \delta$), которая устраняется введением в дипольные магниты M1 и M2 секстульной компоненты (β катушки на рис.1). Форма массовой линии в фокальной плоскости θ_4 определяется, главным образом, геометрической (x/x^2) и хроматической ($x/x \cdot \delta$) aberrациями. Для их компенсации

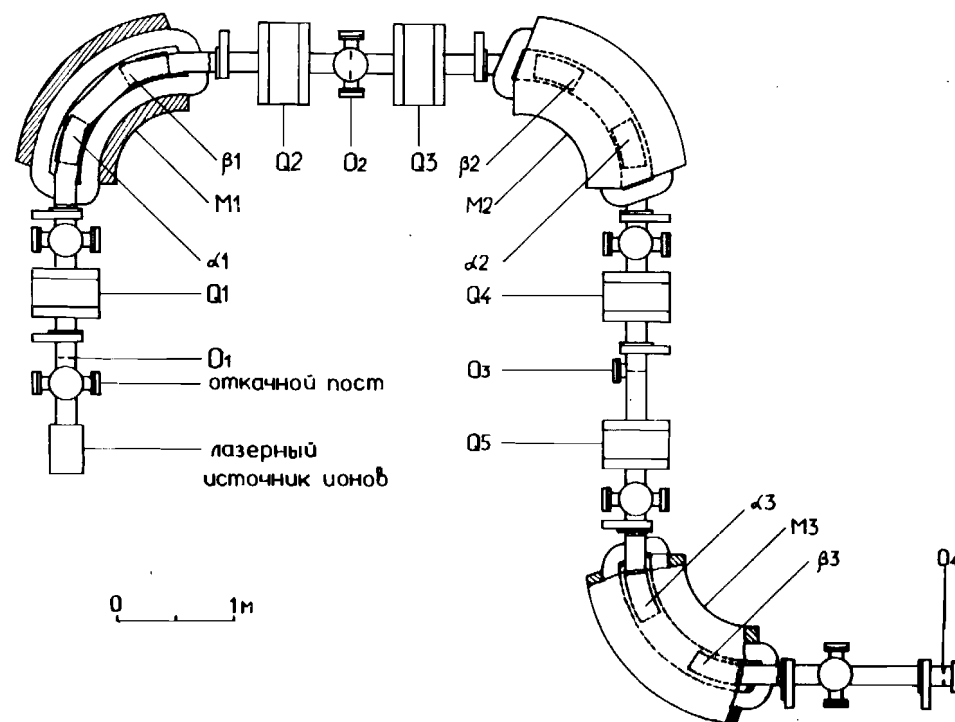


Рис.1. Ионно-оптическая схема масс-спектрометра ЛИИДИА.

границы дипольного магнита M3 выполнены в форме дуг окружностей: входная выпуклая граница с радиусом кривизны $R_{вх} = 696$ мм, выходная вогнутая граница с радиусом кривизны $R_{вых} = 551$ мм. Возможные отклонения расчетных радиусов кривизны торцевых поверхностей от реальных значений, полученных после проведения магнитных измерений, устраняются введением еще одной секстульной компоненты магнитного поля (третья β катушка).

Массовый анализ в плоскости промежуточного изображения θ_2 ограничен существованием в этом месте большой некомпенсируемой геометрической aberrации (x/x^2), сильно ухудшающей разрешение по массе $M/\Delta M \approx 100$.

3. КОНСТРУКЦИЯ МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В качестве главных элементов фокусировки выбраны стандартные квадрупольные линзы МЛБ (Q1, Q4, Q5) и МЛГ (Q2, Q3), выпускаемые промышленностью /11/. В табл.1 приведены их основные оптические параметры.

Таблица 1. Основные технические характеристики магнитных квадрупольных линз

	МЛ-5	МЛ-14
1. Диаметр апертуры, мм	138,6	150
2. Максимальный градиент, Тл/м		
— при естественном охлаждении	2,5	-
— при водяном охлаждении	4,2	8,0
3. Активная длина полюсных наконечников, мм	300	250
4. Максимальный ток, А		
— при естественном охлаждении	5,65	-
— при водяном охлаждении	10,5	508
5. Форма полюсных наконечников	цилиндрическая с радиусом 78 мм	цилиндрическая с радиусом 85 мм

Измерения магнитных полей квадрупольных линз выполнены с помощью датчика Холла, для чего была изготовлена механическая система, осуществлявшая его перемещение в радиальном направлении в диапазоне рабочей области апертуры ± 60 мм, по азимуту в диапазоне $0-360^\circ$, в продольном направлении ± 500 мм, если отсчитывать от центра линзы. Шаг в радиальном направлении равнялся 10 мм, в азимутальном $\pm 10^\circ$, в продольном — 10 мм. Система позволяла фиксировать положение датчика в этих направлениях с точностью 0,1 мм; $0,5^\circ$; 0,5 мм соответственно.

В пределах точности измерений эффективные длины линз ($l_{эфф.}$) оказались практически не зависящими от токов возбуждения обмоток (I). Их значения приведены в табл.2.

На основе измерений был проведен гармонический анализ магнитного поля квадрупольных линз, позволивший определить градиент (G), смещение по отношению оптической оси относительно геометрической в горизонтальном (x_0) и вертикальном (y_0) направлениях, угол поворота квадрупольных осей симметрии линзы вокруг продольной оси (γ). Отличия от нуля значения величин x_0 , y_0 , γ говорит об отклонении реального исполнения данных полюсных элементов от идеальной квадрупольной симметрии. Величины x_0 , y_0 , γ испытывают слабую зависимость от тока возбуждения линз. В табл.2 приведены значения этих величин при токах катушек, близких к максимальному для данного типа

Таблица 2. Гармонические компоненты магнитного поля квадрупольных линз

	Q1	Q4	Q5	Q2	Q3
I, А	9,1	9,1	9,1	395	395
G, Тл/м	3,77	3,79	3,72	7,48	7,23
$l_{эфф.}$, см	34,8	34,8	34,9	31,2	31,4
x_0 , мм	-0,2	-0,6	-0,4	0	0,3
y_0 , мм	0,3	0,6	0,2	0,3	0,5
γ , град.	0,5	0,6	0,2	-1,4	-0,7
β	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$

линз. Там же указаны верхние значения секступольных компонент линз (β), нормированные на квадрупольную составляющую.

В дальнейшем юстировка линз осуществлялась по их геометрическим осям, так как расчеты показали, что полученные значения величин x_0 , y_0 и γ находятся в допустимых пределах и слабо влияют на форму линии, если требуется достижение разрешения $M/\Delta M \geq 300$.

Кривые возбуждения квадрупольных линз представлены на рис.2 и 3.

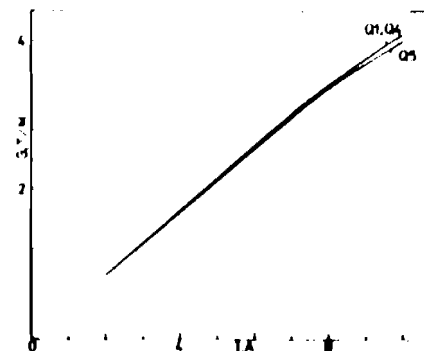


Рис.2. Зависимость градиента (G1) магнитного поля квадрупольных линз Q1, Q4, Q5 от тока в обмотке (I)

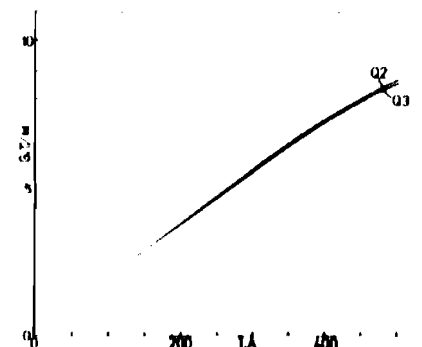
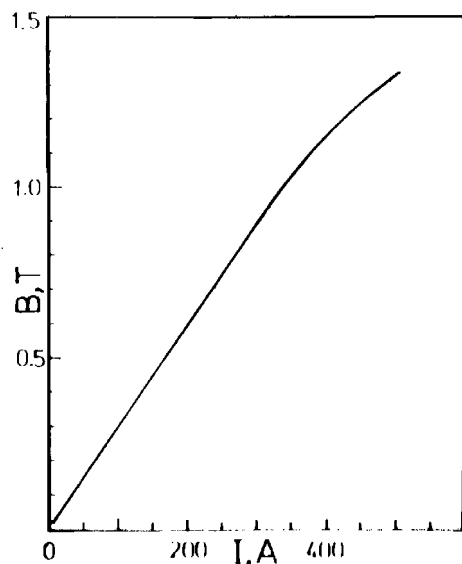


Рис.3. Зависимость градиента (G1) магнитного поля квадрупольных линз Q2, Q3 от тока в обмотке (I)

Таблица 3. Основные технические характеристики дипольных магнитов

	M1	M2	M3
Максимальное магнитное поле, Тл	1,3	1,3	1,3
Максимальный ток, А	470	470	470
Радиус осевой траектории, м	1,0	1,0	1,0
Угол поворота, град.	90	90	90
Угол между осевой траекторией и нормалью к торцевой поверхности полюса магнита:			
на входе, град.	23,5	23,5	23,5
на выходе, град.	23,5	23,5	23,5
Радиус кривизны торцевой поверхности полюса:			
— на входе, мм	-	-	696
— на выходе, мм	-	-	551
Ширина магнитн. дорожки ($\Delta B/B \leq 0,1\%$), мм	130	130	130
Межполюсный зазор, мм	80	80	80

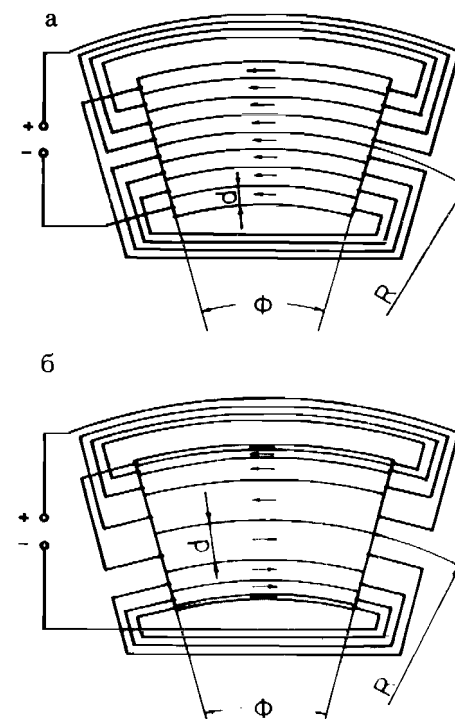


В качестве диспергирующих элементов в масс-спектрометре используются дипольные магниты, технические параметры которых приведены в табл.3. Методика и результаты измерений магнитного поля одного из магнитов (M1) подробно описаны в работе^[12].

Магниты M1 и M2 практически идентичны друг другу. Измерения показали существование у них небольшой положительной секторной компоненты магнитного поля. В зависимости от тока воз-

Рис.4. Кривая возбуждения дипольных магнитов M1, M2, M3

Рис.5. Внешний вид и схема включения корректирующих катушек: а) α -катушка, б) β -катушка.



буждения, ее значения лежат в диапазоне $\beta = 0,4-0,6$. В магните M3 в пределах точности измерений эта компонента поля отсутствует. Кривая возбуждения магнитов приведена на рис.4.

Элементы тонкой настройки масс-спектрометра и коррекции магнитного поля (α - и β -катушки) представляют собой систему концентрических медных проводников, выполненных на единой изоляционной основе (рис.5). Их основные геометрические размеры приведены в табл.4. Для α -катушки ширина всех проводящих полос одинакова, тогда как для β -катушки ширина каждой последующей полосы линейно уменьшается в обе стороны от осевой линии. Тем самым в этих элементах создается радиальное распределение плотности тока $j(r) = \text{const}$ и $j(r) \propto R/r$, соответственно, где R — радиус осевой линии.

Принцип действия катушек подробно рассмотрен, на пример, в работе^[13]. Их размеры и расположение в дипольном магните показаны на рис.1, 5 и 6.

В идеальном случае, когда можно пренебречь магнитным сопротивлением ярма магнита (бесконечная магнитная проницаемость железа), распределение поля в радиальном направлении имеет вид:

Таблица 4. Основные геометрические параметры корректирующих катушек (рис.5 и 6)

	α катушка	β катушка
R, м	1,0	1,0
ϕ , град	26	26
d, мм	14	32
l, мм	60	60
η , мм	1	1

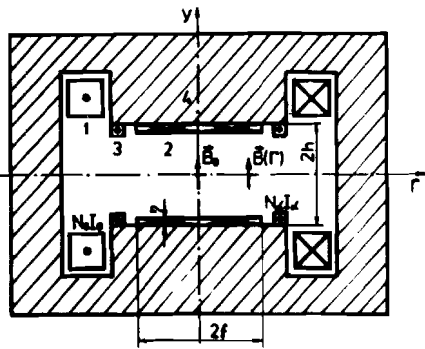


Рис.6. Поперечное сечение дипольного магнита: 1 – основная обмотка с числом ампервитков $N_0 I_0$; 2 – корректирующая катушка (для определенности показана α -катушка) с числом ампервитков $N_\alpha I_\alpha$; 3 – возвратные проводники корректирующей катушки; 4 – ярмо магнита.

а) α -катушка ($j = \text{const}$), $|R-r| \leq f$, $B(r) = B_0(1 + \alpha(R-r)/R)$, $\alpha = N_\alpha I_\alpha R / N_0 I_0 f$;

б) β -катушка ($j(r) = R-r$), $|R-r| \leq f$, $B(r) = B_0(1 + \beta(R-r)^2/R^2)$; $\beta = N_\beta I_\beta R^2 / N_0 I_0 f^2$,

где $B_0 = \mu_0 N_0 I_0 / h$ – поле от основной обмотки магнита, $2f$ – полный поперечный размер рабочей области магнитной дорожки, $2h$ – зазор между полюсами магнита, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

В данном варианте корректирующих катушек $N_\alpha = N_\beta = 4$. Их конструкция позволяет работать в диапазоне токов $I_\alpha, I_\beta \leq 100$ А без заметного нагрева изоляционного материала. Тем самым для α -катушки возможно достижение градиента поля $G \geq 0,2$ Тл/м в рабочей области магнитной дорожки $2f = 120$ мм, что соответствует величине $\alpha_{\text{макс}} \approx 0,20$. Максимально допустимое значение величины β для β -катушки равно $\beta_{\text{макс}} \approx 1,8$.

4. СИСТЕМА СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ПИТАНИЯ, ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА

Система стабилизированного питания магнитооптических элементов установки состоит из 12 стабилизированных источников тока, технические характеристики которых приведены в табл.5. Структурная схема системы изображена на рис.7. Силовая часть источников питания электромагнитов М1-М3 и электромагнитных линз Q2 и Q3 содержит серийный преобразователь напряжения и LC-фильтры подавления пульсаций. В схеме питания электромагнитных линз Q1, Q2 и Q5 подавление пульсаций до уровня 0,2% происходит за счет большой постоянной времени нагрузки. Стабилизация тока обеспечивается замкнутой системой автоматического регулирования, включающей тиристорные преобразователи напряжения, LC-фильтры, датчики тока ДТ, усилители сигнала ошибки УСО, источник опорного напряжения ИОН и потенциометры установки тока ПУ. В качестве датчиков постоянного тока используются серийные тороид

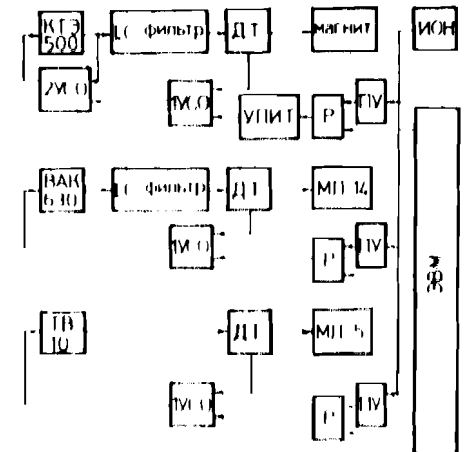
Таблица 5. Характеристики источников питания

Нагрузка	Кол.	Тип агрегата	$I_{\text{ном.}}$, А	$U_{\text{ном.}}$, В	Стабильн., %
Дипольные магниты	3	КТЭ-500/230 ^{14/}	500	230	0,01
Квадрупольные линзы:					
МЛ-14	2	ВАК-630/24 ^{15/}	630	24	0,1
МЛ-5	3	ТВ-10/180 ^{16/}	10	180	0,1
Коррект. катушки	6	ТЕ-100/12 ^{16/}	100	12	≤ 2

дальные магнитные усилители, включенные по мостовой схеме с автоматическим смещением рабочей точки (схема Хингорани). Чувствительность ДТ зависит от величины балластного резистора на его выходе и при $R_\sigma = 5,1$ Ом составляет 2,5 мВ/А. Питание ДТ осуществляется от феррорезонансного стабилизатора напряжения, что обеспечивает его стабильность $\approx 0,005\%$. Конструктивное расположение элементов ДТ практически устраняет влияние наводки на цепь обратной связи. В качестве усилителей сигнала ошибки УСО используются интегральные операционные усилители. Источник опорного напряжения является общим для всей системы питания и имеет стабильность выходного напряжения $\approx 0,005\%$. Распределение опорных напряжений по источникам тока производится через балластные резисторы, величины которых соответствуют данному сигналу обратной связи. Регулирование опорных сигналов в источниках тока производится многооборотными потенциометрами с дискретностью 10^{-3} .

В источнике питания электромагнитов для уменьшения дискретности установки до уровня 10^{-4} применяются дополнительные делители напряжений, собранные на квантовых переключателях.

Рис.7. Структурная схема системы стабилизированного питания электромагнитных элементов масс-спектрометра (обозначения см. в тексте)



Здесь же применяются устройства плавного изменения тока УПИТ, обеспечивающие изменение тока в нагрузке с заданной скоростью. Для получения высокой стабильности источников питания электромагнитов применяется двухконтурная система стабилизации. Основной токовый контур обеспечивает заданную статическую точность при медленных возмущающих воздействиях. Вспомогательный контур стабилизирует выходное напряжение тиристорного преобразователя при скачкообразных изменениях напряжения в сети и обеспечивает достаточное быстродействие всего источника в целом.

Для стабилизации питания корректирующих катушек используются только индуктивные фильтры, которые уменьшают пульсации тока до уровня $\approx 2\%$, что является достаточным, так как величина коррекции полей не превышает 1-2%.

Источники тока имеют два режима работы. В ручном режиме установка тока производится потенциометром уставки, а в автоматическом — от ЭВМ. Коммутация цепей управления осуществляется герконовыми реле Р.

Основными средствами откачки вакуумной системы являются шесть агрегатов, состоящих из магнитоэлектрического и титанового сорбционного насосов с производительностью 2000 л/с. Объем ионного источника откачивается турбомолекулярным насосом и соединен с анализирующей частью через дифференциальную ступень. Анализирующая часть вакуумной системы выполнена по сверхвысоковакуумной технологии и рассчитана на получение давления ниже 10^{-9} Торр.

5. ЮСТИРОВКА МАСС-СПЕКТРОМЕТРА

Вся установка смонтирована на монолитной железобетонной плите толщиной 0,7 м. Юстировка магнитных элементов осуществлялась с помощью швеллера, рейсмуса и специально изготовленных отвесов. Базовые точки для точной установки магнитов и линз определялись путем измерений с точностью 0,1 мм. В результате после юстировки и контрольных проверок в течение одного месяца линейная точность установки магнитных элементов по горизонту составила $\pm 0,3$ мм, вдоль направления движения ионного пучка ± 1 мм. Угловая точность составила $\pm 0,01^\circ$.

В процессе экспериментального определения ионно-оптических характеристик масс-спектрометра дополнительной коррекции положения магнитных элементов не потребовалось.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ИОННО-ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАСС-СПЕКТРОМЕТРА

Для измерения основных характеристик ионно-оптической системы установки в плоскостях O_2 , O_3 и O_4 в точке O_1 (рис.1) был установлен α -источник ^{249}Cf с рабочей поверхностью диаметром 9 мм. Активный слой ^{249}Cf был закрыт алюминиевой фольгой толщиной 9 мкм. Спектр α -частиц на выходе из фольги имел максимум при энергии 3,95 МэВ с шириной на половине высоты $\pm 5\%$, что соответствовало по магнитной жесткости однозарядным ионам с энергией 50 кэВ, массой 78 а.е.м. и импульсным разбросом $\pm 2,5\%$. Размер источника в плоскости O_1 формировался с помощью набора из трех "масок": двух круглых с диаметром 3 и 6 мм и одной прямоугольной с размером 3 мм по горизонтали и 9 мм по вертикали. Соответствующие интенсивности источников приведены в табл.6. Там же указаны размеры диафрагм, которые определяли угловой разброс α -частиц. Выделяемый импульсный диапазон определялся помещением в плоскости O_2 прямоугольных щелей размером $120 \times 30 \text{ мм}^2$ ($\Delta p/p = \pm 2,4\%$) и $80 \times 30 \text{ мм}^2$ ($\Delta p/p = \pm 1,6\%$). Регистрация α -частиц осуществлялась Si(Au)-детекторами. Механическая система позволяла перемещать детекторы в горизонтальном и вертикальном направлениях. Во всех случаях ошибки измерений не превышали $\pm 3\%$.

Таблица 6

Размер источника в пл. O_1	$\varnothing 3 \text{ мм}$		$3 \times 9 \text{ мм}^2$		$\varnothing 6 \text{ мм}$
	Интенсивность источника (α в 2π ср)	$1,54 \cdot 10^6$		$4,05 \cdot 10^6$	$4,86 \cdot 10^6$
Размер диафрагмы, расположенной на расстоянии 390 мм от пл. O_1 (в скобках указан телесный угол в ср)	$\varnothing 14 \text{ мм}$ ($1 \cdot 10^{-3}$)	$\varnothing 20 \text{ мм}$ ($1,5 \cdot 10^{-3}$)	$14 \times 28 \text{ мм}^2$ ($2,3 \cdot 10^{-3}$)		
	$\pm 2,4\%$		$\pm 1,6\%$		
Доля числа α -частиц, зарегистрированных в пл. O_2 , O_3 , O_4 по отношению к их числу в заданном телесном угле в пл. O_1 (%)					
плоскость O_2	85	83	76	86	77
плоскость O_3	73	77	65	81	65
плоскость O_4	61	81	64	83	64
Выход α -частиц в пл. O_4 (от единицы)	1,1	1,0	1,5	2,1	5,1
					7,0

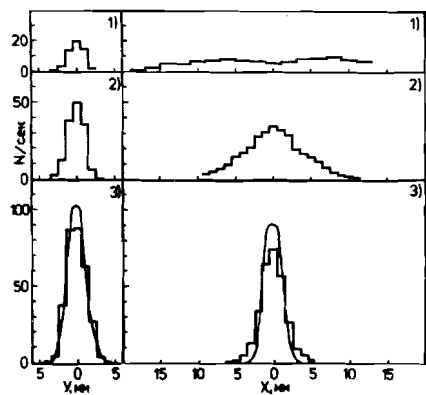


Рис.8. Профили пучка α -частиц в плоскости ахроматического изображения O_3 в двух поперечных направлениях горизонтальном (x) и вертикальном (y): 1 – оптимальная настройка только квадрульных линз $Q1-Q4$ и дипольных магнитов $M1, M2$; 2 – дополнительное возбуждение α -катушек ($\alpha = \alpha_{\text{опт.}}$); 3 – возбуждение α - и β -катушек ($\alpha = \alpha_{\text{опт.}}$, $\beta = \beta_{\text{опт.}}$).

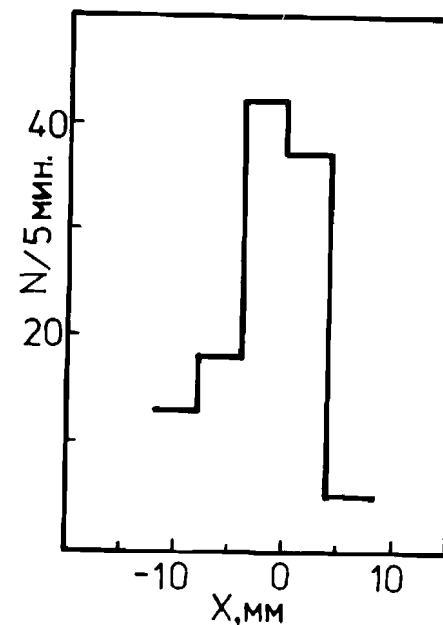
Сравнение энергетического спектра α -частиц, измеренного в плоскости промежуточного изображения O_2 сканированием маг-

нитного поля первого дипольного магнита $M1$, со спектром, снятым непосредственно полупроводниковым детектором с разрешением $\Delta E = 50$ кэВ позволило сделать вывод, что при диаметре источника 3 мм собственное энергетическое разрешение масс-спектрометра в плоскости O_2 не хуже 1%.

Результаты измерений профиля пучка в двух поперечных направлениях (x) и (y) в плоскости ахроматического изображения O_3 приведены на рис.8. Диаметр источника был равен 3 мм, угол захвата в обоих направлениях $\pm 1^\circ$. Три гистограммы (1, 2, 3) соответствуют последовательному улучшению фокусировки пучка, достигаемому настройкой квадрульных линз $Q1-Q4$ и дипольных магнитов $M1$ и $M2$ (1) и дополнительным возбуждением корректирующих α -катушек (2) и β -катушек (3). Сплошными линиями на рисунке изображены расчетные профили, полученные при тех же условиях. Из рисунка видно, что форма линий в вертикальном направлении (y) практически не меняется при включении корректирующих катушек, а последовательное возрастание площади под кривой связано с конечной шириной (10 мм) сканирующей щели в горизонтальном направлении.

В табл.6 представлены данные по измерениям трансмиссии ионно-оптической системы при различных размерах α -источника, то есть величии отношения числа α -частиц, дошедших до плоскостей O_2 , O_3 и O_4 , к числу испущенных из источника O_1 и определенном телесном угле. Видно, что наилучшие результаты получены для источника диаметром 3 мм, при импульсном интервале $\pm 1,6\%$, телесных углах захвата 1×10^{-3} ср (минимум $\epsilon_x = \epsilon_y = 1,5 \times 17\pi$ мм.мрад) и $2,3 \cdot 10^{-3}$ ср ($\epsilon_x = 1,5 \times 17\pi$ мм.мрад, $\epsilon_y = 1,5 \times 35\pi$ мм.мрад), причем основные потери $\sim 15\%$ происходят при прохождении α -частиц через первый магнит. Для

Рис.9. Линия спектрометрического α -источника ^{226}Ra ($E_\alpha = 4,7845$ МэВ), полученная в фокальной плоскости O_4 масс-спектрометра (размер источника по горизонтали 6 мм, по вертикали 8 мм).



ные согласуются с тем, что угловой акцептанс масс-спектрометра в горизонтальной плоскости равен $\approx \pm 15$ мрад.

Таким образом, 100%-й трансмиссии пучка α -частиц из плоскости O_1 в плоскость O_4 в импульсном интервале $\pm 1,6\%$ соответствует акцептанс установки $\epsilon_x = 1,5 \times 15\pi$ мм.мрад и $\epsilon_y = 1,5 \times 35\pi$ мм.мрад.

С точки зрения повышения эффективности использования вещества пробы представляет интерес вариант с большим размером источника (диаметр 6 мм) и угловым захватом $2,3 \cdot 10^{-3}$ ср ($\epsilon_x = 3 \times 17\pi$ мм.мрад и $\epsilon_y = 3 \times 35\pi$ мм.мрад), при котором достигается трансмиссия пучка, равная 74%.

Вторая группа измерений относилась к определению дисперсии установки в плоскости O_2 и O_4 . С этой целью в точке O_1 был установлен спектрометрический α -источник ^{226}Ra интенсивностью 1×10^4 α /с в 2π ср. Размер источника с помощью "маски" был ограничен диаметром 8 мм. Щель на детекторе в плоскостях O_2 и O_4 равнялась 10×30 мм².

Сканируя магнитное поле третьего магнита $M3$ и сравнивая положение максимумов интенсивности в двух случаях, когда детектор располагался на ионно-оптической оси и в 30 мм от нее, можно было определить дисперсию прибора. Подобные измерения проведены для двух α -линий источника ^{226}Ra с энергией $E_1 = 4,7845$ МэВ и $E_2 = 7,6869$ МэВ. Дисперсия масс-спектрометра в плоскости O_2 и O_4 оказалась равной $D = (24,9 \pm 0,6)$ мм/% (Вр) и $D = (40 \pm 1)$ мм/% (Вр) соответственно.

Для измерения разрешения в плоскости O_4 при возможно большей статистике "маска" на α -источнике была сделана 6×8 мм², а щель на детекторе 4 мм. Механическим сканированием детектора измерена форма α -линии с энергией $E_1 = 4,7845$ МэВ, приведенной на рис.9. Видно, что при таком относительно большом размере источника и щели детектора достигается разрешение по массе $M/\Delta M \approx 267$ на половине высоты линии.

В табл.7 даются экспериментально полученные основные ионно-оптические характеристики масс-спектрометра и проведено их сравнение с расчетными параметрами.

Таблица 7. Основные ионно-оптические характеристики масс-спектрометра

	Расчет ^{/10/}	Эксперимент
Массовое разрешение (ширина на полувысоте линии)	480*	267**
Телесный угол захвата (100% трансмиссии), ср	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$
Импульсный акцептанс, %	$\pm 2,5$	$\pm 1,6$
Дисперсия, см/% (Вр):		
пл. θ_2	2,5	2,5
пл. θ_4	4,0	4,0

* Расчетное разрешение по массе получено для α -источника в плоскости θ_1 диаметром 2 мм. Разброс по энергии α -источника $\delta, 1\%$.

** Измеренное разрешение получено для α -источника в плоскости θ_1 размером $6 \times 8 \text{ мм}^2$ при ширине щели в плоскости θ_4 4 мм. Разброс по энергии α -частиц $0,3\%$.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе сформированы и измерены магнитные поля, проведена юстировка ионно-оптической системы масс-спектрометра, рассчитанной с точностью, соответствующей устранению главных aberrаций второго порядка. Измерения, выполненные с помощью источника α -частиц, показали, что акцептанс установки, дисперсия, диапазон пропускаемых импульсов частиц, форма ахроматического изображения близки к расчетным. Получена оценка разрешения прибора в фокальной плоскости. Для более корректного определения разрешения необходимы измерения с широким источником ионов.

Авторы выражают благодарность академику Г.Н.Флерову за полезные дискуссии и постоянный интерес к работе и Ю.В.Григорьеву за помощь в эксплуатации электрофизической аппаратуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ter-Akopian G.M. et al. JINR, E13-82-639, Dubna, 1982.
2. Flerov G.N., Ter-Akopian G.M. – In: Treatise on Heavy Ion Science, edited by D.Allan Bromley, vol.4, 1985, p.333.
3. Flerov G.N., Ter-Akopian G.M. – Rep.Prog.Phys., 1983, 46, p.817.
4. Флеров Г.Н. – В сб.: Международная школа-семинар по физике тяжелых ионов. ДТ-87-68. Дубна: ОИЯИ, 1987, с.9.
5. Флеров Г.Н. и др. ОИЯИ, P12-88-279, Дубна, 1988.
6. Флеров Г.Н. и др. – ЯФ, 1977, 26, с.449.
7. Flerov G.N. et al. – Z.Phys., 1978, A292, p.43.
8. Арзуманян Г.М. и др. ОИЯИ, P7-81-744, Дубна, 1981.
9. Тер-Акопян Г.М. и др. ОИЯИ, P13-84-294, Дубна, 1984.
10. Степанцов С.В., Родин А.М., Тер-Акопян Г.М. ОИЯИ, P13-88-153, Дубна, 1988.
11. Электрофизическая аппаратура промышленного изготовления. Справочник. М.: Госатомиздат, 1963, с.68.
12. Кленин Б.А. и др. ОИЯИ, 9-84-357, Дубна, 1984.
13. Camplan J., Meunier R. – Nucl. Instr. and Meth., 1981, 186, p.445.
14. Электроприводы тиристорные комплекты постоянного тока, ЛК 08.30.03-84, Каталог "Электроника СССР", М.: Изд-во "Информэлектро", 1988.
15. Выпрямительные агрегаты серии ВАК и ВАКР, 05.03.89-74, Каталог "Электротехника СССР", М.: Изд-во "Информэлектро", 1982.
16. Агрегаты выпрямительные серии ТБ, ТВ, ТЕР, ТВР, ТВИ мощностью до 50 кВт, 05.43.04-86, Каталог "Электротехника СССР", М.: Изд-во "Информэлектро", 1988.

Рукопись поступила в редакционный отдел
3 августа 1988 года.