

На правах рукописи



Грачев Евгений Юрьевич

**РАЗРАБОТКА ИОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПЛАНАРНЫМИ
ДИСКРЕТНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ ДЛЯ ВРЕМЯПРОЛЕТНЫХ
МАСС-АНАЛИЗАТОРОВ ИОНОВ**

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2013

Работа выполнена на кафедре «Промышленная электроника» ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Научный руководитель: д-р физ.-мат. наук, профессор
Мамонтов Евгений Васильевич

Официальные оппоненты: Коненков Николай Витальевич, д-р физ.-мат. наук,
профессор, ФГБОУ ВПО «Рязанский
государственный университет имени С.А.
Есенина», профессор
Явор Михаил Игоревич, д-р физ.-мат. наук,
старший научный сотрудник, Институт
аналитического приборостроения РАН, главный
научный сотрудник

Ведущее предприятие: Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
РАН, г. Санкт-Петербург

Защита состоится «22» октября 2013 г. в зале ученого совета, аудитория 235, в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Рязанского государственного радиотехнического университета.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 390005, Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1, ученый совет РГРТУ.

Автореферат разослан «20» сентября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р физ.-мат. наук, профессор



Чиркин М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время существует потребность в масс-спектрометрических приборах, обладающих высокими аналитическими характеристиками, малым временем анализа, имеющих простую конструкцию, малые габариты и невысокую стоимость. Указанным параметрам удовлетворяют радиочастотные времяпролетные масс-спектрометры с линейными электрическими полями (RF TOF MS). Для практической реализации таких приборов необходима разработка ионно-оптических систем (ИОС), позволяющих образовывать ВЧ электрические поля в рабочих областях с различной конфигурацией. С учетом сложного характера движения ионов в ВЧ электрических полях актуальной также является задача углубленного изучения механизмов их времяпролетного масс-разделения и оценки факторов, влияющих на характеристики RF TOF MS.

Цель работы и задачи исследований

Целью работы является исследование структуры колебаний и характеристик времяпролетного масс-разделения ионов в высокочастотных электрических полях и разработка ионно-оптических систем с планарными дискретными электродами для радиочастотных времяпролетных масс-спектрометров.

Поставленные цели достигаются решением ряда задач:

- изучение спектров колебаний ионов в высокочастотных электрических полях с параметрами Матье $a = 0$ и $q \ll 1$;
- получение аналитических зависимостей, учитывающих влияние начальных параметров заряженных частиц на шкалу масс и разрешающую способность времяпролетных радиочастотных масс-анализаторов ионов;
- разработка ионно-оптических систем с протяженными вдоль оси дрейфа ионов двумерными ВЧ электрическими полями;
- разработка методов проектирования ионно-оптических систем с планарными дискретными электродами;
- разработка экспериментального времяпролетного радиочастотного масс-анализатора ионов с планарными дискретными электродами.

Научная новизна результатов работы

В диссертационной работе получен ряд новых результатов, которые следует учитывать при разработке ионно-оптических систем времяпролетных масс-спектрометров:

- численным моделированием возвратных колебаний ионов в линейных ВЧ электрических полях с параметрами Маттье $a = 0$, $q \ll 1$ показано, что колебания ионов могут быть представлены комбинацией из трех компонент: основной низкочастотной и двух высокочастотных;

- установлено, что наличие ВЧ компонент придает колебательный характер линейной шкале масс. В радиочастотных времяпролетных масс-анализаторах монопольного типа величина колебаний обратно пропорциональна массе ионов и не зависит от их начальных параметров. В масс-анализаторах дипольного типа амплитуда колебаний не зависит от массы и углов влета ионов, а при увеличении их энергии ввода и уменьшении начальной координаты уменьшается;

- для разработки ионно-оптических систем с планарными дискретными электродами предложен метод проектирования, использующий понятие «среднего потенциала» элементов электрода;

- для времяпролетных масс-спектрометров с линейными ВЧ электрическими полями предложены и разработаны варианты ионно-оптических систем с планарными многоэлементными электродами с переменной прозрачностью.

Достоверность научных выводов

Достоверность научных выводов работы подтверждается сопоставлением результатов аналитических расчетов с результатами моделирования, оценкой точности используемых численных методов моделирования, использованием при расчетах известных положений фундаментальных наук.

Практическая значимость

- Получены выражения, позволяющие оценить влияние начальных параметров ионов на величину отклонения шкалы масс для времяпролетных анализаторов монопольного и дипольного типов. Установлено, что амплитуда колебаний минимальна при оптимальной фазе ввода ионов в анализатор $\varphi_{0opt} = 3\pi/2$.

- Показано, что применение ионно-оптических систем из планарных дискретных электродов с переменной прозрачностью позволяет уменьшить габариты анализатора (по сравнению с дипольной системой) при малой ($\delta_\phi < 10^{-4}$) нелинейности распределения потенциала.

- Разработана ионно-оптическая система, состоящая из планарного дискретного электрода с постоянной прозрачностью и гиперболического электрода, которая имеет более простую и технологичную конструкцию и позволяет формировать двумерные линейные электрические поля с относительной погрешностью не хуже $\delta_\phi < 2 \cdot 10^{-4}$.

- С помощью программного обеспечения SolidWorks разработана и оптимизирована конструкция масс-анализатора с ионно-оптической системой из «гибридных» электродов.

- Разработан и изготовлен экспериментальный радиочастотный времяпролетный масс-анализатор ионов.

Реализация результатов работы

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении НИОКР «Разработка опытного образца радиочастотного времяпролетного масс-анализатора ионов» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, НИР «Разработка теории и методов масс-разделения ионов по времени пролета в линейных высокочастотных полях для высокоскоростных приборов микроанализа состава и структуры вещества» при поддержке гранта РФФИ (№ 10-02-97500), Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в учебном процессе РГРТУ по курсам «Физические основы технологии производства приборов промышленной электроники», «САПР устройств электроники».

Научные положения и результаты, выносимые на защиту

1. В радиочастотных времяпролетных масс-анализаторах ионов монопольного и дипольного типов зависимость отклонения шкалы масс от линейной имеет характер, близкий к гармоническому. В масс-анализаторах монопольного типа амплитуда отклонений обратно пропорциональна массе ионов и не зависит от их начальных параметров x_0 , v_{0x} , v_{0y} , а в масс-

анализаторах дипольного типа амплитуда отклонений не зависит от массы ионов и является функцией начальных параметров $\Delta t_{\text{д max}} \sim x_0 / (v_{0y} + \beta v_{0x})$.

2. Для образования двумерных линейных электрических полей планарными многоэлементными электродами применима концепция «средних потенциалов» их элементов. В дальней зоне электрические поля, образуемые планарными дискретными электродами из элементов с различной геометрией и одинаковыми размерами, совпадают с погрешностью не хуже 10^{-3} при условии равенства их «средних потенциалов».

3. Ионно-оптические системы из комбинации гиперболических и планарных многоэлементных электродов с шагом дискретности $\Delta y < 0,015 y_a$ позволяют образовывать электрические поля с относительной погрешностью не хуже $2 \cdot 10^{-4}$ при размерах электродных систем по оси X в 2-3 раза меньших по сравнению с системами из гиперболических электродов.

Апробация работы

Результаты работы докладывались в рамках X Всероссийского семинара «Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики», Москва, 2011; на V-м съезде ВМСО в рамках IV Всероссийской конференции с международным участием «Масс-спектрометрия и ее прикладные проблемы», Москва, 2011; на международной конференции «19th International Mass Spectrometry Conference», Kyoto, Japan, 2012.

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликовано 14 печатных работ, из них 6 работ в ведущих рецензируемых журналах и изданиях (6 статей в изданиях, определенных ВАК Минобрнауки РФ), 6 работ – в материалах российских и международных научно-технических конференций. Две работы опубликованы в изданиях, входящих в список базы данных Journal Citation Reports (Web of Science). Получены один патент на изобретение и одно решение о выдаче патента на изобретение.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, содержит 146 страниц основного текста, иллюстрированных 70 рисунками, библиографический список, состоящий из 86 наименований источников на 9 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и решаемые задачи, показаны научная новизна и практическая значимость работы, приведены научные положения и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе («Тенденции развития времяпролетных масс-спектрометров») проведен краткий обзор времяпролетных масс-спектрометров с различными типами ионно-оптических систем со статическими и радиочастотными полями. Основным недостатком времяпролетных масс-спектрометров со статическими полями является узкий энергетический диапазон анализируемых частиц, ограничивающий их разрешение и динамический диапазон. По результатам анализа существующих работ был сделан вывод о целесообразности применения для решения указанной проблемы масс-анализаторов с линейными ВЧ полями. Обоснована необходимость оценки их характеристик с учетом ВЧ составляющих колебаний ионов. Показано, что для создания ИОС анализаторов с линейными ВЧ полями целесообразно использовать системы с планарными многоэлементными электродами [1].

Во второй главе («Шкала масс и разрешающая способность радиочастотных времяпролетных масс-анализаторов ионов») приведены результаты исследования спектрального состава колебаний ионов в радиочастотных масс-анализаторах монопольного и дипольного типов. Получены аналитические выражения, описывающие возвратное движение ионов в линейных ВЧ электрических полях анализаторов обоих типов с учетом низкочастотных и высокочастотных компонент колебаний [2]. Наличие высокочастотных составляющих колебаний ионов является причиной отклонения шкалы масс от линейной. Структура колебаний ионов и влияние их начальных параметров на шкалу масс и разрешение масс-анализатора исследовались численными методами путем построения траекторий движения ионов в ионно-оптических системах монопольного и дипольного типов. Без учета ВЧ компонент траекторий движения ионов шкала масс в обоих случаях описывается выражением:

$$t_{\partial p} \approx \frac{2\pi}{\beta\omega} \approx \frac{\pi r_0^2 \omega}{\sqrt{2} eV} m. \quad (1)$$

Отклонение шкалы масс от (1) для RF TOF MS монопольного типа учитывается поправкой:

$$\Delta t_M \approx \frac{4eV}{\omega^3 r_0^2 m} \sin\left(\frac{2\pi}{\beta} + \frac{\varphi_0}{2}\right). \quad (2)$$

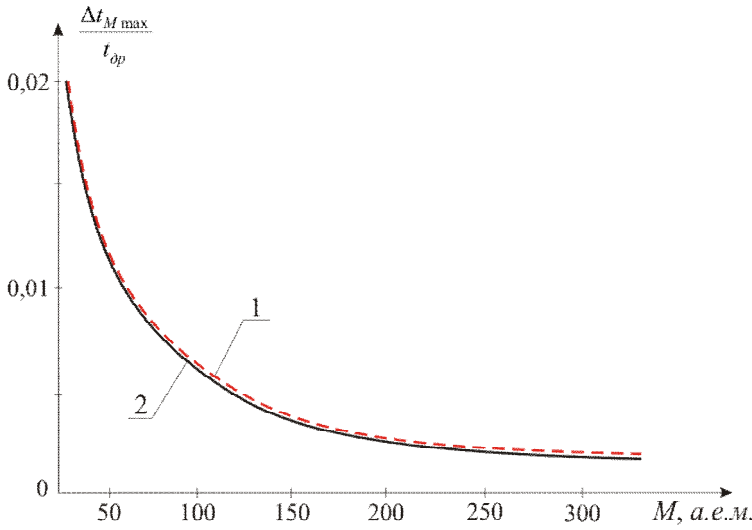


Рисунок 1 – Нормированные зависимости амплитуды отклонения шкалы масс от линейной: 1 – рассчитанной по формуле (2), 2 – численное моделирование

Из (2) с учетом значения параметра $\beta = 4eV / \sqrt{2} m \omega^2 r_0^2$ следует, что амплитуда отклонений обратно пропорциональна массе $\Delta t_{M \max} \sim 1/M$ и не зависит от начальных параметров ионов x_0, v_{0x}, v_{0y} [3].

На рисунке 1 приведены результаты моделирования и расчетов по формуле (2) в виде нормированных зависимостей амплитуды отклонения шкалы масс времяпролетного анализатора

монопольного типа. Результаты расчетов и численного моделирования совпадают с погрешностью не более 5 %.

В случае анализатора дипольного типа колебания ионов вдоль осей X и Y оказываются связанными. При этом отклонения шкалы масс от (1) для RF TOF MS дипольного типа учитываются поправкой:

$$\Delta t_D \approx \frac{\beta}{\sqrt{2}} \cdot \frac{x_0}{v_{0y} + \beta v_{0x}} \left(\cos \varphi_0 - \cos \frac{2\pi}{\beta} \right). \quad (3)$$

Из (3) для амплитуды отклонения шкалы масс получаем:

$$\Delta t_{D \max} \sim \frac{x_0}{v_{0y} + \beta v_{0x}}. \quad (4)$$

Таким образом, в анализаторах дипольного типа амплитуда колебаний шкалы масс является функцией начальных параметров ионов x_0 , v_{0y} и не зависит от их массы.

Для подтверждения справедливости выражения (3) и оценки влияния начальных параметров ионов на величину колебаний шкалы масс времяпролетных анализаторов дипольного типа проведено компьютерное моделирование процесса масс-разделения.

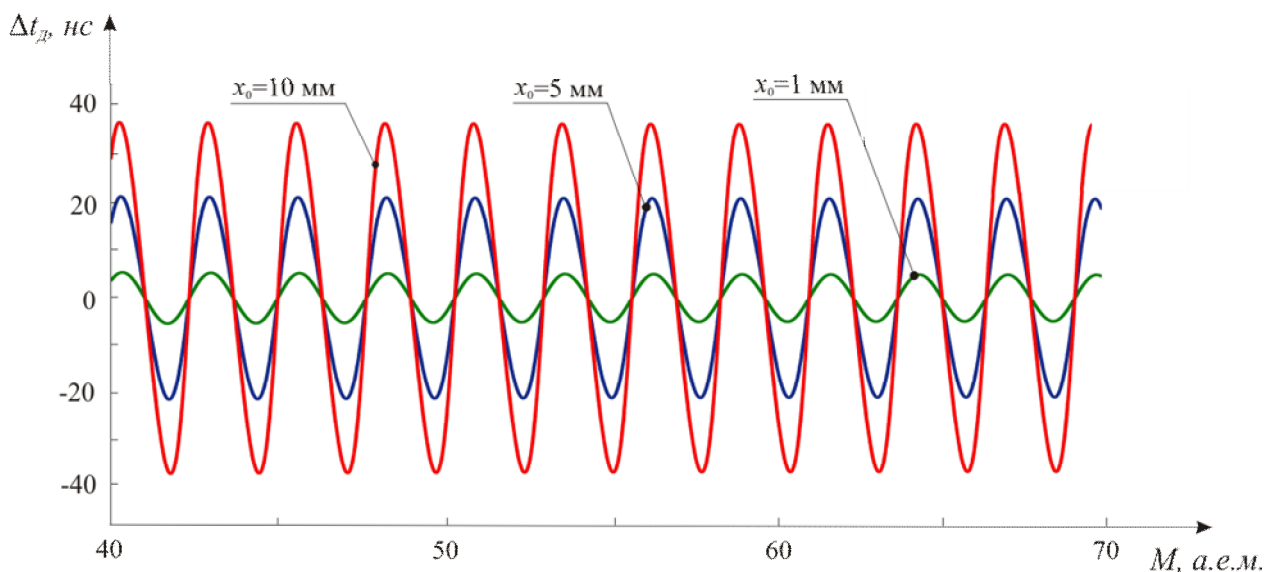


Рисунок 2 – Зависимость величины отклонений шкалы масс в RF TOF MS дипольного типа от массы иона при различных начальных координатах влета.

Результаты моделирования подтверждают линейную зависимость (рисунок 2) амплитуды отклонения $\Delta t_{D\max}$ шкалы масс дипольного анализатора от начальной координаты x_0 и обратно пропорциональную зависимость от начальной скорости v_{0y} . Так как в (3) параметр v_{0x} входит с коэффициентом $\beta \ll 1$, влияние углов влета на шкалу масс дипольного анализатора оказывается незначительным, что также подтверждается результатами моделирования. Шкала масс также зависит от начальной фазы φ_0 ВЧ поля. Минимальные отклонения шкалы масс соответствуют оптимальной фазе $\varphi_0 = 3\pi/2$.

В третьей главе («Планарные электродные системы для времяпролетных радиочастотных масс-анализаторов ионов») приведены результаты исследований ионно-оптических систем с планарными дискретными электродами из элементов различной геометрии. Предложенные в других

работах системы для образования ВЧ электрических полей с дискретно-линейным распределением потенциала на электродах сложны в реализации из-за необходимости создания высокоточных делителей ВЧ напряжения. В данной работе предложены и исследованы ИОС с планарными дискретными электродами, позволяющие решить эту проблему [4, 13]. Возможность создания таких систем вытекает из эквивалентности образования двумерных электрических полей планарными электродами с дискретно-линейным распределением потенциала и планарными электродами с дискретно-линейным распределением «среднего потенциала». Это подтверждается сопоставлением результатов численного моделирования электрических полей заряженной полоски и щели перед потенциальной плоскостью (рисунок 3).

В дальней зоне $x \gg \Delta y$ электрические поля, создаваемые полоской и щелью, различаются не более чем на 0,1 %. Данное утверждение справедливо для планарных элементов шириной Δy с различной геометрией при условии равенства их «средних потенциалов» [5]:

$$\varphi_{cp} = \frac{1}{\Delta y} \int_0^{\Delta y} \varphi_0(y) dy, \quad (5)$$

где $\varphi_0(y)$ – распределение потенциала в плоскости планарного элемента шириной Δy . Из этого следует, что для образования двумерных электрических полей планарными электродами достаточным является условие создания на его границе дискретно-линейного распределения «среднего потенциала». Эта

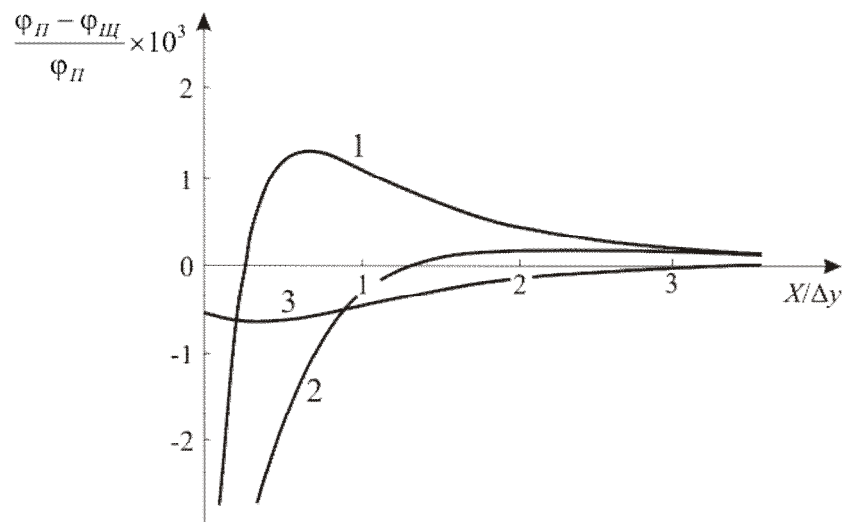


Рисунок 3 – Зависимости отклонения электрических полей, создаваемых щелью и полоской 1,2,3 – в сечениях $y/\Delta y = 0.5, 1, 2$

задача может быть решена с помощью дискретных электродов из множества элементов.

Используя понятие «среднего потенциала» были оптимизированы и исследованы две системы с переменной плотностью распределения элементов. В первом случае ИОС состоит из двух электродов, каждый из которых образован заземленной плоскостью и расположенными перед ней потенциальными нитями (рисунок 4, а) [6, 7]. Изменение величины «среднего потенциала» происходит за счет изменения расстояния между нитями Δy . Задача проектирования таких электродов состоит в нахождении функции распределения координат нитей $y_i = f(i)$ при заданных значениях параметров h , d и числа нитей n [8, 9]. Данный вариант ИОС не во всех случаях обеспечивает требуемый уровень погрешности распределения потенциала, что связано с большим значением шага дискретности Δy в области малых значений координаты y . В качестве компромиссного был предложен вариант электродной системы, состоящей из гиперболических и дискретных электродов (рисунок 4, б) [10].

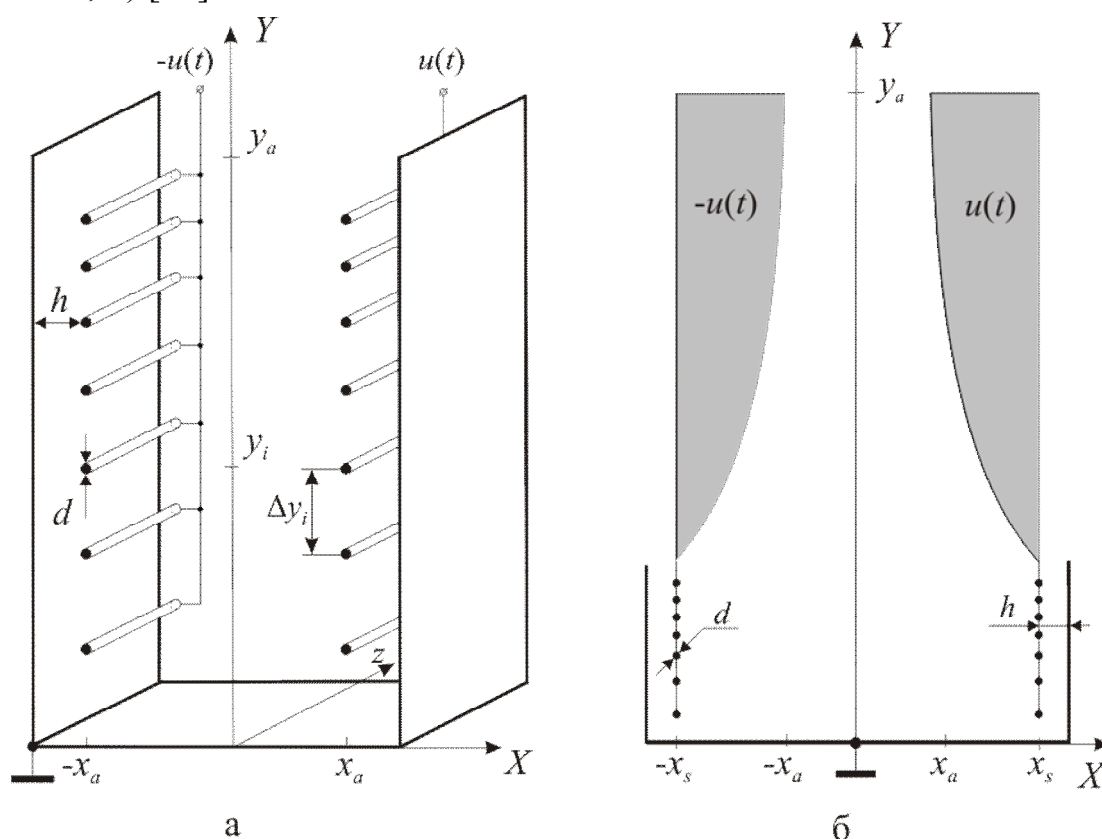


Рисунок 4 – Схемы ИОС: а – из дискретных электродов с переменной плотностью распределения элементов, б – с гиперболическими и дискретными электродами

Как показали исследования, второй вариант ИОС позволяет формировать электрическое поле с погрешностью распределения потенциала не хуже $\delta_\varphi < 1.2 \cdot 10^{-4}$ [11]. ИОС из гиперболических и дискретных электродов целесообразно применять при малых по оси X размерах рабочей области $x_a < 0.02y_a$.

Недостатком рассмотренных выше электродных систем является переменный шаг дискретности, требующий позиционирования нитей с точностью до единиц микрометров. Более совершенной с этой точки зрения является ИОС с «гибридными» электродами (рисунок 5) [12].

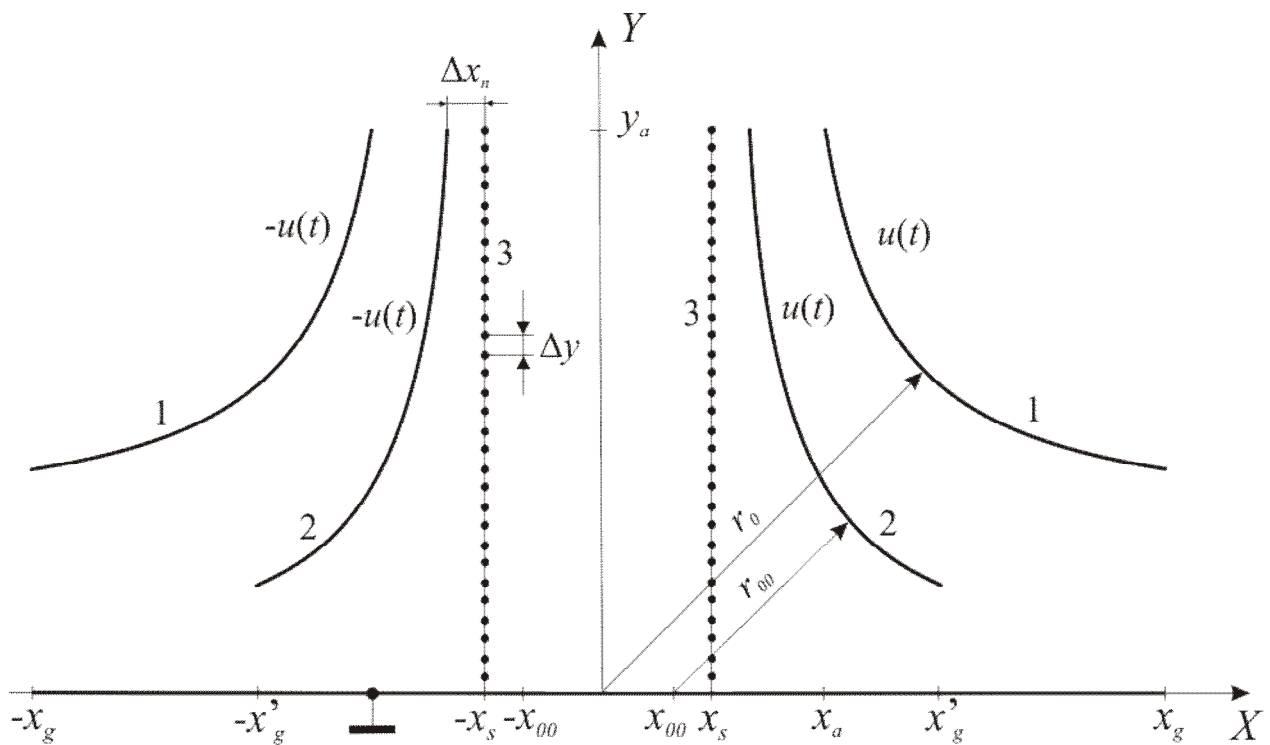


Рисунок 5 – Схема ИОС дипольного типа с гибридными электродами

Гибридный электрод состоит из гиперболического 2 и дискретного 3 электродов. Дискретные электроды расположены в плоскостях $x = \pm x_s$ и состоят из *равномерно* распределенных с шагом Δy металлических нитей диаметром $d \ll \Delta y$. Гиперболические электроды 2 расположены в системах координат, начало которых смещено на величину $\pm x_{00}$. Профиль электродов 2 задается кривой, описываемой уравнением:

$$y = \frac{r_{00}^2}{2(|x| - |x_{00}|)}, \quad (6)$$

где r_{00} – радиус поля гиперболических электродов в смещенных системах координат. Преимущество гибридной ИОС заключается в меньшем в 2-3 раза значении параметра r_{00} гиперболических электродов по сравнению с параметром r_0 электродов 1 в дипольной системе. Это позволяет в 2-3 раза сократить размер системы по оси X при сохранении ее размера по оси Y (вдоль направления дрейфа ионов).

При моделировании ИОС с гибридными электродами решалась задача оптимизации ее параметров Δy , r_{00} по заданным значениям x_a , y_a . На первом этапе определяются параметры r_{00} и Δy . Параметр гиперболического электрода r_{00} выбирается минимально возможным для обеспечения заданных размеров системы. Ограничением при уменьшении параметра r_{00} является минимальное расстояние Δx_n между гиперболическим электродом и нитями, обеспечивающее электрическую прочность ИОС. Шаг дискретности Δy выбирается с учетом требуемой точности поля. В процессе оптимизации находится значение $x_{S_{opt}}$, соответствующее минимуму отклонения распределения потенциала в рабочей области масс-анализатора от линейного. По известным x_a , y_a и Δy рассчитывается положение гиперболического электрода x_{00} :

$$x_{00} = \frac{\Phi_{0cp}}{\Phi_0 - \Phi_{0cp}} \Delta x_n + x_S, \quad (7)$$

$$\Delta x_n = \frac{2\Delta y^{3/2}}{3\pi} \left(\frac{k_0 \Phi_0}{\Phi_{0cp}} - 1 \right).$$

Здесь $\Phi_{0cp} = x_S \cdot \Phi_0 / x_a$ – средний потенциал последнего n -го элемента дискретного электрода, $k_0 = 1 - d / \Delta y$ – коэффициент прозрачности дискретного электрода. По разработанной методике оптимизирована ИОС с параметрами $x_S = 20$ мм, $y_a = 200$ мм, $r_0 = 89.4$ мм, $r_{00} = 34.6$ мм, $\Delta y = 3.05$ мм, $x_{00} = 18.707$ мм, $\Delta x_n = 1.707$ мм. Погрешность распределения потенциала в рабочей области ИОС с указанными параметрами составила $\delta_\Phi < 2 \cdot 10^{-4}$.

В четвертой главе («Радиочастотный времяпролетный масс-анализатор ионов с несимметричной электродной системой») был разработан вариант

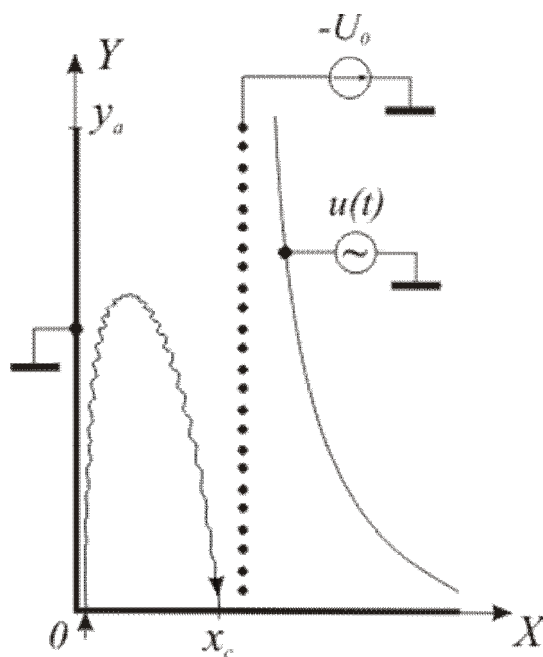


Рисунок 6 – Схема электродной системы RF TOF MS на основе несимметричной ИОС с однофазным ВЧ питанием

времяпролетного масс-анализатора дипольного типа на основе ИОС с несимметричной электродной системой (рисунок 6) [14].

Для реализации режима времяпролетного масс-разделения в таком масс-анализаторе необходимо траектории ионов во время возвратного дрейфа сместить по оси X в сторону больших значений координаты x . Это осуществляется под действием однородного вдоль оси X статического электрического поля, для создания которого на все элементы дискретного электрода подается отрицательное напряжение $-U_0$. С использованием

понятия псевдопотенциала получено выражение для секулярных колебаний ионов по оси X в суперпозиции ВЧ линейного и статического однородного полей:

$$x(t) = (x_0 - x_c) \cos \Omega t + x_c, \quad (8)$$

где $x_c = r_0^2 U_0 / x_a U_{II}$, $U_{II} = eV^2 / m\omega^2 r_0^2$ – псевдопотенциал ВЧ поля. Из (8) следует, что величина смещения $\Delta x = x_c - x_0$ пропорциональна напряжению U_0 и массе ионов m . Таким образом, под действием статического поля траектории ионов смещаются по оси X и времяпролетное масс-разделение можно осуществлять в одном квадранте плоскости XOY , что позволяет существенно упростить конструкцию ИОС и в два раза сократить ее габариты.

По схеме несимметричной ИОС (рисунок 6) с гибридным электродом в среде SolidWorks была разработана конструкция и изготовлен экспериментальный образец радиочастотного времяпролетного масс-анализатора ионов (рисунок 7).

Основой конструкции являются нижнее 1 и верхнее 2 основания и опоры 3 и 4. Нижнее основание 1 и плоская опора 3 выполняют функцию заземленного уголкового электрода. Гибридный электрод состоит из

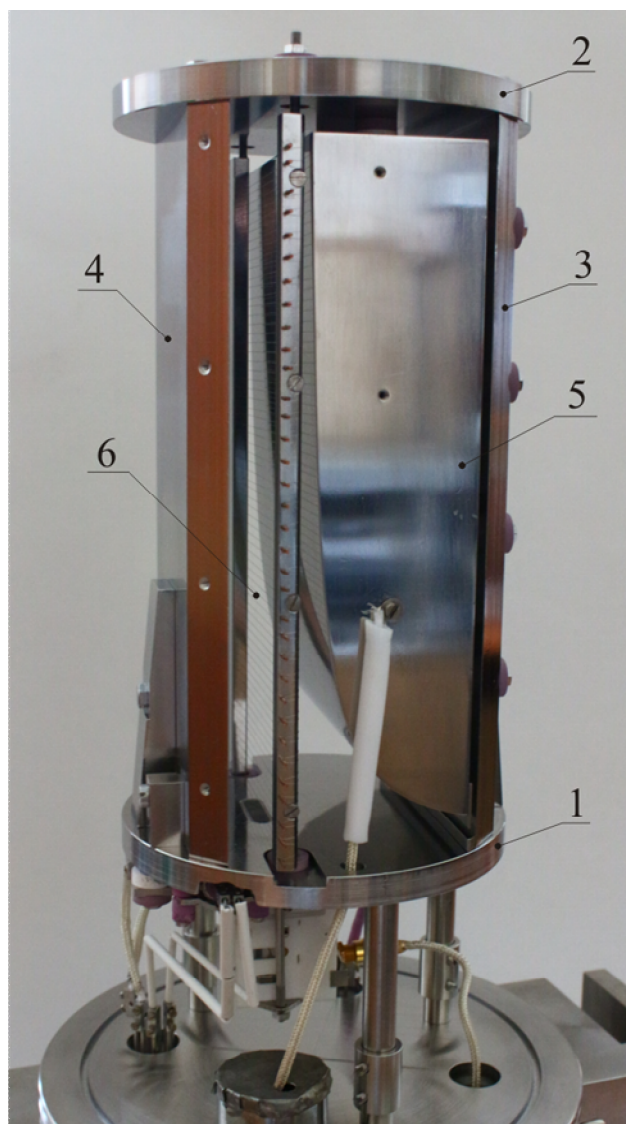


Рисунок 7 – Экспериментальный макет RF TOF MS с несимметричной ионно-оптической системой

гиперболического 5 и расположенного перед ним дискретного 6 электродов. Источник ионов монопольного типа с электронным ударом и вторично-электронный умножитель динодного типа расположены на нижнем основании. Ввод ионов в анализатор осуществляется через узкую щель, а вывод – через полупрозрачное окно. Элементы ИОС изготовлены из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Точность изготовления и сборки ИОС 10 мкм. Питание и управление масс-анализатора осуществляются от блока электроники. Высокочастотное питающее напряжение с амплитудой 1.8 кВ и частотой $f = 1\text{ МГц}$ вырабатывается в генераторе со стабильностью амплитуды $\delta_V = 10^{-4}$ и частоты $\delta_f = 10^{-6}$.

В приложении представлены акты о практическом использовании результатов диссертационной работы, некоторые аналитические выражения, полученные в работе, конструкторская документация на экспериментальный образец радиочастотного времяпролетного масс-анализатора ионов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Определен спектральный состав колебаний ионов в двумерных ВЧ электрических полях с параметром Матье $a = 0$, $q \ll 1$. Установлено, что с погрешностью не более 10^{-3} колебания ионов могут быть представлены одной низкочастотной составляющей с частотой $\Omega_c = \beta\omega/2$ и двумя ВЧ составляющими с частотами $\omega \pm \Omega_c$ и амплитудами $C_{-2} \approx C_2 \approx q/4$.

2. Установлено, что из-за наличия ВЧ компонент колебаний ионов шкала масс радиочастотных времяпролетных масс-анализаторов ионов приобретает колебательный, близкий к гармоническому характер. В радиочастотных времяпролетных масс-анализаторах монопольного типа величина амплитуды отклонений шкалы масс от линейной $\Delta t_{M \max}$ обратно пропорциональна массе ионов и не зависит от начальных параметров ионов x_0 , v_{0x} , v_{0y} . В масс-анализаторах дипольного типа амплитуда отклонений не зависит от масс и является функцией начальных параметров: $\Delta t_{D \max} \sim x_0 / (v_{0x} + \beta v_{0y})$. Наименьшая амплитуда отклонений шкалы масс соответствует оптимальной фазе ввода ионов $\varphi_{opt} = 3\pi/2$.

3. Методами численного моделирования показано, что в дальней зоне ($x \gg \Delta y$) электрические поля, создаваемые элементами планарных дискретных электродов с одинаковым размером Δy и различной геометрией, совпадают с погрешностью не более 10^{-3} при условии равенства их «средних потенциалов».

4. Разработана модель ионно-оптической системы из многоэлементных электродов с дискретно-линейным распределением «среднего потенциала». Модель позволяет формировать двумерные ВЧ электрические поля, протяженные вдоль оси Y . Для системы с параметрами $y_a = 200$ мм, $x_a = 12$ мм относительное отклонение распределения потенциала

от линейного в рабочей области ($|x| < 8$ мм, $0 \leq y \leq 160$ мм) не превышает $\delta_{\varphi} = 1.6 \cdot 10^{-3}$.

5. Разработаны модели ионно-оптических систем из комбинаций гиперболических и планарных дискретных электродов с меньшими в 2-2,5 раза по сравнению с системами из гиперболических электродов размерами по оси X , позволяющие образовывать в протяженных вдоль оси дрейфа ионов областях линейные электрические поля с погрешностью $\delta_{\varphi} = 2 \cdot 10^{-4}$.

ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ СЛЕДУЮЩИЕ РАБОТЫ:

1. Грачев Е.Ю., Мамонтов Е.В. Радиочастотный времяпролетный масс-анализатор вещества (RF-TOF-MS) // Тезисы докладов. Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодежи «Актуальные проблемы развития нано-, микро- и оптоэлектроники». – Рязань, 2010. – С. 145–148.

2. Мамонтов Е.В., Гуров В.С., Дягилев А.А., Грачев Е.Ю. Масс-разделение ионов по времени пролета в радиочастотных двумерных линейных электрических полях // Масс-спектрометрия. – 2011. – Т. 8, – № 3. – С. 195–200.

3. Mamontov E.V., Gurov V.S., Dyagilev A.A., Grachev E.Yu. Time-of-Flight Mass Separation of Ions in Planar Linear Radiofrequency Electric Fields // Journal of Analytical Chemistry. – 2012. – Vol. 67. № 13. – P. 15–20.

4. Мамонтов Е.В., Дягилев А.А., Грачев Е.Ю. Образование двумерных линейных электрических полей системами плоских дискретных эквипотенциальных электродов // Вестник РГРТУ. – 2010. – № 2. Вып. 32. – С. 84–88.

5. Мамонтов Е.В., Гуров В.С., Дягилев А.А., Грачев Е.Ю., Журавлев В.В. Радиочастотные анализаторы для времяпролетного масс-разделения ионов // Вестник РГРТУ. – 2012. – № 1. Вып. 39. – С. 97–103.

6. Мамонтов Е.В., Грачев Е.Ю., Дягилев А.А., Журавлев В.В. Ионно-оптические системы из плоских дискретных электродов с переменной плотностью эквипотенциальных элементов // Вестник РГРТУ. – 2013. – № 1. Вып. 43. – С. 96–101.

7. Пат. 2422939 Российская Федерация, МПК H01J 49/22. Способ образования двумерного линейного электрического поля и устройство для его

осуществления / Мамонтов Е.В., Грачев Е.Ю.; заявитель и патентообладатель Рязанский государственный радиотехнический университет. – № 2009143282/28 ; заявл. 25.11.09 ; опубл. 27.06.11, Бюл. № 18. – 5 с. : ил.

8. Мамонтов Е.В., Грачев Е.Ю., Дягилев А.А. Образование двумерных линейных электрических полей системами плоских дискретных электродов // Тезисы докладов. Четвертая Всероссийская конференция-школа «Фундаментальные основы масс-спектрометрии и ее аналитические применения». – Звенигород, 2010. – С. 29–30.

9. Мамонтов Е.В., Гуров В.С., Дягилев А.А., Грачев Е.Ю. Радиочастотный масс-рефлектор для времяпролетного разделения ионов // Прикладная физика. – 2011. – № 6. – С. 127–132.

10. Мамонтов Е.В., Грачев Е.Ю., Дягилев А.А. Образование двумерных линейных высокочастотных электрических полей для времяпролетного масс-разделения ионов // V съезд ВМСО. IV Всероссийская конференция с международным участием «Масс-спектрометрия и ее прикладные проблемы». – Москва, 2011. – С. 148

11. Грачев Е.Ю., Мамонтов Е.В. Радиочастотный масс-рефлектор с плоскими многоэлементными электродами // Тезисы докладов X Всероссийского семинара «Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики». – Москва, ГНЦ РФ ФГУП «Орион», 2011.

12. **Заявка 2011138617/07 Российская Федерация, МПК H01J 49/00.** Способ образования двумерного линейного электрического поля и устройство для его осуществления / Мамонтов Е.В., Грачев Е.Ю. – № 2011138617/07 ; заявл. 20.09.11 ; опубл. 27.03.13.

13. Dyagilev A.A., Grachev E.Yu., Zhuravlev V.V., Mamontov E.V. Radio Frequency Mass Reflectrons with plane Discrete Electrodes – 19th International Mass Spectrometry Conference. – Japan, Kyoto. – 2012.

14. Mamontov E.V., Dyagilev A.A., Grachev E.Yu., Zhuravlev V.V. Ion-optical systems with planar discrete electrodes for time-of-flight separation mass of ions in radio-frequency linear electric fields // European science and technology: Materials of the IV International research and practice conference. – Germany, Munich. – 2013.

Грачев Евгений Юрьевич

**РАЗРАБОТКА ИОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПЛАНАРНЫМИ
ДИСКРЕТНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ ДЛЯ ВРЕМЯПРОЛЕТНЫХ
МАСС-АНАЛИЗАТОРОВ ИОНОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 18.09.13. Формат бумаги 60 × 84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0

Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.