

На правах рукописи



ДУБКОВ МИХАИЛ ВИКТОРОВИЧ

**СИНТЕЗ МАСС-СЕЛЕКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ СТРУКТУР
С ВОЗМУЩЕНИЯМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ**

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Рязань 2018

Работа выполнена на кафедре «Общая и экспериментальная физика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный консультант:

Гуров Виктор Сергеевич,

доктор технических наук, профессор, г. Рязань

Официальные оппоненты:

Бердников Александр Сергеевич,

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории 221 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт аналитического приборостроения Российской академии наук, г. Санкт-Петербург

Сысоев Алексей Александрович,

доктор физико-математических наук, профессор Отделения нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике офиса образовательных программ Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва

Краснова Надежда Константиновна,

доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Физическая электроника» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург

Защита состоится «04» июня 2019 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д212.211.03 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «РГРТУ»: <http://www.rsreu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. физ.-мат. наук, доц.



Литвинов В. Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Развитие науки и промышленности, разработка и исследование конструкционных материалов, возникновение различного рода экологических факторов, решение проблем утилизации отходов производства и вооружения, расширение присутствия человека в космосе и в околоземном пространстве ставят задачи совершенствования известных и разработки новых методов анализа состава различных веществ. Большинство достижений современной физики, химии, материаловедения связано с развитием техники и методов изучения химического состава вещества.

Развитие фундаментальных наук невозможно без высокоэффективной аппаратуры для анализа соединений и их компонентов. Так, открытие новых элементарных частиц невозможно без мощной ускорительной техники и связанных с ней методов исследования вещества. Совершенствование методов анализа веществ и их структуры в настоящее время является основой современной экспериментальной физики. Это особенно актуально при разработке и производстве твердотельных, вакуумных и газоразрядных изделий электронной техники, где требуются новейшие автоматизированные комплексы, оснащенные средствами контроля технологических процессов и готовой продукции.

Задачи анализа состава веществ зачастую приходится решать в сложных условиях. Так, для космических исследований необходимо создание малогабаритной и прочной аналитической аппаратуры, способной работать как при атмосферном давлении, так и в вакууме, как при наличии гравитации, так и в условиях невесомости. Использование контролирующей аппаратуры в химической промышленности во многих случаях связано с работой в агрессивных средах. Таких примеров можно привести много. В них безотказная работа приборов для контроля вещества должна обеспечиваться в определенных жестких условиях при сохранении необходимых аналитических характеристик.

Создание малогабаритной аппаратуры требует снижения массогабаритных показателей всех её отдельных элементов. В масс-спектрометрах основным элементом является электродная система устройства, в которой

происходит анализ всех компонентов вещества. Поэтому совершенствование малогабаритных масс-анализаторов для промышленности, экологического мониторинга, космических исследований является важной и весьма актуальной задачей.

Степень разработанности темы. В настоящее время существуют различные методы исследования состава вещества: спектральные, химические и пр. Среди них особое место занимает масс-спектрометрический метод, являющийся на сегодняшний день одним из наиболее чувствительных, быстрых и надежных. Он позволяет исследовать химический (элементный) состав как газообразных веществ, так и приповерхностных слоев сложных материалов, находящихся в твердом состоянии. Масс-спектрометрический метод успешно совмещают с газовой хроматографией, что значительно повышает информативность анализа.

Использование масс-спектрометрии основано на формировании электрического поля с заданным распределением потенциала и анализом траекторий заряженных частиц в таком поле. Проводимые до настоящего времени исследования были направлены на повышение аналитических характеристик разрабатываемых и производимых масс-спектрометрических приборов за счет улучшения качества электрического поля и максимального приближения его к идеальному. Разработке таких электродных систем посвящен ряд работ как в зарубежных лабораториях, так и в России (в МИФИ, ИАП РАН и др.), а также в нашей лаборатории. При этом в масс-спектрометрах существуют принципиально неустраняемые отклонения в распределении электрического потенциала в рабочем объеме, а достижение высоких аналитических характеристик влечет за собой резкое увеличение массы и габаритов приборов, что существенно затрудняет их использование в подвижных объектах. Введение же малых возмущений линейных электрических полей может быть использовано на практике для улучшения параметров квадрупольных масс-спектрометров.

Цель и задачи диссертационной работы.

Целью диссертационной работы является разработка квадрупольных масс-спектрометрических приборов с использованием возмущенных линейных электрических полей.

Поставленная цель диссертационной работы достигалась решением следующих задач:

1. Разработка математической модели формирования двумерной конфигурации электрического поля в квадрупольных электродных системах при наличии малых отклонений электрического поля от линейного и взаимосвязи функции распределения электрического потенциала с профилем полеобразующих электродов.
2. Исследование влияния составляющих высших порядков (СВП) распределения потенциала в пролетных масс-анализаторах (МА) на их аналитические характеристики и формирование требований к предельным отклонениям электрического поля от линейного.
3. Разработка электродных систем МА, формирующих заданное распределение электрического потенциала и обеспечивающих эффективную сортировку заряженных частиц, при наличии возмущений линейных электрических полей.
4. Разработка протяженных электродных систем квадрупольных МА на основе многосекционной конструкции, формирующих электрические поля с малыми отклонениями от квадратичного распределения потенциала.
5. Оценка возможности и целесообразности многоэтапного режима сортировки заряженных частиц в секционных электродных системах с различными параметрами отдельных секций.
6. Исследование влияния краевых электрических полей квадрупольных МА на процессы удержания и сортировки заряженных частиц и формирование краевого поля, обладающего повышенной эффективностью захвата заряженных частиц.
7. Анализ формирования и влияния на сортировку заряженных частиц переходного электрического поля в межсекционном промежутке и разработка монопольного МА с развернутым расположением секций.
8. Разработка конструкции и технологии изготовления электродных систем квадрупольных МА на основе универсального электрода, формирующих электрическое поле с заданным распределением потенциала.

9. Экспериментальная проверка разработанных и изготовленных квадрупольных МА, использованных для создания малогабаритной масс-спектрометрической аппаратуры.

Научная новизна диссертационного исследования состоит в следующем:

1. Разработана методика расчета траекторий заряженных частиц и моделирования процесса сортировки ионов в квадрупольном фильтре масс и монополе при наличии составляющих распределения электрического потенциала, отличных от квадратичного.

2. Разработана методика расчета весовых коэффициентов функции распределения электрического потенциала в электродных системах пролетных масс-анализаторов, в основу которой положена аппроксимация дискретных значений потенциала, рассчитанных численным методом, полиномиальной функцией заданного вида.

3. Разработаны конструкции и экспериментальные макеты электродных систем монополя с продольным электрическим полем и с поворотом второй секции относительно первой на 180° , улучшающие форму массового пика и аналитические характеристики масс-анализаторов.

4. Предложена функция для описания распределения электрического потенциала по продольной координате на входе в квадрупольную электродную систему, которая позволила рассчитать распределение заряженных частиц по продольным скоростям после прохождения краевого электрического поля.

5. Установлено из сравнительного анализа пролетных квадрупольных масс-анализаторов, что использование «триполя» для одномерной сортировки заряженных частиц позволяет увеличить приведенную чувствительность по сравнению с монополем на два порядка.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Исследованы особенности формирования СВП в распределении электрического потенциала при деформации электродных систем квадрупольных МА. Установлены взаимосвязи между изменениями составляющих и соответствующих им профилей электродов квадрупольного фильтра масс и монопольного МА.

2. Исследовано влияние СВП распределения потенциала на интенсивность, разрешающую способность, добротность и коэффициент формы массового пика квадрупольного фильтра масс и монопольного МА.

3. Расчетным путем и экспериментально доказано, что введение в распределение потенциала СВП, вызванных симметричными деформациями электродов монопольного МА, улучшает форму массового пика монополя и увеличивает его коэффициент формы с 0,5 до 0,8.

4. Исследовано влияние краевого электрического поля на распределение ионов по продольным скоростям. Установлено, что после пролета заряженных частиц через входную область увеличивается количество «быстрых» ионов, в результате чего снижается разрешающая способность МА. Показано, что отрицательный эффект, вызываемый «расплыванием» ионного потока по продольным скоростям, уменьшается за счет сокращения размеров входной апертуры и приближения ее к электродной системе.

5. Оценено влияние входного краевого электрического поля пролетных квадрупольных МА на коэффициент захвата ионов. Установлено, что для традиционного режима работы анализаторов, в котором параллельный ионный поток вводится вдоль продольной оси, максимальный коэффициент захвата ионов обеспечивается при определенном временном диапазоне их пролета через краевое поле, зависящем от угла наклона рабочей прямой.

6. Предложен ряд конфигураций входных областей электродных систем с различными диафрагмами, позволяющих повысить эффективность сортировки и улучшить аналитические характеристики пролетных квадрупольных МА.

7. Разработаны конструкции электродных систем квадрупольных МА на базе универсального гиперболического электрода, позволяющего реализовать ряд пролетных квадрупольных МА, включая трипольный.

8. Доказана целесообразность построения протяженных пролетных электродных систем квадрупольных МА путем соединения отдельных коротких секций. Системы формируются как на основе моноблочного квадрупольного фильтра масс, так и с использованием разборной секционной конструкции.

9. Разработаны неразрушаемые составные формы для электролитического формирования электродов и способы отделения электродов от форм, позволяющие изготавливать весь спектр электродных систем квадрупольных МА (фильтра масс, монополя и «триполя»).

10. Изготовлены квадрупольные электродные системы пролетных МА, позволяющие создавать малогабаритную аппаратуру для космических исследований, экологического мониторинга, фармакологии, парфюмерии, обнаружения отравляющих веществ и наркотиков.

Методология и методы исследования. Исследования проведены с применением теоретических и экспериментальных методов анализа распределения потенциала в квадрупольных электродных системах и особенностей движения заряженных частиц в таких МА, численного решения дифференциальных уравнений движения заряженных частиц в условиях малого отклонения распределения потенциала от квадратичного и в краевых областях, экспериментального исследования разработанных электродных систем пролетных квадрупольных МА для малогабаритной аппаратуры.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Введение малых возмущений в линейное распределение напряженности поперечного электрического поля позволяет повысить селективные свойства квадрупольных масс-анализаторов и улучшает их массогабаритные показатели, что позволило увеличить коэффициент формы пика монополя от 0,5 до 0,8 при малом взаимном сдвиге электродов.

2. Продольное электрическое поле в малогабаритном монополярном масс-анализаторе увеличивает эффективность сортировки заряженных частиц и улучшает аналитические характеристики приборов; например, увеличивает разрешающую способность в 1,8 раза при наклоне стержневого электрода относительно углового на 5 угловых минут.

3. Формирование протяженных линейных электрических полей с малыми отклонениями, основанное на секционном принципе построения электродной системы квадрупольных масс-анализаторов, обеспечивает заданную точность распределения потенциала и позволяет реализовать многоэтапный режим сортировки заряженных частиц; в частном случае, применение

двухсекционной системы электродов в монопольном масс-анализаторе обеспечивает увеличение разрешающей способности в 1,5 раза.

4. При пролете через краевые области электрического поля на входе квадрупольных масс-анализаторов в распределении ионов по энергии возрастает доля «быстрых» частиц, что приводит к снижению разрешающей способности, которое может быть уменьшено оптимизацией времени пролета или ограничением входной апертуры.

5. Эффективность сортировки заряженных частиц в переходном электрическом поле межсекционного электродного промежутка повышается при ослаблении взаимного влияния секций; установка разделяющей диафрагмы между секциями монополя увеличивает разрешающую способность на 30 %, а интенсивность массового пика – в 1,6 раза.

6. Многосекционные пролетные квадрупольные масс-анализаторы целесообразно конструировать с использованием разработанного универсального гиперболического электрода, что обеспечивает формирование электрического поля с повышенной точностью задания распределения потенциала и позволяет создавать эффективные квадрупольные фильтры масс, монополи и «триполи», обладающие малыми массогабаритными показателями.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов диссертационной работы, полученных расчетным путем и численным моделированием, подтверждается экспериментальной проверкой на макетах квадрупольных МА, а также результатами испытаний приборов: квадрупольного фильтра масс, «МАЛІ-ІФ» и «триполя».

Основные результаты работы, полученные в диссертации, докладывались и обсуждались на 14-й, 15-й, 20-й, 21-й, 22-й Международных конференциях по масс-спектрометрии (Тампере, Финляндия, 1997 г.; Барселона, Испания, 2000 г.; Женева, Швейцария, 2014 г.; Торонто, Канада, 2016 г.; Флоренция, Италия, 2018 г.); 15-й Скандинавской конференции по масс-спектрометрии (Лиллехаммер, Норвегия, 2013 г.); 9-й Международной конференции по оптике заряженных частиц (Брно, Чехия, 2014 г.); 3-м семинаре по масс-спектрометрии стран Средиземноморского региона (Афины, Греция, 2015 г.); 1-м Международном форуме по исследованиям и технологиям для общества и промышленности (Турин, Италия, 2015 г.); 15-м и 16-м

Международных семинарах «Последние тенденции в оптике заряженных частиц и приборостроении физики поверхности» (Брно, Чехия, 2016 и 2018 гг.); Всероссийском симпозиуме по эмиссионной электронике: термоэлектронная, вторично-электронная, фотоэлектронная эмиссии и спектроскопия твердого тела (Рязань, 1996 г.); Международной научно-технической конференции «Электрофизические и электрохимические технологии» (Санкт-Петербург, 1997 г.); Российской научно-технической конференции «Новые материалы и технологии» (Москва, 1997 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и информатика-97» (Москва, 1997 г.); Международной конференции «Эмиссионная электроника, новые методы и технологии» (Ташкент, 1997 г.); Международной научно-технической конференции «Научные основы высоких технологий» (Новосибирск, 1997 г.); 2-й Республиканской конференции по физической электронике (Ташкент, 1999 г.); 5-й Международной научно-технической конференции «К.Э. Циолковский – 150 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика» (Рязань, 2007 г.); Научно-практической конференции «Инновации в науке, производстве и образовании» (Рязань, 2013 г.); XXXII Международной конференции по взаимодействию интенсивных потоков энергии с веществом (Эльбрус, 2017 г.).

Реализация и внедрение. Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы использованы на кафедре «Общая и экспериментальная физика» Рязанского государственного радиотехнического университета при выполнении госбюджетных и хоздоговорных НИР 5-07Г, 13-07, 9-09Г, 7-10Г и ОКР 25-06, 30-09 по созданию масс-спектрометрической аппаратуры, в которых автор являлся исполнителем и ответственным исполнителем. Изготовленные МА вошли в состав аппаратуры для космических исследований в рамках проектов «Марс-96», «ФОБОС-Грунт» и «Луна-Ресурс», проводимых институтами ИКИ РАН и ГЕОХИ РАН.

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении инициативных исследовательских проектов с промышленными предприятиями (ООО «Научно-производственное предприятие «ФОН», ООО «Импульсные технологии», АО «ЕЛАМЕД» Елатомский приборный завод).

Материалы диссертационной работы внедрены в учебный процесс и используются в лекционном курсе и лабораторном практикуме кафедры «Общая и экспериментальная физика» РГРТУ по дисциплине «Физические основы методов анализа вещества».

Результаты внедрения и практического использования подтверждены соответствующими документами.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 93 печатных работы, в том числе: 22 статьи в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук; 8 публикаций в изданиях из перечня Web of Science и Scopus, 23 статьи в научно-технических журналах и межвузовских сборниках научных трудов; 31 публикация тезисов докладов на международных и российских конференциях; 4 патента на изобретение и 5 патентов на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, приложений, изложенных на 299 страницах (включая 157 рисунков и 5 таблиц). Список литературы содержит 231 наименование.

Личный вклад автора. Все основные результаты диссертационной работы, в том числе постановка задач, разработка и исследование квадрупольных МА, основные научные результаты, выводы и рекомендации принадлежат лично автору. Программные средства, реализующие численные модели, разработаны под руководством и при непосредственном участии автора. Работы, выполненные в соавторстве, посвящены конкретизации разработанных методов изучения пролетных квадрупольных МА для малогабаритной аппаратуры.

Содержание работы

Во введении дана краткая характеристика работы, обоснована структура диссертации и приведены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации изложены тенденции исторического развития квадрупольной масс-спектрометрии, приведена классификация квадрупольных масс-спектрометров по различным признакам: по особенностям реализации ловушечного механизма; по расположению области ионизации частиц относительно рабочего объема анализатора; по виду развертки спектра масс; по временной форме высокочастотного напряжения, подаваемого на электроды анализатора, рассмотрены основные типы электродных систем квадрупольных масс-спектрометров и принципы сортировки заряженных частиц.

Результаты исследований, проведенных в первой главе, позволили выявить причины, приводящие к ухудшению аналитических характеристик квадрупольных масс-спектрометров из-за отклонения распределения потенциала реальной электродной системы от квадратичного, связанного с ограничением электродов в пространстве, с ошибками при изготовлении и юстировке электродов, с наличием диэлектрических пленок на поверхности электродов, с искажением питающего напряжения и с наличием краевых полей на входе и выходе анализатора.

Вторая глава посвящена вопросам формирования электрического поля и сортировки заряженных частиц при наличии малых отклонений распределения электрического потенциала от квадратичного в пролетных квадрупольных МА. При этом решаются задачи расчета распределения потенциала в электродных системах квадрупольного фильтра масс и монопольного МА как наиболее часто применяемых в промышленности.

Для этого с применением уравнения Лапласа получено распределение потенциала в электродной системе, которое представлено в виде разложения в степенной ряд:

$$u(x, y) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_{2n} u_n^{(a)}(x, y) + b_{2n} u_n^{(b)}(x, y) + c_{2n+1} u_n^{(c)}(x, y) + d_{2n+1} u_n^{(d)}(x, y)], \quad (1)$$

где a_0 – постоянная составляющая; a_{2n} , b_{2n} , c_{2n+1} , d_{2n+1} – весовые коэффициенты составляющих при $n \geq 1$,

$$\begin{aligned} u_n^{(a)} &= \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k (2n)!}{(2n-2k)!(2k)!} x^{2n-2k} y^{2k}, \\ u_n^{(b)} &= \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(-1)^k (2n-1)!}{(2n-(2k+1))!(2k+1)!} x^{2n-(2k+1)} y^{2k+1}, \\ u_n^{(c)} &= \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k (2n+1)!}{(2n+1-2k)!(2k)!} x^{2k} y^{2n+1-2k}, \\ u_n^{(d)} &= \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k (2n+1)!}{(2n+1-2k)!(2k)!} x^{2n+1-2k} y^{2k}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для идеального квадратичного распределения потенциала единственными являются члены второго порядка, для которых $n=1$, а весовые коэффициенты b_{2n} , c_{2n+1} , d_{2n+1} равны нулю.

На основании этого разложения получены уравнения движения заряженных частиц при использовании импульсного питания электродных систем, которое является наиболее перспективным для малогабаритной аппаратуры.

Для этого введены импульсные координаты диаграммы стабильности:

$$\begin{aligned} a_u &= \frac{1}{f} \sqrt{\frac{2eU_1}{mr_0^2}}, \\ q_u &= \frac{1}{f} \sqrt{\frac{2eU_2}{mr_0^2}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где f – частота высокочастотного напряжения, U_1 и U_2 – амплитуды положительного и отрицательного импульсов, r_0 – радиус поля электродной системы.

Решение уравнений движения заряженных частиц позволило провести расчеты массовых пиков квадрупольного фильтра масс и монополя при наличии различного рода малых отклонений распределения потенциала от квадратичного.

Анализ полученных результатов показал, что появление в распределении потенциала некоторых составляющих высших порядков приводит к

улучшению формы массового пика монополюсного МА. Наличие в распределении электрического потенциала малых составляющих высших порядков с весовыми коэффициентами $a_6, a_{10}, b_4, c_5 \div c_{11}$ ($c_{2n+1} < 0$) улучшает форму массового пика монополюсного МА: из «треугольной» она преобразуется в «прямоугольную». На рисунке 1 приведено изменение формы массового пика монополя при наличии в распределении потенциала составляющих с весовым коэффициентом a_6 .

В третьей главе рассматриваются вопросы формирования электрических полей в пролетных квадрупольных МА с учетом реальной формы и расположения электродов. Решается задача расчета составляющих распределения потенциала в электродных системах по конфигурации электродов. Для этого предлагается использовать метод граничных элементов, позволяющий рассчитывать значения потенциала в определенных точках рабочего объема анализатора и аппроксимировать степенным рядом. Для этого, используя метод наименьших квадратов, производим расчет весовых коэффициентов $a_{2n}, b_{2n}, c_{2n+1}, d_{2n+1}$ и определяем наиболее выгодную конфигурацию электродной системы.

С этих позиций проведен расчет конфигурации электродной системы квадрупольного фильтра масс, который представляет собой систему четырех параллельных электродов, имеющих в сечении вид неограниченных гипербола. Такая электродная система формирует в рабочем объеме идеальное поле с квадратичным распределением потенциала.

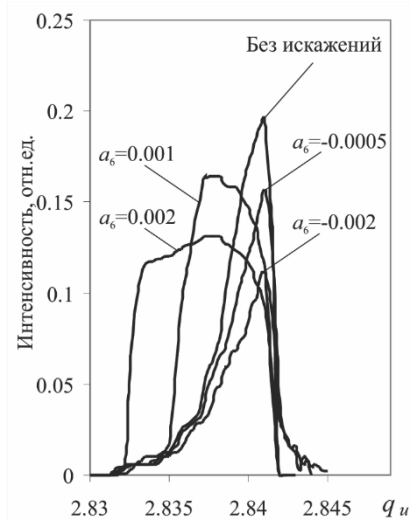


Рисунок 1 – Форма массового пика монополюсного МА при различных значениях весового коэффициента a_6

Однако практическая реализация приборов на основе анализатора квадрупольного фильтра масс предусматривает замену бесконечных гиперболических электродов на электроды конечных размеров. Это ограничивает в пространстве размеры электродной системы и приводит к появлению искажения в распределении потенциала и, как следствие, к ухудшению аналитических характеристик – разрешения и чувствительности. При этом конструкция электродной системы должна обеспечивать отсутствие отклонений в положениях и форме электродов в процессе эксплуатации. В работе предлагается использовать электродные системы с гиперболическими электродами (рисунок 2).

Центральная часть электрода 1 имеет гиперболическое сечение, ограниченное в пространстве на уровне $L_{гп}$. Концевые области 2 протяженностью L_k представляют собой плоскости, параллельные асимптоте, и предназначены для установки керамических изоляторов 3, закрепляющих электроды фильтра масс друг относительно друга и обеспечивающих электрическую развязку.

В целях уменьшения массы анализатора и межэлектродной емкости используются не сплошные изоляторы, а несколько отдельных керамических вставок, количество которых может быть изменено в зависимости от требований вибро- и ударопрочности.

В работе проведен выбор как уровня ограничения электродов, так и размеров концевых областей, а также проведен анализ технологической устойчивости электродной системы к различного рода искажениям электродов и тепловому воздействию на электродную систему, в результате чего получены соответствующие зависимости весовых коэффициентов разложения потенциала в степенной ряд. Комплексное влияние всех коэффициентов исследовано путем проведения расчетов изменения массовых пиков в зависимости от величины искажения электродной системы.

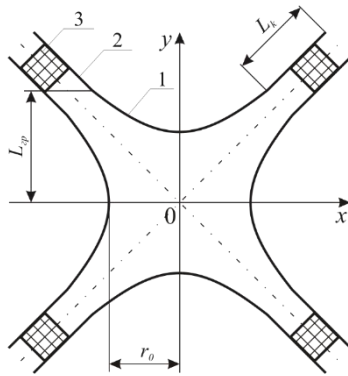


Рисунок 2 – Геометрия квадрупольного фильтра масс с гиперболическими электродами

Аналогичные расчеты проведены и для монополя, который, по сравнению с фильтром масс, обладает целым рядом преимуществ: простотой в изготовлении и сборке, меньшими габаритами и массой, меньшими требованиями к параметрам питающего напряжения. Конструкция монополярного МА представляет собой систему двух электродов: уголкового и стержневого (гиперболического).

Наиболее перспективной является конструкция монополярного МА, электродная система которого состоит из двух электродов – уголкового и стержневого, имеющих в поперечном сечении гиперболический профиль. Трансформация уголкового электрода в гиперболический, описываемый уравнением $y^2 - x^2 = r_{01}^2$, где r_{01} – геометрический параметр гиперболического уголкового электрода, приводит к существенному улучшению формы массового пика и увеличению разрешающей способности монополярного МА при сохранении его чувствительности.

Как и в квадрупольном фильтре масс, в монополярном МА для обеспечения требуемых массогабаритных параметров приходится ограничивать гиперболические поверхности электродов на определенном расстоянии d от центра электродной системы (рисунок 3).

Электроды 1 и 2 анализатора должны быть расположены определенным образом друг относительно друга и жестко закреплены. Юстировка и крепление производятся с помощью керамических изоляторов 3, располагаемых между электродами.

В работе проведено исследование уровня ограничения на величину весовых коэффициентов разложения потенциала и выбрано соотношение, отвечающее минимальному набору коэффициентов высших порядков, а также исследована технологическая устойчивость электродной системы монополя.

С помощью такой электродной системы экспериментально подтверждено улучшение формы массового пика при введении малых составляющих высших порядков с весовыми коэффициентами a_6 , a_{10} , b_4 , $c_5 \pm c_{11}$,

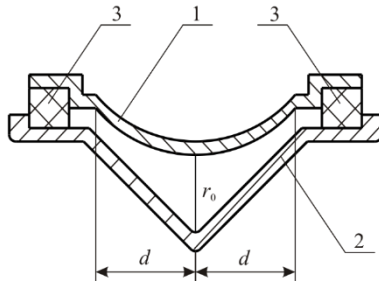


Рисунок 3 – Сечение электродной системы монополярного МА

описанное во второй главе. Для этого в конструкцию электродной системы внесено изменение, связанное со смещением стержневого электрода относительно уголкового, что приводит к появлению «нужных» составляющих в распределении потенциала. В результате достигнуто увеличение коэффициента формы, определяемого соотношением: $K_f = \frac{\Delta_{0,5}}{\Delta_{0,1}}$, где $\Delta_{0,5}$, $\Delta_{0,1}$ – ширина

массового пика на разных уровнях высоты (в нашем случае – на уровнях 0,5 и 0,1 соответственно), от 0,5 для классического расположения электродов до 0,8 при сдвиге электродов.

Расчетным и экспериментальным путем показана возможность создания в монополюсном МА продольного электрического поля за счет наклона стержневого электрода относительно уголкового. При этом достигается увеличение разрешающей способности в 1,6 раза по сравнению с обычным монополюсом.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена вопросам формирования электрического поля в протяженных электродных системах, построенных по секционному принципу и собранных из нескольких идентичных секций, каждая из которой содержит, в случае фильтра масс, четыре скрепленных между собой и изолированных друг от друга полеобразующих электродов, а для монополюсного МА каскад состоит из полеобразующих стержневого и уголкового электродов. При этом каскады механически соединены между собой, обеспечивая электрический контакт между соответствующими электродами и получение единой протяженной электродной системы квадрупольного фильтра масс или монополя.

К такой электродной системе предъявляются дополнительные требования по стыковке отдельных секций друг с другом. Для этого в работе проведена оценка влияния точности сборки электродной системы МА на его аналитические характеристики.

По этому принципу построено несколько электродных систем квадрупольного фильтра масс. Исходный квадрупольный элемент имеет следующие характерные размеры: радиус поля $r_0=8,2$ мм; максимальный радиус электродной системы $r_{\max}=60$ мм; длина секции электродной системы $l=66,7$ мм. Квадрупольный элемент выполнен по оригинальной технологии методом электролитического формования с допусками на размеры меньше 3 мкм.

Материал электродов – медь толщиной 1 мм. На основе этого были изготовлены и экспериментально апробированы составные датчики квадрупольного фильтра масс длиной от 133 до 267 мм, которые показали высокие аналитические и эксплуатационные характеристики. Кроме того, была разработана протяженная электродная система с радиусом поля $r_0=10$ мм и длиной 600 мм, составленная из двух секций.

Построение электродной системы по секционному принципу открыло новые возможности сортировки заряженных частиц в малогабаритной аппаратуре: реализация тандемного режима работы, когда каждая секция функционирует как отдельный анализатор; осуществление многоэтапного цикла сортировки заряженных частиц путем переброса рабочей точки на диаграмме стабильности за счет изменения радиуса поля отдельных секций, использование наклона одной секции относительно другой.

В монополярном МА предлагается использовать электродную систему, состоящую из нескольких секций электродов, но расположенных таким образом, что следующая секция развернута вокруг продольной оси относительно предыдущей на 180° и смещена как по вертикальной, так и по продольной оси. При этом соответствующие электроды различных секций электрически соединены между собой (рисунок 4).

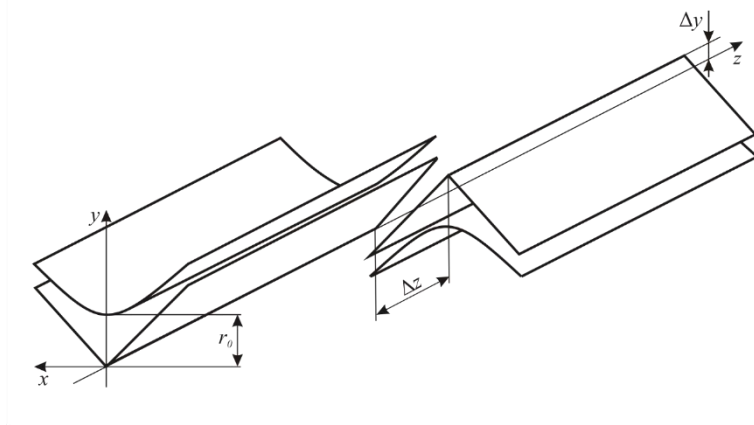


Рисунок 4 – Схема двухсекционной электродной системы монополя с поворотом

Для исследования работы такой электродной системы был проведен анализ траекторий движения заряженных частиц в межсекционном пространстве монополюсного МА и теоретически и экспериментально изучено влияние различных положений секций друг относительно друга.

Пятая глава диссертационной работы посвящена исследованию особенностей прохождения заряженных частиц в переходных областях: в области краевого поля на входе МА и области перехода от одной секции к другой в многосекционных электродных системах. Для достижения поставленной цели проведен анализ распределения потенциала в краевой области и исследовано ее влияние на распределение заряженных частиц по продольным скоростям. Показано, что после прохождения переходной области появляются «быстрые» ионы, существенно ухудшающие аналитические характеристики прибора.

С целью увеличения коэффициента захвата проведен анализ амплитудно-фазовых характеристик первого и второго рода (АФХ I и II рода). Показано, что для ионов, проходящих через входное краевое поле, существует оптимальное время (или временной диапазон) пролета этой области, при котором коэффициент захвата ионов должен быть максимальным. Под коэффициентом захвата в данном случае понимается выражаемое в относительных единицах отношение числа ионов с амплитудами колебаний меньших геометрических размеров анализатора к общему числу вводимых ионов. При этом для фильтра масс наблюдается явно выраженный максимум, положение которого практически не зависит от поперечных составляющих скоростей и соответствует значению порядка 3,5 периода радиочастотного сигнала. Для монополюсного анализатора положение максимума смещается в сторону больших времен пролета и лежит в диапазоне 4–4,5 периода радиочастотного сигнала.

Для уменьшения влияния краевого поля предлагается несколько конфигураций входных диафрагм – электродов, через которые осуществляется ввод ионного потока. Проведенные исследования показали, что уменьшение расстояния между входной и выходной диафрагмами до электродов, а в пределах расположения диафрагм в глубине электродной системы, позволяет улучшить как разрешающую способность, так и чувствительность прибора.

Однако этот способ эффективно работает только при достаточно малых осевых отверстиях в диафрагме, что ограничивает чувствительность и разрешающую способность известных устройств.

Для повышения чувствительности возможно использование диафрагм более сложной формы. В простом варианте указанная цель достигается также применением входной диафрагмы, выполненной в виде углового электрода. При этом линия пересечения плоскостей, образующих угловой электрод, перпендикулярна к оси симметрии электродной системы и лежит в плоскости симметрии, проходящей через электроды, на которые подается отрицательное постоянное напряжение смещения. Проведенное численное моделирование показало, что оптимальный угол раствора двух плоскостей составляет $120\div 130^\circ$. Сама входная диафрагма располагается внутри электродной системы и имеет отверстие, через которое осуществляется ввод ионного потока.

В работе проведен анализ электрического поля в области между секциями электродной системы монополя с поворотом, описанного в четвертой главе. Для увеличения чувствительности такого монополярного МА с развернутым расположением секций проведен анализ конфигурации электрического поля и предложена конструкция дополнительного электрода – диафрагмы, размещаемой между секциями. Это уменьшило влияние одной секции на другую и позволило повысить разрешающую способность в 1,3 раза и уменьшить потери ионов с 0,4 до 0,7.

Шестая глава посвящена разработке конструкций квадрупольных МА. Для этого сформулированы требования к технологии изготовления электродных систем и обосновано применение в качестве таковой технологии электролитического формирования.

Для ее использования необходима разработка соответствующих форм для осаждения металла из электролита. Для квадрупольного фильтра масс была разработана комбинированная форма (рисунок 5), центральная часть 3 которой выполнена из металла и полностью повторяет

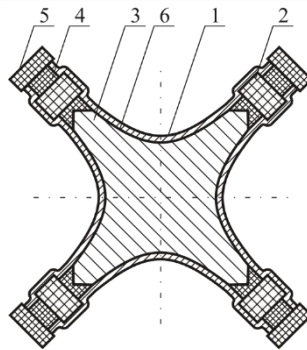


Рисунок 5 – Комбинированная форма для электролитического формирования электродной системы квадрупольного фильтра масс

профиль требуемой электродной системы, а периферийная часть выполнена в виде четырех плоскопараллельных пластин 4 и является разрушаемой.

В разрушаемой части устанавливаются керамические изоляторы, которые впоследствии «вращиваются» в основной слой металла, из которого формируется электродная система квадрупольного фильтра масс в целом, состоящая из четырех гиперболических электродов 1, соединенных керамическими изоляторами 2. В торцевых частях устанавливаются пластины 5 из диэлектрического материала, которые исключают нанесения слоя металла в межэлектродном пространстве.

В процессе электролитического формования на форму наносится тонкий промежуточный слой 6 металла толщиной $5\div 10$ мкм с температурой плавления не более 400°C , например индия, а затем наносится основной слой металла 1 толщиной около 1 мм для обеспечения требуемой прочности анализатора. После этого удаляется разрушаемая часть формы путем растворения в соответствующем растворителе, а затем в специальной оправке, исключающей повреждение как самой формы, так и электродной системы, удаляется постоянная часть формы.

Электродная система монопольного МА состоит из двух принципиально разных электродов: уголкового и гиперболического. В связи с этим для монопольного МА используется иной способ изготовления. Он состоит в том, что для получения электродов изготавливают с высокой точностью две металлических формы 1 и 2, внешние поверхности которых соответствуют внутренним поверхностям уголкового 3 и стержневого (гиперболического) 4 электродов монопольного анализатора (рисунок 6).

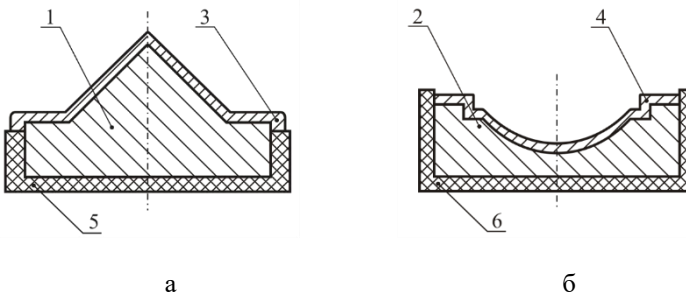


Рисунок 6 – Устройство форм уголкового (а) и стержневого (б) электродов монопольного МА

На эти формы, наносят слой металла путем электрического осаждения толщиной $0,1 \div 1$ мм для обеспечения требуемой прочности уголкового 3 и стержневого 4 электродов анализатора. Для исключения нанесения металла с обратной стороны формы используются защитные кожухи 5 и 6, а с торцов с помощью дополнительных пластин, формируются необходимые ребра жесткости, которые также играют роль крепежных элементов.

После нанесения металла форму удаляют путем нагрева уголкового и охлаждения гиперболического электродов вместе с формами. При этом за счет разности коэффициентов термического расширения происходит отделение электродов 3 и 4 от форм 1 и 2 без каких-либо механических повреждений. Затем на электроды наносят защитное покрытие. Далее электроды собирают в единую электродную систему. Взаимное расположение стержневого 4 и уголкового 3 электродов МА обеспечивается четырьмя керамическими изоляторами, имеющими форму прямоугольного параллелепипеда и изготовленными с высокой точностью, не хуже ± 1 мкм. При этом погрешность выполнения самих электродов не превышает 4 мкм.

По предложенному способу была изготовлена опытная партия МА с характерными размерами электродной системы: радиус поля – 6 мм; длина электродной системы – 67 мм, которые послужили основой многосекционных электродных систем монопольного МА.

Приведенные выше конструкции квадрупольного фильтра масс и монопольного МА построены на базе гиперболических электродов, но имеют одно принципиальное отличие. Электродная система квадрупольного фильтра масс выполнена в виде моноблока и не является разборной. Наоборот, монополь собирается из двух электродов, которые в процессе эксплуатации могут быть подвергнуты разборке и чистке, в том числе и механической.

В связи с этим моноблочная система электродов не всегда удобна в этом отношении. Поэтому были разработаны конструкция и технология изготовления электродных систем на базе универсального электрода (рисунок 7).

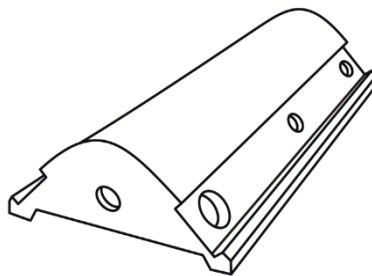


Рисунок 7 – Вид универсального гиперболического электрода

Универсальный электрод представляет собой стержень, выполненный по технологии электролитического формования. Рабочая поверхность электрода имеет гиперболический профиль, выполненный с высокой точностью. На краях гиперболических поверхностей выполнены прямоугольные пазы, которые предназначены для установки керамических изоляторов. Сами изоляторы представляют собой прямоугольные параллелепипеды, выполненные с высокой точностью, что позволяет точно расположить электроды друг относительно друга.

На торцах электродов предусмотрены ребра жесткости, которые одновременно служат крепежными элементами, для установки электродной системы в вакуумной камере. В пазах и на торцах предусмотрены отверстия для сборки электродной системы и ее крепления в вакуумной камере.

Для изготовления универсального электрода была разработана разборная форма, состоящая из основы 1 с вставками 2, на которые наносится слой металла 3 толщиной около 1 мм путем электрического осаждения (рисунок 8). Для исключения нанесения металла с обратной стороны формы используются защитные кожухи 4 и 5, а с торцов с помощью дополнительных пластин формируются необходимые ребра жесткости, которые также играют роль крепежных элементов.

По данной технологии была изготовлена партия универсальных электродов, на основе которых были собраны монополь, квадрупольный фильтр масс, а также трипольный МА. Эксперименты, проведенные с указанными электродными системами, доказали работоспособность технологии изготовления электродных систем на базе универсального электрода.

Таким образом можно изготовить квадрупольный фильтр масс, состоящий из четырех электродов 1, соединенных друг с другом через керамические изоляторы 2 (рисунок 9), а

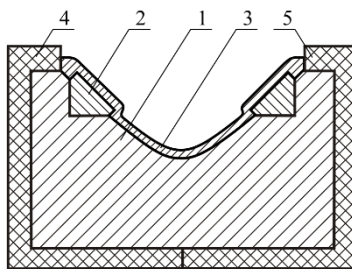


Рисунок 8 – Устройство формы для изготовления универсального электрода

также монополь (рисунок 10) и «триполь» (рисунок 11), для которых требуется изготовить отдельно уголкового электрода 2, на котором необходимо предусмотреть пазы для установки плоских керамических изоляторов 3.

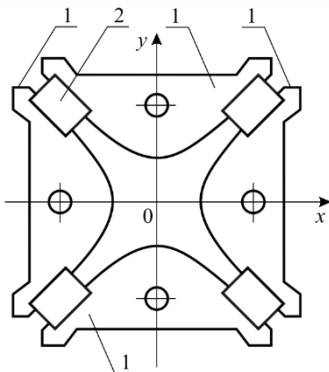


Рисунок 9 – Квадрупольный фильтр масс на основе универсального гиперболического электрода

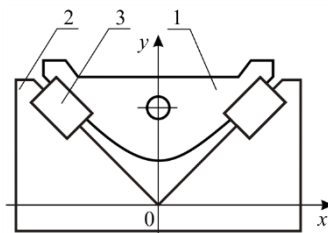


Рисунок 10 – Монопольный МА на основе универсального гиперболического электрода

Для закрепления электродов друг относительно друга в уголкового электроде, так же, как и в гиперболическом, выполнены пазы для установки керамических изоляторов 3. Расчетным путем и экспериментально показано преимущество трипольного МА

Изготовленные электродные системы монополя применены при разработке масс-спектрометров: квадрупольного фильтра масс в рамках программы «Марс-96», «МАЛ-1Ф» для космических аппаратов в рамках ОКР 25-06 программы «ФОБОС-Грунт», трипольного масс-спектрометра.

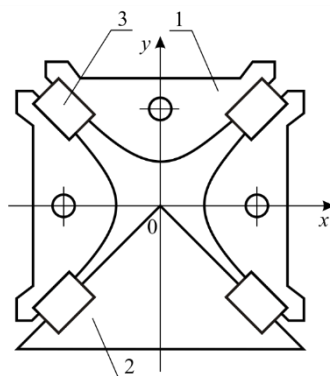


Рисунок 11 – «Триполь» на основе универсального гиперболического электрода

В заключении отражены основные результаты работы.

В соответствии с целью и задачами диссертационных исследований в работе получены теоретические, научно-методические и практические результаты, связанные с разработкой электродных систем пролетных квадрупольных МА и являющиеся обобщением конструкторско-технологических подходов к созданию малогабаритной аналитической аппаратуры.

1. Систематизированы основные составляющие функции распределения потенциала в рабочем объеме квадрупольных МА и установлен общий вид полеобразующей функции, на основе которой получены уравнения движения заряженных частиц в пролетных квадрупольных МА, учитывающие все виды отклонений распределения потенциала от квадратичного.

2. Исследованы особенности появления СВП в распределении потенциала, возникающих при деформации электродов квадрупольных МА. Установлены закономерности, связывающие определенные составляющие распределения потенциала и соответствующие им профили электродов квадрупольного фильтра масс и монопольного МА.

3. Разработана методика расчета массовых пиков квадрупольных МА, учитывающая наличие СВП в распределении потенциала, с помощью которой произведено компьютерное моделирование работы квадрупольного фильтра масс и монопольного МА при малых нарушениях линейности электрического поля. Исследовано влияние отдельных СВП распределения потенциала на аналитические характеристики приборов. Получены зависимости интенсивности, разрешающей способности, добротности и коэффициента формы массового пика от весовых коэффициентов СВП.

4. Показано, что наличие СВП в распределении электрического потенциала с определенными весовыми коэффициентами [a_6 , a_{10} , b_4 , $c_5 \div c_{11}$ ($c_{2n+1} < 0$), d_3] улучшает форму массового пика монопольного МА, преобразуя её из «треугольной» в «прямоугольную». Экспериментальным путем установлено, что введение в распределение потенциала СВП, вызванных симметричными деформациями электродов монопольного МА, увеличивает коэффициент формы от 0,5 до 0,8.

5. Разработана методика расчета весовых коэффициентов СВП в распределении потенциала в электродных системах пролетных МА. В основу

методики положена аппроксимация дискретных значений потенциала, рассчитанных численным методом, полиномиальной функцией заданного вида, с помощью которой весовые коэффициенты СВП определяются методом наименьших квадратов. Методика позволяет оценивать возможности использования различных конфигураций электродных систем анализаторов.

6. Разработана конструкция электродной системы квадрупольного фильтра масс с гиперболическими электродами. Расчетным путем определен уровень ограничения гиперболических поверхностей электродов, которому соответствуют минимальные искажения распределения потенциала в рабочем объеме анализатора. Показано, что для разработанного фильтра масс этот уровень составляет $1,6 r_0$ от осей симметрии электродной системы, где r_0 – радиус поля.

7. Разработана конструкция электродной системы монопольного МА с гиперболическим стержневым электродом. Расчетным путем определен уровень ограничения гиперболических поверхностей электродов, которому соответствует минимальная доля СВП в распределении потенциала. Показано, что для электродной системы с гиперболическим уголковым электродом уровень ограничения составляет $1,38 \cdot r_0$ от оси симметрии, где r_0 – радиус поля.

8. Проведен сравнительный анализ конструкций монопольного МА с гиперболическим уголковым электродом, с цилиндрическим стержневым электродом и с V-образным уголковым электродом. Показано, что суммарная доля СВП в распределении потенциала в электродной системе с V-образным уголковым электродом в 3 раза ниже, чем в системе с гиперболическим уголковым электродом.

9. Предложена конструкция электродной системы монопольного МА с малым продольным электрическим полем, формируемым небольшим (несколько угловых минут) наклоном стержневого электрода к оси симметрии. Компьютерным моделированием и экспериментальными аналитическими характеристиками опытного образца монопольного МА подтверждена целесообразность применения предложенного технического решения.

10. Предложен принцип построения длинных пролетных электродных систем квадрупольных МА в виде набора отдельных коротких секций, точность изготовления которых превосходит точность выполнения профиля

длинных анализаторов. Показана возможность реализации многоэтапной сортировки ионов в секционных электродных системах, в ходе которой при переходе частиц между секциями изменяются один или несколько параметров системы (радиус поля, поворот и взаимный наклон секций). Секционные конструкции успешно опробованы на электродных системах квадрупольного фильтра масс и монопольного МА.

11. Разработана конструкция двухсекционной электродной системы монопольного МА, в которой вторая секция повернута относительно первой на 180° . Для такой конструкции компьютерным моделированием доказана возможность улучшения формы массового пика. Установлено, что наилучшие аналитические характеристики достигаются при определенных значениях углового коэффициента рабочей прямой анализатора ($\lambda=0,33$ и $\lambda=0,28$). Экспериментальным путем показано, что разрешающая способность монополя с поворотом второй секции в 1,5 раза выше, чем анализатора со стандартной конструкцией электродов.

12. Рассчитано распределение потенциала во входной области квадрупольной электродной системы и изучено его влияние на распределение ионов по продольной составляющей скорости. Показано, что в распределении частиц после их пролета через входную область увеличивается доля «быстрых» ионов, в результате чего снижается разрешающая способность МА. Установлено, что отрицательный эффект, вызываемый «расплыванием» ионного потока по продольным скоростям, может быть компенсирован уменьшением входной апертуры и приближением ее к электродной системе.

13. Исследовано влияние локального входного краевого поля пролетных квадрупольных МА на коэффициент захвата ионов. Установлено, что для традиционного режима работы анализаторов, в котором параллельный ионный поток вводится вдоль продольной оси, максимальный коэффициент захвата ионов обеспечивается при определенном временном диапазоне их пролета через краевое поле, зависящем от угла наклона рабочей прямой анализатора. Максимальное значение коэффициента в 2–3 раза больше, чем для случая «неискаженных» полей. Предложен ряд конфигураций входных областей с различными диафрагмами, позволяющих улучшить аналитические характеристики анализаторов.

14. Разработаны неразрушаемые и комбинированные формы для электролитического формования, которые позволяют изготавливать весь спектр электродных систем квадрупольных фильтров масс, а также монополюсных и «триполюсных» МА. Предложенная металлическая неразрушаемая форма допускает многократное применение, что позволяет резко снизить стоимость производства электродных систем.

15. Разработан ряд гиперболоидных электродных систем пролетных масс-анализаторов, в том числе с применением универсального гиперболического электрода и секционного принципа построения, которые позволяют создавать эффективную малогабаритную аппаратуру различного назначения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК:

1. Дубков М.В. Влияние нелинейных искажений электрического поля на эллипсы захвата заряженных частиц в пролетных квадрупольных масс-спектрометрах / М.В. Дубков, А.В. Николаев // Вестник РГРТУ. – 2007. – Вып. 21. – С. 97-100.
2. Гуров В.С. Монополюсный масс-анализатор с тонкостенными гиперболическими электродами / В.С. Гуров, Б.И. Колотилин, М.В. Дубков, М.А. Буробин // Вестник РГРТУ. – 2010. – №1 (Выпуск 31). – С. 58-60.
3. Дубков М.В. Исследование распределения потенциала в монополюсном масс-анализаторе / М.В. Дубков, М.А. Буробин // Вестник РГРТУ. – 2010. – № 3 (Выпуск 33). – С. 72-76.
4. Дубков М.В. Исследование влияния нелинейных искажений электрического поля в анализаторе квадрупольного фильтра масс на условия сортировки заряженных частиц / М.В. Дубков, Б.И. Колотилин, А.В. Николаев // Вестник РГРТУ. – 2011. – № 2 (Выпуск 36). – С. 67-70.
5. Дубков М.В. Улучшение формы массового пика монополюсного масс-анализатора / М.В. Дубков, М.А. Буробин // Вестник РГРТУ. – 2011. – № 4 (Выпуск 38). – С. 109-112.
6. Дубков М.В. Система ввода и вывода ионов в гиперболоидных масс-спектрометрах на основе квадрупольных ячеек с продольным квадрупольным полем / М.В. Дубков, В.В. Иванов // Вестник РГРТУ. – 2012. – №3 (Выпуск 41). – С.104-107.
7. Дубков М.В. Особенности работы монополюсного масс-анализатора при наличии отклонений от квадратичного распределения потенциала / М.В. Дубков, В.С. Гуров, Б.И. Колотилин, М.А. Буробин // Радиотехника. – 2012. – № 3. – С. 89-94.
8. Гуров В.С. Увеличение интенсивности массового пика монополюсного масс-анализатора с продольным электрическим полем / В.С. Гуров, М.В. Дубков, М.А. Буробин, О.В. Рожков, И.А. Харланов // Вестник РГРТУ. – 2013. – № 2 (Выпуск 44). – С. 73-76.
9. Дубков М.В. Исследование зависимости коэффициента трансмиссии ионов от времени пролета краевой области анализатора / М.В. Дубков, В.В. Иванов // Вестник РГРТУ. – 2013. – № 4 (Выпуск 46), ч. 1. – С. 108-115.

10. Гуров В.С. Форма массового пика монополярного масс-анализатора с учетом отраженных ионов / В.С. Гуров, М.В. Дубков, М.А. Буробин, И.А. Харланов // Вестник РГРТУ. – 2013. – № 4 (Выпуск 46), ч. 3. – С. 61-64.
11. Гуров В.С. Уменьшение влияния нестабильных ионов на работу монополярного масс-анализатора / В.С. Гуров, М.В. Дубков, М.А. Буробин, И.А. Харланов // Успехи современной радиоэлектроники. – 2014. – № 6. – С. 4-9.
12. Гуров В.С. Уменьшение влияния краевых полей на работу квадрупольного фильтра масс / В.С. Гуров, М.В. Дубков, М.А. Буробин // Успехи современной радиоэлектроники. – 2014. – № 10. – С. 4-8.
13. Гуров В.С. О возможности уменьшения влияния краевых полей на аналитические характеристики квадрупольного фильтра масс / В.С. Гуров, М.В. Дубков, М.А. Буробин // Вестник РГРТУ. – 2014. – № 4 (Выпуск 50), ч. 1. – С. 94-97.
14. Гуров В.С. Моноблочная тонкостенная квадрупольная электродная система для электронно- и ионно-оптических устройств / В.С. Гуров, М.В. Дубков, М.А. Буробин, А.В. Николаев // Радиотехника. – 2015. – № 5. – С. 80-87.
15. Гуров В.С. Влияние погрешностей сборки секционной электродной системы на аналитические характеристики квадрупольного масс-спектрометра / В.С. Гуров, М.В. Дубков, А.В. Николаев // Радиотехника. – 2015. – № 11. – С. 61-65.
16. Гуров В.С. Оптимизация переходной области двухсекционного монополярного масс-анализатора / В.С. Гуров, М.В. Дубков, М.А. Буробин, И.А. Харланов // Вестник РГРТУ. – 2015. – № 2 (Выпуск 52). – С. 150-154.
17. Гуров В.С. Квадрупольный фильтр масс на основе секционной гиперболической электродной системы / В.С. Гуров, М.В. Дубков, М.А. Буробин, В.В. Иванов // Радиотехника. – 2016. – № 8. – С. 81-85.
18. Гуров В.С. Анализ влияния искажений электрического поля в секционном фильтре масс на условия сортировки заряженных частиц / В.С. Гуров, М.В. Дубков, В.В. Иванов, А.В. Николаев // Радиотехника. – 2016. – № 11. – С. 135-139.
19. Гуров В.С. Использование отображающих свойств квадрупольных линз для селективного выделения ионов / В.С. Гуров, М.В. Дубков, В.В. Иванов, М.А. Буробин // Радиотехника. – 2017. – №5. – С. 173-178.
20. Гуров В.С. Квадрупольные масс-анализаторы на основе тонкостенных гиперболических электродных систем / В.С. Гуров, М.В. Дубков, М.А. Буробин, В.В. Иванов, А.В. Николаев, И.А. Харланов // Вестник РГРТУ. – 2017. – № 2 (Выпуск 60). – С. 141-147.
21. Дубков М.В. Разработка электродных систем пролетных квадрупольных масс-анализаторов с использованием универсального тонкостенного гиперболического электрода / М.В. Дубков, В.С. Гуров, М.А. Буробин, В.В. Иванов, А.Е. Малютин // Радиотехника. – 2018. – №5. – С. 86-91.
22. Дубков М.В. Анализ малых отклонений линейных электрических полей и разработка эффективных масс-селективных систем // Вестник РГРТУ. – 2018. – № 4 (Выпуск 66), ч. 2. – С. 63-68.

Публикации в изданиях из перечня Web of Science и Scopus:

23. Sheretov E.P. A monopole Mass Filter with a Hyperbolic V-shaped Electrode / E.P. Sheretov, V.S. Gurov, M.V. Dubkov, O.V. Korneyeva // Rapid Communications in Mass Spectrometry. – 1999. – 13. – P. 1699-1702.
24. Sheretov E.P. A new monopole mass-analyzer based on a hyperboloid electrode system / E.P. Sheretov, V.S. Gurov, M.V. Dubkov, O.V. Korneyeva // Technical Physics Letters. – 2000. – 26(1). – P. 21-22.
25. Gurov V.S. A pulse high-frequency power supply system for hyperbolic mass analyzers of space vehicles V.S. Gurov, B.I. Kolotilin, E.V. Mamontov, N.V. Veselkin, M.V. Dubkov, A.P. Borisovskii // Instruments and Experimental Techniques. – 2008. – 51(3). – P. 421-424.

26. Gurov V.S. Temperature deformations in a thin-walled quadrupole electrode system with hyperbolic electrodes / V.S. Gurov, M.V. Dubkov, I.N. Romanov, A.V. Nickolaev // *Journal of Analytical Chemistry*. – 2015. – 70(13). – P. 1586-1589.
27. Gurov V. Complex Contoured Electrode System Technology by the Electrolytic Formation Method / V. Gurov, G. Gololobov, M. Dubkov, S. Karabanov, D. Suvorov, Yu. Stryuchkova, M. Klyagina // 2015 IEEE 1st International Forum on Research and Technologies for Society and Industry. Leveraging a better tomorrow (RTSI 2015). – Torino, Italy, 2015. – P. 291-296.
28. Gurov V.S. Using longitudinal linear field to improve the focusing properties of quadrupole lenses in the area of fringing fields / V.S. Gurov, M.V. Dubkov, V.V. Ivanov // 15th International Seminar «Recent Trends in Charged Particle Optics and Surface Physics Instrumentation». – Brno, Czech Republic, 2016. – P. 8-9.
29. Vlasov A.N. Mass analysis of the gas composition after the electrical explosion of copper spirals with a dielectric coating / A.N. Vlasov, M.V. Dubkov, M.A. Burobin // *Journal of Physics: Conf. Series*. – 946 (2018) 012141.
30. Dubkov M.V. Optimization of the edge region of a quadrupole mass analyzer / M.V. Dubkov, V.V. Ivanov, M.A. Burobin, A.V. Nikolaev // 16th International Seminar «Recent Trends in Charged Particle Optics and Surface Physics Instrumentation». – Brno, Czech Republic, 2018. – P. 16-17.

Патенты РФ:

31. Пат. 2091902 Российская Федерация, МПК Н 01 J 49/02, 49/42, 1/36, 9/02. Способ изготовления квадрупольного фильтра масс / Э.П. Шеретов, В.С. Гуров, М.В. Дубков, М.И. Евдокимова; заявитель и патентообладатель Шеретов Э.П. – № 96104868; заявл. 12.03.1996; опубл. 27.09.1997, Бюл. № 27.
32. Пат. 2198449 Российская Федерация, МПК Н 01 J 49/42, G 01 N 27/62. Способ масс-спектрометрического анализа ионов в квадрупольном фильтре масс и устройство для его осуществления / Э.П. Шеретов, О.В. Рожков, В.С. Гуров, М.В. Дубков; заявитель и патентообладатель Шеретов Э.П. – № 97115784; заявл. 24.09.1997; опубл. 10.02.2003, Бюл. № 4.
33. Пат. 2208264 Российская Федерация, МПК Н 01 J 49/42. Датчик квадрупольного фильтра масс / Э.П. Шеретов, В.С. Гуров, М.В. Дубков, Ю.В. Гилев; заявитель и патентообладатель Шеретов Э.П. – № 98115344; заявл. 07.08.1998; опубл. 10.07.2003, Бюл. № 19.
34. Пат. 2393580 Российская Федерация, МПК Н 01 J 49/42 (2006.01). Способ изготовления монопольного масс-анализатора / В.С. Гуров, М.В. Дубков, М.А. Буробин; заявитель и патентообладатель Рязанский государственный радиотехнический университет. – № 2009118863; заявл. 20.05.2009; опубл. 27.06.2010, Бюл. № 18.
35. Пат. на полез. модель 143061 Российская Федерация, МПК Н 01 J 49/42 (2006.01). Монопольный масс-анализатор с продольным электрическим полем / М.В. Дубков, М.А. Буробин, И.А. Харланов; заявитель и патентообладатель Рязанский государственный радиотехнический университет. – № 2013155127; заявл. 11.12.2013; опубл. 10.07.2014, Бюл. № 19.
36. Пат. на полез. модель 149394 Российская Федерация, МПК Н 01 J 49/26 (2006.01). Квадрупольный масс-спектрометр / В.С. Гуров, М.В. Дубков, М.А. Буробин, А.В. Николаев; заявитель и патентообладатель Рязанский государственный радиотехнический университет. – № 2014134661; заявл. 25.08.2014; опубл. 27.12.2014, Бюл. № 36.
37. Пат. на полез. модель 153242 Российская Федерация, МПК Н 01 J 49/26 (2006.01). Квадрупольный фильтр масс / В.С. Гуров, М.В. Дубков, М.А. Буробин, А.В. Николаев; заявитель и патентообладатель Рязанский государственный радиотехнический университет. – № 2014148770; заявл. 03.12.2014; опубл. 10.07.2015, Бюл. № 19.

38. Пат. на полез. модель 156466 Российская Федерация, МПК Н 01 J 49/00 (2006.01). Конструкция многосекционного гиперboloидного масс-анализатора / В.С. Гуров, М.В. Дубков, М.А. Буробин, И.А. Харланов; заявитель и патенто-обладатель Рязанский государственный радиотехнический университет. – № 2015102698; заявл. 27.01.2015; опубл. 10.11.2015. Бюл. № 31.
39. Пат. на полез. модель 167557 Российская Федерация, МПК Н 01 J 49/42 (2006.01). Многосекционный монополюсный масс-анализатор / В.С. Гуров, М.В. Дубков, М.А. Буробин, И.А. Харланов; заявитель и патентообладатель Рязан-ский государственный радиотехнический университет. – № 2016114227; заявл. 12.04.2016; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1.

Статьи:

40. Дубков М.В. Исследование возможности развертки спектра масс гиперboloидного масс-спектрометра типа трехмерной ионной ловушки изменением формы питающего импульсного сигнала // Научное приборостроение: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань, 1995. – С. 65-68.
41. Шеретов Э.П. Гиперboloидные электродные системы для квадрупольного фильтра масс / Э.П. Шеретов, В.С. Гуров, М.В. Дубков // Вестник РГРТА. – Рязань, 1996. – Вып. 1. – С. 141-142.
42. Дубков М.В. Анализ нелинейных искажений поля квадрупольного фильтра масс с цилиндрическими электродами // Научное приборостроение: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань, 1996. – С. 19-22.
43. Гуров В.С. Технология изготовления анализатора квадрупольного фильтра масс с гиперboloическими электродами / В.С. Гуров, М.В. Дубков // Научное приборостроение: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань, 1996. – С. 23-28.
44. Гуров В.С. О выборе геометрии анализатора квадрупольного фильтра масс с гиперboloическими электродами / В.С. Гуров, М.В. Дубков // Научное приборостроение: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань, 1996. – С. 58-61.
45. Гуров В.С. Деформация гиперboloидной электродной системы квадрупольного фильтра масс при нагревании / В.С. Гуров, М.В. Дубков, И.Н. Романов // Научное приборостроение: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань, 1996. – С. 61-65.
46. Гуров В.С. О выборе материала электродов электронно- и ионно-оптических систем, изготавливаемых методом электролитического формирования / В.С. Гуров, М.В. Дубков // Вестник РГРТА. – Рязань, 1997. – Вып. 2. – С. 130-131.
47. Гуров В.С. Влияние технологических погрешностей на качество поля в анализаторе квадрупольного фильтра масс с электродами круглого сечения / В.С. Гуров, М.В. Дубков // Научное приборостроение: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань, 1997. – С. 30-38.
48. Гуров В.С. Влияние способа очистки электрохимически осажденной меди на экзoeлектронную эмиссию с ее поверхности / В.С. Гуров, М.В. Дубков // Физика полупроводников и микроэлектроника: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань, 1997. – С. 47-50.
49. Гуров В.С. Выбор и исследование свойств материалов разрушаемой формы для электролитического формирования сложнопрофильных электродных систем / В.С. Гуров, М.В. Дубков // Научное приборостроение: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань, 1997. – С. 76-84.
50. Гуров В.С. Влияние технологических погрешностей на качество поля в анализаторе квадрупольного фильтра масс с гиперboloическими электродами / В.С. Гуров, М.В. Дубков // Научное приборостроение: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань, 1997. – С. 108-118.
51. Гуров В.С. Экспериментальное исследование квадрупольного фильтра масс с гиперboloическими электродами / В.С. Гуров, М.В. Дубков // Научное приборостроение: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань, 1997. – С. 143-148.

52. Гуров В.С. О выборе материала неразрушаемой формы для электролитического формования сложнопрофильных электродных систем / В.С. Гуров, М.В. Дубков // Научное приборостроение: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань, 1997. – С. 156-158.
53. Гуров В.С. Монопольный масс-анализатор с гиперболическим стержневым электродом / В.С. Гуров, М.В. Дубков, О.В. Корнеева // Научное приборостроение: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань, 1999. – С. 26-36.
54. Дубков М.В. Нелинейные искажения электрического поля, возникающие в краевой области квадрупольного фильтра масс, и их влияние на параметры проходящего ионного пучка / М.В. Дубков, В.А. Саблин // Научное приборостроение: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань, 2002. – С. 3-9.
55. Гуров В.С. Исследование устойчивости тонкостенных квадрупольных электродных систем / В.С. Гуров, М.В. Дубков // Электроника и информационные технологии: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань, 2002. – С. 17-21.
56. Дубков М.В. Исследование влияния нелинейных искажений, возникающих в монополюсном масс-анализаторе, на условия сортировки заряженных частиц / М.В. Дубков, В.Н. Волков // Научное приборостроение: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань, 2005. – С. 66-72.
57. Дубков М.В. Исследование возможности увеличения скорости изготовления медных электродов гиперболических масс-анализаторов, получаемых методом электролитического формования / М.В. Дубков, В.Н. Волков // Научное приборостроение: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань, 2006. – С. 3-6.
58. Дубков М.В. Разработка технологии изготовления универсальной неразрушаемой разборной формы для изготовления электродов пролетных квадрупольных масс-анализаторов // Научное приборостроение: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань, 2006. – С. 7-9.
59. Шеретов Э.П. Гиперболический масс-спектрометр для космической станции проекта «Фобос-грунт» / Э.П. Шеретов, М.В. Дубков, Б.И. Колотилин, Н.В. Веселкин, В.В. Иванов // Научное приборостроение: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань, 2006. – С. 10-15.
60. Дубков М.В. Исследование влияния технологических погрешностей изготовления электродной системы на качество поля в трипольном масс-анализаторе / М.В. Дубков, А.В. Николаев // Научное приборостроение: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань, 2006. – С. 16-22.
61. Иванов В.В. Гиперболические масс-спектрометры пролетного типа для космических исследований / В.В. Иванов, Т.Б. Карнав, М.В. Дубков // Перспективные проекты и технологии. – Рязань, 2006. – Вып. 1. – С. 53-57.
62. Шеретов Э.П. Триполь (фильтр масс с угольным электродом) / Э.П. Шеретов, М.В. Дубков, Т.Б. Карнав, А.Е. Малютин // Научное приборостроение: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань, 2006. – С. 65-71.

Материалы конференций:

63. Гуров В.С. Вторично-эмиссионные свойства поверхности металлов, полученных методом электролитического формования / В.С. Гуров, М.В. Дубков, И.В. Филиппов // Памяти Г.Н.Шуппе: материалы Всероссийского симпозиума по эмиссионной электронике. – Рязань, 1996. – С. 131.
64. Гуров В.С. Исследование процессов, происходящих на поверхности металлов при облучении медленными ионами и электронами / В.С. Гуров, И.В. Филиппов, М.В. Дубков // Памяти Г.Н.Шуппе: материалы Всероссийского симпозиума по эмиссионной электронике. – Рязань, 1996. – С. 177-178.
65. Гуров В.С. Гиперболические системы фокусировки и транспортировки пучков заряженных частиц для вторично-ионной и вторично-электронной спектроскопии / В.С. Гуров, М.В. Дубков // Памяти Г.Н.Шуппе: материалы Всероссийского симпозиума по эмиссионной электронике. – Рязань, 1996. – С. 181.

66. Гуров В.С. О возможности нормализации свойств поверхности металлов, подвергшихся облучению заряженными частицами / В.С. Гуров, И.В. Филиппов, М.В. Дубков // Памяти Г.Н.Шуппе: материалы Всероссийского симпозиума по эмиссионной электронике. – Рязань, 1996. – С. 199-200.
67. Sheretov E.P. Quadrupole Mass-Analyzers in Space Research / E.P. Sheretov, V.S. Gurov, M.V. Dubkov // 14th International Mass Spectrometry Conference. – Tampere, Finland, 1997. – P. 229.
68. Гуров В.С. Исследование экзоелектронной эмиссии с поверхности металлов под действием медленных электронов / В.С. Гуров, М.В. Дубков, И.В. Филиппов // Эмиссионная электроника, новые методы и технологии: сб. тез. докл. Межд. конф. – Ташкент, 1997. – С. 102.
69. Гуров В.С. Исследование процессов, происходящих на поверхности металлов под действием медленных электронов / В.С. Гуров, М.В. Дубков, И.В. Филиппов // Эмиссионная электроника, новые методы и технологии: сб. тез. докл. Межд. конф. – Ташкент, 1997. – С. 182.
70. Гуров В.С. О возможности восстановления свойств металлических поверхностей, подвергшихся облучению медленными электронами / В.С. Гуров, М.В. Дубков, И.В. Филиппов // Эмиссионная электроника, новые методы и технологии: сб. тез. докл. Межд. конф. – Ташкент, 1997. – С. 183.
71. Шеретов Э.П. Технология электролитического формирования сложнопроводных электродных систем для аналитического приборостроения / Э.П. Шеретов, В.С. Гуров, М.В. Дубков // Новые материалы и технологии: сб. тез. докл. Росс. науч.-техн. конф. – М.: МАТИ-РГТУ, 1997. – С. 79.
72. Шеретов Э.П. Исследование свойств конструкционных материалов электронной техники, полученных методом электролитического формирования / Э.П. Шеретов, В.С. Гуров, М.В. Дубков, И.В. Филиппов // Электроника и информатика-97: сб. тез. докл. Всеросс. науч.-техн. конф. – Москва, 1997. – С. 29.
73. Шеретов Э.П. Технология изготовления сложнопроводных электродных систем методом электролитического формирования / Э.П. Шеретов, В.С. Гуров, М.В. Дубков // Электрофизические и электрохимические технологии: сб. тез. докл. Межд. науч.-техн. конф. – СПб.: СПбГТУ, 1997. – С. 35.
74. Гуров В.С. О выборе материала неразрушаемой формы для прецизионного электролитического формирования электронно- и ионно-оптических систем / В.С. Гуров, М.В. Дубков // Электрофизические и электрохимические технологии: сб. тез. докл. Межд. науч.-техн. конф. – СПб.: СПбГТУ, 1997. – С. 36.
75. Гуров В.С. Технология изготовления высокоточной разрушаемой формы для электролитического формирования электронно- и ионно-оптических систем / В.С. Гуров, М.В. Дубков // Электрофизические и электрохимические технологии: сб. тез. докл. Межд. науч.-техн. конф. – СПб.: СПбГТУ, 1997. – С. 37.
76. Гуров В.С. О выборе материала для изготовления электронно- и ионно-оптических систем методом электролитического формирования / В.С. Гуров, М.В. Дубков // Электрофизические и электрохимические технологии: сб. тез. докл. Межд. науч.-техн. конф. – СПб.: СПбГТУ, 1997. – С. 38.
77. Гуров В.С. О выборе материала покрытия, обеспечивающего срок службы электронно- и ионно-оптических систем, изготовленных методом электролитического формирования / В.С. Гуров, М.В. Дубков, И.В. Филиппов // Электрофизические и электрохимические технологии: сб. тез. докл. Межд. науч.-техн. конф. – СПб.: СПбГТУ, 1997. – С. 39.
78. Шеретов Э.П. Гиперболические масс-анализаторы с одномерной сортировкой для космических исследований и охраны окружающей среды / Э.П. Шеретов, В.С. Гуров, М.В. Дубков // Научные основы высоких технологий: сб. тез. докл. Межд. науч.-техн. конф. – Новосибирск: НГТУ, 1997. С. 63-66.

79. Гуров В.С. Гиперboloидные масс-анализаторы с одномерной сортировкой для экологических исследований / В.С. Гуров, М.В. Дубков, О.В. Корнеева // сб. тез. докл. 2-й Республ. конф. по физической электронике. – Ташкент, 1999. – С.151.
80. Sheretov E.P. Opportunities for Improvements of Monopole Mass Spectrometer Performances / E.P. Sheretov, V.S. Gurov, M.V. Dubkov, O.V. Korneeva // 15th International Mass Spectrometry Conference. Barcelona, Spain. – 2000. – P. 66.
81. Sheretov E.P. Utilization and Prospects of Border Compression Mode for Quadrupole Mass Spectrometers / E.P. Sheretov, O.W. Rozhkov, V.S. Gurov, M.V. Dubkov, A.A. Fefelov, Y.V. Gilev, M.A. Burobin // 15th International Mass Spectrometry Conference. – Barcelona, Spain, 2000. – P. 70.
82. Гуров В.С. Масс-спектрометр «МАЛ-1Ф» / В.С. Гуров, Б.И. Колотилин, М.В. Дубков, Н.В. Веселкин, М.А. Буробин, А.Е. Малютин, Е.В. Мамонтов, А.П. Борисовский // К.Э. Циолковский – 150 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика: сб. тез. докл. 5-й Межд. науч.-техн. конф. – Рязань, 2007. – С. 144-146.
83. Dubkov M. QMF with the long focus energy separator to SIMS / M. Dubkov, V. Gurov, A. Trubitsyn // 15th Nordic Conference in Mass Spectrometry. – Hafjell, Lillehammer, Norway, 2013. – P. 53.
84. Дубков М.В. Монопольный масс-анализатор с реверсивной секцией / М.В. Дубков, М.А. Буробин, И.А. Харланов // Инновации в науке, производстве и образовании: сб. тр. науч.-практ. конф. – Рязань, 2013. – С. 9-12.
85. Dubkov M. Methods to improve analytical characteristics of monopole mass spectrometers / M. Dubkov, M. Burobin, V. Ivanov, I. Kharlanov // 20th International Mass Spectrometry Conference. – Geneva, Switzerland, 2014. – P. 444.
86. Dubkov M.V. Separation of the ions by using mapping features of quadrupole lens / M.V. Dubkov, V.V. Ivanov // 9th International Conference on Charged Particle Optics. – Brno, Czech Republic, 2014. – P. 74.
87. Dubkov M.V. AES-SIMS Combine / M.V. Dubkov, P.I. Kuksa, D.Yu. Tarabrin, A.A. Trubitsyn // 9th International Conference on Charged Particle Optics. – Brno, Czech Republic, 2014. – P. 87.
88. Dubkov M.V. Electrode system of the monopolar mass-analyzer / M.V. Dubkov, M.A. Burobin, I.A. Kharlanov, D.A. Ignatyev // 3rd Mediterranean Sea Region Countries Mass Spectrometry Workshop (MEDMS III). – Athens, Greece, 2015. – P. 93.
89. Gurov V.S. Quadrupole mass filter with break of the longitudinal axis / V.S. Gurov, M.V. Dubkov, V.V. Ivanov, A.A. Trubitsyn, A.V. Nikolaev // 3rd Mediterranean Sea Region Countries Mass Spectrometry Workshop (MEDMS III). – Athens, Greece, 2015. – P. 94.
90. Dubkov M.V. Multisectional monopolar mass-analyzer / M.V. Dubkov, V.S. Gurov, I.A. Kharlanov, M.A. Burobin // 21st International Mass Spectrometry Conference. – Toronto, Canada, 2016. – P. 193.
91. Dubkov M.V. Two-channel monopolar mass-analyzer / M.V. Dubkov, M.A. Burobin, V.S. Gurov, I.A. Kharlanov // 21st International Mass Spectrometry Conference. – Toronto, Canada, 2016. – P. 194.
92. Vlasov A.N. Mass analysis of the gas composition after the electrical explosion of copper spirals with a dielectric coating / A.N. Vlasov, M.V. Dubkov, M.A. Burobin // XXXII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter. – Elbrus, Russia, 2017. – P. 368.
93. Dubkov M.V. Universal electrode for quadrupole electrode systems / M.V. Dubkov, M.A. Burobin, V.V. Ivanov, A.E. Malutin, V.S. Gurov // 22nd International Mass Spectrometry Conference. – Florence, Italy, 2018. – P. 326-327.

Дубков Михаил Викторович

СИНТЕЗ МАСС-СЕЛЕКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ СТРУКТУР
С ВОЗМУЩЕНИЯМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Подписано в печать 22.02.1019 г. Формат бумаги 60 × 84 1/16.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 2,0.
Тираж 100 экз.
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.