

4. Боровиков П. В., Григорьев А. Д., Мейев В. А. и др. // Известия ЛЭТИ. 1991. Вып. № 3. С. 72.

Литература

1. Nusinovich G. S., Mitin L. A., Vlasov A. N. // Phys. Plasmas. 1997. № 4(12) Дек.
2. Рогашкова А. И., Цейтлин М. Б. // Электрон. техника. Сер. 1. "Электроника СВЧ". 1967. Вып. 7. С. 3—17.
3. Рогашкова А. И., Цейтлин М. Б. // Там же. Вып. 4. С. 3—17.

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2005 г.

Simulation of plasma-filled TWT characteristics

P. V. Borovikov, V. Yu. Grigoriev
All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

Method of calculation of the main plasma-filled TWT characteristics is suggested and some results presented. The base features of vacuum and plasma modes are examined qualitative and proved by calculations.

УДК 537.533

Вытягивающая система источника ионов с отклонением пучка на вход монопольного масс-анализатора

Л. П. Овсянникова, Т. Я. Фишкова
ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия

В. А. Сурков
АО "SELM", г. Сумы, Украина

Предложена ионно-оптическая система для формирования пучка на вход монопольного масс-спектрометра. Ее отличительные особенности — заземление вытягивающего электрода в целях уменьшения разброса в пучке ионов по энергии и использование отклоняющей системы нетрадиционной конструкции (хорошо сочетающейся с осесимметричными электродами) для предотвращения попадания рассеянных электронов в монополь. В аналитическом виде получено распределение потенциала в такой отклоняющей системе. Расчет траекторий ионов проведен численно по программе авторов. Дано сравнение параметров исследованной системы с ранее используемой в монопольном масс-спектрометре.

© Овсянникова Л. П., Фишкова Т. Я., Сурков В. А., 2006

Промышленное освоение монопольных масс-спектрометров связано с их большей технологичностью и дешевизной по сравнению с квадрупольными. Поэтому серийный выпуск приборов актуален до настоящего времени. Технические возможностей монополей вполне достаточно, чтобы с успехом решать задачи как в научных исследованиях для изучения процессов в вакууме и газах, так и в технологии — для оперативного контроля химических процессов при напылении, сварке, отжиге, для анализа геологических проб, при экспресс-экологическом контроле и др.

Монопольная разновидность квадрупольного масс-анализатора обладает рядом специфических особенностей, одна из которых — сильное влияние энергии ионов на чувствительность и разрешающую способность. На рис. 1 приведен общий вид монопольного масс-

спектрометра с входящими в него узлами. Если в последних модификациях приборов MX7304A вместо ранее используемого дефлектора на выходе из монополя поставить энергофильтр типа двугранный угол [1], то разрешающая способность прибора на уровне 10 % улучшается на два порядка (в 500 раз). Однако при этом приблизительно во столько же раз ухудшается чувствительность. Кроме того, часть электронов, участвующих в ионообразовании, попадает в межэлектродный зазор монополя, длина которого недостаточна, чтобы их отсеять.

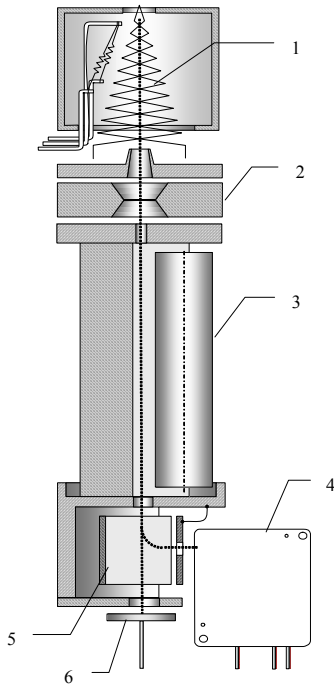


Рис. 1. Монополярный масс-анализатор типа MX7304A:

1 — область ионобразования; 2 — ИОС источника; 3 — электродный блок масс-анализатора; 4 — вторично-электронный умножитель; 5 — энергофильтр типа двугранный угол; 6 — коллектор

Ионно-оптическая система (ИОС) источника вышеупомянутых приборов состоит из сетчатого стакана, охватывающего область ионизации с ускоряющим напряжением $U = (30—50)$ В и конусного электрода с вытягивающим напряжением $V = -(50—100)$ В, который также выполняет функцию потенциального барьера для электронов. Имеется еще и фокусирующий электрод. Недостатком такой ИОС является большой разброс по энергии в ионном пучке, достигающий (14—23) эВ. Кроме того, вследствие прямого хода пучка часть электронов попадает в масс-анализатор, ухудшая его разрешающую способность. Поэтому актуальными являются, по крайней мере, две задачи: уменьшение разброса по энергии формирующей ИОС, а также недопущение попадания паразитных электронов в монополярный масс-анализатор.

Результаты

В настоящей работе предлагается трехэлектродную ИОС источника (см. рис. 1, поз. 2) заменить осесимметричным заземленным вытягивающим электродом в целях уменьшения разброса частиц по энергии в ионном пучке. Задача о нахождении распределения потенциала в области формирования ионного пучка и вытягивающего электрода решена численно по программе ТЕО ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН. На основании картины эквипотенциалов определены величины потенциалов на переднем и заднем фронтах области ионизации, ответственные за энергию ионов для трех различных форм заземленного вытягивающего электрода: одной цилиндрической и двух конических расширяющейся и сужающейся. Оказалось, что при длине электрода не менее диаметра со стороны области ионизации его форма не влияет на распределение поля, а следовательно, и на

ход траекторий. Разброс по энергии в ионном пучке оказался равным всего (3—5) эВ, что позволяет работать без энергофильтра.

Для предотвращения попадания в масс-анализатор электронного пучка используется отклоняющая система (ОС), которая одновременно служит для проведения ионов на его вход. Поскольку классические ОС в виде плоского и цилиндрического конденсаторов конструктивно плохо сочетаются с осесимметричным вытягивающим электродом, предлагается использовать ОС в виде цилиндра, разрезанного по образующим на четыре части. На две противоположные части с угловыми размерами 120° подается отклоняющее напряжение, а две другие, расположенные между ними, заземлены. При такой геометрии ОС его поле в двухмерном приближении наиболее близко к однородному [2]. По торцам ОС помещены плоские заземленные диафрагмы, участвующие в формировании отклоняющего поля и препятствующие проникновению посторонних полей, а также вырезающие пучок нужного размера с требуемым углом наклона. Предлагаемая ИОС схематически представлена на рис. 2.

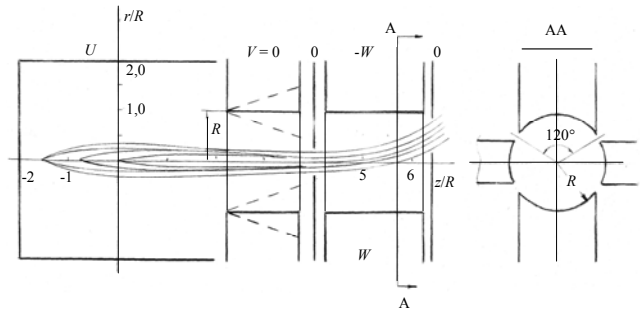


Рис. 2. Ионно-оптическая система источника с заземленным вытягивающим электродом и отклонением пучка на вход масс-анализатора, а также ход ионных траекторий в ней

Решение уравнения Лапласа методом Фурье позволяет получить аналитическое выражение для распределения потенциала ОС в виде цилиндра с плоскими торцевыми электродами, которое имеет следующий вид:

$$\Phi(r, \varphi, z) = -\frac{16W}{\pi^2} \sum_{k=0}^{\infty} \times \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\sin[(2k+1)\pi/3] \sin[(2k+1)\varphi] \sin[(2i+1)\pi z/L]}{(2k+1)(2i+1)} \times \frac{I_{2k+1}[(2i+1)\pi r/L]}{I_{2k+1}[(2i+1)\pi R/L]},$$

где W — величина потенциала на полезадающих электродах;

R — радиус апертуры отклоняющей системы, равный радиусу вытягивающего цилиндра;

L — ее длина (расстояние между торцевыми диафрагмами);

$I_{2k+1}[(2i+1)\pi r/L]$ и $I_{2k+1}[(2i+1)\pi R/L]$ — функции Бесселя $(2k+1)$ порядка.

Распределение потенциала в отклоняющей системе, рассчитанное по приведенной выше формуле, представлено на рис. 3. Для сравнения авторами численно рассчитана картина эквипотенциалов плоского конденсатора с торцевыми электродами аналогичной геометрии, результаты обработки которой также даны на рис. 3. Расчеты показали, что с точки зрения однородности поля в средней плоскости оптимальной является длина ОС, равная $L = 2,2R$ (см. кривую 2 рис. 3, а). Поэтому именно для нее проведены дальнейшие исследования ОС. В продольном направлении у обеих отклоняющих систем с плоской и цилиндрической формой электродов в области до 0,75 апертуры распределение потенциалов отличается мало.

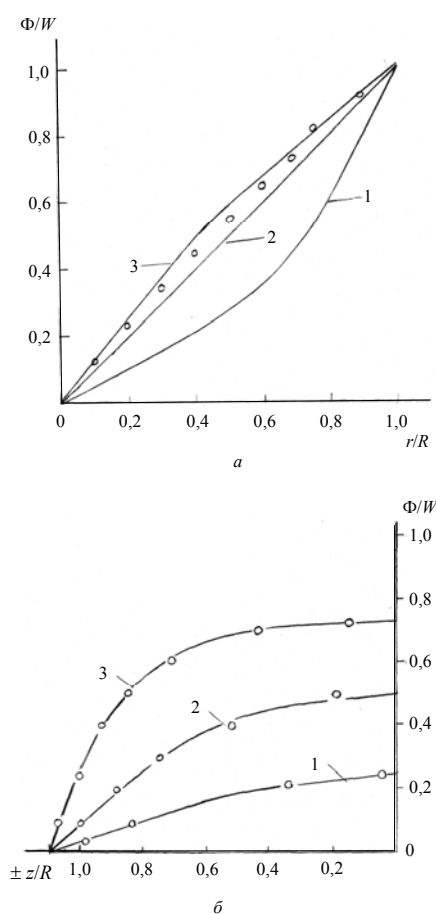


Рис. 3. Распределение потенциала в цилиндрической и плоской отклоняющих системах с торцевыми электродами:

а — в средней плоскости по направлению, перпендикулярному оси системы для ее различных длин: 1 — $L/R = 1$; 2 — 2,2; 3 — 10; б — вдоль продольной оси: 1 — $r/R = 0,25$; 2 — 0,50; 3 — 0,75. — — — разрезной цилиндр, ○ — плоский конденсатор

Геометрические размеры исследуемой ИОС выражены в единицах радиуса R вытягивающего электрода, поэтому они могут меняться в широких пределах в зависимости от предъявляемых требований. Длина вытягивающего электрода равна $2R$, а отклоняющей системы — $2,2R$, радиус стакана, охватывающего область ионизации, равен $2R$, его длина — $4R$. Радиусы вырезающих диафрагм на входе и выходе отклоняющей

системы, соответственно, равны $r_1 = 0,2R$, $r_2 = 0,25R$.

Численные расчеты траекторий однозарядных ионов в предлагаемой системе проведены по программе ТЕО. Ионы стартуют с тепловыми скоростями во всем возможном диапазоне начальных углов вылета ($-180^\circ \leq \alpha_0 \leq 180^\circ$) из области ионизации длиной $1,5R$ как с оси системы, так и на различных расстояниях от нее. Результаты расчета эффективности прохождения ионов в масс-анализатор при условии равномерного распределения их интенсивности представлены на рис. 4. Из этого рисунка видно, что наибольшее число ионов вытягивается вблизи заднего фронта области ионизации. Следует отметить, что и разброс по энергии в пучке здесь минимален (в диапазоне $-1,5 \leq z_0/R \leq -1,0$ он не превышает 1 эВ). Обработка данных, приведенных на рис. 4, дает возможность рассчитать эффективность вытягивания ионов из различных по величине объемов области ионизации. Так, из объема цилиндрической формы радиусом $0,1R$ на вход масс-анализатора проходит 90 % образовавшихся ионов, при $0,2R$ — 83 %, при $0,3R$ — 75 %. При этом отклоняющее напряжение равно $\pm W = U/2$ (U — ускоряющее напряжение "на стакане"). Предлагаемая ИОС должна быть наклонена к оси монополя на 20° . Максимальный разброс в пучке по углу равен $\pm 3^\circ$.

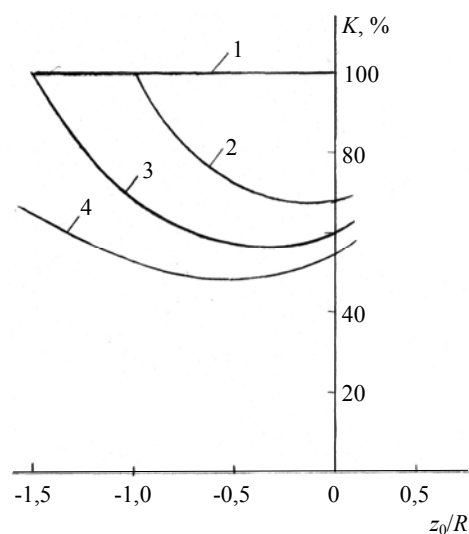


Рис. 4. Эффективность прохождения ионного пучка в монополь в зависимости от места старта в продольном направлении при различных начальных расстояниях от оси системы:

1 — $r_0/R = 0$; 2 — 0,1; 3 — 0,2; 4 — 0,3

Заключение

Предложена и рассчитана ИОС, которая может быть использована в монопольном и квадрупольном масс-спектрометрах. Она отличается от применяемых до настоящего времени ИОС следующим: вытягивающий электрод заземлен, поэтому на порядок уменьшается разброс по энергии в ионном пучке независимо от его формы; используется отклоняющая система (конструктивно хорошо сочетающаяся с вытягивающим электродом), которая отклоняет ионы на вход масс-анализатора, а электроны — в противоположную сто-

рону, убирая помехи и тем самым повышая чувствительность прибора.

Интересно сравнить параметры предложенной системы и ранее используемой ИОС с конусным вытягивающим электродом, на который обычно подается вытягивающее напряжение, равное по абсолютной величине двум ускоряющим. Численные расчеты авторов показали, что при одинаковых габаритах обеих ИОС из одинаковой области ионизации (длиной $1,5R$, радиусом $0,3R$) последняя вытягивает несколько меньше ионов (около 70 %), в то время как угловой разброс в пучке у нее больше и достигает $\pm 5^\circ$.

Таким образом, поскольку предлагаемая ИОС позволяет работать без энергофильтра, который отсекает существенную часть пучка, имеющего разброс по энергии больше

(3—5) эВ, ожидается увеличение чувствительности масс-спектрометра примерно на два порядка. Кроме того, в связи с тем, что предлагаемая ИОС уменьшает угол раствора пучка на входе масс-анализатора, можно ожидать увеличения разрешающей способности прибора.

Литература

1. Вайсберг Э. И., Сурков В. А., Фишкова Т. Я. А.с. 1677779, Б.И. 1991. № 34.
2. Овсянникова Л. П., Фишкова Т. Я. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 8. С. 104—107.

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2005 г.

Drawing out system of an ion source with beam deflection to an input of single-pole mass-analyzer

L. P. Ovsyannikova, T. Ya. Fishkova

A. F. Ioffe Physical-Technical Institute RAS St.-Petersburg, Russia

V. A. Surkov

SELMI, Inc, Sumy, Ukraine

The ion-optical system for beam forming to an input of the single-pole mass-spectrometer is offered. Its distinctive features are the ground connection of a drawing out electrode with the purpose of diminution of straggling in the beam ions on energy, and also usage of a deflecting sistem of a nonconventional construction (well combined with the axisymmetrical electrodes) for preventing a hit of scattered electrons in a monopole. The potential distribution in such deflecting system is obtained in an analytical view. The calculation of trajectories of ions is made numerically by the program of the autors. Matching is done for the parameters of the explored sistem with the sistem, earlier used in the single-pole mass spectrometer.