

УДК 621.384.83

Е.В. Мамонтов, В.С. Гуров, И.В. Филиппов, А.А. Дягилев**ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТР
С ЛИНЕЙНЫМ ВЧ ПОЛЕМ**

Рассматривается возможность создания масс-спектрометра, представляющего собой сочетание времяпролетного и квадрупольного масс-анализаторов. В основе прибора лежит идея пространственно-временной фокусировки заряженных частиц в линейном высокочастотном (ВЧ) электрическом поле. Показана возможность формирования линейного ВЧ поля с помощью системы плоских дискретных электродов. Приводится структурная схема времяпролетного масс-спектрометра с линейным ВЧ полем и описывается его работа.

Введение. Масс-спектрометрия является универсальным методом инструментального анализа вещества. Времяпролетные масс-спектрометры имеют самую высокую скорость масс-анализа [1]. Однако для получения высокой разрешающей способности необходимо формировать короткий пакет ионов с малым разбросом по начальной энергии. В настоящее время эту проблему решают, осуществляя ортогональный ввод ионов, используя ионное зеркало (рефлектор) и т.п. [2]. Для анализа вещества также широко используются квадрупольные масс-спектрометры. Масс-анализ в них осуществляется последовательным способом [3]. При этом скорость развертки оказывается невысокой. В данной работе рассматривается метод масс-селективного разделения заряженных частиц, сочетающий в себе преимущества указанных выше масс-спектрометров. Этот способ основан на времяпролетном разделении ионов по удельному заряду в двумерном линейном ВЧ поле.

Фокусирующее свойство линейного ВЧ поля. На основе анализа решений уравнения Матье было установлено, что двумерное линейное ВЧ поле обладает свойством пространственно-временной фокусировки для заряженных частиц по начальным координатам, энергиям и углам влета [4]. При начальных параметрах ионов $y_n = 0$, $x_n \neq 0$, $v_n \neq 0$ движение ионов в двумерном ВЧ поле по координате y носит возвратный характер. Причем время возвратного движения от начальных координат $x_n = -x_0$, $y_n = 0$ до конечных координат $x_k = x_0$, $y_k = 0$ определяется соотношением

$$t_A = \frac{\pi r_0^2 \omega}{\sqrt{2} eV} m, \quad (1)$$

где r_0 – радиус ВЧ поля, ω и V – частота и амплитуда ВЧ питающего напряжения $u(t) = V \sin(\omega t)$, e и m – заряд и масса анализируемых ионов. Как видно из формулы (1), масс-

селективная сортировка заряженных частиц происходит при постоянных параметрах питающего напряжения. Из свойств линейного ВЧ поля вытекает независимость времени дрейфа ионов одинаковой массы от начальных координат, энергий и углов влета. Это свойство является основой для построения времяпролетного масс-анализатора. Траектории движения заряженных частиц с различными начальными скоростями в линейном ВЧ поле показаны на рисунке 1.

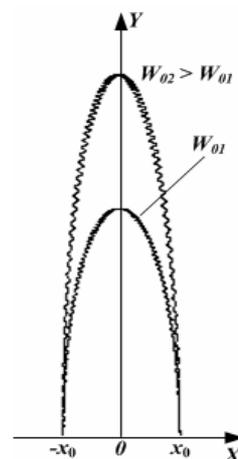


Рисунок 1 – Траектории движения заряженных частиц в линейном ВЧ поле с различными начальными энергиями ввода

Электродные системы для формирования линейного ВЧ поля. В связи с разработкой идеи использования ВЧ поля для времяпролетной сортировки ионов возникла проблема создания электродной системы, формирующей двумерное линейное электрическое поле в рабочей области с произвольными размерами по осям X и Y . Традиционно для этой цели использовали системы с электродами гиперболического сечения, однако в этом случае выполнение условия $Y_0 \gg 2X_0$, обеспечивающего эффективное разделение заряженных частиц, затруднительно (рисунок 2, система 1). Для этих целей предлагается исполь-

зовать масс-анализатор, состоящий из плоских электродов с дискретно-линейным распределением ВЧ потенциала (рисунок 2, система 2) [5]. Геометрический параметр r_0 дискретной электродной системы определяется соотношением

$$r_0 = \sqrt{2X_0Y_0}, \quad (2)$$

где X_0 и Y_0 – размеры рабочей области анализа-

тора. Использование плоских дискретных электродов для задания линейного ВЧ поля кроме улучшения массогабаритных параметров анализатора позволит упростить технологию изготовления прибора и уменьшить влияние краевых полей, возникающих из-за ограниченных размерах гиперболических электродов.

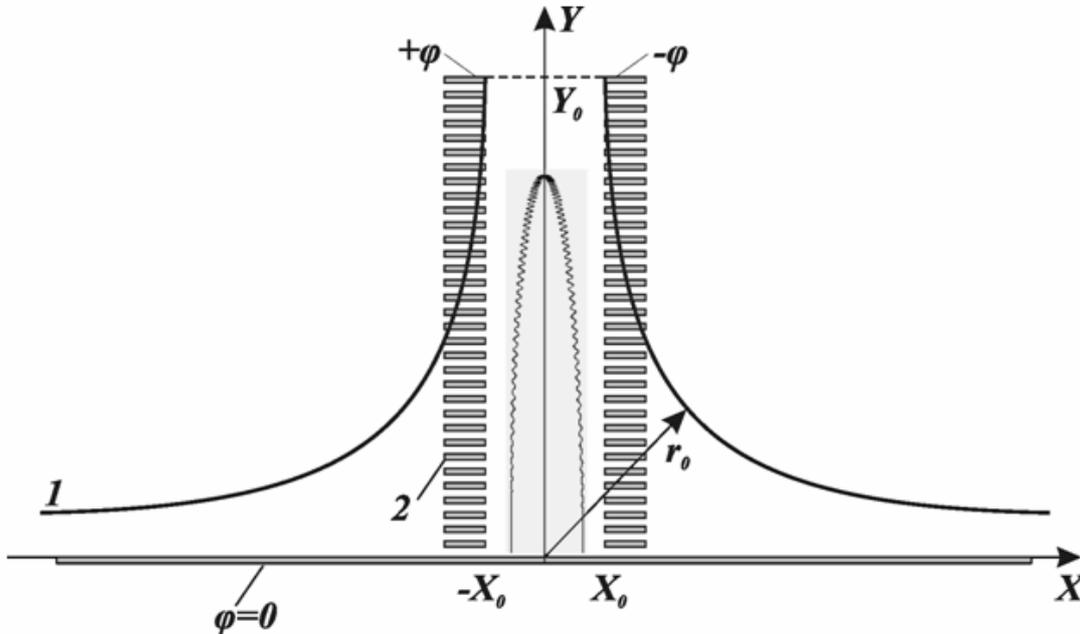


Рисунок 2 – Системы для формирования двумерного линейного ВЧ поля: 1 – с гиперболическими электродами, 2 – с плоскими электродами с дискретным распределением ВЧ потенциала

Практически реализовать дискретное линейное распределение ВЧ потенциала на плоских электродах можно с помощью емкостного или индуктивного делителя напряжения (рисунок 3).

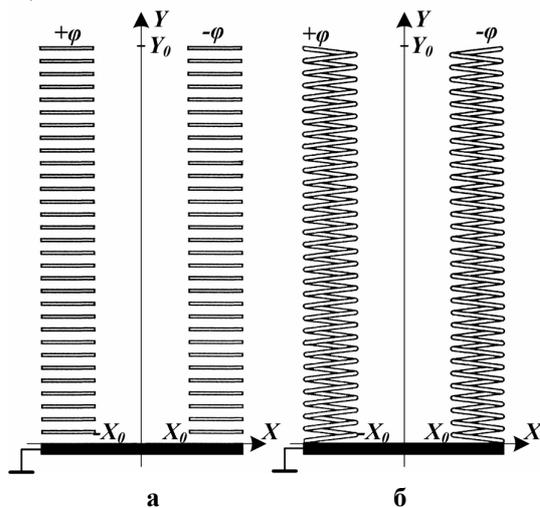


Рисунок 3 – Практическая реализация электродных систем с дискретным линейным распределением ВЧ потенциала: а – емкостный делитель ВЧ напряжения, б – индуктивный делитель ВЧ напряжения

Структурная схема масс-спектрометра. На основе результатов теоретических исследований была создана компьютерная модель масс-спектрометра и разработана структурная схема экспериментального радиочастотного времяпролетного масс-спектрометра (рисунок 4).

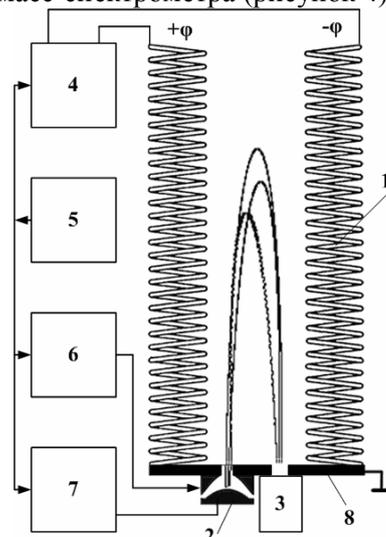


Рисунок 4 – Структурная схема времяпролетного масс-спектрометра с линейным ВЧ полем: 1 – анализатор, выполненный в виде индуктивного делителя ВЧ потенциала; 2 – импульсный источник ионов; 3 – детектор и устройство регистрации;

4 – генератор ВЧ напряжения для электродной системы анализатора; 5 – устройство управления; 6, 7 – источник электронов и генератор ускоряющих импульсов для источника ионов; 8 – заземленный электрод анализатора

Важным элементом прибора является импульсный источник ионов 2, формирующий пакет заряженных частиц с малым разбросом времени влета в масс-анализатор 1. Он выполнен на основе двумерной гиперболической электродной системы. Использование двумерного линейного поля для ускорения ионов позволяет исключить влияние разброса начальных координат ионов на время влета в анализатор. Некоторый разброс по энергиям из-за тепловых скоростей ионов для радиочастотного времяпролетного анализатора не является проблемой, так как линейное ВЧ поле обладает свойством временной фокусировки заряженных частиц с различными начальными скоростями. Параметры ионного пакета регулируются амплитудой и длительностью ускоряющего импульса, поступающего от генератора 7.

Работа радиочастотного времяпролетного масс-спектрометра происходит следующим образом. От генератора 4 на электродную систему масс-анализатора 1 подаются два противофазных ВЧ напряжения с постоянными амплитудой V и частотой f , которые формируют в рабочей области двумерное линейное ВЧ поле. В источнике электронным ударом формируются ионы с различными начальными координатами и малыми тепловыми скоростями. Под действием короткого импульса на электроде 2 ионы ускоряются и вводятся через входную диафрагму в масс-анализатор. В рабочей области анализатора происходит масс-селективная сортировка ионов по времени пролета под действием линейного ВЧ поля. Распределенные по времени ионы различных масс через выходное отверстие в заземленном электроде анализатора поступают на детектор и устройство регистрации. За один цикл анализируется весь диапазон масс от m_{\min} до m_{\max} . Развертка масс оказывается линейной и осуществляется при постоянных параметрах ВЧ питания.

Разработан и исследован экспериментальный радиочастотный времяпролетный масс-спектрометр с параметрами $X_0 = 17$ мм, $Y_0 = 220$ мм. Экспериментально подтверждены:

1. Возможность времяпролетного масс-анализа заряженных частиц в двумерном линейном ВЧ поле.

2. Возможность формирования двумерного линейного ВЧ поля с помощью плоских электродов с дискретным линейным распределением ВЧ потенциала.

3. Основные аналитические соотношения для времени пролета t_A , амплитуды колебания заряженных частиц y_m , максимальной скорости и энергии ввода ионов.

Заключение. В данной работе рассмотрена возможность создания масс-спектрометра, представляющего собой сочетание времяпролетного и квадрупольного масс-анализаторов. В основе прибора лежит идея времяпролетной сортировки заряженных частиц в линейном ВЧ электрическом поле. Показан способ формирования линейного ВЧ поля с помощью системы плоских дискретных электродов, которая позволяет уменьшить массогабаритные параметры анализатора, упростить технологию изготовления и снизить влияние краевых эффектов. В отличие от масс-анализаторов квадрупольного типа разделение ионов происходит при постоянных параметрах ВЧ напряжения, что упрощает систему питания прибора. Таким образом, свойство пространственно-временной фокусировки ионов в линейном высокочастотном электрическом поле позволяет создать прибор для высокоскоростного анализа веществ. Использование современных технологий нанесения проводящих покрытий на диэлектрическую основу и компактных откачных систем позволит создать базовый прибор с высокими эксплуатационными и аналитическими параметрами.

Библиографический список

1. Артеменко К.А. Времяпролетная масс-спектрометрия: преимущества для рутинного анализа. // Тезисы докладов II Всероссийской конференции «Масс-спектрометрия и ее прикладные проблемы». – Москва, 2007.
2. Семин Н.Д., Пянов И.В., Воронов К.Е., Попельников Р.А. Перспективы развития времяпролетных масс-спектрометров для анализа газовых и пылевых частиц. // Прикладная физика, 2002, №2. – С. 124-141.
3. Слободенюк Г.И. Квадрупольные масс-спектрометры. – М.: Атомиздат, 1974. – 265 с.
4. Мамонтов Е.В., Гуров В.С., Филиппов И.В., Дятлов Р.Н. Времяпролетное разделение ионов по удельному заряду в высокочастотных полях с квадратичным распределением потенциала. // Журнал технической физики, 2007, том 77, вып. 7. – С. 139-142
5. Мамонтов Е.В., Гуров В.С., Филиппов И.В., Дятлов Р.Н. Способ разделения заряженных частиц по удельному заряду и устройство для его осуществления. / Решение о выдаче патента на изобретение по заявке №2005124794/28(027878) от 10.10.2006
6. Гуров В.С., Мамонтов Е.В., Дягилев А.А. Электродные системы с дискретным линейным распределением высокочастотного потенциала для масс-анализаторов заряженных частиц. // Масс-спектрометрия, 2007, № 4 (2). – С. 139-142.