

10; 12

© 1991 г.

## ИОННАЯ ОПТИКА МАЛОГАБАРИТНЫХ МАСС-АНАЛИЗАТОРОВ С КРУГЛЫМИ ПОЛЮСАМИ МАГНИТА

*Л. Г. Гликман, С. П. Кареукая, В. М. Кельман*

Показано, что, отказавшись от фокусировки пучка в плоскости входной щели приемника, при анализе ионов по массам магнитным полем, создаваемым круглыми полюсами, можно существенно расширить аналитические возможности такого поля. Приведены ионно-оптические схемы многоколлекторных масс-спектрометров (масс-спектрографов) с круглым магнитным полем.

В том случае, когда масс-спектрометрическому исследованию или масс-сепарации подлежат ионы, существенно отличающиеся по массе, и, следовательно, разрешающая способность прибора может быть небольшой, требования к качеству фокусировки ионного пучка в месте расположения выходной щели приемника значительно ослабляются. В частности, может вообще отсутствовать фокусировка ионов на щель приемника. Это позволяет увеличить разнообразие ионно-оптических схем масс-спектрометров и масс-сепараторов и найти такие схемы, которые, проигрывая по разрешающей способности, обладают другими достоинствами. Некоторые из них рассматриваются в настоящей работе.

На рис. 1 приведена схема многоколлекторного масс-спектрометра (масс-спектрографа) с круглыми полюсами магнита и электростатической астигматичной линзой, в котором ионные пучки не фокусируются на щели приемников. В средней плоскости ионный пучок, выходящий из центральной точки щели источника, при выключенном магнитном поле фокусируется электростатической линзой в центре  $O$  межполюсного зазора. При включенном магнитном поле ионы отклоняются, разделяются по массам и, покинув поле, движутся так, как если бы все они вышли из точки  $O$ , причем ионы каждой массы образуют пучок, угол расходимости которого равен углу сходимости неразделенного пучка перед входом в магнитное поле. Для каждой массы формируется свой промежуточный фокус  $F_i$ . В направлении, перпендикулярном к средней плоскости, пучок, пройдя линзу, становится параллельным. В поле рассеяния магнита направления движения всех ионов мало отличаются от радиальных, поэтому вертикальная фокусировка (дефокусировка) в магнитном поле незначительна и можно считать, что ионы после отклонения продолжают двигаться параллельно средней плоскости. Щели приемников ионов или позиционно-чувствительный детектор располагаются по дуге окружности произвольного радиуса с центром в точке  $O$  или по касательной к ней.

Угол отклонения  $\varphi_i$  ионов с массой  $m_i$  связан с радиусом  $\rho_i$  их траекторий в однородном магнитном поле и радиусом  $r$  магнитных полюсов соотношением

$$\operatorname{tg} \frac{\varphi_i}{2} = \frac{r}{\rho_i},$$

угловая дисперсия магнитного поля по массе

$$D_i = m_i \frac{d\varphi_i}{dm_i} = \frac{1}{2} \sin \varphi_i.$$

Разрешающая способность спектрографа для массы  $m_i$  без учета ширины щели источника и аббераций

$$R_i = \frac{D_i}{\alpha} = \frac{\sin \varphi_i}{2\alpha},$$

где  $\alpha$  — угол сходимости пучка перед входом в магнитное поле.

Чем меньше  $\alpha$ , тем больше  $R_i$ , а потому целесообразно использовать линзу с угловым уменьшением. При заданном  $\alpha$  максимальная разрешающая способность получается для  $\varphi_i = 90^\circ$  ( $\rho_i = r$ ). В этом случае при  $\alpha \sim 0.1^\circ$   $R_i \sim 300$ . Если обозначить массу частиц, отклоняющихся на  $90^\circ$ , через  $m_0$ , то  $D_i$  можно преобразовать к виду

$$D_i = \frac{\sqrt{\frac{m_0}{m_i}}}{1 + \frac{m_0}{m_i}},$$

а для угла отклонения произвольной массы записать формулу

$$\operatorname{tg} \frac{\varphi_i}{2} = \sqrt{\frac{m_0}{m_i}}.$$

В зависимости от условий задачи на  $90^\circ$  следует отклонить ту или иную массу. Так, если требуется, чтобы наибольшей массе соответствовала наибольшая разрешающая способность, то на  $90^\circ$  следует отклонить именно эту массу. Если две массы  $m_1$  и  $m_2$  нужно развести на наибольший угол, то углу  $90^\circ$  должна соответствовать масса  $m_0 = \sqrt{m_1 m_2}$ . При этом  $\varphi_1 = 90^\circ + \gamma$ ,  $\varphi_2 = 90^\circ - \gamma$ , где  $\gamma$  удовлетворяет условию

$$\operatorname{tg} \frac{90^\circ + \gamma}{2} = \sqrt{\frac{m_0}{m_1}}.$$

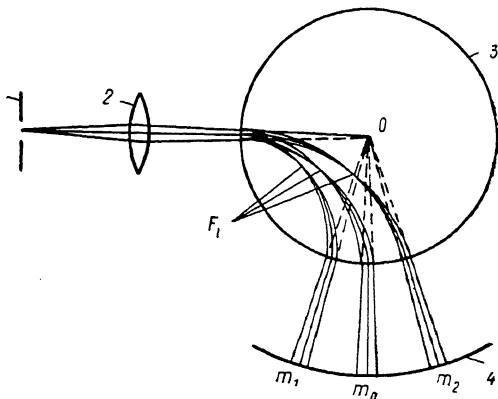


Рис. 1. Ионно-оптическая схема многоколлекторного масс-спектрометра (масс-спектрографа).

1 — выходная щель источника ионов; 2 — электростатическая линза; 3 — полюса магнита; 4 — поверхность, с которой совмещаются входные щели приемников, либо позиционно-чувствительный детектор.

Рассматриваемая схема позволяет построить очень компактный многоколлекторный масс-спектрометр, так как его разрешающая способность не зависит от размеров магнитных полюсов, а детекторы могут быть расположены вокруг них на небольшом расстоянии. Схема позволяет также создать прибор, работающий одновременно с несколькими источниками ионов различного типа, причем некоторые из них могут испускать положительные ионы, другие — отрицательные. Пример такого спектрометра показан на рис. 2. В масс-сепараторе, построенном по этой схеме, наличие нескольких источников может значительно повысить его производительность.

В рассматриваемой схеме существует уникальная возможность, не ухудшая разрешающей способности, значительно уменьшить размеры магнита или напряженность магнитного поля. Для этого нужно добавить трансаксиальную, электростатическую систему с осью симметрии, проходящей через точку 0, которая тормозит ионы перед входом в магнитное поле и ускоряет их после его прохождения. В средней плоскости поле такой системы не изменяет направления движения ионов на входе в магнитное поле и выходе из него. Поэтому угловая дисперсия  $D_i$  остается той же, что и без трансаксиальной электростатической системы, а диапазон анализируемых масс увеличивается, так как энергия отклоняемых ионов уменьшена. На рис. 3 показана диспергирующая система с торможением ионов перед входом в магнитное поле. Одним из электродов транс-

аксиальной электростатической системы служат полюса магнита, на которые подается нужный потенциал, другим — пара плоских колец, расположенных симметрично относительно средней плоскости. В такой системе магнитные по-

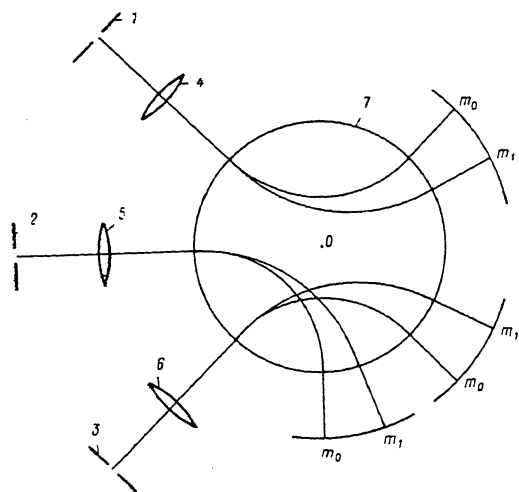


Рис. 2. Ионно-оптическая схема многоколлекторного масс-спектрометра с тремя источниками ионов.

1—3 — выходные щели источников ионов; 4—6 — электростатические линзы; 7 — полюса магнита. Показаны только осевые траектории пучков ионов различных масс.

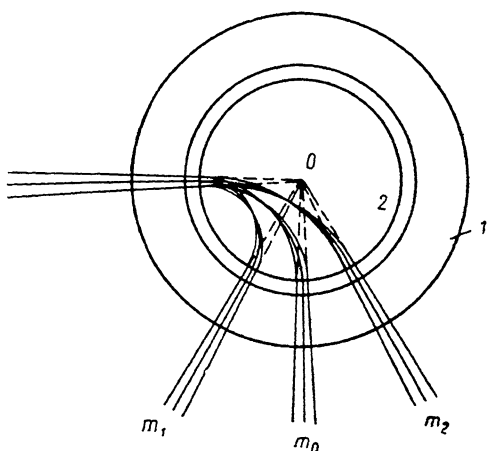


Рис. 3. Диспергирующая система с предварительным торможением.

1 — внешний электрод электростатической трансаксиальной системы; 2 — полюса магнита, одновременно внутренний электрод трансаксиальной системы.

люса должны быть помещены внутрь вакуумной камеры. Электростатическая линза подбирается теперь так, чтобы в средней плоскости пучок по-прежнему

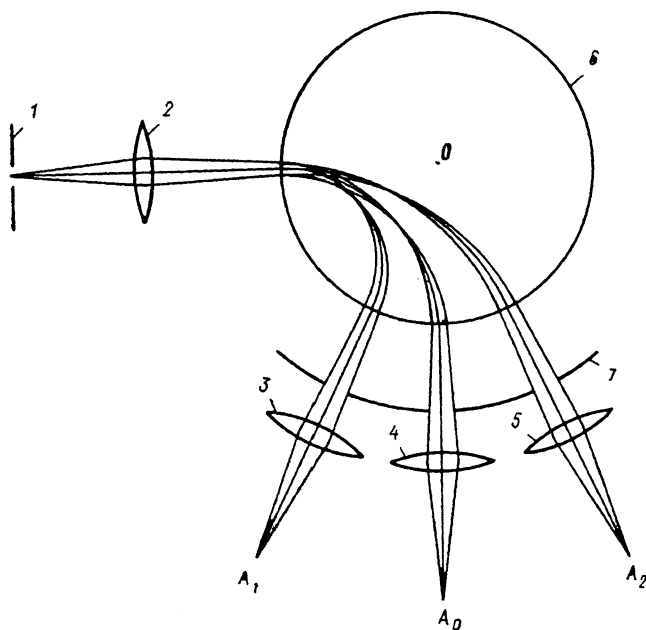


Рис. 4. Ионно-оптическая система, предназначенная для выделения нескольких групп изотопов.

1 — выходная щель источника ионов; 2—5 — идентичные электростатические линзы; 6 — полюса магнита; 7 — диафрагмы, определяющие интервалы выделяемых масс.

направлялся в точку 0, а в перпендикулярном к ней направлении после воздействия линзы и тормозящего электрического поля входил в магнитное поле па-

параллельным. Выйдя из магнита, разделенные пучки ионов одинаково фокусируются ускоряющим трансаксиальным полем к средней плоскости.

Если описанные выше ионно-оптические схемы дополнить линзами, идентичными входной и расположенными после магнита, то получатся системы, аналогичные по действию предложенным ранее в работе [1]. В этой работе рассматриваются системы, предназначенные для очистки пучка ионов, которым облучается исследуемая поверхность, от ионов посторонних элементов. Используются секторное магнитное поле и две электростатические линзы, расположенные до и после него. В середине магнитного поля, где формируется действительное промежуточное изображение, установлена диафрагма, сепарирующая ионы по

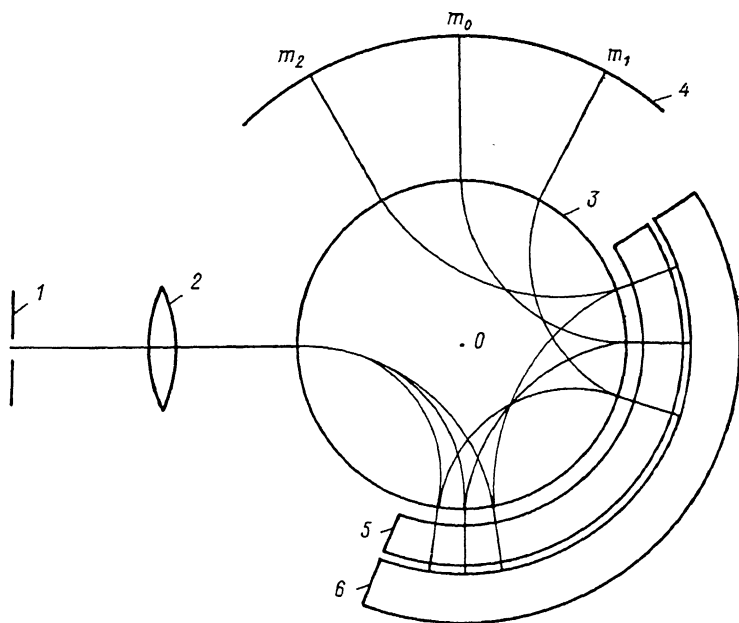


Рис. 5. Ионно-оптическая схема многоколлекторного масс-спектрометра с трехкратным прохождением ионами магнитного поля.

1 — выходная щель источника ионов; 2 — электростатическая линза; 3 — полюса магнита; 4 — поверхность, с которой совмещаются входные щели приемников; 5, 6 — электроды трансаксиального зеркала. Показаны только осевые траектории пучков ионов с различными массами.

массам. Выделяется вся группа изотопов данного элемента и формируется стигматичное и ахроматичное изображение щели источника ионов. Предлагаемые в настоящей работе системы способны выделить одновременно несколько групп изотопов и для каждой из них сформировать стигматичное и ахроматичное изображения. Рис. 4 демонстрирует эту возможность. Сепарирующие диафрагмы расположены между магнитом и выходными линзами. В каждой из точек  $A_0$ ,  $A_1$  и  $A_2$  собираются изотопы, принадлежащие тому или иному элементу.

Дополнив показанную на рис. 1 схему электростатическим трансаксиальным зеркалом, ось которого проходит через точку 0, можно осуществить  $n$ -кратное прохождение ионов через магнитное поле и тем самым увеличить угловую дисперсию прибора в  $n$  раз. На рис. 5 показан пример многоколлекторного масс-спектрометра (масс-спектрографа), в котором ионы трижды проходят через магнитное поле. Ионы возвращаются в магнитное поле двухэлектродным трансаксиальным зеркалом, каждый электрод которого образован парой параллельных средней плоскости пластин. В средней плоскости выходящие из магнитного поля в радиальном направлении ионы после отражения от зеркала вновь поступают в поле магнита направленными на центр 0. В направлении, перпендикулярном к средней плоскости, зеркало должно сохранить параллельность падающего на него пучка, для чего следует выбрать нужные потенциалы на электродах зеркала.

Если разброс энергий ионов в пучке велик и заметно сказывается на разрешающей способности спектрометра, то для уменьшения его влияния также может быть использовано электростатическое трансаксиальное зеркало (рис. 6). Это зеркало, как и входная линза в предыдущих схемах, в средней плоскости при выключенном магнитном поле фокусирует ионный пучок, вышедший из центральной точки источника, в центре  $O$  межполюсного зазора, а в проекции на плоскость, перпендикулярную к средней, делает его параллельным. Выходная щель источника ионов и ось симметрии магнитного поля совмещены с первой и второй главными плоскостями зеркала. В этой случае линейная дисперсия по энергии всегда равна нулю и все ионы, вышедшие из центральной точки щели источника, независимо от их энергии фокусируются в точке  $O$  [2]. Угловая дисперсия зер-

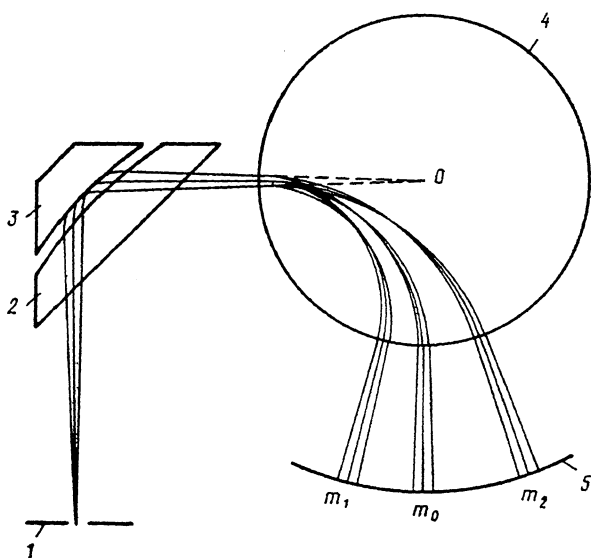


Рис. 6. Ионно-оптическая схема многоколлекторного масс-спектрометра с фокусировкой по энергии.

1 — выходная щель источника ионов; 2, 3 — электроды трансаксиального зеркала; 4 — полюса магнита, 5 — поверхность, с которой совмещаются входные щели приемников.

кала должна быть равной по величине и противоположной по знаку угловой дисперсии магнитного поля для некоторой выбранной массы  $m_i$ . Тогда для этой массы в приборе будет обеспечена фокусировка ионов по энергии, для других масс она будет неполной. Однако остаточная угловая дисперсия по энергии невелика при достаточно широком интервале одновременно регистрируемых масс. Так, если угловая дисперсия по энергии в приборе обращена в нуль для массы  $m_0$ , то для масс, равных  $2m_0$  и  $m_0/2$ , она составляет 0.03, для масс, равных  $4m_0$  и  $m_0/4$ , — 0.10.

Изложенное выше наглядно демонстрирует потенциальные возможности нетрадиционного использования круглого магнитного поля.

### Список литературы

- [1] Liebl H. // Low-energy Ion Beams. Conf. Ser. N 38. Bristol; Jondon, 1978. P. 266—281.  
 [2] Бейзина Л. Г., Карецкая С. П., Кельман В. М. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 9. С. 1681—1689.

Институт ядерной физики АН КазССР  
 Алма-Ата

Поступило в Редакцию  
 21 марта 1990 г.