

УДК 621.384.8

В.С. Гуров, Б.И. Колотилин, М.В. Дубков, М.А. Буробин
МОНОПОЛЬНЫЙ МАСС-АНАЛИЗАТОР
С ТОНКОСТЕННЫМИ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Описана конструкция электродной системы монополюсного масс-анализатора с использованием тонкостенных гиперболических электродов, изготовленных методом электролитического формования. Приведены результаты экспериментального исследования предложенной конструкции масс-анализатора и их сравнения с серийным монополюсным масс-спектрометром МХ-7103.

Ключевые слова: монополюсный масс-анализатор, тонкостенный гиперболический электрод, форма массового пика, разрешающая способность.

Введение. Монополюсный масс-анализатор является разновидностью гиперболических масс-спектрометров пролетного типа. По своей конструкции он схож с квадрупольным фильтром масс, однако обладает по сравнению с ним рядом преимуществ: простотой в изготовлении и сборке, меньшими габаритами и массой, более мягкими требованиями к параметрам питающего напряжения.

В рабочем объеме монополюсного масс-анализатора создается квадратичное распределение потенциала вида

$$\varphi(x, y) = \frac{x^2 - y^2}{r_0^2} (U - V \cos \omega t).$$

В конструкции монополюсного масс-анализатора, впервые предложенной Цаном [1], электрическое поле создается уголковым электродом 1, образованным двумя перпендикулярными плоскостями, и стержневым электродом 2 круглого сечения (рисунок 1), радиус r которого связан с радиусом r_0 поля соотношением $r = (1,1458 - 1,16)r_0$ [2].

Существенным недостатком такой конструкции является наличие в спектре ионов «хвостов» массового пика со стороны тяжелых масс, что ограничивает разрешающую способность, относительную чувствительность и возможность анализа малых компонент. Кроме того, данная конструкция сложна в сборке и юстировке.

Настоящая работа посвящена сравнительному анализу характеристик монополюсного масс-спектрометра МХ-7103 с двумя другими. В первой из них стержневой электрод анализатора заменен на сложнопрофильный гиперболический. Во второй конструкции оба полеобразующих

электрода имеют гиперболическую форму.

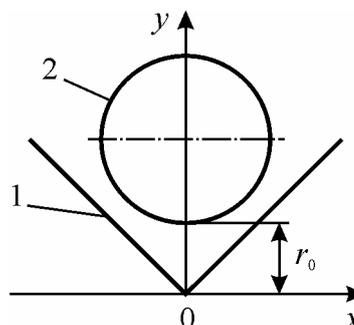


Рисунок 1 – Геометрия электродной системы монополюсного масс-анализатора Цана

Монополюсный масс-анализатор с гиперболическим стержневым электродом. Данная конструкция масс-анализатора отличается от масс-анализатора Цана тем, что стержневой электрод заменен тонкостенным гиперболическим электродом 2, а уголкового электрода 1 сохранил прежнюю форму (рисунок 2).

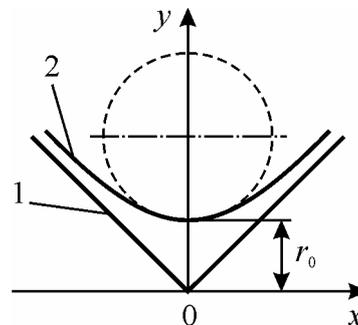


Рисунок 2 – Геометрия электродной системы монополюсного масс-анализатора с гиперболическим стержневым электродом

Это не только заметно улучшает качество поля в рабочем объеме анализатора и, как следствие, аналитические параметры прибора [3, 4], но и снижает влияние технологических погреш-

ностей электродной системы на распределение потенциала [5]. Поэтому замена стержневого круглого электрода сложнопрофильным гиперболическим представляется вполне оправданной. Такая замена предпочтительна еще и потому, что разработанная технология электролитического формования [6] сложнопрофильных электродных систем позволяет достаточно просто осуществить это на практике при одновременном снижении массы анализатора почти на порядок.

Монопольный масс-анализатор с гиперболическими стержневым и уголковым электродами. Проведенные нами ранее теоретические расчеты [7] показали, что трансформация уголкового электрода в гиперболический 1 (рисунок 3) приводит к существенному улучшению формы массового пика и увеличению разрешающей способности монопольного масс-анализатора при сохранении его чувствительности.

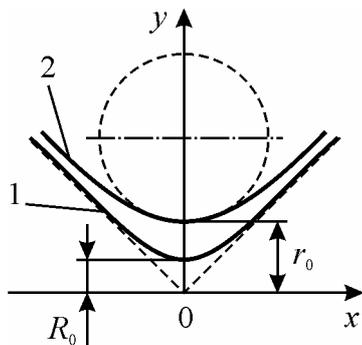


Рисунок 3 – Геометрия электродной системы монопольного масс-анализатора с гиперболическими стержневым и уголковым электродами

Геометрия стержневого электрода 2 и радиус поля r_0 электродной системы остаются при этом неизменными, сохраняется и квадратичное распределение потенциала в такой электродной системе. Улучшение параметров связано с тем, что в таком анализаторе отсутствует приосевая область, где электрическое поле равно нулю, и ионы вводятся в анализатор с начальными координатами $y \geq R_0$, где R_0 – геометрический параметр гиперболического уголкового электрода, уравнение которого имеет вид: $y^2 - x^2 = R_0^2$ (случай $R_0 = 0$ соответствует уголкового электроду монопольного масс-анализатора Цана). Так, увеличение геометрического параметра R_0 уголкового электрода от 0 до $0,05r_0$ позволяет увеличить относительную чувствительность, по крайней мере, в $10^2 - 10^3$ раз. При этом разрешающая способность, определяемая по уровню 0,01, возрастает приблизительно в 2,5–3 раза.

Конструкция тонкостенного масс-анализатора.

На рисунке 4 показана конструкция электродной системы монопольного масс-анализатора с тонкостенными сложнопрофильными электродами. Она выполнена из трех отдельных идентичных секций 1, каждая из которых состоит из двух электродов – уголкового 2 и стержневого 3, имеющего в поперечном сечении гиперболический профиль.

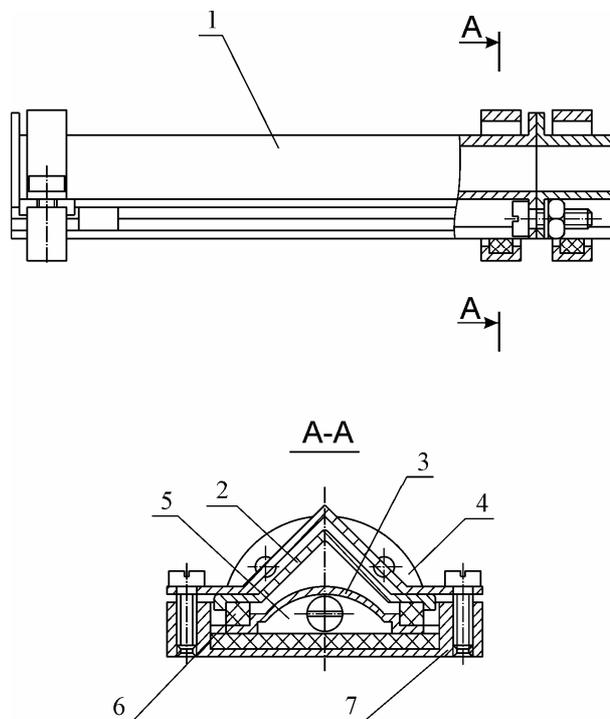


Рисунок 4 – Конструкция монопольного масс-анализатора с тонкостенными гиперболическими электродами

Тонкостенные электроды выполнены из меди с толщиной стенок 1 мм по технологии электролитического формования с использованием неразрушаемой металлической формы с допусками на размеры меньше 4 мкм. Для увеличения прочности электродной системы уголкового и стержневого электроды имеют ребра жесткости 4 и 5 соответственно, которые одновременно используются для соединения отдельных секций, установки входной и выходной диафрагм и крепления анализатора к фланцу вакуумной камеры. Взаимное расположение электродов и отдельных секций масс-анализатора обеспечивается размерными плоскими изоляторами 6, выполненными из керамики с допусками на размеры меньше 2 мкм. Электроды, разделенные керамическими изоляторами, плотно стягиваются держателем 7.

Радиус поля электродной системы r_0 равен 6 мм, длина электродной системы определяется числом секций и для исследуемого анализатора составляет 200 мм.

Сравнительный анализ предлагаемых

конструкций масс-анализатора. Для оценки эффективности предлагаемых конструктивных решений было проведено экспериментальное исследование аналитических характеристик масс-анализаторов с тонкостенными гиперболическими электродами, а также серийного монополюсного масс-спектрометра МХ-7103 с круглым стержневым электродом. В экспериментах использовались одинаковые схемы регистрации, геометрии входной и выходной диафрагм, энергия ионов и генератор ВЧ напряжения с гармоническим сигналом и амплитудной разверткой от масс-спектрометра МХ-7103. В установке использовался источник ионов с поперечной ионизацией электронным ударом, который позволял получать на выходе ионные токи до 10^9 А при токе эмиссии катода до 200 мкА и давлении в вакуумной системе 10^{-6} мм рт.ст. Энергия ионов на выходе из источника могла изменяться в широких пределах от 1 до 30 эВ.

Фрагменты соответствующих масс-спектров группы азота 27–29 а.е.м. приведены на рисунке 5.

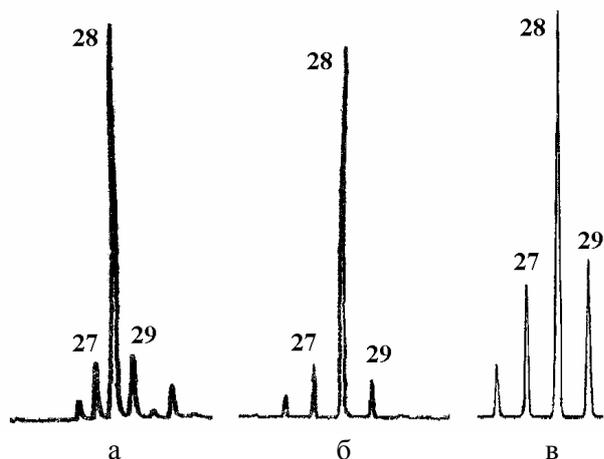


Рисунок 5 – Фрагменты масс-спектров для различных конструкций масс-анализатора:
 а – масс-анализатор МХ-7103; б – масс-анализатор с гиперболическим стержневым электродом;
 в – масс-анализатор с гиперболическими стержневым и уголковыми электродами

Видно, что монополюсный масс-анализатор с круглым стержнем (рисунок 5, а) обладает более низкой разрешающей способностью по пику 28 а.е.м. на уровне 0,5 высоты и худшей формой массового пика, имеющего ярко выраженный «хвост» со стороны более тяжелых масс. Замена круглого стержня гиперболическим электродом

(рисунок 5, б) позволяет получить при прочих равных условиях выигрыш в разрешающей способности по массам: 500 против 150–200 для анализатора с круглым стержнем.

Если же оба электрода являются гиперболическими (рисунок 5, в), то разрешающая способность достигает 825, при этом улучшается форма массового пика – он становится практически треугольным.

Закключение. Представленные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- замена круглых стержневых электродов гиперболическими позволяет повысить разрешающую способность монополюсного масс-анализатора в 2,5–3 раза для одной и той же чувствительности;
- возможно изготовление высокоточных сложнопрофильных разборных тонкостенных электродных систем гиперболических масс-анализаторов пролетного типа;
- предложенная и реализованная секционная конструкция монополюсного масс-анализатора обладает высокими эксплуатационными и аналитическими характеристиками, что открывает широкие перспективы для создания монополюсных электродных систем практически любой длины без ухудшения качества поля.

Библиографический список

1. Von Zahn U. // Rev. Sci. Instrum. 1963. V. 34. P. 1-4.
2. Dawson P.H., Whetten N.R. Quadrupole mass spectrometers // Dyn. Mass Spectrom. 1970. P. 1-60.
3. Сысоев А.А. Физика и техника масс-спектрометрических приборов и электромагнитных установок. М.: Энергоатомиздат, 1983. 256 с.
4. Гуров В.С., Дубков М.В. Экспериментальное исследование квадрупольного фильтра масс с гиперболическими электродами // Научное приборостроение: межвуз. сб. науч. тр. Рязань, 1997. С. 143-148.
5. Гуров В.С., Дубков М.В. Влияние технологических погрешностей на качество поля в анализаторе квадрупольного фильтра масс с гиперболическими электродами // Научное приборостроение: межвуз. сб. науч. тр. Рязань, 1997. С. 108-119.
6. Шеретов Э.П., Гуров В.С., Дубков М.В. Технология электролитического формования сложнопрофильных электродных систем для аналитического приборостроения // Материалы Всероссийской конференции «Новые материалы и технологии». М.: МАТИ-РГТУ, 1997. С. 79.
7. Шеретов Э.П., Гуров В.С., Дубков М.В. // Труды междунар. науч.-техн. конф. «Научные основы высоких технологий». Новосибирск, 1997. Т. 1. С. 63-66.