

01;10;12

Ионно-оптическая система с фильтрацией по энергии для монопольного масс-спектрометра

© Л.П. Овсянникова¹, Т.Я. Фишкова¹, В.А. Сурков²¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия² АОА „SELMI“, Сумы, Украина
e-mail: fishkova@mail.ru

(Поступило в Редакцию 30 января 2007 г.)

Предложена и рассчитана электростатическая ионно-оптическая система, обеспечивающая фокусировку пучка по углу и его монохроматизацию на входе в монопольный масс-анализатор. В ней используется воронкообразный вытягивающий электрод в энергофильтр в виде цилиндра, в меридиональной плоскости которого расположен плоский электрод. Система допускает изменение геометрии пропорционально радиусу апертуры, а также питания пропорционально потенциалу анода.

PACS: 07.75.+h

Для получения высокой чувствительности и, в особенности разрешающей способности монопольных масс-спектрометров необходимо, чтобы инжектированный в блок электродов пучок имел малые сечение, расходимость и разброс по энергии [1]. Эти требования значительно жестче, чем для квадрупольных масс-спектрометров (КМС), поэтому не оправдало себя заимствование хорошо зарекомендовавших себя источников ионов КМС.

Одним из возможных путей решения задачи является повышение эквипотенциальности области образования ионов, по нему пошли авторы в своей предыдущей работе [2]. Для предотвращения попадания в блок электродов монопольного анализатора рассеянных электронов авторы предложили сместить ионно-оптическую систему относительно его входной апертуры с помощью простой малогабаритной отклоняющей системы. Следует отметить, что такое решение несколько усложнило устройство в целом из-за необходимости выдерживать требуемый угол инжекции. Описанная система обеспечивает уменьшение разброса по энергии в ионном пучке, что позволяет для ряда задач работать без энергофильтрации. И все же в тех случаях, когда требования к моноэнергетичности пучка выше, необходимо дополнительно ставить фильтр по энергии.

Ранее Сумским заводом были выпущены монопольные масс-спектрометры МХ7304А2 и МХ7304А3 с энергофильтром типа „двугранный угол“ [3]. Они хорошо зарекомендовали себя при работе со сторонними пучками ионов, имеющими большой разброс по энергии, в частности, для вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) и вторично-атомной масс-спектрометрии (ВАМС) [4,5]. Однако в обычном режиме газового анализа в условиях высокого вакуума значительных улучшений характеристик прибора получено не было из-за погрешности изготовления энергофильтра, поскольку

механические aberrации нивелируют выигрыш от монохроматизации пучка.

В настоящей работе для фильтрации ионов по энергии предлагается использовать более простое в изготовлении устройство в виде цилиндра, в меридиональной плоскости которого помещен плоский заземленный электрод со щелью, а по торцам — плоские заземленные диафрагмы. Ионный пучок с малыми размерами и угловой расходимостью формируется на входе такой системы с помощью трехэлектродной ионно-оптической системы (ИОС). Ее выходная диафрагма одновременно служит входной для энергофильтра.

Целью настоящей работы является расчет одного из вариантов такого устройства, его модель приведена на рис. 1. Ионизатор (1) представлен областью, ограниченной сплошной сеткой с потенциалом U_a (все потенциалы заданы относительно заземленной входной апертуры блока электродов монополя), через сетчатые стенки в область ионизации попадают электроны, ускоренные по энергии ионизации, в результате столкновения которых с нейтральными частицами образуются ионы. Ионы вытягиваются электродом (2) с потенциалом U_{ex} и формируются в пучок с помощью фокусировки электрода (3) с потенциалом U_f , выходная диафрагма (4) заземлена. На цилиндрический электрод энергофильтра (5) подается полезадающий потенциал U , фильтрация пучка по энергии осуществляется щелью S в плоском электроде (6). Рабочий режим подбирается таким образом, чтобы пучок проходил через плоский электрод в его середине и тогда оси отверстий во входной и выходной торцевых диафрагмах будут располагаться симметрично относительно оси цилиндра. Осуществление такого так называемого параллельного переноса пучка исключает попадание в блок электродов монополя рассеянных электронов, нейтралей и метастабильных частиц. Кроме того, это удобно для работы со сторонними источниками ионов, как в методах ВИМС и ВАМС.

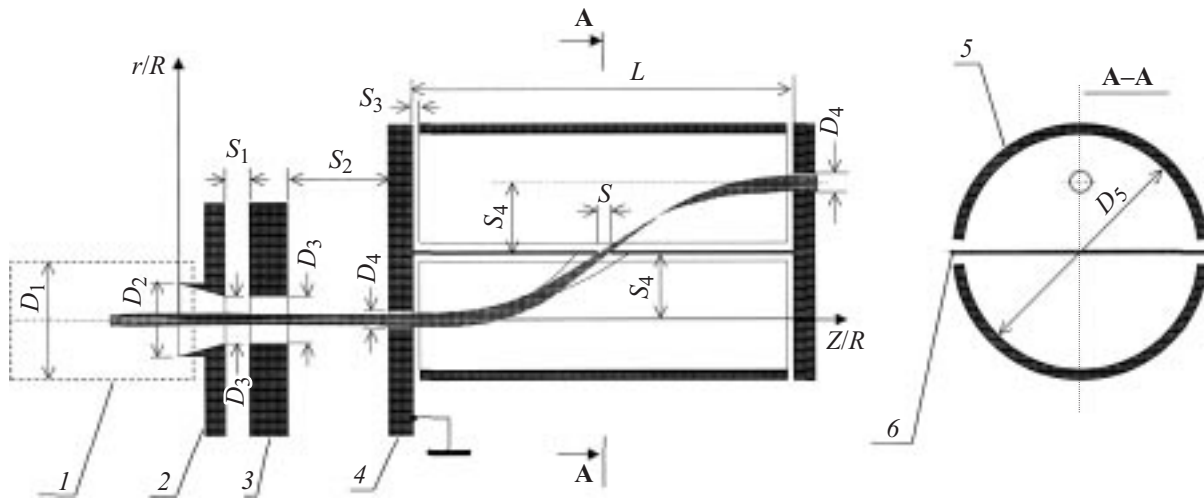


Рис. 1. Ионно-оптическая система формирования пучка с фильтрацией по энергии.

Параметры ИОС, формирующей пучок, выбирались таким образом, чтобы обеспечить максимально возможную интенсивность ионного пучка на ее выходе, и в дальнейшем — прохождение пучка с минимальными потерями через рабочий зазор блока электродов монополя диаметром 4 и длиной 150 мм. Расчеты проведены численно по программе авторов для осесимметричных электронно-оптических систем.

Ионы стартуют с оси системы в широком интервале начальных координат с тепловыми скоростями. Варьировались форма вытягивающего электрода, а также диаметры электродов D_1 , D_2 , D_3 и расстояния между ними S_1 и S_2 . При этом величина вытягивающего напряжения (U_{ex}) изменялась в пределах $0-3U_a$, и каждый раз подбиралось оптимальное фокусирующее напряжение (U_f), знак которого, как оказалось, совпадает с U_{ex} , а абсолютное значение равно или превышает последнее.

Обычно в электронно и ионно-оптических системах для вытягивания пучков заряженных частиц используется электрод, имеющий форму расширяющегося конуса. Авторы предлагают для этой цели использовать воронкообразный электрод (суживающийся конус). Сравнение интенсивности вытягивания ИОС с различной формой вытягивающего электрода в процентах от полного количества ионов, вылетающих в пределах $\pm\pi$, дано на рис. 2. Учтены лишь осевые ионы, поскольку количество неосевых ионов, способных пройти через блок электродов монополя, незначительно и не влияет на результаты сравнения. В дальнейшем для оптимизированной системы прохождение неосевых ионов будет учитываться в предположении, что плотность ионного тока во всей области ионообразования одинакова. Следует отметить, что все линейные размеры отнесены к величине меньшего радиуса вытягивающего электрода R .

Сравнение результатов проводилось путем расчета площадей контуров, охватывающих соответствующие

кривые, которые замыкались на уровне 20% интенсивности. С увеличением U_{ex} величина этих площадей меняется не более чем на 5% как для конусного, так и для воронкообразного электродов, однако интенсивность пучка, проходящего монополь, у последнего в 1.5 раза больше. Она составляет 60–67% от полного количества осевых ионов. Вторым преимуществом воронкообразного электрода над конусным является меньший разброс по энергии в пучке, поскольку он вытягивает ионы из более удаленной от ИОС области ионообразования. Так, при $U_{ex} = 0$ у ИОС с воронкой разброс по энергии составляет 12%, а у ИОС с конусом — 27%. При увеличении величины вытягивающего напряжения это различие несколько уменьшается.

Обосновав выбор формы вытягивающего электрода, авторы определили оптимальную геометрию ИОС: $D_1 = 10R$, $D_2 = 6R$, $D_3 = 2R$, $D_4 = 1.6R$, $S_1 = 2R$, $S_2 = 8R$, толщина вытягивающего электрода составля-

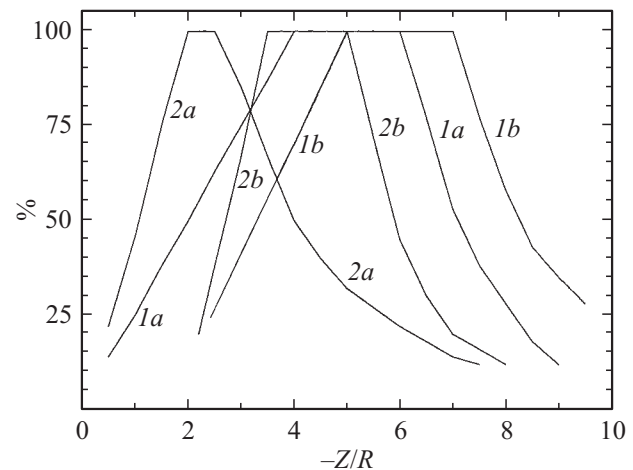


Рис. 2. Сравнение ионно-оптических систем с воронкообразным (кривые 1) и конусным (2) вытягивающими электродами; а — $U_{ex} = 0$, б — $-2.3U_a$.

ет $3.5R$, фокусирующего — $3R$, диафрагмы — $2R$. Потенциал вытягивающего и фокусирующего электродов этой ИОС, выраженные в единицах анодного потенциала ($U_a = 30\text{ V}$), приведены в таблице. Выходная диафрагма заземлена.

Для выбора оптимального питания ИОС, обеспечивающего максимальный ток ионного пучка на вход блока электродов монополя, рассчитана интенсивность пучка в процентах от общего количества ионов, стартовых с оси системы, для различных напряжений на воронкообразном вытягивающем электроде. Результаты этих расчетов в зависимости от начальной продольной координаты даны на рис. 3, *a*, из которого вытягивание ионов обеспечивается в интервале значений начальной осевой координаты $-Z_0/R$ от 1 до 9. Эффективность вытягивания определяется размерами площадей σ_i под кривыми 1–4, которые замыкались на продольную ось системы по прямым, являющимся продолжением ветвей соответствующих кривых. Максимально возможная эффективность вытягивания ионов определяется площадями σ_m прямоугольников с основанием, равным разности продольных координат, $-(Z_{\max} - Z_{\min})$ и высотой, соответствующей 100% интенсивности.

Отношение площадей σ_1/σ_m по мере роста величины потенциала воронкообразного электрода убывает (см. таблицу). При этом область вытягивания смещается в глубину области ионообразования. Таблица дополнена отношением разности значений осевых потенциалов ΔU к анодному в крайних стартовых точках ионов в области наилучшего вытягивания. Разброс по энергии в пучке по мере роста вытягивающего напряжения сильно растет (см. рис. 3, *b*).

$-U_{\text{ex}}/U_a$	0	1	2	3
$-U_f/U_a$	1.5	2.5	3.0	3.0
$\sigma_i/\sigma_m, \%$	58	52	43	41
$\Delta U/U_a$	0.25	0.47	0.70	1.0

Таким образом, сравнение трехэлектродных ИОС с различной величиной напряжения на вытягивающем воронкообразном электроде показало, что по всем основным параметрам $U_{\text{ex}} = 0$ предпочтительнее, так как фокусирующий потенциал и разброс по энергии в пучке при этом меньше, а эффективность вытягивания больше. Кроме того, заземление электрода упрощает схему питания ИОС.

Для дальнейшего снижения разброса по энергии в ионном пучке непосредственно за ИОС установлен фильтр по энергии (см. рис. 1). Цилиндрический электрод энергофильтра с потенциалом U имеет диаметр $D_5 = 20R$ и длину $L = 30R$. В его меридиальной плоскости находится плоский электрод, соединенный с плоскими заземленными торцевыми диафрагмами, которые

отстоят на расстоянии $S_3 = R$ от цилиндра и имеют отверстия для входа и выхода пучка диаметром $D_4 = 1.6R$, расположенные симметрично по обе стороны плоского электрода. Расчет траекторий проведен численно по программе на основе аналитического выражения распределения потенциала описанного устройства, полученного авторами.

Выбор режима работы энергофильтра осуществлялся путем расчета хода параллельного пучка на его входе при условии получения фокусировки на плоский электрод посередине энергофильтра. В этом случае на его выходе образуется пучок, близкий к параллельному. Такому режиму соответствует сила энергофильтра $\beta = 0.7$ ($\beta = U/U_b$, где U_b — потенциал стартовых точек ионов, определяющий базовую энергию пучка), коэффициент дисперсии по энергии равен $\Delta = 10.5R$, а расстояние центральной траектории пучка от продольной оси энергофильтра $S_4 = 5.7R$.

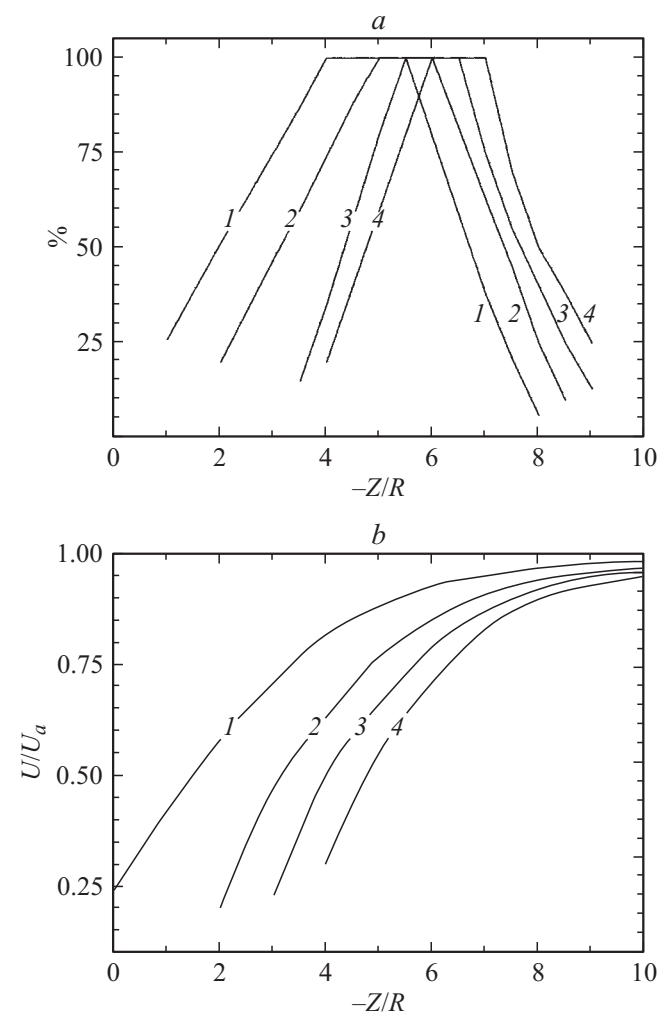


Рис. 3. Интенсивность вытягивания ионного пучка фокусирующей системой в зависимости от стартовой координаты (*a*) и распределение осевого потенциала в области ионообразования (*b*) при изменении величины вытягивающего напряжения. Кривые 1: $U_{\text{ex}}/U_a = 0$, 2 — -1 , 3 — -2 , 4 — -3 .

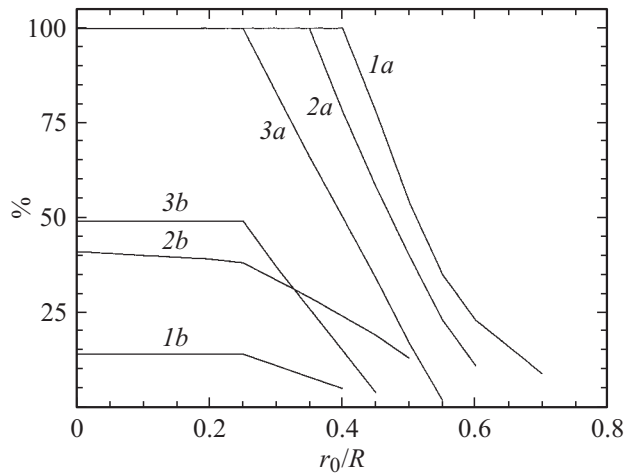


Рис. 4. Интенсивность вытягивания ионного пучка на выходе из энергофильтра в зависимости от поперечной начальной координаты для различных начальных продольных координат; кривая 1 — $Z_0/R = -7$, 2 — -6 , 3 — -5.5 , кривые (а) относятся к выходным углам $\alpha \leq \pm 0.05$ rad, (b) — к выходным углам, обеспечивающим прохождение пучка через канал блока электродов монополя $\alpha \leq \pm 0.013$ rad.

Поскольку для работы монополюсного масс-анализатора требуются ионные пучки с малой угловой расходимостью (наклон к продольной оси системы не должен превышать 0.05 rad), была определена область ионообразования, соответствующая этому требованию. Расчеты показали, что она находится в пределах $5.5 \leq | -Z_0/R | \leq 7.0$, при этом потенциал в точках старта ионного пучка лежит в интервале $U/U_a = 0.93 \pm 0.02$. Для прохождения пучка с таким разбросом по энергии через плоский электрод требуется щель размером $S = R$, центр которой расположен на расстоянии $15.1R$ от входного торцевого электрода.

В оптимальном режиме работы ИОС совместно с фильтром по энергии ($U_{ex} = 0$, $U_f = -1.5U_a$, $U = 0.65U_a$) проведены расчеты траекторий осевых, а также неосевых ионов, стартующих под различными углами к продольной оси в пределах $\alpha_0 = \pm\pi$, в указанной выше области ионообразования. Результаты расчетов интенсивности ионного пучка, проходящего выходную диафрагму энергофильтра, в широкой области изменения начальной поперечной координаты r_0 для трех различных продольных координат Z_0 приведены на рис. 4.

При относительно больших углах на выходе ($\alpha \leq \pm 0.05$ rad) вытягиваются частицы, стартующие вплоть до значений r_0 от 0.55 до $0.7R$, а интенсивность пучка несколько возрастает по мере удаления от ИОС продольной стартовой координаты. При этом интенсивность пучка, стартующего из всей указанной области ионообразования, объем которой равен $1.7R^3$, на выходе системы составляет 78% от максимально возможной. Наибольший интерес представляет нахождение интенсивности пучка, проходящего блок электродов

монополя, в этом случае угол выхода из системы не должен превышать $\alpha \leq \pm 0.013$ радиан. Из рис. 4 (кривые b) видно, что объем области захвата такого пучка уменьшается (он равен $1.2R^3$). При этом его интенсивность на выходе системы составляет лишь 26% от максимальной.

В заключение отметим:

- 1) в соответствии с законом геометрического пробоа, поскольку все размеры системы отнесены к R , их можно менять пропорционально без изменения ионно-оптических свойств системы;
- 2) проверено наличие электрического подобия — поскольку питающие напряжения отнесены к U_a , а начальная энергия ионов очень мала (тепловая), то изменение ускоряющего потенциала в пределах до $\pm 20\%$ также не влияет на ионно-оптические свойства системы;
- 3) уменьшение разброса по энергии в пучке может быть достигнуто за счет меньшего размера щелей, при этом его интенсивность падает;
- 4) фильтрация ионов по энергии для монополюсного масс-анализатора сохраняет хорошо известные функции аналогичных устройств, применяемых для квадрупольных масс-спектрометров, а именно: отделение ионов, образованных ионизацией газовой фазы, от тех, что получены в результате электронно-стимулированной десорбции, а также удаление быстрых ионов при анализе сторонних ионных пучков;
- 5) намечено проведение опытно-конструкторской разработки предложенного выше устройства.

Список литературы

- [1] Слободенюк Г.И. Квадрупольные масс-спектрометры. М.: Атомиздат, 1978. С. 133–134.
- [2] Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я., Сурков В.А. // Прикладная физика. 2006. № 3. С. 88–91.
- [3] Вайсберг Э.И., Сурков В.А., Фишкова Т.Я. / А.с. СССР № 1 6 777 79. БИ № 34. 1991.
- [4] Батулин В.А., Еремин С.А. // ПТЭ. 2005. Вып. 2. С. 120–122.
- [5] Батулин В.А., Еремин С.А., Пустовойтов С.А. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Плазменная электроника. 2006. № 5. С. 222–226.