

УДК 621.384.83

Е.В. Мамонтов, И.В. Филиппов, А.А. Дягилев

## ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК ИОНОВ ДЛЯ РАДИОЧАСТОТНОГО ВРЕМЯПРОЛЕТНОГО МАСС-АНАЛИЗАТОРА

Рассматривается простая конструкция импульсного источника ионов для радиочастотного времяпролетного масс-спектрометра. Электродная система источника состоит из двух гиперболических электродов, создающих электрическое поле с квадратичным распределением потенциала, благодаря чему достигается временная фокусировка ионного пакета. Приводятся результаты компьютерного моделирования источника ионов, описываются параметры ионного пакета.

**Введение.** Источники ионов для статических времяпролетных масс-спектрометров должны обеспечивать моноэнергетичность и одновременность ввода заряженных частиц в масс-анализатор. Это требование в значительной степени усложняет их конструкции, способы питания и управления [1]. В радиочастотных времяпролетных масс-анализаторах используется линейное по координатам  $x$  и  $y$  высокочастотное (ВЧ) электрическое поле, обладающее свойством фокусировки заряженных частиц по энергиям. При этом допускается значительный разброс вводимых заряженных частиц по энергиям [2]. Целью работы является исследование импульсного источника ионов для времяпролетных масс-анализаторов с двумерным линейным электрическим ВЧ полем.

**Устройство источника ионов.** Схема импульсного источника ионов для радиочастотного времяпролетного масс-спектрометра представлена на рисунке 1. Источник ионов состоит из двух гиперболических электродов 1 и 2 с минимальными расстояниями  $r_1$  и  $r_2$  от оси  $Z$ . В центральной части электрода 2 в направлении оси  $Z$  имеется узкая щель шириной  $\Delta x \ll D$  для вывода ионов из источника. Параметры электродной системы  $r_1$  и  $r_2$  определяются исходя из геометрических размеров радиочастотного времяпролетного масс-анализатора и режима его ВЧ питания, а размеры  $L$  и  $D$  – из требований точности распределения потенциала в рабочей области источника ионов. Гиперболические электроды формируют в рабочем объеме источника ионов поле с двумерным квадратичным распределением потенциала.

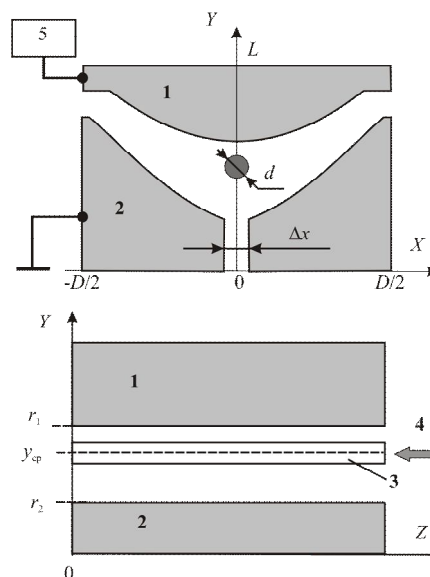


Рисунок 1 – Схема импульсного источника ионов для времяпролетного масс-спектрометра:

- 1, 2 – электроды гиперболического сечения,
- 3 – область образования ионов,
- 4 – ионизирующий электронный поток,
- 5 – генератор ускоряющих импульсов

Область образования ионов 3 имеет форму цилиндра диаметром  $d$  с координатами центра  $x = 0$ ,  $y = y_{cp} \approx (0.8 \div 0.9)r_1$ . Диаметр области образования ионов определяется исходя из требуемой чувствительности масс-спектрометра и допустимого разброса вводимых ионов по энергиям и углам влета. Электрод 2 источника ионов заземляется, а на электрод 1 от генератора 5 подается ускоряющий импульс положительной полярности длительностью  $t_y$  и амплитудой  $U_y$ . Ионы в рабочей области источника образуются под действием ионизирующего электронного потока 4.

Электрическое поле с двумерным квадратичным распределением потенциала обладает свойством независимости движения заряженных частиц

по координатам  $x$  и  $y$ . Из этого следует, что заряженные частицы одинаковой массы  $m$ , образованные с различными начальными координатами  $x_0$  и  $y_0$  и малыми тепловыми начальными скоростями  $v_T$ , при движении в двумерном линейном электрическом поле достигают плоскости  $y=0$  за одинаковое время ввода  $t_B$ . Таким образом, электрическое поле с квадратичным распределением потенциала осуществляет временную фокусировку ионов в плоскости  $y=0$ . В результате на входе анализатора формируется импульсный пакет ионов с малым разбросом по времени ввода, что является условием получения высокой разрешающей способности времяпролетных масс-спектрометров.

Цикл формирования импульсного пакета ионов включает процесс ионизации длительностью  $t_{и}$ , этап ускорения длительностью  $t_y$  и этап дрейфа длительностью  $t_{др}$ . В течение интервала  $t_{и}$  в области ионизации 3 образуются заряженные частицы с малыми тепловыми скоростями  $v_T$  и начальными координатами  $y_{ср} - d/2 < y_0 < y_{ср} + d/2$ ,  $-d/2 < x_0 < d/2$ , где  $d \ll y_{ср}$ . Далее, под действием импульса положительной полярности длительностью  $t_y$ , подаваемого на электрод 1, ионы ускоряются в направлении плоскости  $y=0$ . В результате ионы приобретают скорости, пропорциональные их начальным координатам  $y_0$  и обратно пропорциональные массам  $m$  (осуществляется ввод ионов с постоянным импульсом). В течение интервала  $t_{др}$  ионы движутся с постоянными скоростями, причем ионы одной и той же массы  $m$  достигают плоскости  $y=0$  в один и тот же момент времени.

**Результаты моделирования.** С помощью компьютерного моделирования исследовалось влияние параметров ионизирующих и ускоряющих импульсов на длительность пакетов ионов одинаковой массы на входе времяпролетного масс-анализатора. В качестве источника ионов использовалась система из двух гиперболических электродов с параметрами  $L = 33$  мм,  $D = 20$  мм,  $\Delta x = 4$  мм (рисунок 2).

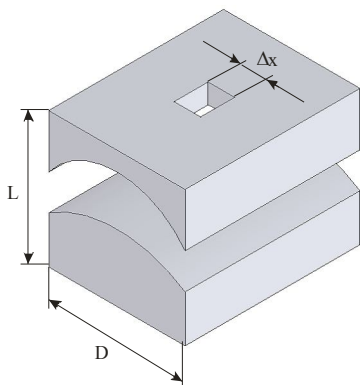


Рисунок 2 – Источник ионов с гиперболическими электродами  $L = 33$  мм,  $D = 20$  мм,  $\Delta x = 4$  мм

Результаты моделирования, представленные в таблицах 1–2 и на рисунках 3–5, показывают изменение длительности ионного пакета и средней энергии ионов в зависимости от длительности импульсов ионизации и ускоряющих импульсов при различных амплитудах ускоряющего напряжения. Из таблиц 1–2 видно, что параметры ионного пакета слабо зависят от длительности ионизирующего импульса и в основном определяются амплитудой и длительностью ускоряющего импульса.

Таблица 1 – Длительность ионного пакета, мкс

$U_y, \text{В}$	$t_{и}, \text{мкс}$ / $t_y, \text{мкс}$	$t_{и}, \text{мкс}$				
		0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
50	0.3	4.120	4.128	4.136	4.144	4.152
	0.5	1.492	1.498	1.503	1.509	1.514
	0.7	0.797	0.801	0.805	0.810	0.814
	0.9	0.508	0.511	0.515	0.518	0.523
70	0.3	2.074	2.082	2.089	2.096	2.104
	0.5	0.785	0.789	0.793	0.798	0.804
	0.7	0.427	0.430	0.434	0.438	0.442
	0.9	0.276	0.279	0.282	0.285	0.288
90	0.3	1.271	1.276	1.281	1.286	1.294
	0.5	0.490	0.493	0.497	0.502	0.507
	0.7	0.271	0.274	0.277	0.280	0.283
	0.9	0.177	0.179	0.182	0.184	0.186

Графики на рисунках 3 и 4 показывают изменение длительности импульсного пакета ионов и средней энергии ионов в пакете в зависимости от длительности ускоряющего импульса при различной амплитуде ускоряющего напряжения.

С увеличением длительности ускоряющего импульса длительность ионного пакета сокращается, но при этом энергия ионов увеличивается. К тому же результату приводит увеличение ускоряющего напряжения.

Таблица 2 – Энергия ионов в пакете, эВ

$U_y, \text{В}$	$t_{и}, \text{мкс}$ / $t_y, \text{мкс}$	$t_{и}, \text{мкс}$				
		0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
50	0.3	4.120	4.128	4.136	4.144	4.152
	0.5	1.492	1.498	1.503	1.509	1.514
	0.7	0.797	0.801	0.805	0.810	0.814
	0.9	0.508	0.511	0.515	0.518	0.523
70	0.3	2.074	2.082	2.089	2.096	2.104
	0.5	0.785	0.789	0.793	0.798	0.804
	0.7	0.427	0.430	0.434	0.438	0.442
	0.9	0.276	0.279	0.282	0.285	0.288
90	0.3	1.271	1.276	1.281	1.286	1.294
	0.5	0.490	0.493	0.497	0.502	0.507
	0.7	0.271	0.274	0.277	0.280	0.283
	0.9	0.177	0.179	0.182	0.184	0.186

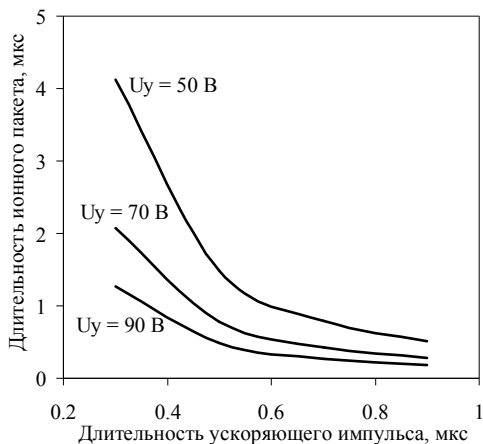


Рисунок 3 – Зависимость длительности ионного пакета от продолжительности ускоряющего импульса при  $t_{и} = 0.1 \text{ мкс}$

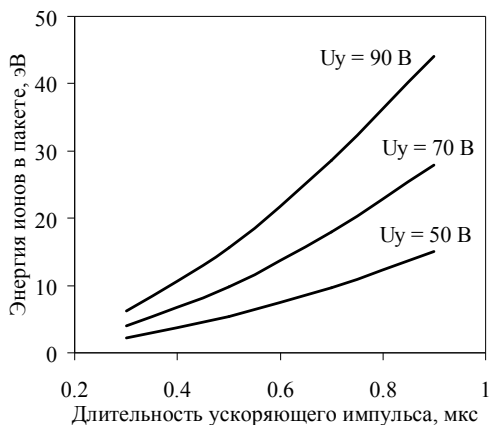


Рисунок 4 – Зависимость энергии ионов в пакете от длительности ускоряющего импульса при  $t_{и} = 0.1 \text{ мкс}$

Сформированный источником ионный пакет вводится в радиочастотный времяпролетный масс-спектрометр, в котором под действием линейного ВЧ поля происходит пространственно-временная фокусировка ионов и их масс-селективное разделение по времени пролета. В этом случае разрешающая способность в основном определяется длительностью ионного пакета на входе масс-анализатора. Для получения разрешающей способности  $R > 10^2$  для ионов с  $m = 100 \text{ а.е.м.}$  необходимо, чтобы длительность ионного пакета на входе в анализатор была меньше 1 мкс.

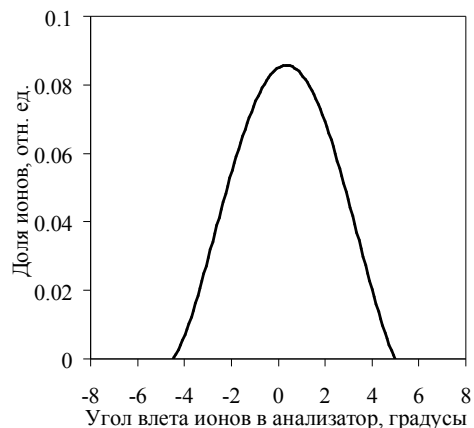


Рисунок 5 – Распределение ионов по углам влета в анализатор

Параметры радиочастотного времяпролетного масс-спектрометра также во многом зависят от угла влета ионов в анализатор. По результатам моделирования построено распределение ионов по углам влета в анализатор (рисунок 5).

**Заключение.** В течение времени ионизации частицы за счет начальных тепловых скоростей разлетаются в пространстве и таким образом приобретают разброс по координатам. При подаче ускоряющего импульса на электрод 2 в источнике формируется электрическое поле с квадратичным распределением потенциала, которое осуществляет на выходе временную фокусировку ионов. Таким образом, предлагаемая конструкция источника ионов для радиочастотного масс-анализатора обеспечивает временную фокусировку ионов с различными начальными координатами и малыми тепловыми скоростями, недостижимую в традиционных конструкциях источников ионов.

#### Библиографический список

1. Семнин Н.Д., Пиянов 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.
2. 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