

На правах рукописи



Витухин Владимир Владимирович

**РАЗРАБОТКА ЛИНЕЙНОЙ ИОННОЙ ВЧ ЛОВУШКИ С
ТРЕУГОЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ В РЕЖИМЕ МАСС-
СЕЛЕКТИВНОГО РЕЗОНАНСНОГО ВЫВОДА**

Специальность: 01.04.01 –
«Приборы и методы экспериментальной физики»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань – 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО
«Рязанский государственный радиотехнический университет»

- Научный руководитель - Доктор физико-математических наук,
профессор ФГБОУ ВПО «Рязанский
государственный радиотехнический
университет» г. Рязань
Мамонтов Евгений Васильевич.
- Официальные оппоненты - Доктор физико-математических наук,
Зав. лабораторией Физико-технического
института им. А.Ф. Иоффе РАН г. Санкт-
Петербург
Галль Николай Ростиславович
- Кандидат физико-математических наук,
директор ООО «Шибболет», г. Рязань
Черняк Евгений Яковлевич
- Ведущая организация - ФГБОУ ВПО «Рязанский
государственный университет
имени С.А. Есенина»

Защита состоится «23» декабря 2014 г. В 13:00 на заседании
диссертационного совета Д 212.211.03 в ФГБОУ ВПО «Рязанский
государственный радиотехнический университет» по адресу: 390035, г.
Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО
«РГРТУ»

Автореферат разослан «__» _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.211.03

доктор физико-математических наук,
профессор



М.В. Чиркин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Со времени первой успешной коммерциализации ионной ловушки Пауля с высокочастотным питанием фирмой Finnigan Mat непрерывно совершенствуются методы управления движением захваченных ионов и аналитическими характеристиками масс спектрометров на основе ионной ловушки. Последним достижением в этом направлении явился выпуск в 2003 году фирмой Thermo Electron линейной квадрупольной ионной ловушки с гиперболическими электродами, отличающейся большей емкостью по отношению к объемному заряду. В настоящее время ионные ловушки являются не только отдельными масс-спектрометрами, но и широко используются в tandemных приборах в качестве эффективного устройства предварительного анализа и подготовки ионной смеси для последующего исследования приборами высокого разрешения, такими как времяпролетные анализаторы (ВПМС), магнитные ловушки ионно-циклотронного резонанса (ИЦР) и электростатической ловушкой Орбитрап.

Одновременно с этим явно прослеживается тенденция к упрощению формы электродов ловушек, а также к поиску новых технических решений в области ионных ловушек. Примером этого является разработка в лаборатории проф. Кукса, так называемой Rectilinear Trap, в которой сложные электроды гиперболической формы заменены плоскими пластинами. В результате такого упрощения конструкции сильно страдает разрешающая способность прибора. Попыткой исправить указанный недостаток является разработка ловушки РСВ-Trap, в которой плоские электроды разделены на пластины с индивидуальным питанием с целью улучшить форму поля путем оптимизации питающих напряжений. Такой подход ведет к неоправданному усложнению и удорожанию источников питания ловушки и системы управления прибором. Таким образом, актуальными являются исследования возможности создания линейных ловушек, которые бы имели сравнительно простую форму электродов, состоящую из плоских сегментов, и позволяли бы получить достаточно высокое разрешение, сопоставимое с коммерческими ловушками.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования в данной работе является линейная ионная ловушка, каждый электрод которой состоит из двух плоских сегментов, которые образуют между собой определенный угол, так что поперечное сечение электрода со стороны направленной в объем ловушки имеет форму равнобедренного треугольника (ловушка «Т-Trap»). В такой геометрии электродов при минимальных искажениях квадрупольного поля достигается компенсация эффекта провисания поля вблизи щелей, через которые ионы выводятся из объема ловушки (выводные щели). Это позволяет рассчитывать на реализацию режима высокого разрешения спектра при использовании масс селективного сканирования с резонансным выводом ионов. Предлагаемая кон-

струкция ловушки обладает простотой и дешевизной процесса изготовления электродов по сравнению с коммерческими аналогами.

Конструкция T-Trap является сравнительно недавней отечественной разработкой под авторством М.Ю.Судакова (патент РФ № 2466475).

Предметом исследования данной работы является изучение возможности использования данной конструкции ловушки в сочетании с двумя видами ВЧ питания – гармонического и прямоугольными импульсами (Digital Drive).

Цель диссертационной работы

Цель диссертационной работы заключается в достижении высокой разрешающей способности при использовании масс-селективного резонансного вывода в ионных ВЧ ловушках с повышенной емкостью по отношению к объемному заряду на примере линейной квадрупольной ионной ловушки с треугольными электродами T-Trap.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

1) Изучение особенностей полей, создаваемых в объеме ловушки треугольными электродами и оптимизация формы электродов для достижения наилучшей разрешающей способности в режиме масс-селективного резонансного сканирования при использовании гармонического питания.

2) Создание компьютерных моделей линейной квадрупольной ионной ловушки с треугольными электродами T-Trap для прямого моделирования движения ионов в режиме сканирования спектра. Оптимизация параметров сканирования для достижения максимальной разрешающей способности. Выбор оптимальной геометрии ловушки по результатам моделирования спектров при различных геометрических параметрах электродной системы.

3) Исследование с помощью компьютерного моделирования влияния различных параметров прибора, таких как скорость сканирования, масса ионов, давление буферного газа, частота резонансного возбуждения, на характеристики спектра масс. Сравнение параметров предлагаемой конструкции ловушки с параметрами коммерческих ловушек.

4) Применение развитых идей и методов исследования к ловушкам других конструкций – тороидальным ловушкам и цилиндрическим ловушкам с коническими электродами. Хотя использование последних является шагом назад в плане зарядовой емкости ловушки, разработка таких систем оправдана требованиями миниатюризации (изготовление миниатюрных ловушек с гиперболическими электродами – чрезвычайно сложная и дорогостоящая задача).

Научная новизна результатов диссертации

1. Решена актуальная задача упрощения и удешевления конструкции линейных ВЧ ловушек без ухудшения аналитических характеристик масс-спектрометров на их основе.

2. Показана возможность реализации режима высокого разрешения в ловушке с треугольными электродами T-Trap.

3. Исследованы особенности работы ловушки T-Trap с использованием традиционного гармонического ВЧ питания и сканирования спектра путем постепенного увеличения амплитуды питающего напряжения в присутствии дополнительного гармонического резонансного возбуждения.

4. Исследовано влияние массы ионов, скорости сканирования, давления буферного газа и частоты резонансного возбуждения на характеристики спектра масс.

5. При оптимизации параметров сканирования в моделированиях достигнуты высокие значения разрешающей способности свыше 25000.

Научно-практическое значение результатов работы

Проведенное в работе исследование позволило выявить факторы, влияющие на возможность реализации высокого разрешения в ионной ловушке при масс-селективном резонансном сканировании. Эти результаты имеют важное практическое значение как для успешной реализации ловушки T-Trap, так и для перспектив разработки других конструкций ловушек.

Проведенные моделирования показывают, что при сравнительно простой форме электродов, масс-спектрометры на основе ловушки T-Trap обладают аналитическими характеристиками, не уступающими лучшим образцам коммерческих приборов на основе ловушек с гиперболическими электродами. Таким образом, дальнейшее совершенствование ионно-оптических квадрупольных систем актуально для разработки конкурентоспособных отечественных масс-спектрометрических приборов.

Научные положения, вынесенные на защиту

1) В линейной ловушке с электродами треугольной формы с использованием режима масс-резонансного вывода при использовании намеренно вносимых искажений идеального квадрупольного поля оптимальной геометрией электродов с шириной щели в диапазоне от 12-16% от вписанного радиуса является угол сходимости α в пределах 138-145°.

2) Треугольные электроды создают четные искажения положительного знака, что позволяет скомпенсировать искажение, вносимыми выводными щелями. Использование электродов подобной формы позволяет подавить 6-ю гармонику и снизить уровни 10-ой и 14-ой гармоники, которые способствуют реализации высокого разрешения.

3) Для T-Trap по сравнению с ловушкой с электродами гиперболической формы, оптимальная ширина щели оказывается в 3 раза больше (16% по сравнению с 5%), что приводит к минимизации рассеяния частиц на искажениях поля вблизи краев щелей, результатом чего является в 1,5 раза более высокое разрешение и на порядок большая чувствительность.

4) Переходные поля затухают внутрь по экспоненте, причем скорость затухания тем выше, чем выше мультипольность поля.

Достоверность исследований

Достоверность результатов исследований, проведенных в рамках данной диссертационной работы, подтверждается соответствием результатов моделирований, проведенных автором, с экспериментальными результатами научно-исследовательской группы из Университета Фуданя, что подробно рассказано в главе 4.

Реализация результатов работы

Результаты диссертационной работы использованы для разработки методов повышения аналитических характеристик квадрупольных масс-спектрометров в ООО «Масс-спектрометрические Технологии».

Апробация работы.

Результаты работы докладывались на: VI Съезд ВМСО (V всероссийская конференция с международным участием «Масс-спектрометрия и ее прикладные проблемы»), г. Москва, 2013г.

Результаты диссертационного исследования нашли отражение на лекциях и семинарах по дисциплине «Диагностическая аппаратура в электронике» в учебной программе на кафедре Промышленной Электроники РГРТУ.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 4 работы, из них – 3 статьи в печатных изданиях из списка ВАК, 1 опубликованный тезис доклада на конференции.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Диссертация содержит 128 страниц, в том числе 100 страниц основного текста, 14 таблиц, 61 рисунок и список литературы из 50 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика диссертационной работы: обоснована актуальность темы, сформулированы цели работы, научная новизна и практическая ценность полученных результатов. Перечислены основные научные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации результатов, объеме и структуре работы.

Первая глава диссертационной работы содержит краткий экскурс в историю ионных ловушек с высокочастотным питанием, описание основных достижений технологии ловушек и ее наиболее существенных ограничений. Сформулированы проблемы, которые привели к необходимости разработки исследуемой в данной работе линейной ловушки с треугольными электрода-

ми T-Trap, а также намечены основные этапы работы и разработана методология исследования.

Проанализированы особенности, принцип работы ловушки Пауля и недостатки данного устройства.

На примере открытия режима масс-селективной нестабильности рассмотрен принцип работы и основные параметры, влияющие на стабильность ионов. В этом режиме происходит постепенное увеличение амплитуды переменного ВЧ питания. Это приводит к тому, что движение ионов в порядке возрастания масс M_i становится более нестабильным по направлению оси ловушки, их амплитуда колебаний нарастает, и часть из этих ионов будет вылетать из ловушки на детектор через отверстия в торцевом электроде. Таким образом, полный спектр масс будет получаться после единственного периода накопления ионов в режиме вывода через границу стабильности, что значительно увеличивает чувствительность анализа.

Далее представлен режим масс-селективного резонансного вывода, в котором функционирует T-Trap. Для его реализации дополнительные источники питания АС создают почти однородное поле между торцами ловушки, изменяющееся во времени по гармоническому закону с некоторой фиксированной частотой ω_{ex} . Ионы попадают в резонанс с данным полем, если их секкулярная частота совпадает с частотой АС-возбуждения: $\omega_s = \omega_{ex}$, то есть при некотором значении параметра стабильности q_{ej} . При сканировании напряжения ВЧ, на диаграмме стабильности ионы будут достигать точки q_{ej} в порядке возрастания масс. В данном режиме работы ионы попадают в резонанс с полем возбуждения и при возрастании амплитуды их колебаний, они вылетят на детектор. При резонансном выводе, эжекция ионов будет происходить в точке q_{ej} , а не на границе стабильности q_0 . Резонансное воздействие на колебания ионов нашли широкое применение в приборостроении для реализации управления движением захваченных ионов, что позволило значительно расширить массовый диапазон ловушек. Было показано, что, как и в случае квадруполь (1) массовый диапазон ловушек является ограниченным максимальной амплитудой ВЧ питания V_{max} , которое можно приложить к электродам ловушки не опасаясь электрического разряда. В случае резонансного вывода ограничение массового диапазона имеет вид:

$$M_{max} = \frac{4eV_{max}}{q_{ej}\Omega^2 z_0^2} \quad (1)$$

Используя для вывода ионов малые значения частоты АС возбуждения и, следовательно, малые значения q_{ej} , вполне реально значительно расширить массовый диапазон ловушки при все том же максимальном высокочастотном напряжении.

Выполнен анализ существующих устройств, работающих в режиме масс-селективного резонансного вывода, для обоснования актуальности в разработке новых более совершенных устройств, приведших к созданию линейных ионных ловушек, обладающих большей зарядовой ёмкостью.

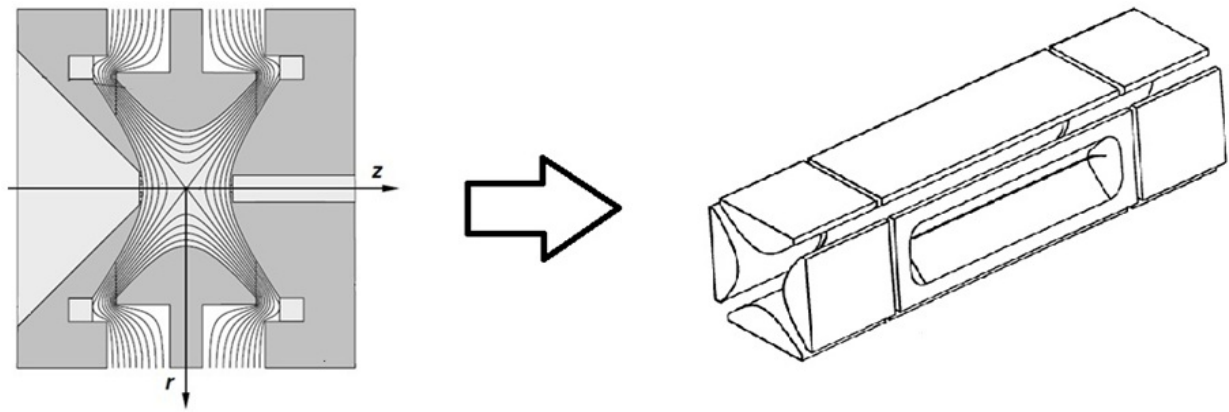


Рис. 1 – Переход от трехмерных ловушек к линейным

На рис. 1 приведены 3D-Trap и линейная ионная ловушка с гиперболическими электродами фирмы Thermo Electron, подтверждающая актуальность перехода с 3х-мерных ловушек на линейные ввиду большого объема удержания ионов. Также, на рис. 2 показан процесс развития линейных ловушек в сторону упрощения.

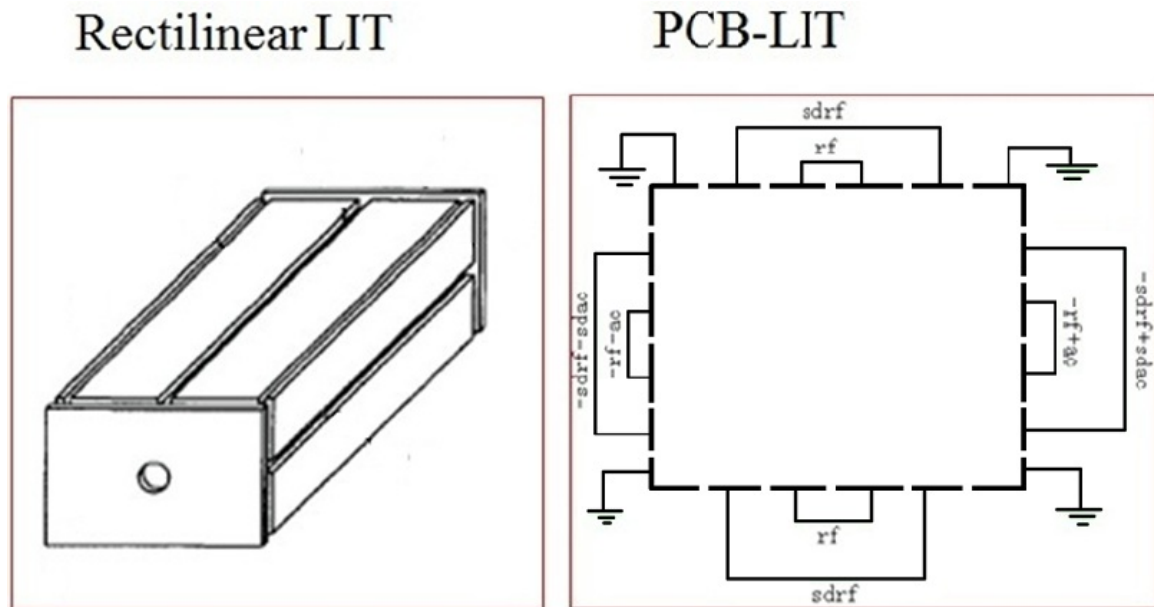


Рис. 2 – Дальнейшее развитие линейных ионных ловушек с применением плоских электродов

Усовершенствование электродной системы через упрощение конструкции актуально только при сохранении разрешающей способности. Анализ поля в ионной ловушке с гиперболическими электродами подтверждает, что разрешающая способность таких ловушек сильно страдает из-за высоких искажений поля ввиду неизбежного его провисания поля вблизи выводных щелей. Предложено использовать электроды угловой формы, которые создают четные искажения положительного знака, что позволяет скомпенсировать искажение, вносимыми выводными щелями и реализовать высокое разрешение. Геометрия разрабатываемой по этой идее ловушки, представлена на рис. 3.

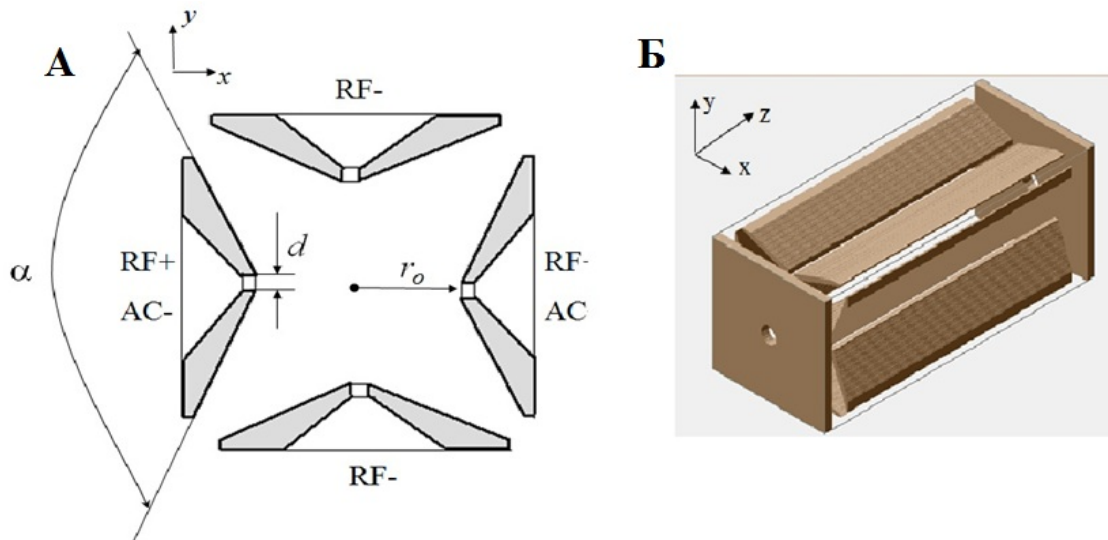


Рис. 3 – Конфигурация электродной системы ловушки Т-Трап: а - сечение электродной системы; б - трехмерная модель

Во второй главе приведены результаты исследований линейной ионной ловушки Т-Трап при питании прямоугольными импульсами.

На примере свойств двумерного поля, был проведен анализ поля Т-Трап. методом Фурье-анализа, из которого следует, что при данной симметрии и квадрупольном питании с возбуждающим напряжением АС, присутствуют только A_2 , A_6 , A_{10} , A_{14} гармоники.

На рис. 4 представлены две диаграммы, отражающие исследования компонентов поля в ловушке Т-Трап без щелей (слева) и с щелью 0,8мм (справа).

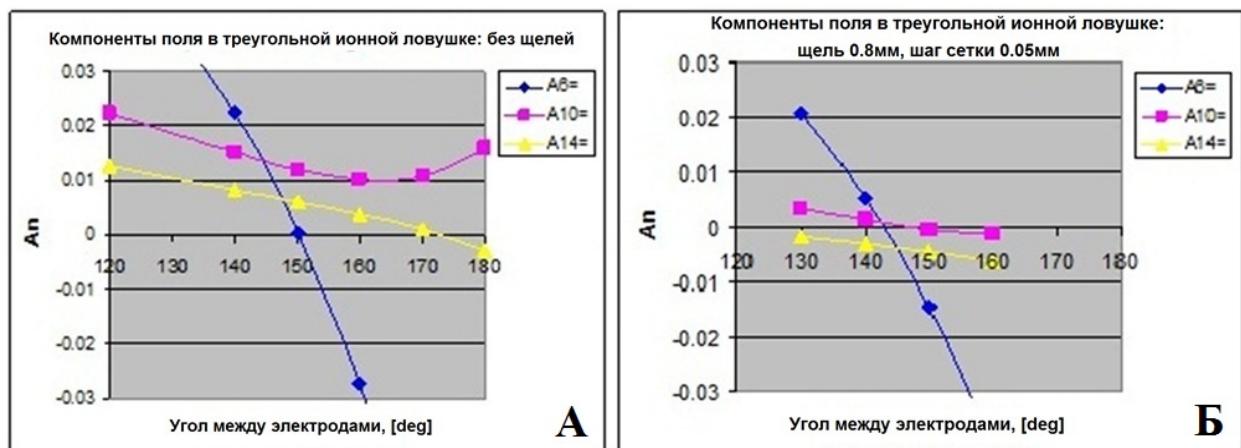


Рис. 4 – Диаграммы результатов исследования компонент поля в ионной ловушке Т-Трап: а - без щелей; б - с щелью 0,8мм

Экспериментально обнаружено, что оптимальным распределением поля является такое, в котором высшие гармоники A_{10} и A_{14} имеют небольшие положительные значения, а A_6 стремиться к нулю, что соответствует интервалу $140^\circ < \alpha < 150^\circ$. Поэтому подбирая соответствующий угол и ширину щели, можно компенсировать провисание полей вблизи щелей и создать условия для достижения высокой разрешающей способности.

Результатом численного эксперимента по исследованию компонент поля при различных параметрах геометрии, стала базовая геометрия линейной ионной ловушки T-Trap, представленная на рис. 5.

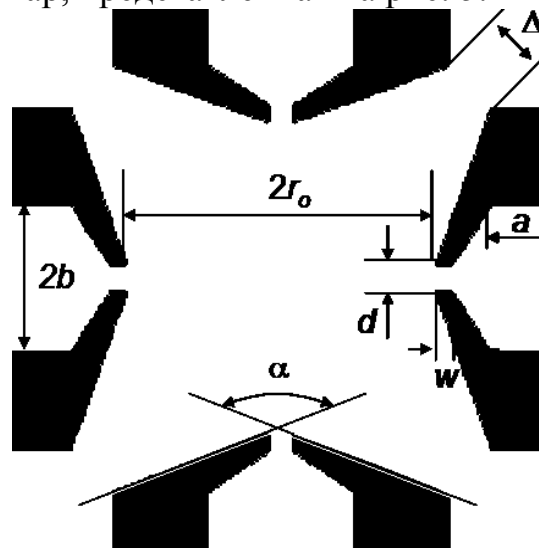


Рис. 5 – Базовая геометрия модели T-Trap с параметрами: $r_0=5\text{мм}$; $a=3\text{мм}$; $b=2\text{мм}$; $w=0.5\text{мм}$; $\Delta=1\text{мм}$; $d=0.8\text{мм}$; $\alpha=140^\circ$.

Результаты изучения зависимости разрешающей способности от угла сходимости электродов совместно с анализом гармоник, показаны на рис. 6. Экспериментально получено, что разрешение ловушки в основном регулируется значением нелинейной компоненты A_6 , которая для оптимальной геометрии составляет около 0.5%.



Рис. 6 – График зависимости разрешающей способности от угла между электродами

Результаты исследования зависимости разрешающей способности от скорости сканирования представлены на рис. 7. Из них следует, что в ловуш-

ке с треугольными электродами достижима величина разрешающей способности 18000, которая сопоставима с коммерческими ловушками.

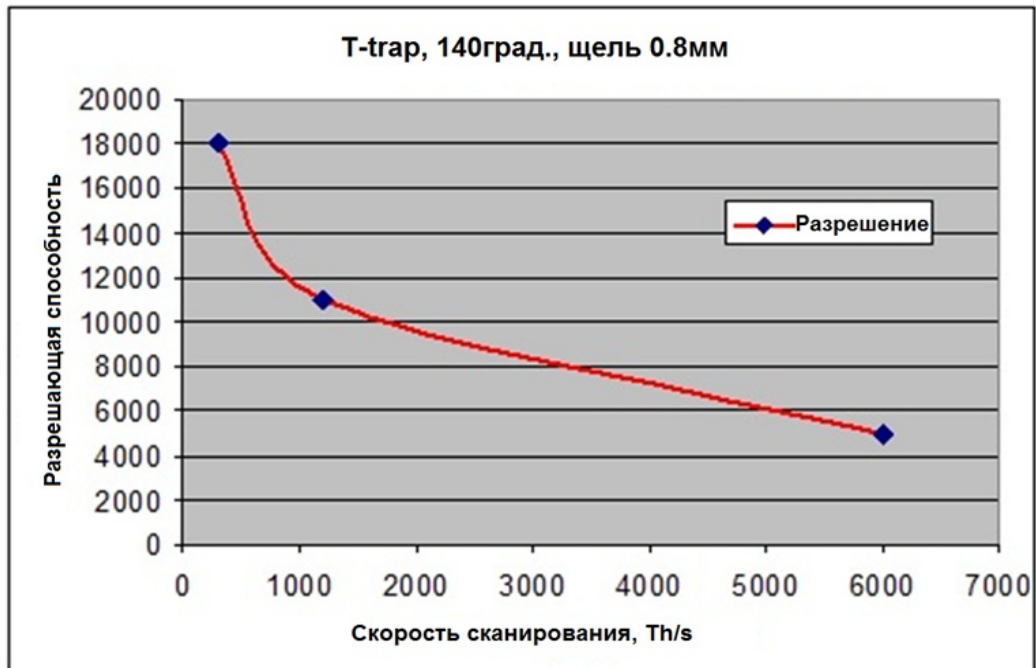


Рис. 7– График зависимости разрешающей способности от скорости сканирования

В третьей главе приведены основные результаты исследований T-Trap в режиме гармонического питания.

1) Зависимость разрешающей способности от массы ионов M_i иллюстрирует рис. 8.

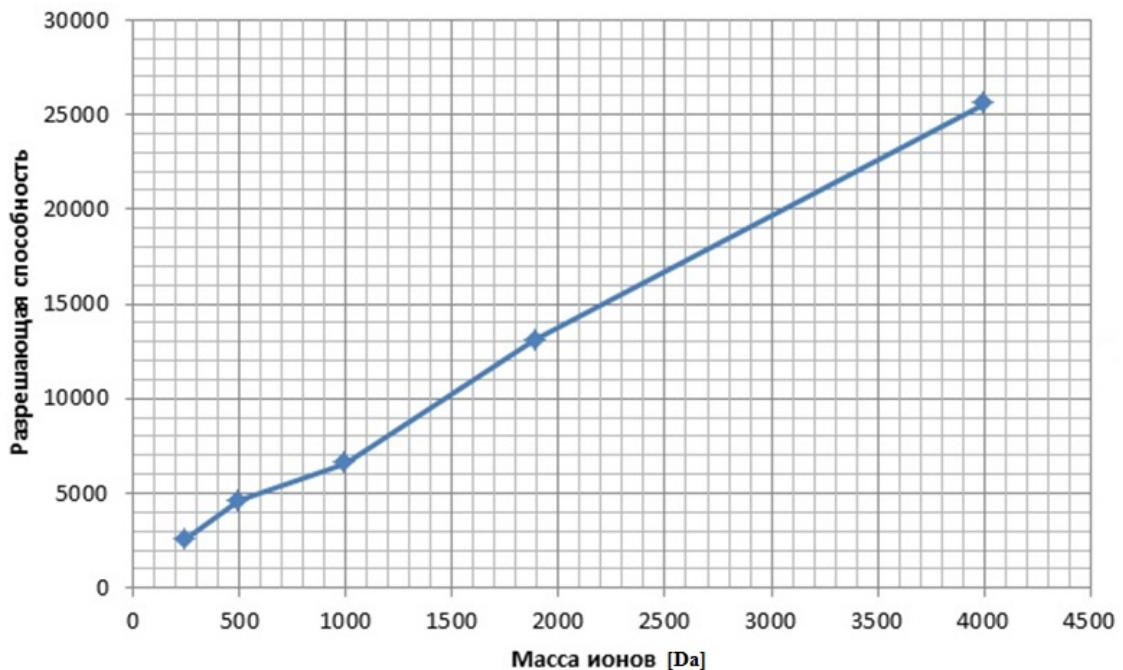


Рис. 8 – График зависимости разрешающей способности от массы исследуемых ионов

По данным результатам был сделан вывод, что разрешающая способность нарастает пропорционально массе ионов M_i , соответственно, масса ионов

пропорциональна приложенному напряжению возбуждения V_{AC} , при котором происходит эжекция. Из чего можно сделать вывод о преимуществе гармонического напряжения над прямоугольным, т.к. для прямоугольного питания трудно реализовать высокое напряжение по техническим причинам.

2) Зависимость разрешающей способности от скорости сканирования спектра λ [Th/s].

Исходя их формулы:

$$\lambda \left[\frac{Th}{s} \right] = 1273 \cdot \left(\frac{V_{RF}}{1000V} \right) \cdot \frac{T_{step}[ps]}{N_{waves}}, \quad (2)$$

Математически была доказана возможность и актуальность изменения скорости сканирования за счет варьирования приращений T_{step} . Результаты зависимости разрешающей способности от скорости сканирования представлены на рис. 9.

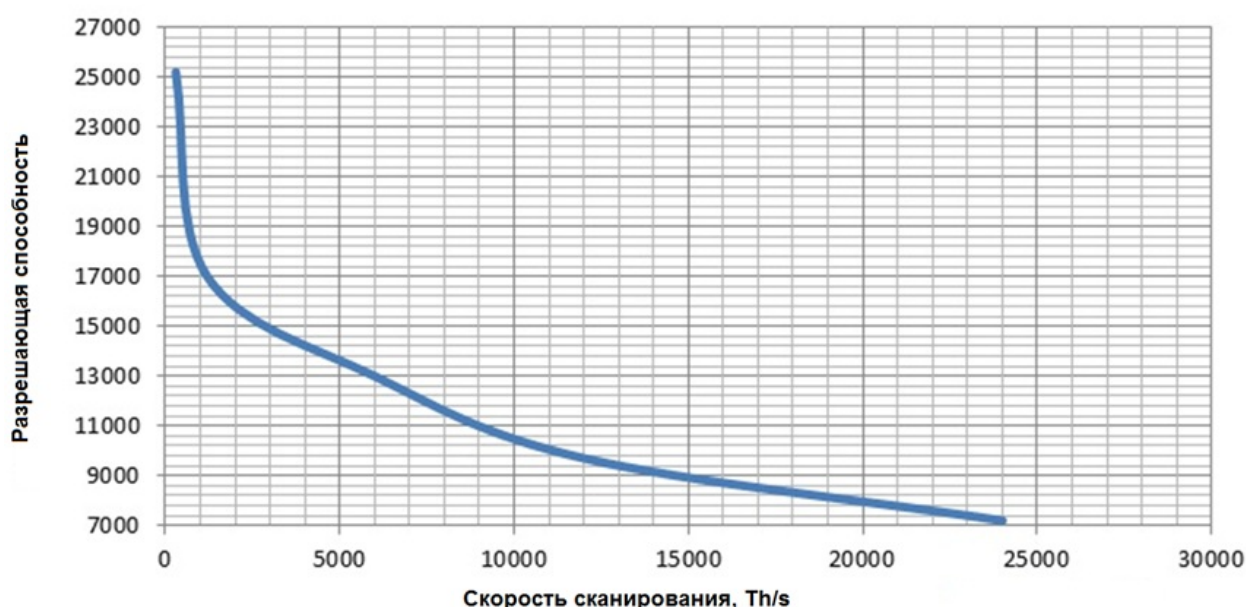


Рис. 9 – График зависимости разрешающей способности от скорости сканирования

Экспериментально достигнута разрешающая способность более 25000 при скорости сканирования $\lambda=300$ Th/s. В коммерческих ловушках одной “весовой категории”, аналогичное разрешение получается при скорости сканирования $\lambda=30$ Th/s, что не очень практично, т.к. удастся развернуть только узкий участок спектра. Проведенные исследования показывают, что Т-Трап расширяет эту возможность на порядок.

3) Зависимость R от давления буферного газа Р.

Большинство стандартных моделирований Т-Трап проводились при давлении буферного газа 0,2 мТорр. Однако коммерческие аналоги работают при более высоких давлениях. Нижеприведенный график иллюстрирует исследование зависимости разрешающей способности от давления Р в линейной ионной ловушке Т-Трап.

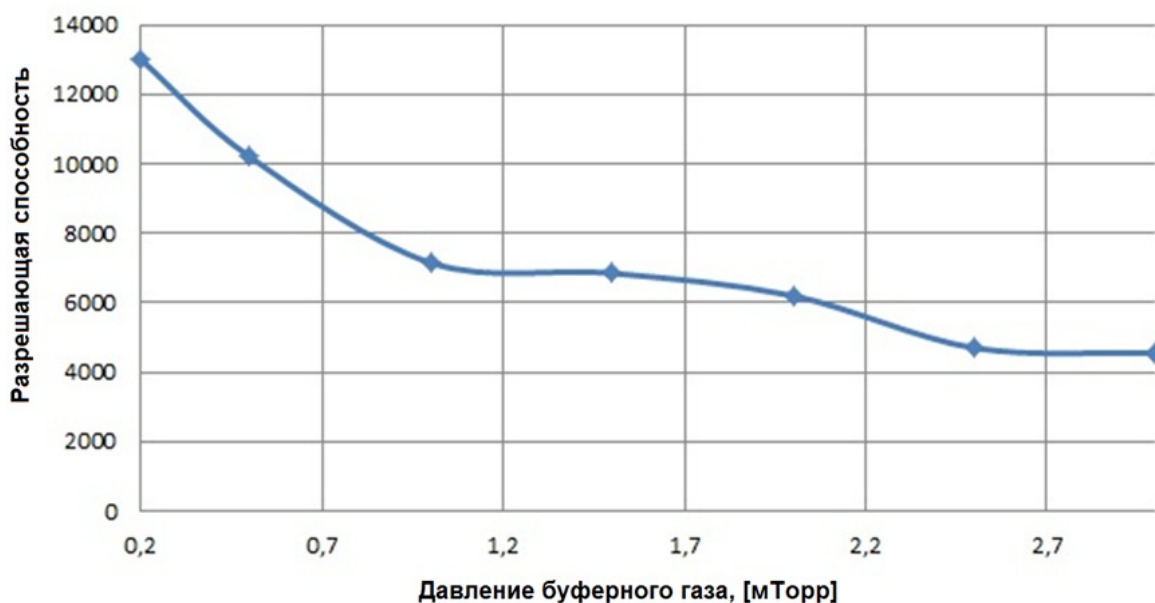


Рис. 10 – График зависимости разрешающей способности от давления буферного газа

4) Исследование основных параметров геометрии Т-Трап.

Была исследована зависимость угла сходимости электродов α на разрешающую способность. На рис. 11 приведены результаты:

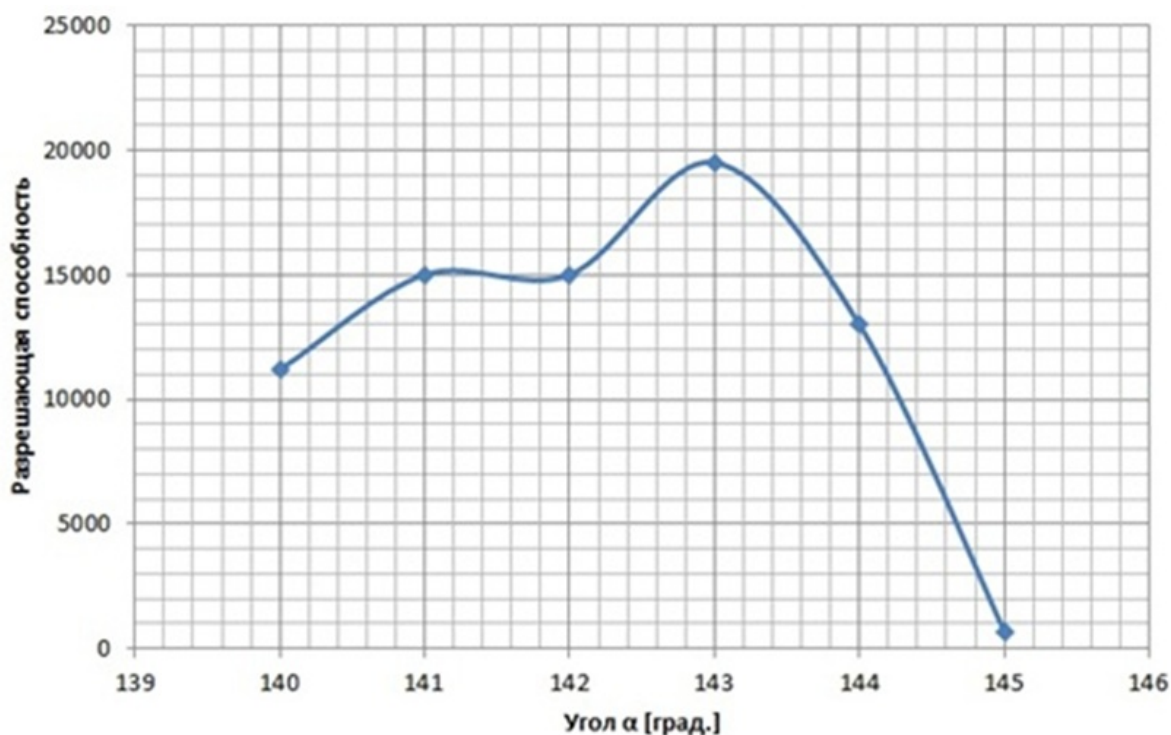


Рис. 11 – График зависимости разрешающей способности от угла сходимости электродов

Из приведенных результатов видно, что при угле электрода $\alpha > 143^\circ$, R резко ухудшается. Это связано с гармоникой A_6 , негативно влияющей на R . При $\alpha < 143^\circ$, A_6 растет. При $\alpha > 140^\circ$, A_6 слишком мало или отрицательно. Аналогичные численные эксперименты проводились и при других d , из которых следует, что если щель очень широкая ($> 0,8\text{ мм}$) – уровень искажения существенно возрастает, A_6 растет и начинаются уже негативные явления

воздействие на R . А если щель очень узкая ($<0,6\text{мм}$), то нелинейные искажения начинают исчезать, и тогда A_{10} и A_{14} гармоники тоже начинают исчезать, и их позитивное влияние начинает уменьшаться и чувствительность прибора падает. График, представленный на рис. 11, является подтверждением графика на рис. 4, где оптимальным углом является такой α , при котором гармоника A_6 отсутствует.

5) Исследование зависимости разрешающей способности от частоты АС.

Для существенного расширения массового диапазона можно добиться путем снижения частоты АС-возбуждения (ион выводится при меньших значениях q). Для проверки этого были проведены подобные исследования и результаты приведены на рис. 12.

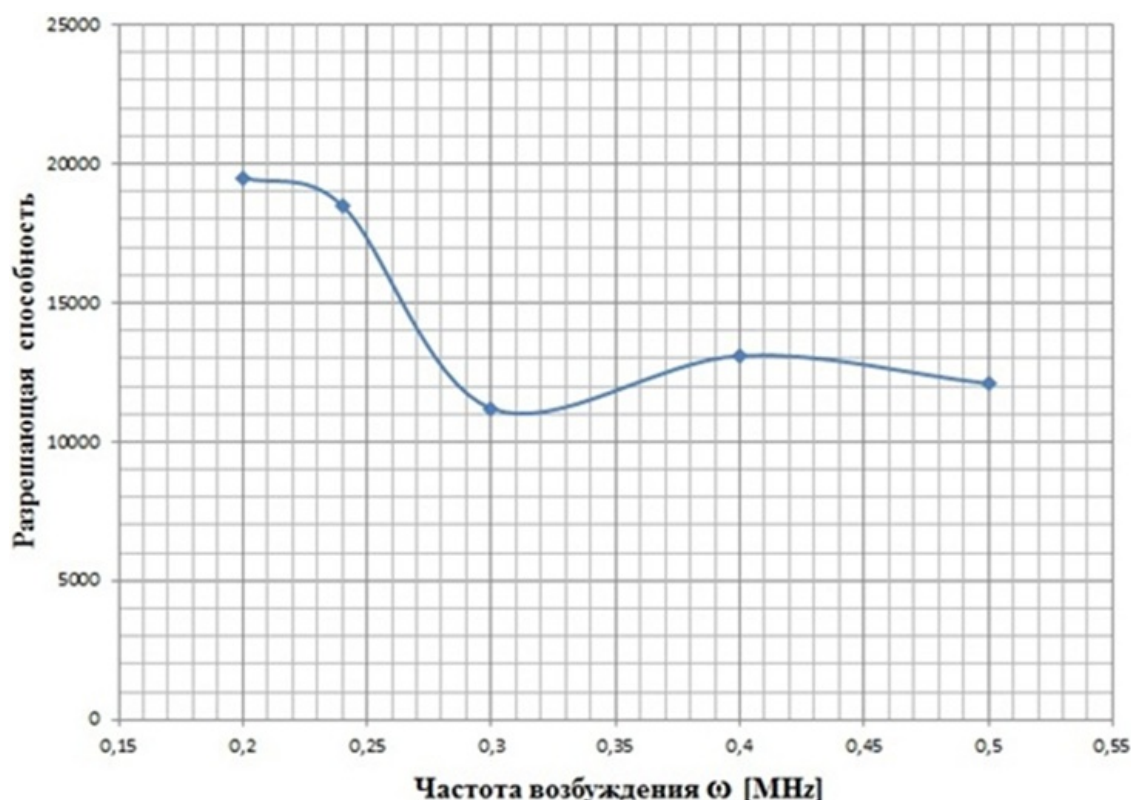


Рис. 12 – График зависимости разрешающей способности от частоты напряжения возбуждения

При малых частотах возбуждения, R увеличивается, но и время выхода также увеличивается. Данный эксперимент показал, что существенного ухудшения R не было замечено. И даже были найдены другие конфигурации параметров сканирования, при другом соотношении частот RF и АС, дающие более высокие результаты разрешающей способности.

Завершается глава кратким резюме о результатах проделанной работы.

В четвертой главе исследуются свойства переходного поля в T-Trap. Для изучения свойств краевых эффектов поля, ограничивающих движения ионов вдоль оси ловушки, подготовлены модели ловушки с шириной щелей $0,8\text{мм}$, углом электродов 140° , с различной длиной стержней центральной секции (30 и 50 мм). Также для данных моделей рассчитаны и проанализиро-

ваны поля 2х типов, изображенные на рис. 13 – постоянное электрическое DC поле, создаваемое диафрагмой перед квадруполем и квадрупольное поле ВЧ, создаваемое стержнями вблизи диафрагмы.

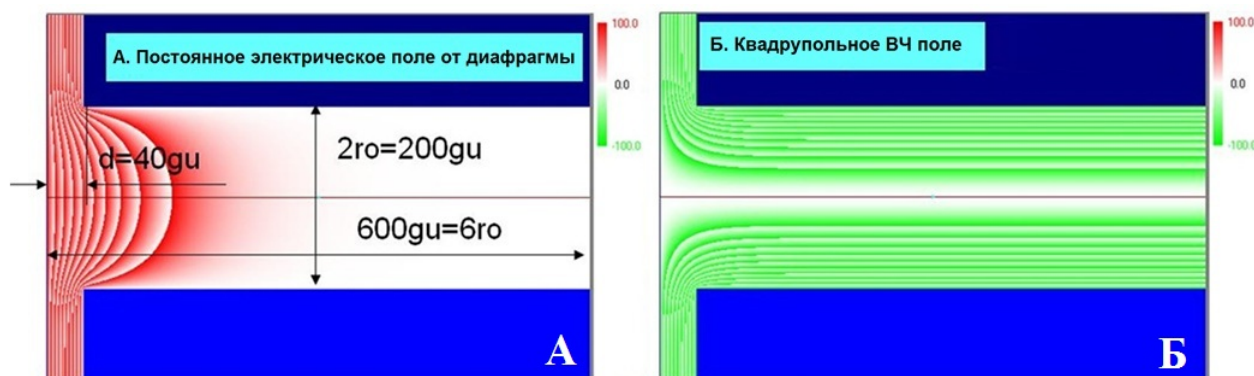


Рис. 13 – Моделируемые поля: А – поле от входной диафрагмы при напряжении 100В; Б – Квадрупольное поле от стержней при напряжении +/-100В

Результаты изменения интенсивности изменение амплитуды постоянного поля создаваемого диафрагмой вдоль оси квадруполя представлены в логарифмическом масштабе на рис. 14.

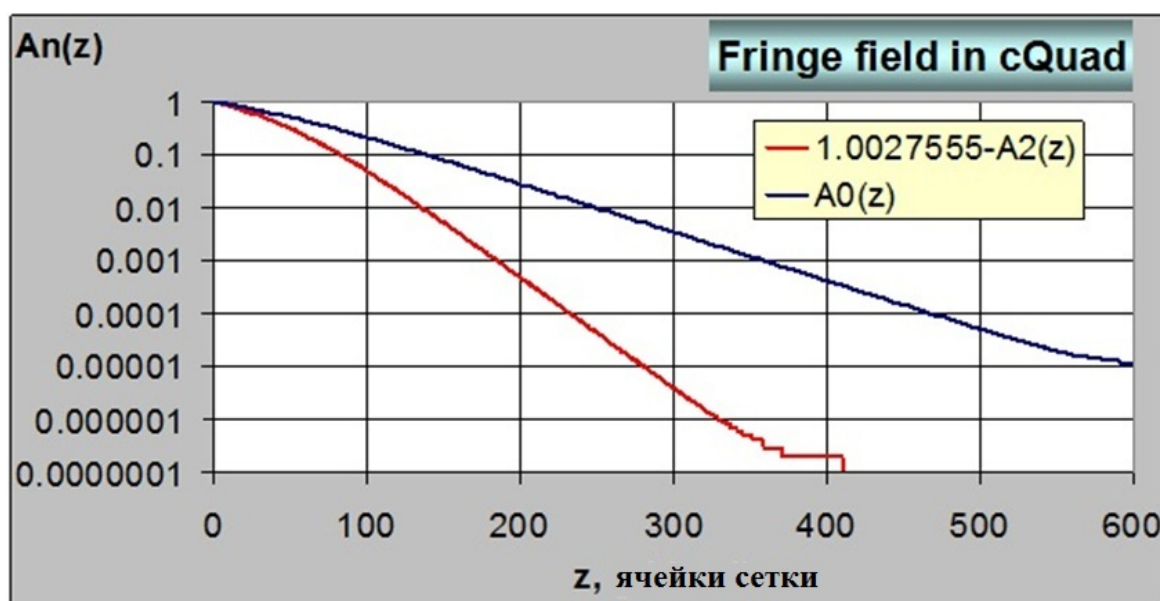


Рис. 14 – График изменения интенсивности статического и квадрупольного поля

Исследование полученных полей показало, что длина моделируемых электродов достаточна, чтобы переходные поля затухли и были пренебрежимо малы на выходе массива, где он смыкается с двумерным полем. Из рис. 14 очевидно, что переходные искажения квадрупольного поля затухают экспоненциально, причем быстрее, чем постоянное поле. Из этого следует, что в той области, где находятся охлажденные ионы, захваченные потенциалом постоянного поля, искажения ВЧ-потенциала, вызванные переходными полями – ничтожны.

Проведенные исследования показывают, что эффективность удержания за счет использования диафрагмы будет такой же, как и эффективность удержания от дополнительных секций ловушки. Что также подтверждается

результатами 3D-моделирования. Однако разрешающая способность в 3D-моделированиях оказалась на $\sim 15\%$ ниже, чем при 2D, что можно объяснить более низкой точностью расчета полей за счет более крупной сетки в 3D-моделях.

Логическим продолжением данной работы является построение прототипа данного устройства.

После публикации работы по линейной ионной ловушке с треугольными электродами T-Trap в режиме резонансного сканирования ионов при питании прямоугольными импульсами в международном журнале *Journal of Analytical Chemistry* ([3] из списка основных публикаций по теме диссертации), ей заинтересовались на Кафедре Химии Института лазерной химии при Фуданьском Университете в Шанхае.

По согласию с автором конструкции, на базе своей лаборатории они собрали по предложенным в публикации расчетам и геометрии работающий прототип (рис. 15). И в начале 2014г. было сообщено об успешном завершении этапа тестирования и первых результатах, опубликованных в их собственной работе, посвященной практическим аспектам приборостроения (*Xiao Y., Ding Z., Xu C., Dai X., Fang X., Ding CF. Novel linear ion trap mass analyzer built with triangular electrodes. // Anal. Chem., 2014, 86 (12), pp. 5733–5739*).

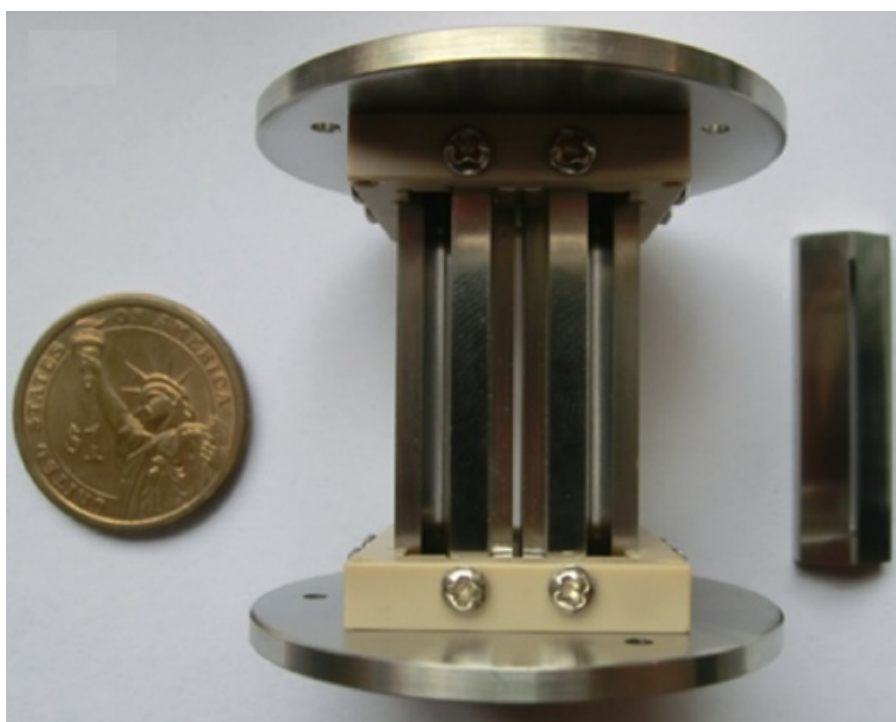


Рис. 15 – Прототип линейной ионной ловушки с треугольными электродами

Ссылаясь на наши исследования, они провели свои собственные исследования данной геометрии, в которых подтвердилась научная новизна и эффективность предложенной нами конфигурации электродов. Также, успешно были проведены эксперименты по изоляции ионов и использованию линейной ионной ловушки с треугольными электродами в тандемном масс-спектрометрическом анализе.

В заключении приведены основные научные и практические результаты диссертационной работы.

1. Использование угловой формы в профилях электродов вносит четные искажения положительного знака, что позволяет скомпенсировать искажения, вносимыми выводными щелями и реализовать высокое разрешение.
2. Условием для достижения высокой разрешающей способности является такая конфигурация электродной системы, в которой искажения 10-го и 14-го порядка положительны и невелики ($<0,5\%$), а 6-го – обращается в ноль. Данная ситуация реализуется при угле сходимости электродов в промежутке $135-150^\circ$.
3. При исследовании граничных возможностей Т-Трап была достигнута разрешающая способность свыше 18000 при использовании питания прямоугольными импульсами, и 25000 при гармоническом питании, полученная при скоростях, на порядок выше, чем у коммерческих аналогов.
4. Использование гармонического питания в Т-Трап имеет огромные преимущества перед импульсным, ввиду перспективы достижения высокой разрешающей способности путем приложения пропорционально высокого напряжения.
5. Проведенные исследования показывают, что ввиду того, переходное квадрупольное ВЧ поле затухает быстрее переходного DC-поля, эффективность удержания облака ионов вдоль оси ловушки диафрагмами и дополнительными секциями одинакова, из чего следует, что диафрагмы актуальнее, так как намного проще как в механическом исполнении, так и с точки зрения питающей электроники.
6. Аналитические и численные исследования, проведенные в рамках данной диссертационной работы, подтверждаются экспериментальными результатами от коллег из научно-исследовательской группы из Университета Фуданя.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Судаков М.Ю., Апацкая М.В., Витухин В.В., Трубицын А.А. Новая линейная ловушка с простыми электродами // Масс-спектрометрия, 9(1)'2012, с. 43-68;
2. Витухин В.В., Судаков М.Ю. Исследование и оптимизация параметров режима резонансного вывода ионов различных масс в линейной ловушке с треугольными электродами Т-Трап // Вестник РГРТУ, Выпуск 49, 2014г. с. 94-99;
3. M. Yu. Sudakov, M. V. Apatskaya, V. V. Vitukhin, A. A. Trubitsyn. A new linear ion trap with simple electrodes // Journal of Analytical Chemistry, December 2012, Vol. 67., Iss. 14., pp. 1057-1065;
4. Витухин В.В., Судаков М.Ю., Трубицын А.А. Особенности линейной ловушки с треугольными электродами в режиме резонансного вывода ионов

// Тезисы докладов VI Съезда ВМСО (V Всероссийская конференция с международным участием «Масс-спектрометрия и ее прикладные проблемы»), г. Москва, 2013г., с. 112.

Витухин Владимир Владимирович

РАЗРАБОТКА ЛИНЕЙНОЙ ИОННОЙ ВЧ ЛОВУШКИ С
ТРЕУГОЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ В РЕЖИМЕ МАСС-
СЕЛЕКТИВНОГО РЕЗОНАНСНОГО ВЫВОДА

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ответственный за выпуск - _____

Подписано к печати __.__.2014. Формат бумаги 60x80 1/16.

Усл. печ. л. 1.0. Тираж 100 экз. Заказ № _____. Бесплатно.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

391000, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.