

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Рязанский государственный радиотехнический университет»



На правах рукописи

ХАРЛАНОВ Игорь Алексеевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
МНОГОСЕКЦИОННОЙ ЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМЫ
МОНОПОЛЬНОГО МАСС-АНАЛИЗАТОРА**

Специальность 01.04.01 –
Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2018

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

Научный руководитель: **Дубков Михаил Викторович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Общая и экспериментальная физика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет», г. Рязань.

Официальные оппоненты: **Бердников Александр Сергеевич**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института аналитического приборостроения Российской академии наук, г. Санкт-Петербург;

Кобаев Игорь Александрович, кандидат физико-математических наук, инженер-исследователь ООО «Т8 НТЦ», г. Москва.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г Москва.

Защита состоится «10» апреля 2018 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 «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, д.ф.-м.н., проф. _____ Чиркин М.В.



Общая характеристика работы

Актуальность темы

Развитие современного производства неразрывно связано с применением новых материалов, которые позволяют повысить эффективность производимой продукции. Поэтому для развития любой отрасли производства необходима информация о составе и структуре веществ и, следовательно, их свойствах. Соответственно и необходимо развитие аналитического приборостроения, которое производит приборы способные «рассказать» о веществах.

Более того, рост промышленности в наше время способствует росту числа и масштабов техногенных факторов, пагубно влияющих на окружающую среду. Контроль экологической обстановки и принятие правильных мер по предотвращению экологических катастроф требует соответствующего аналитического оборудования, способного определять малые количества загрязняющих веществ.

Среди методов анализа веществ масс-спектрометрический является наиболее универсальным и информативным. Широкое применение в масс-спектрометрии получили гиперболоидные масс-анализаторы, относящиеся к приборам динамического типа и обладающие высокими аналитическими характеристиками: разрешающей способностью и чувствительностью.

Одним из гиперболоидных масс-анализаторов является и монополь, который представляет четверть квадрупольного фильтра масс, и состоит из стержневого и уголкового электродов между которыми создаётся высокочастотное электрическое поле. Частицы с определённым удельным зарядом, пролетающие через такое электрическое поле, будут совершать колебания с ограниченной амплитудой и попадут в детектор.

Наличие уголкового электрода накладывает дополнительные ограничения на движение ионов, что определяет ряд преимуществ и недостатков монополюсных масс-анализаторов. К преимуществам монополюсов относят: малые габариты и вес, простоту конструкции, низкие требования к стабильности питающего напряжения, относительно низкую себестоимость, по сравнению с другими масс-спектрометрами (квадрупольными фильтрами масс, ионными ловушками, магнитными масс-спектрометрами). Однако, монополюсные

масс-анализаторы обладают недостаточно высокими аналитическими характеристиками: чувствительностью и разрешающей способностью.

Современная конструкция электродной системы монополюсного масс-анализатора состоит из нескольких коротких секций, содержащих тонкостенные гиперболические стержневой и уголковогой электроды, изготовленные по технологии электролитического формования сложнопрофильных электродов. Такая конструкция позволяет получить качественное электрическое поле, максимально приближенное к идеальному, а также обеспечивает устойчивость к вибрационным нагрузкам и прочность.

К такой конструкции электродной системы монополюсного масс-анализатора возникает вопрос: можно ли добиться улучшения аналитических характеристик за счёт расположения электродов в секции или расположения секций относительно друг друга? Исследования, направленные на решение данного вопроса, рассматриваются в данной диссертационной работе.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является увеличение аналитических характеристик монополюсного масс-анализатора за счёт модификации геометрии электродной системы путём изменения взаимного расположения отдельных электродов в секции или целых секций относительно друг друга без изменения существующей технологии изготовления электродов.

Поставленная цель диссертационной работы достигалась решением следующих задач:

- исследование влияния продольного электрического поля на разрешающую способность и чувствительность монополюсного масс-анализатора;
- разработка конструкции электродной системы монополюсного масс-анализатора с продольной составляющей электрического поля;
- исследование особенностей траекторий заряженных частиц масс-анализатора, участвующих в формировании массового пика;

- исследование влияния электрического поля между секциями электродов двухсекционного монополюсного масс-анализатора на аналитические характеристики прибора;
- выбор параметров расположения электродов с развёрнутым расположением секций;
- разработка конструкции многосекционной электродной системы монополюсного масс-анализатора с развёрнутым расположением секций.

Научная новизна диссертационного исследования состоит в следующем:

- Показано влияние продольного электрического поля на условия сортировки заряженных частиц в монополюсном масс-анализаторе и аналитические характеристики монополя.
- Показано влияние электрического поля в области между секциями электродов на движение заряженных частиц, в зависимости от взаимного расположения секций электродов.
- Показано теоретически и экспериментально положительное влияние диафрагмы, расположенной между секциями электродов, на аналитические характеристики монополюсного масс-анализатора

Практическая значимость диссертационной работы заключается в следующем:

- Представлен и исследован простой способ создания продольного электрического поля в монополюсном масс-анализаторе, позволяющий улучшить аналитические характеристики прибора.
- Разработана конструкция двухсекционного монополюсного масс-анализатора с развёрнутым расположением секций электродов, позволяющая повысить разрешающую способность устройства.
- Предложен и исследован способ ослабления влияния нелинейного электрического поля между секциями электродов, позволяющий повысить чувствительность монополюсного масс-анализатора с развёрнутым расположением электродов.

Реализация результатов работы

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы использовались на кафедре «Общая и экспериментальная физика» РГРТУ при выполнении НИР, а также внедрены в учебный процесс по дисциплине «Физические основы современных методов анализа вещества».

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Формирование продольного электрического поля в монопольном масс-анализаторе за счёт линейного увеличения расстояния между стержневым и уголковым электродами в направлении продольной оси монополя масс-анализатора приводит к росту интенсивности массового пика в 1,8 раза за счёт уменьшения поперечных составляющих электрического поля или к увеличению разрешающей способности в 1,5 раза из-за торможения частиц продольной составляющей электрического поля.

2. Использование поворота на 180° вокруг продольной оси второй секции электродов монопольного масс-анализатора относительно первой приводит к увеличению разрешающей способности монополя в 1,5 раза за счёт рассеяния заряженных частиц с большими поперечными скоростями.

3. Уменьшение влияния электрического поля между секциями электродов за счёт внедрения диафрагмы с потенциалом уголкового электрода позволяет увеличить разрешающую способность монопольного масс-анализатора с развёрнутым расположением электродных секций в 1,3 раза (до 250) и интенсивность массового пика в 1,7 раза.

Достоверность результатов работы

В диссертационном исследовании использовалась численная модель монопольного масс-анализатора, разработанная на основе расчёта траекторий заряженных частиц в электрическом поле методом Рунге-Кутты 4-го порядка. Электрическое поле во второй и третьей главах рассчитывалось методом конечных элементов по известным граничным условиям. В каждой главе присутствуют результаты экспериментальных исследований, проведённых на основе монопольного масс-спектрометра МАЛ-1Ф. Достоверность диссертационной работы подтверждается соответствием полученных

теоретических результатов, численного моделирования и экспериментальных исследований.

Апробация работы и публикации

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: «20-ая и 21-ая Международные конференции по масс-спектрометрии» в Швейцарии (2014 г.) и Торонто (2016 г.); «3-я Международная конференция по масс-спектрометрии стран Средиземноморского региона» в Афинах (2015 г.); «2-ая и 3-я Международные научно-практические конференции «Инновации в науке производстве и образовании», Рязань (2013, 2014 гг.); «3-я Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы науки, технологии и производства», Санкт-Петербург (2014 г.),

По результатам работы было опубликовано 5 статей, включенных в «Перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ», 9 тезисов международных научно-технических конференциях и получено 3 свидетельства патентов РФ на полезную модель.

Структура и объём работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и библиографического списка, изложена на 146 страницах и содержит 55 рисунков.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы и приведены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор литературы, рассмотрен принцип работы гиперболоидных масс-спектрометров, показано развитие электродной системы монополярных масс-анализаторов. На основании литературных источников выбрана цель и поставлены задачи диссертационного исследования.

Преимуществами монополярных масс-анализаторов являются простота конструкции, малые габариты и вес, более низкие требования к стабильности питающего напряжения. Существующая технология

электролитического формирования сложнопрофильных электродов позволяет создать электродную систему, электрическое поле в которой приближено к идеальному квадратичному распределению потенциала. Однако, время сортировки ионов ограничено временем пролёта в электродной системе, в результате этого часть частиц не сортируется и попадает в детектор.

Поскольку монополюсный масс-анализатор относится к малогабаритным приборам, важно найти решение, которое приведет к улучшению сортировки ионов в объёме масс-анализатора, но при этом не усложнит конструкцию электродной системы. Соответственно, следующие главы посвящены детальному анализу движения частиц в монополюсном масс-анализаторе и решениям, позволяющим повысить аналитические характеристики прибора.

Во второй главе рассматривается способ увеличения времени сортировки ионов в монополюсном масс-анализаторе путём торможения ионов продольным электрическим полем (патент на полезную модель РФ №143061).

Самый простой способ создать продольное электрическое поле в монополюсном масс-анализаторе – наклонить стержневой электрод относительно углового. Была разработана численная модель монополя, основанная на расчёте траекторий заряженных частиц методом Рунге-Кутты 4-го порядка. Анализ аналитических характеристик проводился по расчёту массового пика: для ионов с различными начальными координатами и скоростями рассчитывались траектории. Заряженные частицы, двигающиеся в пределах электродной системы масс-анализатора, считались стабильными. По расчёту множества траекторий и подсчёту числа стабильных из них при различных частотах высокочастотного напряжения моделировался массовый пик монополя.

Для расчёта траекторий была получена приближенная формула распределения электрического потенциала в объёме монополюсного масс-анализатора с продольной составляющей:

$$\varphi(x, y, z) \approx -\frac{U}{3r_0(r_0 + Kz)^2} [3r_0(y^2 - x^2) - 2Kzx^2],$$

где r_0 – характерный размер электродной системы, начальное расстояние гиперболического электрода относительно оси масс-

анализатора, K – коэффициент наклона стержневого электрода вдоль оси анализатора (угол наклона в рад.), U – разность потенциалов уголкового и стержневого электродов.

Также были проведены экспериментальные исследования на монополюсном масс-анализаторе МАЛ-1Ф, в котором для наклона стержневого электрода относительно уголкового, ближе к выходной диафрагме, увеличивалась толщина изолятора между электродами. Таким образом, расстояние между электродами линейно увеличивается по продольной оси, что приводит к появлению тормозящего ионы продольного электрического поля.

Зависимости аналитических характеристик от наклона стержневого электрода, полученные численным моделированием и экспериментальными исследованиями, отнесённые к значениям соответствующих характеристик монополюсного масс-анализатора традиционной конструкции показаны на рис. 1.

Наличие экстремума на зависимостях аналитических характеристик от угла наклона электрода объясняется тем, что при наклоне стержневого электрода вдоль оси анализатора по мере увеличения расстояния между электродами уменьшается величина поперечной составляющей напряжённости электрического поля и появляется продольная составляющая электрического поля, которая тормозит ионы.

Соответственно, при малых наклонах электрода тормозящее ионы воздействие электрического поля мало и интенсивность массового пика увеличивается за счёт постепенного уменьшения поперечных составляющих электрического поля. При больших углах наклона стержневого электрода сказывается торможение ионов, поэтому увеличивается разрешающая способность.

Технический результат, полученный в экспериментальных исследованиях: увеличение интенсивности массового пика в 1,8 раза или увеличение разрешающей способности в 1,3 раза без потерь в интенсивности массового пика.

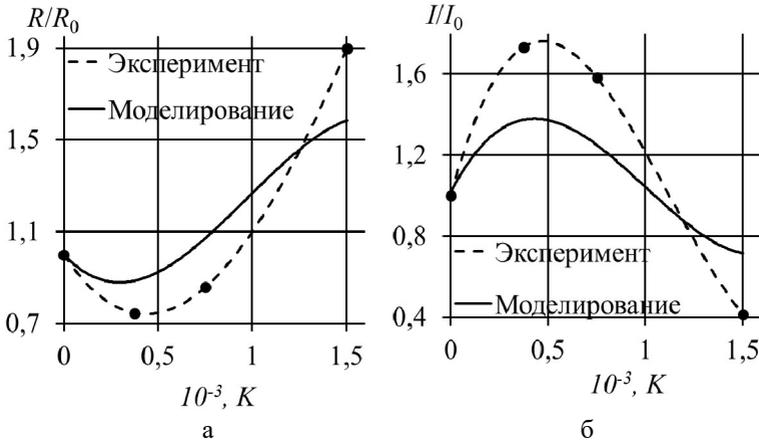


Рис. 1. Зависимости разрешающей способности (а) и интенсивности массового пика (б) монополярного масс-анализатора

В третьей главе исследуется метод увеличения аналитических характеристик монополярного масс-анализатора за счёт ограничения ионов с несортированными траекториями.

Проведённый анализ траекторий ионов в монополярном масс-анализаторе показал, что большинство стабильных траекторий заряженных частиц сфокусированы в область выходной диафрагмы. Однако, некоторые ионы за время пролёта не успевают набрать достаточной для нейтрализации на электродах амплитуды колебаний и тоже пролетают через выходную диафрагму в детектор, в добавок, если в качестве детектора используется вторично-электронный умножитель (ВЭУ), то электрическое поле ВЭУ проникает через диафрагму и способствует затягиванию несортированных ионов. Однако, такие несортированные ионы в области выходной диафрагмы обладают большими поперечными скоростями.

Для устранения несортированных ионов предлагается использовать конструкцию электродной системы монополярного масс-анализатора, состоящую из нескольких коротких электродных секций, содержащих полеобразующие стержневой и уголкового электроды, при этом каждая следующая секция развёрнута вокруг продольной оси относительно предыдущей на 180° и смещена по вертикальной и продольной осям (рис. 2). В результате этого между секциями

электродов будет практически свободное от электрического поля пространство, пролетая которое ионы с большими поперечными скоростями вылетят за пределы второй секции электродов и не попадут в детектор. (Патент на полезную модель РФ №167557)

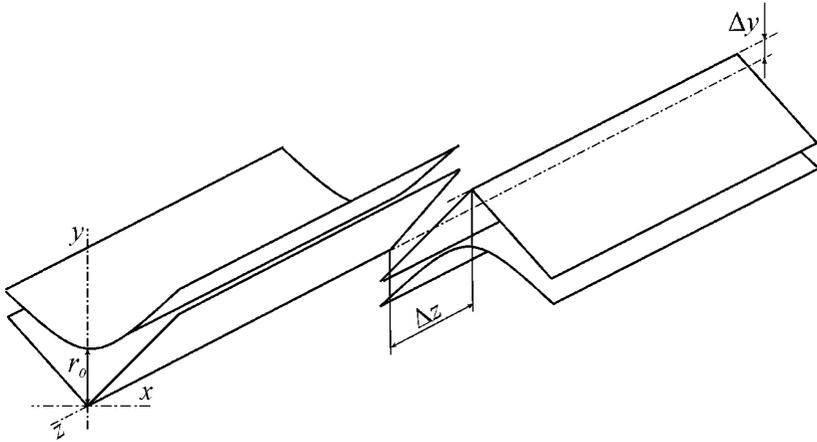


Рис. 2. Схема двухсекционной электродной системы монополюсного масс-анализатора с развёрнутым расположением электродных секций

Для исследования двухсекционного монополюсного масс-анализатора с развёрнутым расположением секций электродов была разработана численная модель монополюсного масс-анализатора. Распределение потенциала в области между секциями электродов рассчитывалось методом конечных элементов, а затем находились проекции напряжённости электрического поля и рассчитывались траектории заряженных частиц методом Рунге-Кутты 4-го порядка. По анализу пучка заряженных частиц рассчитывались аналитические характеристики монополюсного масс-анализатора.

Проведенные эксперименты по позиционированию секций электродов показали, что смещение секций по вертикальной оси y негативно влияет на аналитические характеристики, это объясняется тем, что с увеличением смещения Δy по вертикальной оси во вторую секцию попадают ионы с большими поперечными скоростями. Также

искажения электрического поля на выходе первой секции электродов и на входе второй секции электродов рассеивает стабильные ионы.

Смещение второй секции электродов по продольной оси z привели к повышению разрешающей способности монополюсного масс-анализатора при увеличении смещения Δz . Соответственно, наличие области слабого электрического поля между секциями электродов приводит к рассеянию ионов с большими поперечными скоростями.

Также была разработана конструкция монополюсного масс-анализатора на базе масс-спектрометра МАЛ-1Ф, электродная система которого выполнена из двух коротких секций. Для разворота второй секции относительно первой были изготовлены держатели.

Результаты экспериментальных исследований, их соотношение с численной моделью показаны на рис. 3. Значения разрешающей способности нормированы на значение разрешающей способности монополюсного масс-анализатора с традиционной конструкцией электродной системы одинаковой длины.

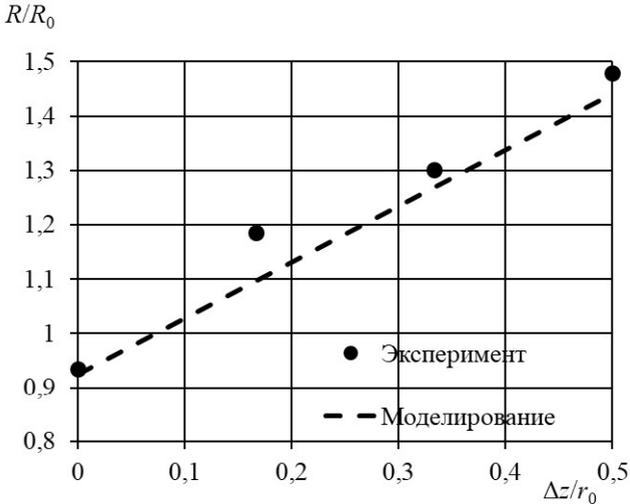


Рис. 3. Зависимости разрешающей способности от смещения второй секции по продольной оси при смещении по вертикальной оси $\Delta y = 0,167r_0$

По результатам проведенных в данной главе диссертации исследований можно заключить, что монополярный масс-анализатор с развёрнутым расположением секций электродов позволяет повысить разрешающую способность прибора. При этом необходимо сместить вторую секцию по вертикальной оси на наименьшее расстояние, обеспечивающее прохождение ионов ($\Delta y = 0,083 \div 0,167r_0$) и сдвинуть по продольной оси ($\Delta z = 0,333 \div 0,5r_0$). Был достигнут технический результат – увеличение разрешающей способности прибора в 1,5 раза при смещениях по продольной оси $\Delta z = 0,5r_0$ и по вертикальной $\Delta y = 0,167r_0$ относительно монополярного масс-анализатора с традиционной конструкцией электродов при их одинаковой длине.

В четвёртой главе рассматривается способ увеличения трансмиссии ионов в области между секциями электродов. Как показали исследования распределения электрического поля в межсекционной области, вблизи угловых электродов присутствует градиент электрического потенциала, который приводит к рассеянию всех ионов, пролетающих эту область, из-за этого часть стабильных ионов вылетает за пределы аксептанса второй секции электродов и, соответственно, не попадают в детектор, что в итоге приводит к снижению чувствительности масс-анализатора.

Для снижения потерь ионов предлагается добавить между секциями электродов диафрагму с потенциалом углового электрода, при этом между секциями электродов ослабляется электрическое поле и снижается рассеяние стабильных ионов.

По аналогии с предыдущей главой составлена численная модель монополярного масс-анализатора с диафрагмой между секциями электродов и исследовано влияние радиуса диафрагмы на аналитические характеристики прибора.

Также в масс-анализаторе с развёрнутым расположением секций электродов была прикреплена диафрагма к угловому электроду в конце первой секции и проведены экспериментальные исследования влияния радиуса отверстия на аналитические характеристики монополя.

На рис. 4. приведены зависимости разрешающей способности (а) и интенсивности массового пика (б) масс-анализатора с диафрагмой между секциями электродов, показано сравнение численного моделирования и эксперимента. Значения аналитических

характеристик нормированы на соответствующие значения монопольного масс-анализатора традиционной конструкции с одинаковой длиной электродной системы. Значения радиуса диафрагмы нормированы на характерный размер электродной системы.

Зависимости отражают снижение разрешающей способности монополя с увеличением радиуса диафрагмы и наблюдается максимум интенсивности массового пика. Рост интенсивности массового пика свидетельствует об ограничении ионов диафрагмой малого радиуса. Снижение интенсивности пика и разрешающей способности наблюдается из-за того, что диафрагма большого радиуса практически не влияет на электрическое поле между секциями электродов, что приводит к рассеянию ионов.

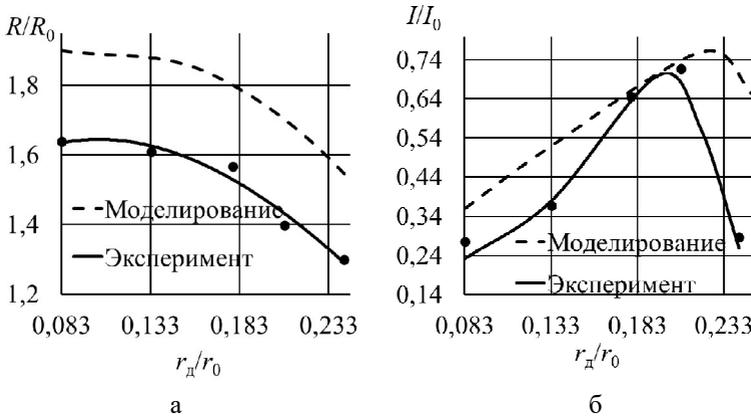


Рис. 4. Зависимости аналитических характеристик монопольного масс-анализатора с диафрагмой между секциями электродов от её радиуса, получены при смещениях $\Delta z = 0,5r_0$ и $\Delta y = 0,167r_0$

Таким образом, за счёт ослабления электрического поля диафрагмой между секциями электродов повышается разрешающая способность и повышается интенсивность массового пика монопольного масс-анализатора с развёрнутым расположением электродных секций. Экспериментально получен результат: при радиусе диафрагмы $r_d = 0,179r_0$ происходит увеличение разрешающей способности в 1,6 раза и снижение потерь в интенсивности массового

пика до 30%, по сравнению с масс-анализатором традиционной конструкции.

В заключении диссертации подводятся основные итоги проделанной работы.

1. Разработана численная модель монополюсного масс-анализатора с продольным электрическим полем. Изготовлен экспериментальный масс-анализатор с продольным электрическим полем, в котором продольное электрическое поле создавалось наклоном стержневого электрода относительно уголкового.

2. Исследовано с помощью численной модели и эксперимента влияние наклона стержневого электрода относительно уголкового по продольной оси на аналитические характеристики монополя. Получено увеличение интенсивности массового пика в 1,8 раза, при снижении разрешающей способности на 25%, за счёт уменьшения поперечных составляющих электрического поля. При большем наклоне стержневого электрода из-за торможения ионов наблюдается рост разрешающей способности в 1,3 раза.

3. Проведены исследования траекторий заряженных частиц в монополюсном масс-анализаторе, ограничивающих разрешающую способность. Показано, что несортированные ионы в области выходной диафрагмы обладают большими поперечными скоростями.

4. Предложен способ ограничить пролёт несортированных заряженных частиц, который заключается в использовании монополюсного масс-анализатора, электродная система которого состоит из двух идентичных секций, при этом вторая секция электродов развернута вокруг продольной оси анализатора на 180° и смещена относительно первой. Это позволяет исключить частицы, летящие с большими поперечными скоростями, в промежутке между секциями электродов и повысить разрешающую способность.

5. Разработана численная модель монополюсного масс-анализатора с развёрнутым расположением электродных секций и подготовлен экспериментальный масс-спектрометр с развёрнутым расположением электродных секций. По результатам исследований предложен способ повысить разрешающую способность в 1,5 раза.

6. Предложена и исследована конструкция монополюсного масс-анализатора с развёрнутым расположением электродных секций и

диафрагмой с потенциалом уголкового электрода между секциями, в которой уменьшение влияния нелинейного искажения поля между секциями электродов приводит к увеличению чувствительности.

7. Результаты численных и экспериментальных исследований показали, что диафрагма с потенциалом уголкового электрода между секциями позволяет повысить разрешающую способность в 1,6 раза при потерях интенсивности массового пика 30% по сравнению с монополярным масс-анализатором такой же длины с традиционным расположением электродных секций.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. В.С. Гуров, М.В. Дубков, М.А. Буробин, О.В. Рожков, И.А. Харланов. Увеличение интенсивности массового пика монополярного масс-анализатора с продольным электрическим полем. // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. Вып. 44. – С.73-76.

2. В.С. Гуров, М.В. Дубков, М.А. Буробин, И.А. Харланов. Форма массового пика монополярного масс-анализатора с учетом отраженных ионов. // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013 Вып. 46. С.61-64.

3. В.С. Гуров, М.В. Дубков, М.А. Буробин, И.А. Харланов. Уменьшение влияния нестабильных ионов на работу монополярного масс-анализатора. // Успехи современной радиоэлектроники. 2014. № 6. С. 4-8.

4. В.С. Гуров, М.В. Дубков, М.А. Буробин, И.А. Харланов. Оптимизация переходной области двухсекционного монополярного масс-анализатора. // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 52. С. 150-154.

5. В.С. Гуров, М.В. Дубков, М.А. Буробин, В.В. Иванов, А.В. Николаев, И.А. Харланов. Квадрупольные масс-анализаторы на основе тонкостенных гиперболических электродных систем. // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 60. С. 141-146.

Патенты

6. М.В. Дубков, М.А. Буробин, И.А. Харланов. Монопольный масс-анализатор с продольным электрическим полем. Патент на ПМ РФ №143061 заявл. 11.12.2013 опубл. 10.07.2014 Бюл №19.

7. В.С. Гуров, М.В. Дубков, М.А. Буробин, И.А. Харланов. Конструкция многосекционного гиперболоидного масс-анализатора. Патент на ПМ РФ №156466 заявл. 27.01.2015 опубл. 10.11.2015 Бюл. №31.

8. В.С. Гуров, М.В. Дубков, М.А. Буробин, И.А. Харланов. Многосекционный монопольный масс-анализатор. Патент на ПМ РФ №167557 заявл. 12.04.2016 опубл. 10.01.2017 Бюл №1.

Тезисы конференций

9. V.S. Gurov, M.V. Dubkov, M.A. Burobin, O.V. Rozhkov, I.A. Kharlanov. Improvement of the analytical characteristics of monopole mass analyzer with modified electrode geometry. // Materials of the IV international research and practice conference Vol.1 April 10th-11th 2013 – Germany Munich P. 198-203.

10. М.В. Дубков, М.А. Буробин, И.А. Харланов. Монопольный масс-анализатор с реверсивной секцией. // Сборник трудов II Международной научно-практической конференции Инновации в науке производстве и образовании, Рязанский государственный университет им С.А. Есенина 14-16 октября 2013г С. 9-12.

11. M. Dubkov, M. Burobin, V. Ivanov, I. Kharlanov. Methods to improve analytical characteristics monopole mass spectrometers. // 20th International mass spectrometry conference. August 24–29 2014 Switzerland Geneva P.444.

12. И.А. Харланов. Двухкаскадный монопольный масс-анализатор. // Сборник трудов III Международной научно-практической конференции Инновации в науке производстве и образовании, Рязанский государственный университет им С.А. Есенина 13-14 октября 2014г С. 13-16.

13. И.А. Харланов. Увеличение разрешающей способности двухкаскадного монопольного масс-анализатора. // III Международная научно-практическая конференция Актуальные

вопросы науки, технологии и производства, 21-22 ноября 2014 С-Пб, С108-111.

14. M. Dubkov, M. Burobin, D. Ignatyev, I. Kharlanov. Electrode system of the monopolar mass analyzer. // 3rd Mediterranean sea region countries mass spectrometry workshop, June 28 – July 2, 2015, Athens, Greece, P.93.

15. И.А. Харланов. Метод расчёта траекторий заряженных частиц в электрических полях. // Сборник трудов XXVIII Международной научной конференции Математические методы в технике и технологии в 12 Т. // Саратов, Ярославль, Рязань, 2015 Т. 9 С.30-33.

16. V.S. Gurov, M.V. Dubkov, M.A. Burobin, I.A.Kharlanov. Multisectional monopolar mass analyzer. // 21th International mass spectrometry conference. August 20–26 2016 Canada, Toronto P.193.

17. V.S. Gurov, M.V. Dubkov, M.A. Burobin, I.A.Kharlanov. Two-channel monopolar mass analyzer. // 21th International mass spectrometry conference. August 20–26 2016 Canada, Toronto P.194.

Харланов Игорь Алексеевич

Разработка и исследование многосекционной
электродной системы монопольного масс-анализатора

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 29.01.2018 г. Формат бумаги 60×84 1/16.

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

Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.