

На правах рукописи



БУРОБИН Михаил Анатольевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ
И РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМЫ
МОНОПОЛЬНОГО МАСС-АНАЛИЗАТОРА**

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2010

Работа выполнена на кафедре «Общая и экспериментальная физика»
ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук,
доцент Дубков Михаил Викторович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Явор Михаил Игоревич,
доктор физико-математических наук,
профессор Волков Степан Степанович

Ведущая организация: Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», г. Москва

Защита состоится «1» февраля 2011 г. в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 в зале ученого совета, ауд. 235, ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Автореферат разослан «10» декабря 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, профессор



Б.И. Колотилин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Монопольные масс-анализаторы находят широкое применение при создании малогабаритной масс-спектрометрической аппаратуры, предназначенной для количественного анализа газовых смесей. Этому способствуют их малые габариты и вес, простота конструкции, дешевизна изготовления. Однако монопольные масс-анализаторы имеют относительно невысокие аналитические параметры по сравнению с другими типами квадрупольных масс-спектрометров (трехмерная ионная ловушка, квадрупольный фильтр масс). В связи с этим улучшение аналитических параметров монопольного масс-анализатора является актуальной задачей.

В рабочем объеме любой реальной электродной системы масс-анализатора в распределении потенциала электрического поля по координатам содержатся составляющие высших порядков (выше 2-го). Теоретические и экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что их наличие нежелательно, поскольку они снижают чувствительность и разрешающую способность прибора. Однако при изготовлении электродных систем для обеспечения требуемых массогабаритных показателей приходится ограничивать гиперболические поверхности электродов, кроме того, при эксплуатации прибора возможны деформации электродов и образование на них диэлектрических пленок. Таким образом, полностью исключить составляющие потенциала высших порядков принципиально невозможно. В связи с этим возникает вопрос: а нельзя ли их каким-либо образом использовать для улучшения аналитических параметров масс-анализатора? Для ответа на этот вопрос необходимо провести исследование влияния составляющих высших порядков на аналитические параметры монопольного масс-анализатора и попытаться найти пути их улучшения. Технические решения, разработанные на основе полученных результатов, позволят совершенствовать монопольные масс-анализаторы, что расширит область их применения.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является улучшение аналитических характеристик монопольного масс-анализатора путем введения в распределение электрического потенциала составляющих высших порядков и разработка электродной системы монопольного масс-анализатора.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- исследование взаимосвязи между составляющими высших порядков распределения электрического потенциала и профилем полеобразующих электродов монопольного масс-анализатора;
- исследование влияния составляющих высших порядков распределения потенциала на аналитические параметры монопольного масс-анализатора, поиск возможных путей их улучшения;
- разработка методики расчета весовых коэффициентов составляющих распределения потенциала в технологической конструкции монопольного масс-анализатора;
- определение степени полиномиального ряда, описывающего распределение потенциала в монопольном масс-анализаторе;
- определение уровня ограничения гиперболических поверхностей электродов монопольного масс-анализатора, при котором доля составляющих высших порядков распределения потенциала минимальна;
- модернизация технологии изготовления электродной системы монопольного масс-анализатора с целью улучшения его потребительских характеристик.

Научная новизна

1. Установлены закономерности, связывающие определенные составляющие распределения потенциала и соответствующие им профили электродов монопольного масс-анализатора.
2. Показано, что путем определенной коррекции профиля полеобразующих электродов монопольного масс-анализатора, состоящей в том, что в распределение электрического потенциала вводятся составляющие высших порядков (до 10-го порядка), можно улучшить форму массового пика: из «треугольной» она преобразуется в «прямоугольную»; при этом коэффициент формы увеличивается от 0,5 до 0,8.
3. Определена степень полиномиального ряда, аппроксимирующего распределение потенциала в монопольном масс-анализаторе; показано, что ограничение составляющими 10-го порядка обеспечивает относительную погрешность аппроксимации не более 0,02 %.
4. Определен уровень ограничения гиперболических поверхностей электродов в технологической конструкции монопольного масс-анализатора, при котором доля составляющих высших порядков в распре-

делении потенциала минимальна; показано, что для электродной системы с V-образным угольным электродом уровень ограничения составляет $1,6r_0$, для электродной системы с гиперболическим угольным электродом – $1,38r_0$, где r_0 – радиус поля.

5. В технологии изготовления электродной системы монопольного масс-анализатора предложен новый способ отделения электродов от форм за счет разности их коэффициентов теплового расширения, использование которого позволяет повысить предельную рабочую температуру масс-анализатора до 200 °С.

Практическая ценность работы

1. Установлено, что наличие в распределении потенциала определенных составляющих высших порядков (до 10-го порядка), вызванных симметричными деформациями электродов, приводит к улучшению формы массового пика от 0,5 до 0,8 и, как следствие, к увеличению динамического диапазона монопольного масс-анализатора до 10^6 .

2. Разработан пакет программ, позволяющих анализировать распределение потенциала в различных конструкциях монопольного масс-анализатора, а также моделировать работу монопольного масс-анализатора при заданном распределении потенциала.

3. Разработаны принципы конструирования электродной системы монопольного масс-анализатора.

4. Разработан способ изготовления электродной системы монопольного масс-анализатора, улучшающий его потребительские параметры: динамический диапазон, предельную рабочую температуру.

5. Разработана конструкция электродной системы монопольного масс-анализатора масс-спектрометра «МАЛ-1Ф».

Реализация результатов работы

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы использовались на кафедре «Общая и экспериментальная физика» РГРТУ при выполнении НИОКР по созданию масс-спектрометрической аппаратуры, а также внедрены в учебный процесс по дисциплине «Физические основы современных методов анализа вещества». Разработанный способ изготовления электродной системы монопольного масс-анализатора позволил создавать электродные системы, удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к исследовательской аппаратуре. Изготов-

ленные по модернизированной технологии монопольные масс-анализаторы вошли в состав аппаратуры для космических исследований в рамках проекта «ФОБОС-Грунт», проводимого институтами ИКИ РАН и ГЕОХИ РАН.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Коррекция профиля полеобразующих электродов монопольного масс-анализатора, обеспечивающая контролируемое введение составляющих высших порядков в распределение потенциала, существенно (от 0,5 до 0,8) увеличивает коэффициент формы и улучшает форму массового пика, приближая её к «прямоугольной».

2. Ограничение полиномиального ряда, описывающего распределение потенциала, составляющими 10-го порядка обеспечивает достаточно высокую (относительная погрешность не более 0,02 %) точность аппроксимации при расчете аналитических параметров монопольного масс-анализатора.

3. Заданное содержание составляющих высших порядков в распределении потенциала в масс-анализаторе с тонкостенными гиперболическими электродами целесообразно обеспечивать путем вариаций размеров и расположения плоских керамических изоляторов в концевых областях электродов и выбора определенных значений расстояния от центра до концевых областей ($1,6r_0$ для системы с V-образным уголковым электродом и $1,38r_0$ для системы с гиперболическим уголковым электродом, где r_0 – радиус поля), что позволяет улучшить аналитические характеристики монопольного масс-анализатора.

4. При изготовлении электродной системы монопольного масс-анализатора методом электролитического формования отделение электродов от форм за счет разности их коэффициентов теплового расширения обеспечивает получение идентичных высокоточных (погрешность не более ± 2 мкм) электродов, способных работать при повышенной (до 200 °С) температуре.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на 5-й международной научно-технической конференции «К.Э. Циолковский – 150 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформа-

тика», Рязань, 2007 г.; конференции молодых ученых ЦФО «Актуальные направления научных исследований», Калуга, 2009 г.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 7 печатных работ, из них 3 статьи опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК для защиты кандидатских диссертаций, 2 работы – в материалах международных и всероссийских научно-технических конференций, получен патент на изобретение.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 68 наименований и приложений, содержит 173 страницы машинописного текста, в том числе 69 рисунков, 3 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе приведен краткий обзор литературы по масс-спектрометрии, типам гиперболоидных масс-спектрометров (ГМС), их конструкциям и режимам работы.

На основе литературных источников описаны принципы работы и основы построения ГМС; рассмотрены основные конструкции анализаторов ГМС: ионная ловушка, квадрупольный фильтр масс и монопольный масс-анализатор; проанализированы особенности их работы и аналитические характеристики. Особое внимание уделено вопросам, касающимся распределения потенциала в анализаторах ГМС. Проанализировано влияние нелинейных искажений электрического поля на аналитические параметры ГМС.

По результатам проведенного обзора литературы сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Во второй главе анализируется влияние составляющих высших порядков в распределении потенциала на аналитические характеристики монопольного масс-анализатора: форму массового пика, разрешающую способность, чувствительность, добротность.

Функцию распределения потенциала в анализаторе ГМС можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned}
u(x, y) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_{2n} \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k (2n)!}{(2n-2k)!(2k)!} x^{2n-2k} y^{2k} + \right. \\
\left. + b_{2n} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(-1)^k (2n-1)!}{(2n-(2k+1))!(2k+1)!} x^{2n-(2k+1)} y^{2k+1} + \right. \\
\left. + c_{2n+1} \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k (2n+1)!}{(2n+1-2k)!(2k)!} x^{2k} y^{2n+1-2k} + d_{2n+1} \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k (2n+1)!}{(2n+1-2k)!(2k)!} x^{2n+1-2k} y^{2k} \right], \quad (1)
\end{aligned}$$

где $a_0, a_{2n}, b_{2n}, c_{2n+1}, d_{2n+1}$ – постоянные коэффициенты.

В распределении потенциала (1) составляющие разделены на 4 группы с весовыми коэффициентами $a_{2n}, b_{2n}, c_{2n+1}, d_{2n+1}$, различающиеся степенями переменных x и y . Функцию в виде (1) удобно использовать для расчета профиля полеобразующих электродов масс-анализатора и исследования влияния отдельных составляющих потенциала высших порядков на его аналитические параметры. Было установлено, что появление в распределении потенциала составляющих с весовыми коэффициентами a_{2n} и c_{2n+1} связано с симметричными относительно оси OY деформациями электродов анализатора, а появление составляющих с весовыми коэффициентами b_{2n} и d_{2n+1} – с несимметричными. Причем появление составляющих с весовыми коэффициентами c_{2n+1} , а также $a_4, a_8, a_{12}, \dots$ вызвано симметричными деформациями обоих электродов (стержневого и уголкового) масс-анализатора, а появление составляющих с весовыми коэффициентами $a_6, a_{10}, a_{14}, \dots$ – симметричными деформациями только стержневого электрода. Рассматривая краевые области электродной системы как симметричные деформации электродов, следует ожидать, что в технологической конструкции монополярного масс-анализатора будут преобладать составляющие с весовыми коэффициентами a_{2n} и c_{2n+1} . Данное предположение подтверждено результатами, приведенными в третьей главе настоящей работы.

Для расчета массового пика разработана математическая модель, в основе которой лежит решение дифференциального уравнения движения иона в переменном электрическом поле монополярного масс-анализатора численным методом. При моделировании работы масс-анализатора ионы с заданными начальными параметрами (координата и скорость), чьи траектории оставались ограниченными при их движении вдоль оси масс-анализатора и удовлетворяли условиям фокусировки в точке положения выходной диафрагмы масс-анализатора, считались зарегистрированными.

Интенсивность массового пика рассчитывалась как отношение количества ионов, зарегистрированных на выходе из масс-анализатора, к общему числу вводимых ионов за заданный промежуток времени.

Исследование влияния составляющих высших порядков распределения потенциала на аналитические характеристики монопольного масс-анализатора сводилось к тому, что для выбранной составляющей с заданным весовым коэффициентом рассчитывался массовый пик и определялись его характеристики: форма, разрешающая способность, чувствительность и добротность. В целом подтвердилось негативное влияние составляющих высших порядков на аналитические характеристики масс-анализатора. Однако в ряде случаев был обнаружен положительный эффект.

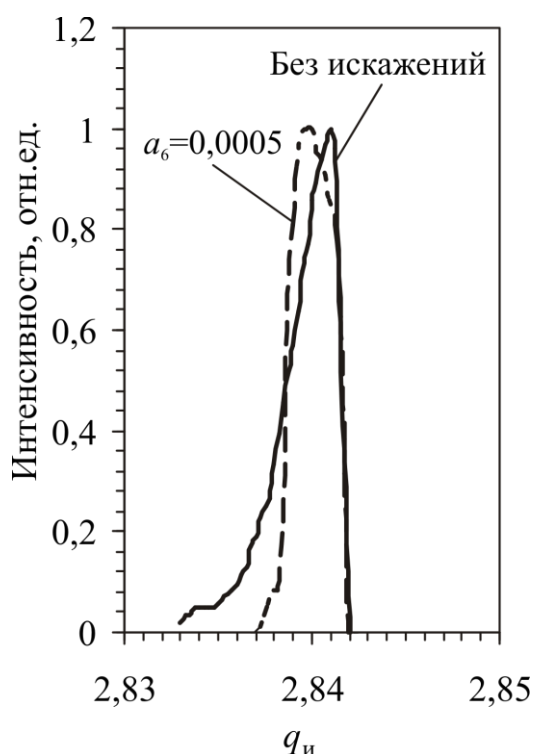


Рис. 1. Расчетные формы массовых пиков при одинаковом разрешении на уровне 0,5 высоты

Для монопольного масс-анализатора характерно наличие «хвоста» массового пика (рис. 1, «без искажений»), что ограничивает его динамический диапазон. Но при введении составляющих с весовым коэффициентом a_6 наблюдается уменьшение «хвоста» (рис. 1, « $a_6=0,0005$ »), сопровождающееся изменением формы массового пика: из «треугольной» она преобразуется в «прямоугольную». Похожая ситуация наблюдается и при введении в распределение потенциала составляющих с коэффициентами a_{10} , b_4 , c_5 , c_7 , c_9 , c_{11} ($c_{2n+1} < 0$).

Для экспериментальной проверки полученных результатов использовалась тонкостенная электродная система монопольного масс-анализатора с гиперболическими электродами (см. далее рис. 3), в которой стержневой электрод был смещен по вертикали относительно уголкового электрода. Предварительные расчеты показали, что в этом случае в распределении потенциала увеличиваются значения весовых коэффициентов различных составляющих высших порядков, однако общая доля составляющих a_6 , a_{10} , $c_5 \div c_{11}$, улучшающих форму массового пика, превосходит долю остальных в 2,8 раза.

В ходе эксперимента была получена зависимость коэффициента формы K_f массового пика от смещения h/r_0 (r_0 – радиус поля) стержневого электрода, показанная на рис. 2.

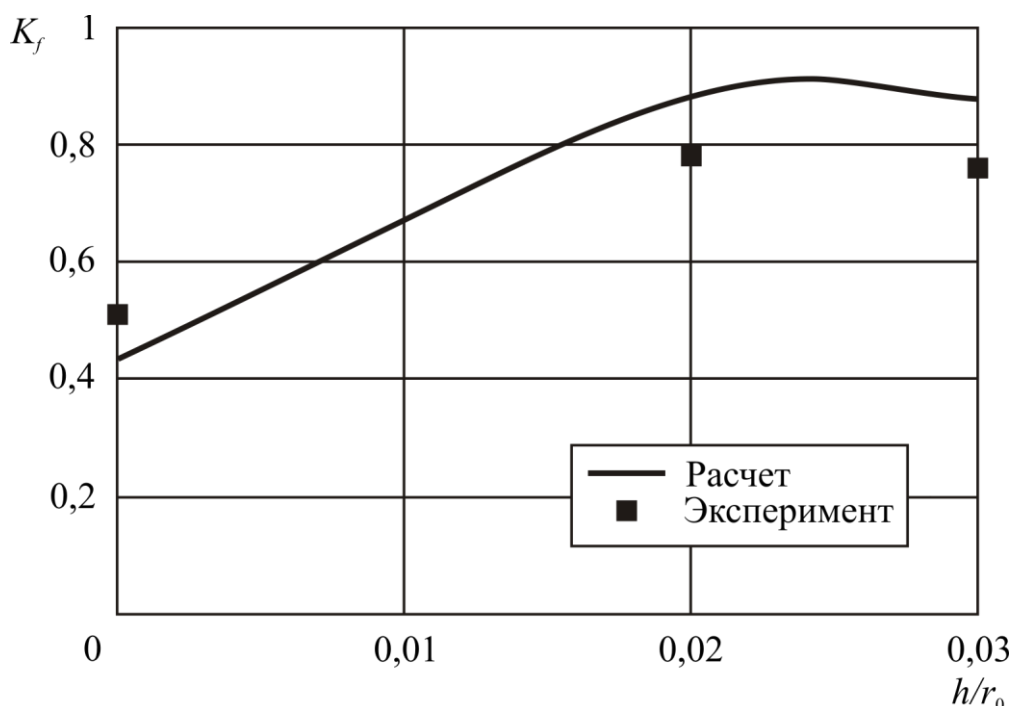


Рис. 2. Зависимость коэффициента формы массового пика от смещения стержневого электрода

Коэффициент формы рассчитывался по формуле $K_f = \Delta_{0,5} / \Delta_{0,1}$, где $\Delta_{0,5}$ и $\Delta_{0,1}$ – ширины массового пика на уровнях 0,5 и 0,1 высоты соответственно. Приведенная на рис. 2 экспериментальная зависимость подтверждает ранее полученные теоретические результаты.

Третья глава посвящена исследованию распределения потенциала в технологических конструкциях монопольного масс-анализатора.

Технологическая конструкция, в отличие от идеализированной, имеет ограниченные размеры и более сложную форму электродов, гиперболическая поверхность которых ограничена на определенном расстоянии от центра электродной системы. Это неизбежно приводит к увеличению доли составляющих высших порядков в распределении потенциала. Как показали ранее проведенные исследования, не все составляющие распределения потенциала оказывают положительное влияние на аналитические параметры монопольного масс-анализатора. Поэтому возникает задача подавления всех составляющих высших порядков для того, чтобы затем выделить те, которые оказывают положительное влияние. Другими словами, возникает задача определения уровня ограничения электродов, при котором общая доля составляющих высших порядков минимальна.

Для решения данной задачи была разработана методика расчета весовых коэффициентов составляющих распределения электрического потенциала. В основе данной методики лежит аппроксимация дискретных значений потенциала $u_{i,j}^*$, рассчитанных в различных точках (x_i, y_j) исследуемой конструкции масс-анализатора высокоточным численным методом, функцией $u(x, y)$ заданного вида. Согласно методу наименьших квадратов, условие максимальной точности аппроксимации имеет вид

$$S = \sum_{i,j} (u(x, y) - u_{i,j}^*)^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где

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

$$u_n^{(a)}(x, y) = \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k (4n-2)!}{(4n-2-2k)!(2k)!} x^{4n-2-2k} y^{2k},$$

$$u_n^{(b)}(x, y) = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(-1)^k (4n-1)!}{(4n-2k-1)!(2k+1)!} x^{4n-2k-1} y^{2k+1},$$

$$u_n^{(c)}(x, y) = \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k (2n+1)!}{(2n+1-2k)!(2k)!} x^{2k} y^{2n+1-2k},$$

$$u_n^{(d)}(x, y) = \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k (2n+1)!}{(2n+1-2k)!(2k)!} x^{2n+1-2k} y^{2k}.$$

Задача минимизации (2) сводится к поиску корней системы уравнений

$$\frac{\partial S}{\partial a_0} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial a_{2n}} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial b_{2n}} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial c_{2n+1}} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial d_{2n+1}} = 0. \quad (3)$$

Подставляя (2) в (3), получаем СЛАУ

$$\begin{cases} \sum_{i,j} u(x_i, y_j) = \sum_{i,j} u_{i,j}^*, \\ \sum_{i,j} u(x_i, y_j) u_n^{(a)}(x_i, y_j) = \sum_{i,j} u_{i,j}^* u_n^{(a)}(x_i, y_j), \\ \sum_{i,j} u(x_i, y_j) u_n^{(b)}(x_i, y_j) = \sum_{i,j} u_{i,j}^* u_n^{(b)}(x_i, y_j), \\ \sum_{i,j} u(x_i, y_j) u_n^{(c)}(x_i, y_j) = \sum_{i,j} u_{i,j}^* u_n^{(c)}(x_i, y_j), \\ \sum_{i,j} u(x_i, y_j) u_n^{(d)}(x_i, y_j) = \sum_{i,j} u_{i,j}^* u_n^{(d)}(x_i, y_j), \end{cases} \quad (4)$$

решением которой является массив $\{a_0, a_{2n}, b_{2n}, c_{2n+1}, d_{2n+1}\}$, где $n = 1, 2, \dots, N$.

Для расчета значений потенциала $u_{i,j}^*$ в рабочем объеме анализатора решалось уравнение Лапласа с заданными граничными условиями (задача Дирихле). Одним из эффективных путей приближенного решения уравнения Лапласа является использование его интегральной формулировки в сочетании методом граничных элементов (МГЭ). Оценки показывают, что использование МГЭ позволяет значительно снизить затраты машинного времени по сравнению с другими известными методами, например с методом конечных элементов. Выигрыш растет и при наличии открытой границы (межэлектродного пространства).

Данный метод расчета электрического поля реализован в программе FOCUS 2D (Трубицын А.А. Средства и методы высокоинформативного энерго- и масс-анализа вещества: Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук / РГРТУ. Рязань, 2007. 262 с.). С помощью этой программы рассчитывалось распределение потенциала в различных конструкциях монопольного масс-анализатора.

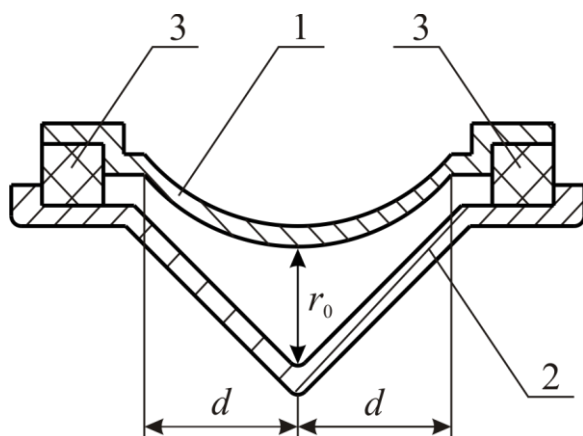


Рис. 3. Электродная система монопольного масс-анализатора в разрезе:

- 1 – стержневой электрод;
- 2 – уголкового электрод;
- 3 – керамические изоляторы

ности изготовления электродов, приходится сталкиваться с принципиально неустранимым искажением электрического поля, вызванным концевыми областями электродной системы.

Для исследования были выбраны две технологические конструкции монопольного масс-анализатора: I – электродная система с гиперболическим стержневым и V-образным уголкового электродами; II – электродная система с гиперболическими стержневым и уголкового электродами.

В технологической конструкции монопольного масс-анализатора (рис. 3) расположение стержневого электрода 1 и уголкового электрода 2 относительно друг друга обеспечивается с помощью керамических изоляторов 3. Для размещения изоляторов предусмотрены посадочные места определенной (технологически обусловленной) формы. В этом случае, даже при высокой точности

Поскольку распределение потенциала представлено в виде бесконечного степенного ряда (1), на практике его приходится ограничивать определенным количеством членов. Для определения степени ряда были рассчитаны зависимости весовых коэффициентов составляющих потенциалов от количества N членов ряда. При начальном увеличении количества членов ряда (1) наблюдались колебания значений весовых коэффициентов составляющих высших порядков. Однако их значения стабилизируются при $N = 5$, т.е. при ограничении степенного ряда составляющими 10-го порядка. Относительная погрешность аппроксимации при этом не превышает 0,02 %.

На следующем этапе исследовалась зависимость весовых коэффициентов в распределении потенциала от уровня d ограничения электродов. В ходе расчетов выяснилось, что отличными от нуля остаются лишь весовые коэффициенты a_{2n} и c_{2n+1} , а коэффициенты b_{2n} и d_{2n+1} обращаются в ноль. Этого и следовало ожидать, т.к. рассматривается электродная система, симметричная относительно оси OY , а коэффициенты b_{2n} и d_{2n+1} обусловлены несимметричными деформациями электродов. На рис. 4 показаны зависимости модуля коэффициентов $|a_{2n}|$ (рис. 4, а) и $|c_{2n+1}|$ (рис. 4, б) от уровня d/r_0 , где r_0 – радиус поля, ограничения электродов электродной системы I.

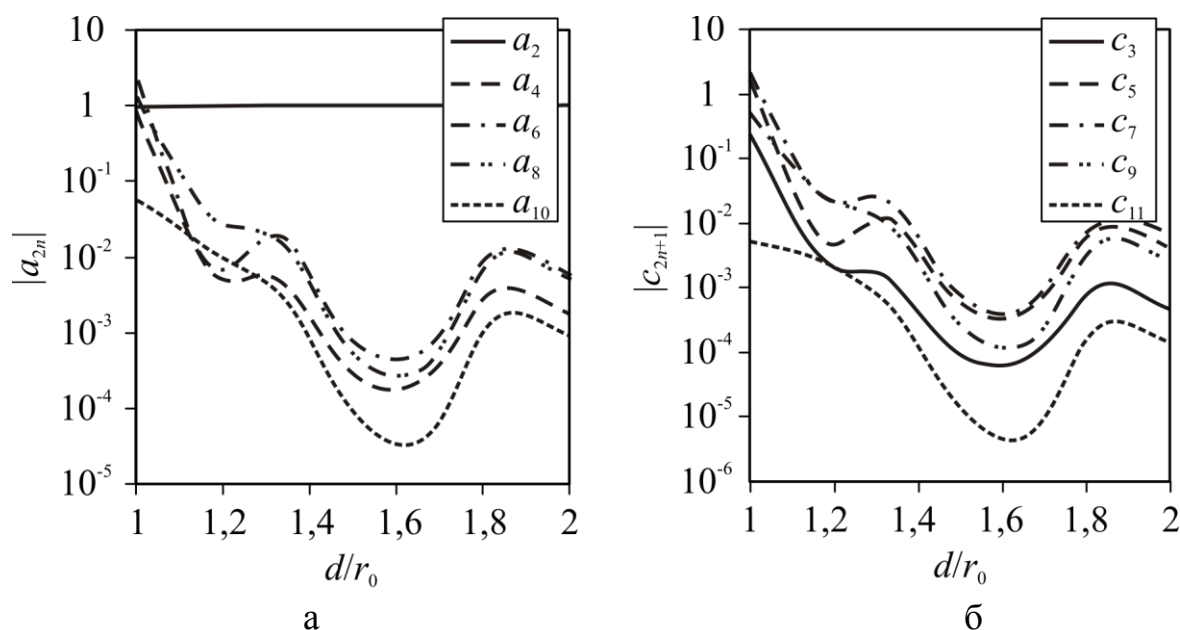


Рис. 4. Зависимость модуля весовых коэффициентов $|a_{2n}|$ и $|c_{2n+1}|$ от уровня d/r_0 ограничения электродов электродной системы I

Видно, что квадратичная составляющая a_2 распределения потенциала практически не зависит от уровня ограничения электродов. Составляющие высших порядков уменьшаются при увеличении d/r_0 , достигая своих минимальных значений при $d = 1,6r_0$.

Аналогичные зависимости модуля коэффициентов $|a_{2n}|$ и $|c_{2n+1}|$ от уровня d/r_0 ограничения электродов электродной системы II показаны на рис. 5. В данном случае составляющая a_2 распределения потенциала также не зависит от уровня ограничения электродов (рис. 5, а).

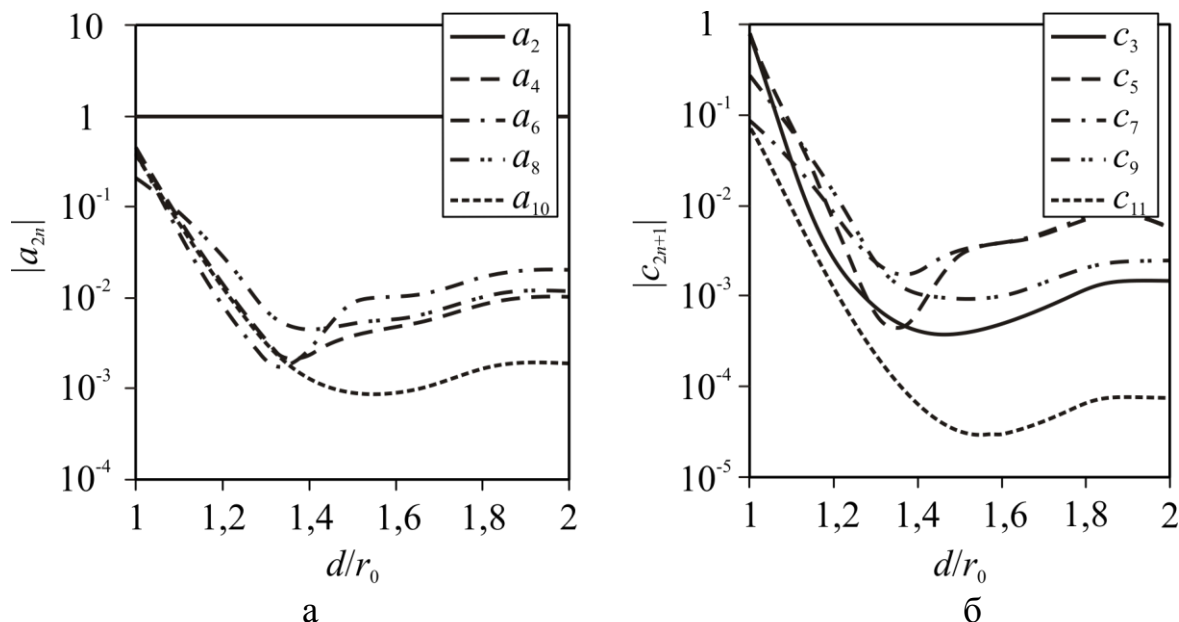


Рис. 5. Зависимость модуля весовых коэффициентов $|a_{2n}|$ и $|c_{2n+1}|$ от уровня d/r_0 ограничения электродов электродной системы II

Составляющие высших порядков уменьшаются при увеличении d/r_0 , достигая своих минимальных значений при $d = 1,38r_0$.

Таким образом, в рассматриваемых конструкциях монопольного масс-анализатора доказана возможность минимизации составляющих высших порядков при определенном расстоянии от центра до концевых областей.

Четвертая глава посвящена разработке конструкции электродной системы монопольного масс-анализатора.

Полученные теоретические и экспериментальные результаты использованы при разработке электродной системы монопольного масс-анализатора масс-спектрометра «МАЛ-1Ф», предназначенного для проведения эксперимента в составе научной аппаратуры проекта «ФОБОС-Грунт».

Гиперболоидные масс-спектрометры хорошо зарекомендовали себя для исследования космического пространства: существует опыт применения таких приборов в рамках проектов «Венера-Галлей» и «Марс-96». Работа в условиях космоса накладывает повышенные требования по вибро- и ударопрочности конструкции, массогабаритным показателям, надежности аналитической аппаратуры. Для этих целей известная конструкция монопольного масс-анализатора, состоящего из массивного круглого стержня и уголкового электрода, оказалась непригодной.

Чтобы удовлетворять высоким требованиям при выполнении проекта «Марс-96» впервые была применена технология изготовления тонкостенных электродов масс-анализатора, в основе которой лежит метод электролитического формования, позволяющий изготавливать сложно-профильные тонкостенные электроды масс-анализаторов различных типов (Гуров В.С. Сложнопрофильные гиперболоидные электродные системы масс-анализаторов, энергоанализаторов и систем формирования потоков заряженных частиц: Дисс. ... д-ра техн. наук / РГРТА. Рязань, 2000. 508 с.). С помощью данного метода изготовление деталей производится путем осаждения металла на специально подготовленную форму из раствора соответствующего электролита. Главное достоинство метода электролитического формования – высокая точность воспроизведения поверхности, на которую производится осаждение металла.

Известен способ изготовления тонкостенной электродной системы, согласно которому на предварительно подготовленную форму наносятся слой легкоплавкого металла толщиной $5 \div 10$ мкм, основной слой металла толщиной не менее 0,1 мм, после чего форму удаляют, расплавляя слой легкоплавкого металла. Однако из-за наличия на электродах негладких поверхностей остается слой легкоплавкого металла, который затрудняет использование масс-анализатора при температурах выше $100 \div 150$ °С.

В качестве модернизации данного способа изготовления монопольного масс-анализатора предлагается исключить нанесение промежуточного слоя из легкоплавкого металла, а отделение полученных электродов от форм производить путем нагрева уголкового электрода и охлаждения стержневого электрода вместе с формами. За счет разности в коэффициентах теплового расширения форм и электродов произойдет отделение электродов от форм без каких-либо механических воздействий. После съема формы могут быть повторно и многократно использованы [6].

Технологический цикл изготовления электродной системы модифицированным способом можно представить следующим образом. Сначала изготавливают с высокой точностью две металлические формы 1 и 2 (рис. 6), поверхности которых повторяют внутренние поверхности уголкового (а) и гиперболического (б) электродов. На нерабочие поверхности форм наносят защитное покрытие 3. Далее на формы наносят слой металла 4, например путем электрического осаждения, толщиной $0,1 \div 1$ мм.

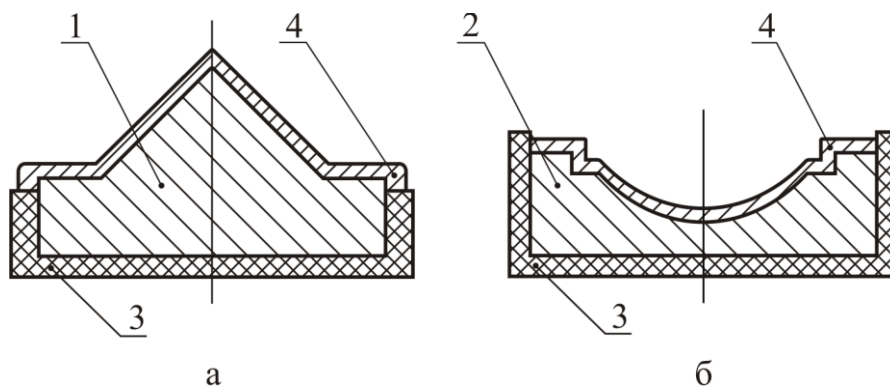


Рис. 6. Устройство форм и процесс изготовления масс-анализатора

Сформированные электроды отделяют от форм предложенным способом и наносят на них защитное покрытие толщиной $5 \div 10$ мкм, улучшающее однородность их потенциального рельефа.

На этапе сборки стержневой электрод 1 и угольный электрод 2 фиксируют относительно друг друга с помощью керамических изоляторов 3 и 4, изготовленных в виде прямоугольных параллелепипедов с допусками на линейные размеры ± 1 мкм, и оправы 5 (рис. 7). Погрешность изготовления и взаимного расположения электродов не превышает ± 2 мкм.

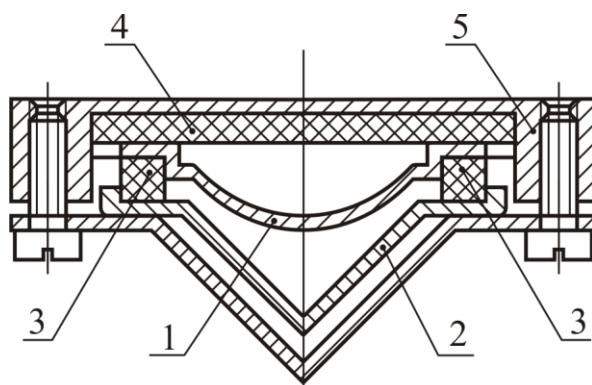


Рис. 7. Электродная система монопольного масс-анализатора:

- 1 – стержневой электрод;
- 2 – угольный электрод;
- 3,4 – изолятор;
- 5 – фиксирующая оправа

По данной технологии была изготовлена опытная партия монопольных масс-анализаторов с длиной электронной системы 67 мм, радиусом поля $r_0 = 6$ мм, показавшая следующие технические результаты:

- увеличение разрешающей способности, чувствительности и динамического диапазона;
- увеличение точности изготовления электродов;
- при изготовлении электродной системы исключается прямое механическое воздействие на электроды при их отделении от форм, что гарантирует сохранение заданного профиля электродов.
- увеличение предельной рабочей температуры масс-анализатора до 200°C .

Результаты диссертационной работы

1. Систематизированы составляющие распределения потенциала в монопольном масс-анализаторе и установлены закономерности, связывающие определенные составляющие распределения потенциала и соответствующие им профили электродов.

2. Разработана математическая модель монопольного масс-анализатора, позволившая провести исследование влияния составляющих высших порядков распределения потенциала на аналитические характеристики.

3. Показано, что путем коррекции профиля полеобразующих электродов монопольного масс-анализатора, состоящей в том, что в распределение электрического потенциала вводятся составляющие высших порядков, вызванные симметричными деформациями электродов, можно улучшить форму массового пика: из «треугольной» она преобразуется в «прямоугольную». При этом коэффициент формы увеличивается от 0,5 до 0,8, а динамический диапазон масс-анализатора увеличивается до 10^6 .

4. Разработана и реализована в компьютерной программе методика расчета весовых коэффициентов распределения потенциала в технологической конструкции монопольного масс-анализатора.

5. Определена степень полиномиального ряда, аппроксимирующего распределение потенциала в монопольном масс-анализаторе. Показано, что ограничение составляющими 10-го порядка обеспечивает относительно небольшую погрешность аппроксимации не более 0,02 %.

6. Разработаны принципы конструирования электродной системы монопольного масс-анализатора. Определен уровень ограничения гиперболических поверхностей электродов в технологической конструкции монопольного масс-анализатора, при котором доля составляющих высших порядков в распределении потенциала минимальна. Показано, что для электродной системы с V-образным уголковым электродом уровень ограничения составляет $1,6r_0$ от центра (по оси X), для электродной системы с гиперболическим уголковым электродом – $1,38r_0$, где r_0 – радиус поля.

7. Предложен способ изготовления электродной системы монопольного масс-анализатора, улучшающий его потребительские характеристики, в основе которого лежит новый принцип отделения электродов от форм за счет разности их коэффициентов теплового расширения. В частности, ис-

пользование данного способа позволяет повысить предельную рабочую температуру масс-анализатора до 200 °С.

8. Разработана конструкция электродной системы монопольного масс-анализатора масс-спектрометра «МАЛ-1Ф», вошедшего в состав масс-спектрометрической аппаратуры для космических исследований в рамках проекта «ФОБОС-Грунт».

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. Рожков О.В., Буробин М.А., Новиков А.В. Исследование влияния конфигурации краевых областей электродной системы трехмерного ГМС на аналитические параметры в режиме масс-селективного накопления // Межвуз. сб. науч. трудов «Научное приборостроение». – Рязань, 2006. – С. 121-130.

2. Гуров В.С., Колотилин Б.И., Дубков М.В., Веселкин Н.В., Буробин М.А. и др. Масс-спектрометр «МАЛ-1Ф» // Тезисы докл. 5-й межд. науч.-техн. конференции «К.Э. Циолковский – 150 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». – Рязань, 2007. – С. 144-146.

3. Рожков О.В., Буробин М.А. Влияние формы краевых областей и технологических отверстий в электродах на распределение потенциала в трехмерной ионной ловушке // Вестник РГРТУ. – 2008. – Вып. 23. – С. 122-125.

4. Буробин М.А. Технология изготовления монопольного масс-анализатора для космических исследований // Тезисы докл. конференции молодых ученых ЦФО «Актуальные направления научных исследований». – Калуга, 2009.

5. Гуров В.С., Колотилин Б.И., Дубков М.В., Буробин М.А. Монопольный масс-анализатор с тонкостенными гиперболическими электродами // Вестник РГРТУ. – 2010. – Вып. 31. – С. 58-60.

6. Гуров В.С., Дубков М.В., Буробин М.А. Способ изготовления монопольного масс-анализатора: пат. № 2393580 Рос. Федерация; заявл. 20.05.2009; опубл. 27.06.2010. – Бюл. № 18.

7. Дубков М.В., Буробин М.А. Исследование распределения потенциала в монопольном масс-анализаторе // Вестник РГРТУ. – 2010. – Вып. 33. – С. 72-76.

Б у р о б и н Михаил Анатольевич

Исследование особенностей работы и разработка
электродной системы монопольного масс-анализатора

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 03.12.2010 г. Формат бумаги 60×84 1/16.

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

Тираж 100 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.