

На правах рукописи



ДЯГИЛЕВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЯПРОЛЕТНОГО МЕХАНИЗМА  
РАЗДЕЛЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
В ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПОЛЯХ С КВАДРАТИЧНЫМ  
РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПОТЕНЦИАЛА**

Специальность 05.27.02 – Вакуумная и плазменная электроника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рязань 2009

Работа выполнена на кафедре «Промышленная электроника» ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководитель: д-р техн. наук, профессор  
Гуров Виктор Сергеевич

Научный консультант: канд. техн. наук, доцент  
Мамонтов Евгений Васильевич

Официальные оппоненты: д-р физ.-мат. наук, профессор  
Коненков Николай Витальевич

д-р физ.-мат. наук, профессор  
Кристя Владимир Иванович

Ведущее предприятие: Национальный исследовательский ядерный  
университет «МИФИ» г. Москва

Защита состоится «16» февраля 2010 г. в зале ученого совета, аудитория 235, в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 при ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

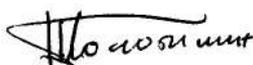
Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 390005, Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Автореферат разослан «28» декабря 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

д-р техн. наук, профессор



Б.И. Колотилин

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы**

Среди известных методов микроанализа состава вещества важное место занимают масс-спектрометрические методы, позволяющие проводить исследование материи во всех агрегатных состояниях. Масс-спектрометрические приборы широко применяются в науке и технике благодаря высокой чувствительности, скорости анализа, возможности исследования многокомпонентных смесей и возможности состыковки с другой аналитической аппаратурой.

В настоящее время существует потребность в универсальных, относительно простых, компактных и в то же время обладающих высокими аналитическими характеристиками масс-спектрометрах.

Поэтому проведение исследований, направленных на создание масс-спектрометрических приборов с новыми свойствами, позволяющими значительно улучшить их аналитические и потребительские характеристики, является важной и актуальной задачей.

Времяпролетные анализаторы в настоящее время широко применяются при анализе вещества благодаря высокой скорости анализа и практически неограниченному диапазону анализируемых масс. Основные проблемы времяпролетных приборов – это чувствительность к энергетическому разбросу ионов и ограниченное разрешение из-за пространственного заряда. Минимизации указанных недостатков посвящено большое количество работ. Известные пути их решения – это использование предложенного Б.А. Мамыриным ионного зеркала и осуществление принципа ортогонального ускорения ионов. В настоящей работе рассматривается возможность решения представленных выше проблем путем разработки времяпролетного механизма разделения ионов по массам в высокочастотных электрических полях с квадратичным распределением потенциала.

### **Цель работы и задачи исследований**

Целью настоящей диссертационной работы являлось создание теоретических и экспериментальных основ для разработки времяпролетных масс-анализаторов ионов на основе сепарирующих свойств высокочастотных полей с квадратичным распределением потенциала.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- углубленное исследование свойств ВЧ полей с двумерным квадратичным распределением потенциала с целью осуществления времяпролетного масс-разделения заряженных частиц;
- разработка эффективных методик расчета плоских электрических полей для решения задач оптимизации конструкций масс-анализаторов с времяпролетным разделением заряженных частиц в высокочастотных полях;
- разработка способов построения масс-анализаторов ионов, реализующих времяпролетное разделение заряженных частиц в полях с квадратичным распределением потенциала.

**Научная новизна** результатов работы заключается в следующем:

- разработаны теоретические и методические основы сепарации заряженных частиц по времени пролета в двумерных электрических высокочастотных полях с квадратичным распределением потенциала;
- разработаны численные методы оптимизации геометрии времяпролетных масс-анализаторов ионов с линейными ВЧ полями;
- разработаны устройства для формирования двумерных ВЧ полей с квадратичным распределением потенциала при помощи системы из плоских электродов с дискретно-линейным распределением ВЧ потенциала на них.

**Достоверность** научных выводов работы подтверждается сравнением данных, полученных аналитическим путем и в процессе численного моделирования, с результатами испытания экспериментального макета радиочастотного времяпролетного масс-спектрометра.

**Практическая значимость** работы состоит в следующем:

- в работе изучены свойства высокочастотных полей с двумерным квадратичным распределением потенциала, позволяющие осуществить масс-разделение ионов по времени пролета и улучшить аналитические и потребительские характеристики масс-анализаторов;
- разработан программный комплекс для моделирования двумерных ионно-оптических систем на базе математического аппарата вычисления напряженности электрических полей методом граничных элементов, проведено исследование погрешностей вычислений и тестирование на модельных схемах;

- разработаны радиочастотные времяпролетные масс-анализаторы с плоскими с дискретно-линейным распределением потенциала электродами и методики расчета и оптимизации геометрических параметров таких анализаторов.

### **Реализация результатов работы**

Результаты, полученные в диссертационной работе, использовались при разработке и создании радиочастотного времяпролетного прибора для микроанализа вещества, которые выполнялись при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, грантов администрации Рязанской области и Роснауки, а также при чтении лекций по курсам «Диагностическая аппаратура в электронике» и «Моделирование в газоразрядной технике» в ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

### **Положения и результаты, выносимые на защиту**

1. В высокочастотных полях с квадратичным распределением потенциала реализуется времяпролетный режим масс-разделения заряженных частиц с пространственно-временной фокусировкой по начальным скоростям и углам влета, что позволяет создавать радиочастотные масс-рефлектроны с линейной шкалой масс и на порядок по сравнению с аналогичными приборами статического типа увеличить диапазон начальных энергий и значений объемного заряда анализируемых ионов.

2. Двумерные высокочастотные поля с квадратичным распределением потенциала могут формироваться ионно-оптическими системами из плоских дискретных электродов на основе емкостных или индуктивных линейных делителей высокочастотного напряжения, что позволяет уменьшить в 3-4 раза габариты анализаторов для радиочастотных масс-рефлектронов.

3. Использование метода граничных элементов при численном моделировании ионно-оптических систем из плоских электродов с дискретно-линейным распределением ВЧ потенциала позволяет проводить расчет с погрешностью не более  $10^{-6}$  %, что соответствует современным требованиям к технологическим допускам при изготовлении масс-спектрометрических приборов высокого разрешения.

4. Использование в импульсных источниках ионов ускоряющих электрических полей с квадратичным распределением потенциала позволяет осуществить в плоскости выходной апертуры временную

фокусировку заряженных частиц по начальным координатам и в 2-3 раза повысить разрешающую способность радиочастотных масс-рефлектронов.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались на 2-й всероссийской конференции с международным участием «Масс-спектрометрия и ее прикладные проблемы», 2007, Москва; на 5-й международной научно-технической конференции «К.Э. Циолковский – 150 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика», 2007, Рязань; на 40-й научно-технической конференции, 2008, Рязань; на 9-м всероссийском семинаре «Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики», 2009, Москва.

### **Публикации**

По материалам диссертационной работы опубликовано 13 печатных работ, из них 6 статей (в том числе опубликованных в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, определенных ВАК Минобрнауки РФ, – 3 статьи), 5 работ – в материалах российских и международных научно-технических конференций, получен 1 патент на изобретение и 1 положительное решение на выдачу патента на изобретение.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка, включающего 81 наименование. Работа изложена на 135 страницах машинописного текста, содержит 33 рисунка.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель работы, изложены основные решаемые задачи, показана научная новизна и практическая ценность работы, приведены основные научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертации проведен краткий обзор литературы по квадрупольной и времяпролетной масс-спектрометрии, источникам ионов и методам моделирования ионно-оптических систем.

На основе литературных источников проанализированы свойства полей с квадратичным распределением потенциала. Приведены основные выражения, описывающие движение заряженных частиц в таких системах. Рассмотрены различные типы гиперболоидных электродных систем,

формирующих поля с квадратичным распределением потенциала. Освещены вопросы минимизации влияния краевых полей на работу анализатора.

Выполнен обзор работ по времяпролетному масс-разделению заряженных частиц. Основными факторами, ограничивающими разрешающую способность статических анализаторов данного типа, являются пространственный заряд ионов и их начальный разброс по скоростям. Отмечена возможность построения тандемных анализаторов.

При исследовании свойств масс-анализаторов различных типов возникает необходимость численного расчета электрических полей и моделирования движения заряженных частиц в таких системах. В работе приведен краткий анализ различных методов расчета, получивших широкое распространение.

По результатам проведенного анализа сформулированы цель и задачи настоящей диссертационной работы.

**Вторая глава** («Расчет двумерных электрических полей методом граничных элементов») диссертационной работы посвящена реализации метода граничных элементов в случае двумерных электрических полей.

Широкий класс электронно-оптических систем может быть описан в рамках двумерных (плоских) моделей. Уравнение в дискретной форме, формализующее внутреннюю плоскую задачу Дирихле в случае отсутствия объемных зарядов, имеет вид:

$$\gamma u(\xi) + \sum_{j=1}^N u_j H_j(\xi) = \sum_{j=1}^N q_j F_j(\xi), \quad (1)$$

где  $\gamma = 2\pi$ ,  $u(\xi)$  – распределение потенциала в расчетной области  $\Omega$  ( $\xi \in \Omega$ ), рассчитываемое в ходе решения «прямой» задачи;  $u_j$  – заданное распределение потенциала на границе области  $\Gamma$  ( $\chi \in \Gamma$ );  $q_j$  – рассчитываемый в ходе решения «обратной» задачи вектор зарядов; функции  $F_j(\xi)$  и  $H_j(\xi)$  в случае аппроксимации границы  $\Gamma$  прямолинейными линиями вычисляются по формулам:

$$F_j(\xi) = \Delta \chi_j \int_0^1 U^*(\xi, \Delta \chi_j \tau + \chi_j) d\tau = \Delta \chi_j \int_0^1 U_j^*(\xi, \tau) d\tau, \quad (2)$$

$$H_j(\xi) = \Delta \chi_j \int_0^1 Q^*(\xi, \Delta \chi_j \tau + \chi_j) d\tau = \Delta \chi_j \int_0^1 Q_j^*(\xi, \tau) d\tau, \quad (3)$$

где  $U^*(\xi, \chi) = w^*$ ,  $Q^*(\xi, \chi) = \partial U^* / \partial n$ ,  $w^*$  – фундаментальное решение уравнения Лапласа,  $n$  – модуль внешней нормали,  $\tau \in [0, 1]$  – нормированная координата.

Показано, что для двумерного случая интегралы (2) и (3) имеют аналитические выражения, что исключает дополнительные погрешности, возникающие при использовании численного интегрирования. Составляющие градиента электрического поля, используемые при расчете траекторий движения заряженных частиц, также определяются аналитически.

Оценена точность расчета по методу конечных разностей и методу граничных элементов на тестовых задачах. В случае плоского конденсатора относительная погрешность вычисления как потенциала, так и напряженности электрического поля по методу граничных элементов не превышает  $10^{-8}$ , в то время как по методу конечных разностей не превосходит  $10^{-3}$ . Пример цилиндрического конденсатора иллюстрирует возможности метода граничных элементов при расчете систем с криволинейными границами. Показано, что при применении метода граничных элементов относительная погрешность распределения потенциала не превышает  $10^{-5}$ .

Сделан вывод о том, что использование методики расчета электрических полей, основанной на методе граничных элементов, позволяет повысить точность расчета в случае прямоугольных границ электродов на 5 порядков по сравнению с методом конечных разностей и на 3 порядка при расчете систем с криволинейными границами. Кроме высоких точностных характеристик метода граничных элементов, данный метод представляет преимущество и по скорости расчета. Дальнейшее моделирование и оптимизация исследуемых электродных систем велось с применением данной методики расчета.

**Третья глава** («Времяпролетный механизм разделения ионов в высокочастотных полях с квадратичным распределением потенциала») диссертационной работы посвящена исследованию возможности времяпролетного масс-разделения заряженных частиц в ВЧ полях с квадратичным распределением потенциала.

Среди многообразия методов разделения заряженных частиц по удельному заряду в настоящее время наибольшую популярность приобрели времяпролетные масс-анализаторы. Они обладают высокой скоростью анализа, относительно простой конструкцией и высокими массогабаритными показателями. Основной проблемой для анализаторов данного типа остается чувствительность основных параметров к начальному разбросу ионов по энергиям. Рассматривается возможность ее решения путем времяпролетного разделения ионов по удельному заряду в высокочастотных полях с квадратичным распределением потенциала.

Свойство инвариантности траекторий движения ионов в высокочастотных полях с квадратичным распределением потенциала к изменению начальных координат частиц при нулевых начальных скоростях и к изменению начальных скоростей при нулевых начальных координатах, определяемое видом общего решения уравнения Маттье, позволяет осуществить пространственно-временную фокусировку заряженных частиц и решить проблему разброса ионов по энергиям во времяпролетных масс-анализаторах. При малых значениях параметра  $\beta < 0.1$  в линейном ВЧ поле анализатора без постоянной составляющей ( $a=0$ ) траектории движения заряженных частиц на секулярной частоте  $\beta\omega/2$  описываются эллипсами. Для значений начальных параметров ионов  $x_0 \neq 0$ ,  $y_0 \approx 0$ ,  $v_{0y} > 0$ ,  $v_{0x} \approx 0$  получено выражение для времени пролета ионов, которое позволяет установить времяпролетный механизм разделения заряженных частиц в ВЧ поле:

$$t_A = \frac{\pi r_0^2 \omega}{\sqrt{2eV}} m. \quad (4)$$

Время движения иона в пространстве дрейфа с линейным высокочастотным полем оказывается пропорциональным массе анализируемой частицы. Развертка масс в этом случае происходит при постоянных параметрах амплитуды  $V$  и частоты  $\omega$  питающего ВЧ напряжения. Фактором, лимитирующим разрешающую способность анализаторов такого типа, является ограниченность амплитуд движения ионов по оси  $Y$  геометрическими параметрами электродной системы. При использовании монополярной схемы анализатора таким параметром является радиус гиперболического электрода  $r_0$ . На основе свойства инвариантности траекторий движения ионов в ВЧ полях с квадратичным распределением потенциала времяпролетное масс-разделение ионов можно осуществить в системе координат, повернутой на угол  $\theta = \pi/4$ . В этом случае максимальная амплитуда траекторий ионов в направлении дрейфа определяется размером анализатора по оси  $Y$  (рисунок 1).

Эллиптические траектории заряженных частиц описывают только секулярные колебания ионов на основной частоте  $\beta\omega/2$  и не учитывают составляющие с частотой ВЧ поля. Получены аналитические выражения для траекторий движения ионов с учетом высокочастотных составляющих колебаний, точность которых оценивалась по результатам компьютерного моделирования. Установлено, что импульсный режим ввода ионов минимизирует влияние начальной фазы ВЧ поля на эффективность времяпролетной сортировки заряженных частиц.

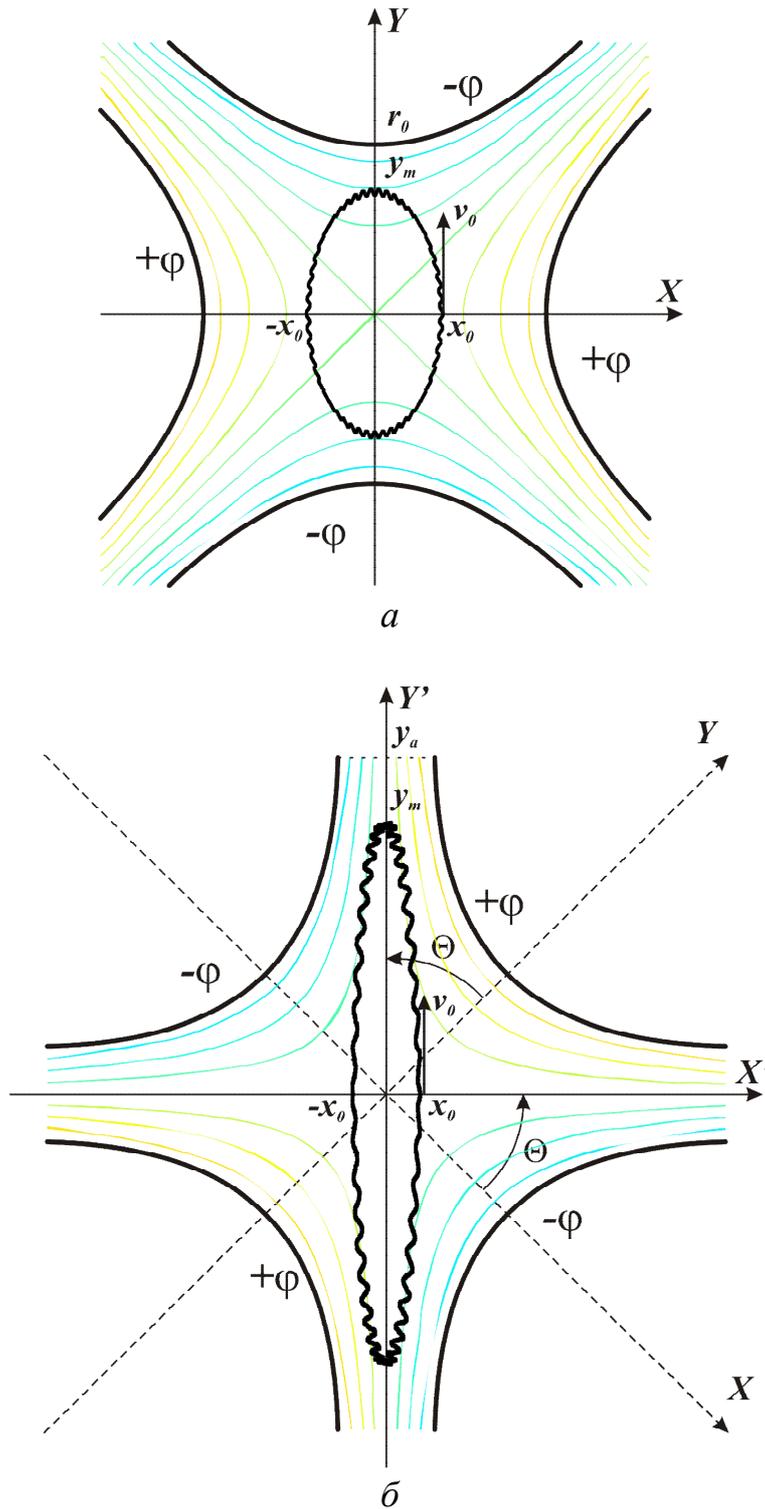


Рисунок 1. Электродные системы, создающие поля с квадратичным распределением потенциала, и траектории движения заряженных частиц в них с начальными параметрами  $x_0 \neq 0$ ,  $y_0 = 0$ ,  $v_0 > 0$ ,  $\alpha = 0$

Показано, что одним из методов повышения разрешающей способности времяпролетных анализаторов с квадратичным распределением потенциала является использование периодического в пространстве двумерного линейного поля, позволяющего увеличить время нахождения иона в пространстве дрейфа.

**Четвертая глава** («Электродные системы с дискретным линейным распределением потенциала ВЧ потенциала») посвящена разработке способов формирования ВЧ электрических полей для радиочастотных времяпролетных масс-анализаторов ионов.

Высокочастотные поля с квадратичным распределением потенциала обладают свойством пространственно-временной фокусировки ионов с различными начальными скоростями и углами влета и свойством временной фокусировки заряженных частиц с различными начальными координатами. Время пролета ионов одной массы в таких полях пропорционально их массе, что позволяет использовать данное свойство для времяпролетного разделения заряженных частиц. Для масс-сепарации ионов с широким диапазоном начальных энергий необходимо иметь протяженную в направлении дрейфа частиц рабочую область с двумерным линейным ВЧ электрическим полем. При использовании в качестве масс-анализатора электродной системы монополюсного типа амплитуда колебаний ионов ограничена радиусом поля  $r_0$ .

Рассмотрена возможность реализации анализатора с произвольным соотношением размеров рабочей области по координатам  $x$  и  $y$ . Известно, что двумерная гиперболическая электродная система неограниченных размеров (рисунок 1,а) создает поле с квадратичным распределением потенциала по осям  $X$  и  $Y$  вида:

$$\varphi(x, y) = \frac{\varphi_0}{r_0^2} (x^2 - y^2). \quad (5)$$

При повороте декартовой системы координат на угол  $\Theta = \pi/4$  (рисунок 1,б) и преобразовании переменных в новой системе координат  $OX'Y'$  выражение (5) принимает вид

$$\varphi(x', y') = \frac{2\varphi_0}{r_0^2} x' y'. \quad (6)$$

Из формулы (6) видно, что в системе координат  $OX'Y'$  потенциал вдоль осей  $X'$  и  $Y'$  изменяется по линейному закону. Это означает, что в направлениях, перпендикулярных к асимптотам гиперболических электродов, потенциал изменяется линейно. Отсюда следует, что если вдоль этих направлений выделить замкнутую прямоугольную границу и задать вдоль нее распределение потенциала, изменяющееся по линейному

закону, полученная структура будет создавать идеальное квадрупольное поле внутри этой ограниченной области.

Таким образом, анализаторы для времяпролетного разделения ионов в линейных ВЧ полях, в соответствии с (5) и (6), могут быть реализованы применением традиционных методов задания квадратичного распределения потенциала в рабочей области анализатора при помощи электродов гиперболического сечения либо в системах из плоских электродов с дискретно-линейным распределением вдоль одной из координат потенциалами на них. При этом возможны следующие схемы времяпролетных масс-анализаторов: монополярная (один электрод гиперболического или круглого сечения и уголкового заземленный электрод), дипольная (два электрода гиперболического или круглого сечения и плоский заземленный электрод) и с плоскими дискретными электродами с линейным распределением потенциала (рисунок 2). В последнем случае параметр  $r_0$  определяется соотношением:

$$r_0 = \sqrt{2x_a y_a}, \quad (7)$$

где  $x_a, y_a$  – размеры анализатора по оси  $X$  и  $Y$ .

Проведено сравнение различных схем анализаторов по линейности поля в рабочей области и эффективности осуществления времяпролетного разделения ионов. Установлено что дипольная схема с гиперболическими электродами и схема с плоскими дискретными электродами являются наиболее приемлемыми, так как имеют более протяженную рабочую область с заданной точностью поля (рисунок 3).

При использовании масс-анализаторов с линейно-дискретным распределением потенциала возникает вопрос о выборе шага дискретизации  $\Delta u$  плоской электродной системы. В процессе моделирования получены зависимости относительной погрешности распределения  $\delta_\phi$  от величины  $\Delta u$  при фиксированных размерах электродной системы ( $y_a=180$  мм и  $x_a=18$  мм), зависимости относительной погрешности распределения потенциала  $\delta_\phi$  от шага дискретизации  $\Delta u$  в различных сечениях рабочей области, относительного разброса времени пролета  $\Delta t/t$  при различных энергиях ввода ионов, а также оценена способность ВЧ поля, создаваемого плоскими электродами с дискретно-линейным распределением ВЧ потенциала на них, фокусировать в плоскости  $y=0$  по времени пролета  $t_A$  ионы с различными начальными энергиями  $W_0$ , углами  $\alpha_0$  и координатами  $x_0$  влета.

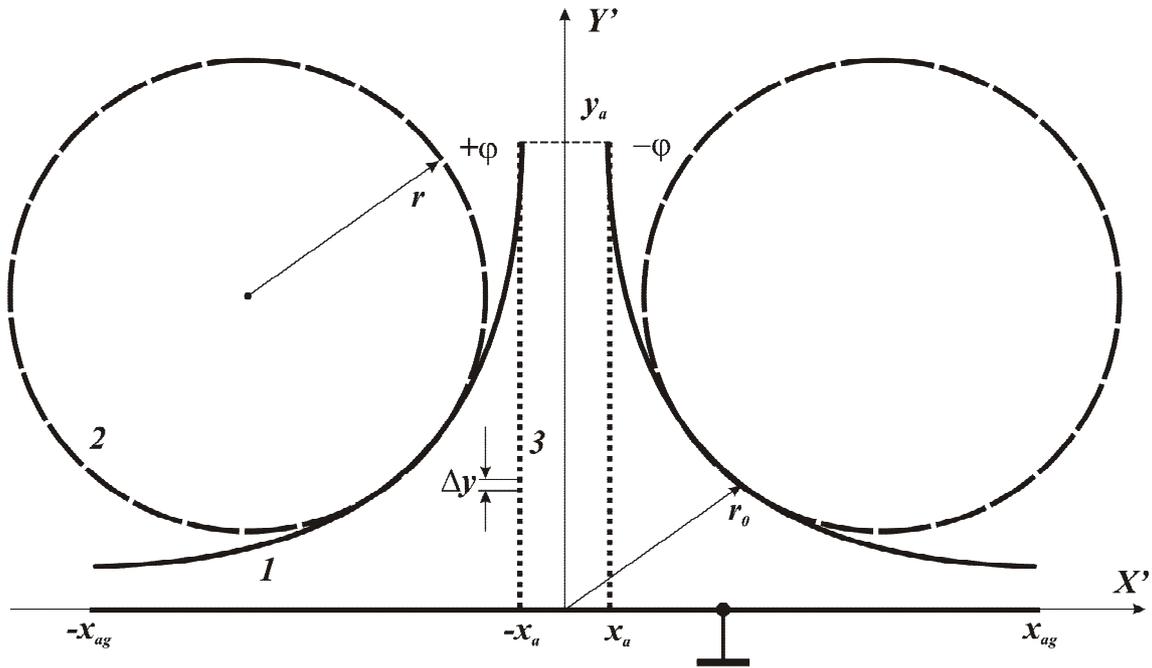


Рисунок 2. Формирование двумерного линейного электрического поля при помощи электродных систем, выполненных по дипольной схеме (1,2 – гиперболические и круглые электроды) и схеме с плоскими дискретными электродами (3)

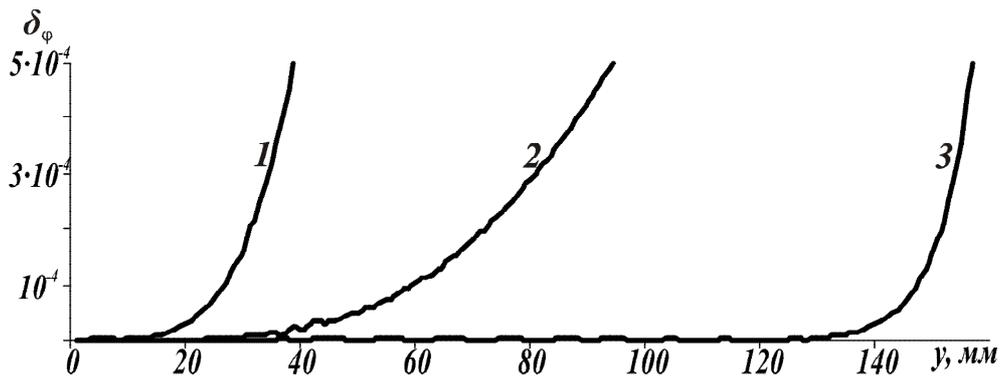


Рисунок 3. Распределение относительной погрешности  $\delta_\varphi$  отклонения потенциала от идеального по координате  $y$  в плоскости  $x = 10$  мм: кривые 1, 2, 3 – для анализаторов с круглыми, гиперболическими и плоскими электродами соответственно

Системы с плоскими дискретными электродами могут быть реализованы на практике при помощи линейного индуктивного или емкостного делителя ВЧ напряжения.

**Глава пятая** («Экспериментальное исследование радиочастотного времяпролетного масс-спектрометра») посвящена разработке импульсного источника и экспериментальному исследованию макета радиочастотного времяпролетного масс-спектрометра.

В радиочастотных времяпролетных масс-анализаторах, в отличие от статических, допускается значительный разброс вводимых заряженных частиц по энергиям. Так как требование моноэнергетичности ионов для радиочастотных масс-рефлектронов не является обязательным, ускорение частиц в ионном источнике возможно в электрическом поле с квадратичным распределением потенциала, что позволяет осуществить временную фокусировку в плоскости  $y = 0$  заряженных частиц с различными начальными координатами. Импульсный источник ионов в этом случае можно представить в виде системы из двух гиперболических электродов с минимальными расстояниями  $r_1$  и  $r_2$  от оси  $Z$ . В центральной части нижнего электрода в направлении оси  $Z$  имеется узкая щель для вывода ионов из источника. Электрическое поле с двумерным квадратичным распределением потенциала, формируемое в источнике ионов, обладает свойством временной фокусировки заряженных частиц по начальным координатам. При этом заряженные частицы одинаковой массы  $m$ , образованные с различными начальными координатами  $x_0$  и  $y_0$  при движении в двумерном линейном электрическом поле, достигают плоскости  $y = 0$  за одинаковое время. 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.

На основе результатов теоретических исследований и компьютерного моделирования разработан макет радиочастотного времяпролетного масс-спектрометра (рисунок 4), экспериментальное исследование которого позволило подтвердить возможность осуществления масс-разделения по времени пролета ионов в линейных ВЧ полях, создаваемых системами из плоских дискретных электродов, а также основные аналитические соотношения для времени пролета, максимальной скорости и энергии ввода ионов.

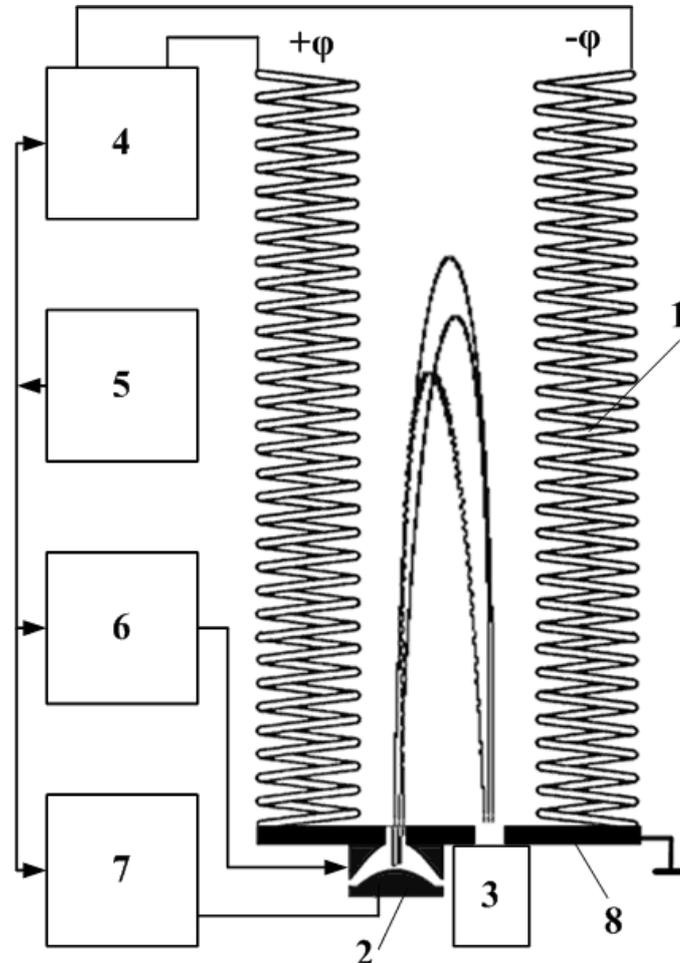


Рисунок 4. Структурная схема времяпролетного масс-спектрометра с линейным ВЧ полем: 1 – анализатор, выполненный в виде индуктивного делителя ВЧ потенциала; 2 – импульсный источник ионов; 3 – детектор и устройство регистрации; 4 – генератор ВЧ напряжения для электродной системы анализатора; 5 – устройство управления; 6, 7 – источник электронов и генератор ускоряющих импульсов для источника ионов; 8 – заземленный электрод анализатора

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Показано, что двумерные высокочастотные электрические поля с квадратичным распределением потенциала обладают свойством временной фокусировки ионов по начальным энергиям, углам и координатам влета, которое позволяет проводить масс-разделение заряженных частиц по времени пролета и реализовать анализаторы высокого разрешения ( $R > 2 \cdot 10^3$ ) с линейной шкалой масс при значительных объемных зарядах.

2. Разработана методика и программный комплекс расчета плоских ионно-оптических систем методом граничных элементов, обеспечивающие погрешность не хуже  $10^{-6}$  %, для компьютерного моделирования и оптимизации конструкций анализаторов с разномасштабными элементами.

3. Разработан способ формирования двумерных линейных ВЧ полей для осуществления времяпролетного масс-разделения ионов в системах из плоских дискретных электродов с линейным распределением потенциала, который позволяет строить анализаторы с произвольным соотношением размеров по осям  $X$  и  $Y$ . Реализация на практике таких систем возможна при помощи линейных индуктивных или емкостных делителей ВЧ напряжения.

4. Разработана конструкция импульсного источника ионов для радиочастотного масс-спектрометра с ускорением заряженных частиц в поле с квадратичным распределением потенциала, которая позволяет осуществить временную фокусировку ионов с различными начальными координатами.

5. По результатам аналитических расчетов и компьютерного моделирования разработан опытный образец радиочастотного масс-рефлектрона, экспериментальное исследование которого подтвердило возможность создания времяпролетных масс-спектрометров с высокочастотными электрическими полями.

Вышеизложенные результаты позволяют сделать вывод о том, что поставленные задачи решены, и цель диссертационной работы достигнута.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Дягилев А.А., Гуров В.С., Мамонтов Е.В. Сравнительная оценка точности распределения потенциала в масс-анализаторах типа «фильтр масс» с различной геометрией электродной системы // Электроника: Межвуз. сб. науч. тр. Рязань. 2006. С. 52-56.
2. Дягилев А.А. Радиочастотный времяпролетный прибор для микроанализа вещества // Тез. докладов. Федеральная школа-конференция по инновационному малому предпринимательству в приоритетных направлениях науки и высоких технологий. Москва, 2006. С. 37.
3. Гуров В.С., Мамонтов Е.В., Дягилев А.А. Электродные системы с дискретным линейным распределением ВЧ потенциала // Масс-спектрометрия. 2007. Т.4. №2. С.139-142.
4. Дягилев А.А., Мамонтов Е.В. Использование плоской электродной системы с дискретным распределением потенциала для формирования двумерного линейного электрического поля // Электроника: Межвуз. сб. науч. тр. Рязань. 2007. С. 61-63.
5. Мамонтов Е.В., Гуров В.С., Филиппов И.В., Дягилев А.А. Способ ввода заряженных частиц во времяпролетный радиочастотный масс-анализатор и устройство для его осуществления // Решение о выдаче патента на изобретение по заявке №20077106273/28 от 19.02.2007.
6. Мамонтов Е.В., Гуров В.С., Трубицын А.А., Дягилев А.А. Способ масс-селективного анализа ионов по времени пролета в линейном ВЧ поле и устройство для его осуществления // Патент на изобретение №2367053 от 10.09.2009.
7. Гуров В.С., Мамонтов Е.В., Филиппов И.В., Дягилев А.А. Оптимизация параметров электродной системы с дискретным линейным распределением потенциала // Тез. докладов. III съезд ВМСО. II Всероссийская конференция с международным участием «Масс-спектрометрия и ее прикладные проблемы». Москва. 2007. ПУ-8.
8. Дягилев А.А. Времяпролетный масс-спектрометр с линейным ВЧ полем для космических исследований // Тез. докладов. 5-я МНТК «К.Э. Циолковский - 150 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Рязань. 2007. С. 323-326.
9. Мамонтов Е.В., Филиппов И.В., Дягилев А.А. Импульсный источник ионов для радиочастотного времяпролетного масс-анализатора // Вестник РГРТУ. 2007. вып. 22. С. 88-91.

10. Гуров В.С., Мамонтов Е.В., Дягилев А.А. Формирование двумерных линейных электрических полей в системах с плоскими электродами с дискретным распределением потенциала // Тез. докладов. 40-я Научно-техническая конференция. Рязань. 2008.
11. Гуров В.С., Мамонтов Е.В., Филиппов И.В., Дягилев А.А. Времяпролетный масс-спектрометр с линейным ВЧ полем // Вестник РГРТУ. 2008. Вып.23. С.131-134.
12. Гуров В.С., Трубицын А.А., Мамонтов Е.В., Дягилев А.А. Решение плоской задачи Дирихле методом граничных элементов // Вестник РГРТУ. 2008. Вып. 24. С.91-94.
13. Трубицын А.А., Гуров В.С., Дягилев А.А., Мамонтов Е.В. Метод граничных элементов для решения двумерных задач электронной оптики // Тез. докладов. 9-й Всероссийский семинар «Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики». Москва. 2009. С. 13-14.

ДЯГИЛЕВ Александр Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЯПРОЛЕТНОГО МЕХАНИЗМА  
РАЗДЕЛЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ  
ПОЛЯХ С КВАДРАТИЧНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПОТЕНЦИАЛА**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 21.12.09. Формат бумаги 60×84 1/16.  
Бумага ксероксная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.  
Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет  
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.  
Редакционно-издательский центр РГРТУ.