

УДК 621.384.82

ТЕХНОЛОГИЯ ПЛАНАРНЫХ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ ИОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ МАСС-АНАЛИЗАТОРОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Е. В. Мамонтов, профессор кафедры промышленной электроники РГРТУ, д.ф.-м.н., профессор;
mamontov.evgeny@mail.ru

В. С. Гуров, ректор РГРТУ, заведующий кафедрой промышленной электроники РГРТУ, д.т.н.,
профессор; gurov.v.s@rsreu.ru

Е. Ю. Грачев, доцент кафедры промышленной электроники РГРТУ, к.т.н.; monopol_rus@mail.ru

А. А. Дягилев, доцент кафедры промышленной электроники РГРТУ, к.т.н., доцент;
a.dyagilew@gmail.com

В. Н. Двойнин, ведущий инженер кафедры промышленной электроники РГРТУ;
joker92-elektro@mail.ru

В. В. Журавлев, инженер кафедры промышленной электроники РГРТУ, к.т.н.; vladimir.rgrtu@mail.ru

Д. В. Кирюшин, доцент кафедры общей и экспериментальной физики РГРТУ, к.т.н., доцент;
kiriushin_rrtu@mail.ru

А. А. Саликов, аспирант РГРТУ; joker92-elektro@mail.ru

***Цель работы:** развитие методов и средств аналитического исследования вещества на основе технологии образования электрических полей ионно-оптическими системами с планарными дискретными электродами. Распределение потенциалов на граничных поверхностях ионно-оптической системы формируется системой распределенных резисторно-емкостных делителей напряжения, образованных между металлизированными покрытиями диэлектрических подложек. С использованием предлагаемой технологии разработаны методы масс-разделения ионов в электрических полях по времени пролета и с преобразованием Фурье наведенных токов. Аналитическая теория методов подтверждена результатами компьютерного моделирования и экспериментов.*

***Ключевые слова:** масс-спектрометрия, квадрупольные поля, планарные дискретные электроды, времяпролетное масс-разделение ионов, преобразование Фурье наведенных токов.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2017-60-2-132-140

Введение

Микроанализ состава и структуры вещества на молекулярном и атомарном уровне является важнейшим элементом технологий в науке, производстве и других сферах современной жизни. Значительная часть разрабатываемых и коммерциализируемых масс-спектрометрических приборов для аналитического исследования вещества используют свойства движения заряженных частиц в квадрупольных высокочастотных (ВЧ) электрических полях [1-3]. Традиционно такие поля создаются ионно-оптическими системами (ИОС) с непрерывными (эквипотенциальными) электродами гиперболической (или близкой к ней) формы, возможности которых для инновационного развития аналитических приборов практически исчерпаны [4-9]. Для разработки новых, более совершенных методов энерго- и масс-анализа заряженных частиц требуются ИОС для образования более широкого классов

распределений статических и ВЧ электрических полей, в том числе и их композиций. Такая задача решается ИОС с планарными дискретными электродами [10-19], которые позволяют усовершенствовать существующие методы масс-разделения заряженных частиц в квадрупольных ВЧ полях и разрабатывать более совершенные для аналитических приборов нового поколения.

Технология планарных дискретных электродов с распределенными резисторно- емкостными делителями напряжения

В [16] с использованием функции Грина показано, что электрическое поле с распределением потенциала $\varphi(x, y)$ может быть образовано системой планарных дискретных электродов

$$\varphi(x, y) \cong \sum_{i=1}^n \varphi_i(x, y) \cong \frac{x}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta y_i \varphi_{is}}{x^2 + (y - y_i)^2}, \quad (1)$$

где $\varphi_i(x, y)$ – потенциал, создаваемый i -м элементом дискретной поверхности,

$$\varphi_{is} = \frac{1}{\Delta y} \int \varphi_i(y) dy - \text{средний потенциал } i\text{-го эле-}$$

мента дискретной поверхности. Точность приближения (1) зависит от 2-х факторов: шага дискретности электродов Δy_i и распределения потенциала в плоскости i -го элемента $\varphi_i(y)$. Влияние дискретности электродов на отклонение распределения потенциала от линейного в ИОС с плоскими многоэлементными электродами исследовано в [10, 11]. ИОС с планарными дискретными электродами в плоскостях $x = x_a$ для образования двумерных ВЧ полей показана на рисунке 1. При шаге дискретности $\Delta y < 0,1x_a$ в рабочей области $|x| < x_a - \Delta y$ ИОС погрешность распределения потенциала составляет $10^{-4} \dots 10^{-3}$.

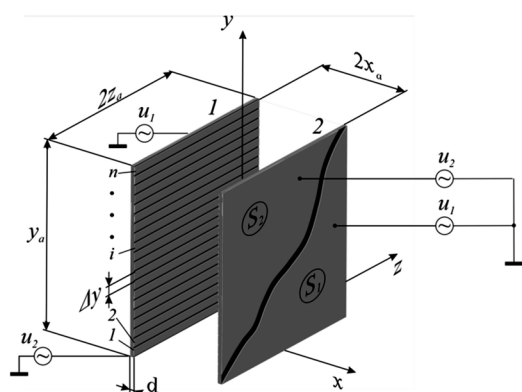


Рисунок 1 – ИОС с планарными дискретными электродами

Для практической реализации дискретных электродов разработана технология распределенных емкостных делителей ВЧ напряжения. Технология состоит в нанесении на диэлектрические подложки толщиной $d \ll x_a$ двухсторонних металлизированных покрытий (рисунок 2, а).

Полеобразующие поверхности образованы множеством равномерно, с шагом Δy , распределенных вдоль оси Y , параллельных оси Z проводящих полосок шириной $\Delta y - h$, где h – зазор между проводящими полосками. Ширина зазора выбирается по возможности минимальной $h \ll \Delta y$, исходя из необходимой электрической прочности промежутков между полосками и возможностей технологии нанесения металлизаций. Металлизация обратных поверхностей электродов разделена на две части S_1 и S_2 . Границы раздела $z_1 = F(y)$ и $z_2 = F(y) + h_2$, где h_2 – ширина зазора между металлизациями, определяется с учетом требуемого распределения потенциала $\varphi(x, y)$ в рабочей области ИОС. Между металлизациями обеих сторон ИОС образуются параллельные системы емкостных делителей напряжения (эквивалентная схема представлена на рисунке 2, б). Емкости делителей

C_{1i} , C_{2i} определяются соотношением площадей перекрытия S_{1i} , S_{2i} металлизированных полосок с поверхностями S_1 и S_2 . В этом случае потенциалы дискретных электродов будут связаны с функцией $F(y_i)$ выражением

$$\varphi_i = \left[1 - \frac{F(y_i)}{z_a - h_2} \right] (u_1 - u_2). \quad (2)$$

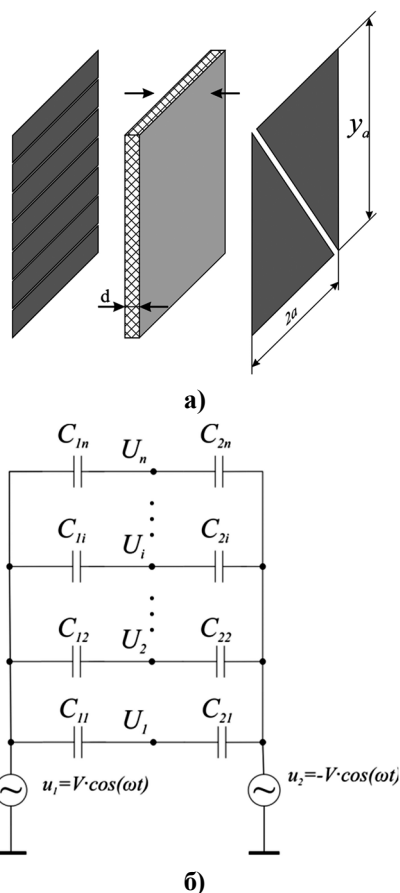


Рисунок 2 – Планарный дискретный электрод (а) и его эквивалентная схема (б)

В ИОС с планарными дискретными электродами реализуемость распределений $\varphi_1(-x_a, y)$, $\varphi_2(x_a, y)$, являющихся частными решениями уравнения Лапласа, ограничена условием корректной дискретизации:

$$\frac{d\varphi}{dy} \ll \frac{u_1 - u_2}{\Delta y}. \quad (3)$$

В ИОС аналитических приборов распределения $\varphi(x, y)$ являются медленноизменяющимися функциями, и условие (3) выполняется, если $\Delta y \ll y_a$.

Для образования композиций переменных и статических полей систему емкостных делителей ВЧ напряжения необходимо дополнить резисторными делителями напряжения.

Для электрода с параметрами $z_a = 100$ мм, $\Delta y = 2$ мм, $d = 0,6$ мм, $\varepsilon = 10$, емкость $C_0 = 29,5$ нФ. На частоте $f = 1$ МГц реактивное

сопротивление емкости $x_C = 5,4$ кОм и условие $R_i \gg \frac{1}{\omega C_0}$ практически реализуемо.

Предлагаемая технология образования электрических полей с планарными дискретными электродами имеет ряд достоинств:

- конструктивная простота, технологичность, малые габариты ИОС;
- высокая точность образования электрических полей и малая чувствительность к изменению геометрических параметров ИОС;
- возможность образования композиций полей с вариацией пространственно-временных распределений потенциалов.

Это определяет перспективность использования технологии для создания инновационных, конкурентоспособных аналитических приборов и систем.

Времяпролетные масс-анализаторы ионов с планарными дискретными электродами

В [4, 5, 20-23] показана возможность времяпролетного масс-разделения в линейных ВЧ полях немонотонных ионов, что делает их предпочтительными по сравнению со статическими полями для использования во времяпролетных масс-рефлекторах. ИОС с планарными дискретными электродами позволяют создавать линейные ВЧ поля в рабочих областях с большим соотношением размеров y_a / x_a , характерных для времяпролетных масс-анализаторов [11, 12].

Механизм масс-разделения ионов по времени пролета реализуется в полуплоскости $y \geq 0$ с двумерным распределением ВЧ потенциала вида

$$\varphi(x, y) = \frac{u(t)}{r_0^2} xy, \quad (4)$$

где $r_0 = \sqrt{2x_a y_a}$ – геометрический параметр ИОС, $u(t) = U \cos \omega t$.

Согласно (4) в плоскостях $x = \pm x_a$ распределения ВЧ потенциала описываются линейными функциями, а в плоскости $y = 0$ потенциал $\varphi(x, 0) = 0$. Схема ИОС с дискретными электродами для образования двумерного линейного ВЧ поля с распределением потенциала (4) в полуплоскости $y \geq 0$ и траектории движения в ней ионов показаны на рисунке 3.

Время возвратных колебаний ионов с начальными координатами $-x_0, y = 0$ до конечных координат $x_0, y = 0$ в радиочастотном линейном поле оказывается пропорциональным массе ионов и не зависит от начальных энергий ионов W_{0x}, W_{0y} [4, 14]:

$$t_A = \frac{\pi r_0^2 \omega}{\sqrt{2eV}} m. \quad (5)$$

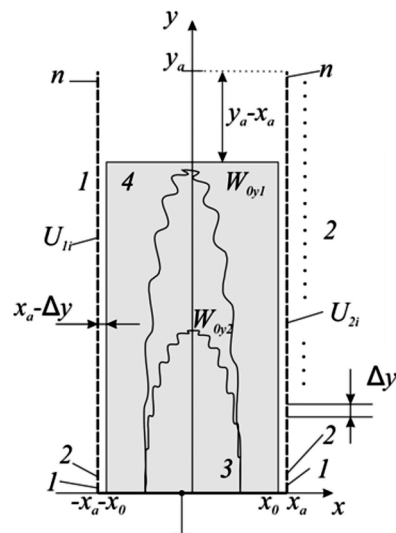


Рисунок 3 – Схема ИОС с двумерным линейным ВЧ электрическим полем для времяпролетного масс-разделения немонотонных ионов: 1, 2 – дискретные, 3 – сплошной заземленный электрод, 4 – рабочая область анализатора

Геометрия проводящих покрытий дискретных электродов для ИОС времяпролетного радиочастотного масс-анализатора ионов показана на рисунке 4.

Элементы металлизированных покрытий обеих сторон электродов образуют параллельную систему емкостных делителей напряжения, которые на полосках полеобразующей поверхности создают дискретно-линейные по оси Y распределения ВЧ потенциала:

$$\varphi_i = \frac{C_{2i}}{C_0} u = \frac{i}{n} u, \quad (6)$$

где $i = 0, 1, 2, \dots, n$ – полоса дискретных элементов.

Для установки на дискретных элементах электродов нулевых постоянных потенциалов проводящие полоски соединяются с общей шиной через высокоомные резисторы $R_0 \gg \frac{1}{\omega C_0}$.

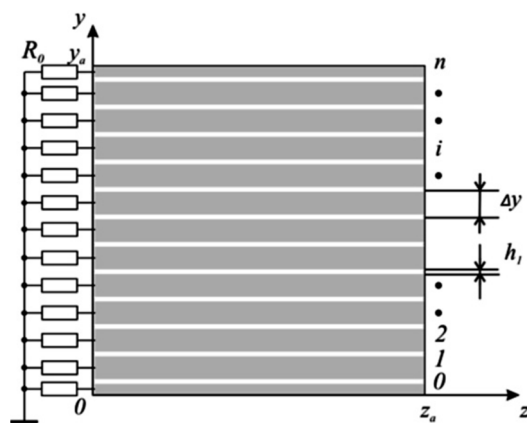
Размер z_a электрода определяется из условия удержания ионов за время дрейфа по оси Z в рабочей области

$$v_T t_A < (z_a - l)/2 - x_a, \quad (7)$$

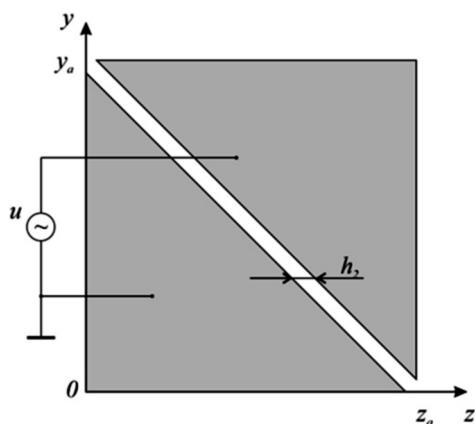
где $v_T = \sqrt{2W_T/m}$ – тепловая скорость ионов, l – размер по оси Z ленточного пучка ионов, вводимых в анализатор.

Эффективность предлагаемой технологии ИОС с планарными дискретными электродами оценивалась при исследовании экспериментального радиочастотного времяпролетного масс-анализатора ионов. Для экспериментального образца прибора на предприятии ООО «Микроэлектронная фирма – ОНИКС» были изготовлены планарные дискретные электроды с размерами

100 x 100 x 0,6 мм. В качестве материала диэлектрических пластин использовалась керамика Al_2O_3 . Полеобразующие поверхности электродов выполнены в виде металлизированных полосок толщиной 10 мкм и шириной 1,9 мм, разделенных промежутками 0,1 мм. Металлизация обратных поверхностей электродов в форме трех треугольников создает на элементах электродов дискретно-линейное распределение ВЧ потенциала.



а



б

Рисунок 4 – Геометрия металлизированных покрытий планарных дискретных электродов ИОС для времяпролетного масс-разделения ионов в радиочастотных полях;

а, б – полеобразующая и обратная поверхности

Схема ИОС экспериментального радиочастотного времяпролетного масс-анализатора ионов приведена на рисунке 5, а фотография его установки в вакуумную камеру – на рисунке 6.

Питание электродной системы анализатора осуществлялось парой симметричных ВЧ напряжений с амплитудами до 2 кВ и переключаемыми частотами 500 кГц и 1 МГц. В блоке управления синхронно с ВЧ напряжением вырабатывались импульсы ионизации, ускорения и регистрации.

Экспериментальный масс-спектр остаточного газа приведен на рисунке 7.

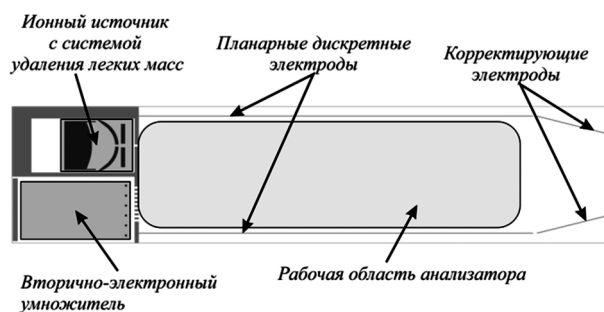


Рисунок 5 – Схема ИОС экспериментального радиочастотного времяпролетного масс-анализатора ионов

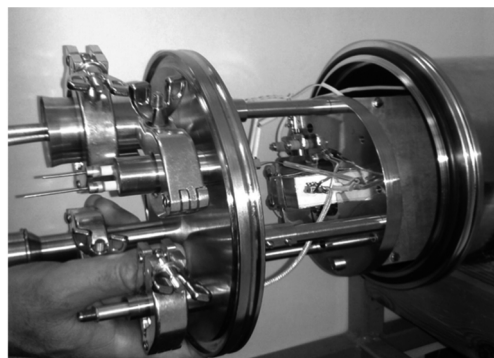


Рисунок 6 – Установка экспериментального масс-анализатора в вакуумную камеру

В результате исследования экспериментального времяпролетного масс-анализатора ионов подтверждена справедливость аналитической теории и численных моделей образования двумерных линейных ВЧ электрических полей планарными дискретными электродами, выполненными по технологии распределенных емкостных делителей напряжения, а также эффективность времяпролетного масс-разделения в таких полях немонотонных ионов. Масс-спектры, полученные с помощью экспериментального времяпролетного масс-анализатора ионов, изготовленного в лабораторных условиях с точностью, не превышающей 20 мкм, имеют следующие параметры [17-19, 24, 25]:

- длительность массового пика с $M = 91$ а.е.м. при $P = 2 \cdot 10^{-6}$ мБар, $V = 1$ кВ, $W_{0y} = 130$ эВ, $q = 0,16$ составила $\Delta t_{min} = 25$ нс;
- абсолютная разрешающая способность для $M = 91$ а.е.м. составила $\Delta M = 0,202$ а.е.м.;
- относительная разрешающая способность для $M = 91$ а.е.м. составила $R = 500$.

Технология планарных дискретных электродов позволяет создавать ИОС с суперпозицией статических и переменных полей с различающимися распределениями потенциала. В [19, 26] на основе этого свойства ИОС разработана радиочастотная ионная ловушка с однополярным по одной координате пространством колебаний заряженных частиц – «Монотрап». Показано

[1, 27], что «Монотрап» может быть использован в качестве детектора наведенных токов в масс-спектрометрах высокого разрешения с преобразованием Фурье. Схема ИОС ионной ловушки «Монотрап» приведена на рисунке 8, распределения ВЧ и статических потенциалов – на рисунке 9 [25, 28-31].

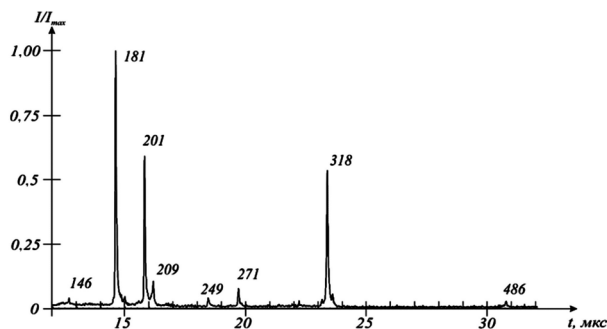


Рисунок 7 – Обзорный масс-спектр остаточного газа экспериментального радиочастотного времяпролетного масс-анализатора ионов при $V = 1,8$ кВ, $f = 475$ кГц, $U_y = 105$ В, $P = 1,6 \cdot 10^{-6}$ мБар

**Масс-анализаторы ионов
с преобразованием Фурье с планарными
дискретными электродами**

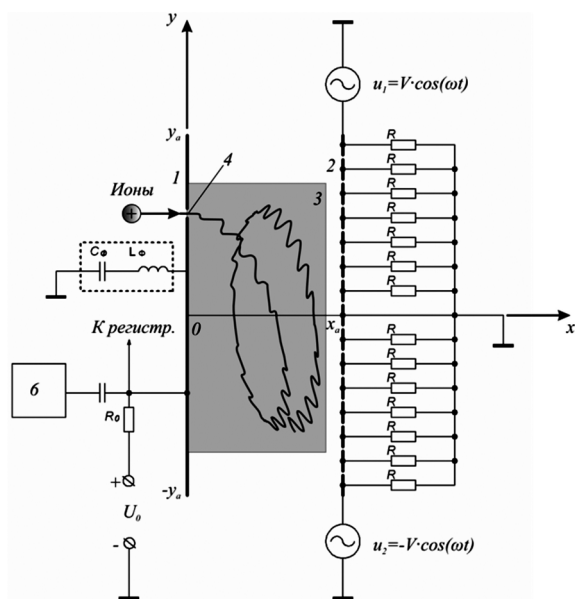


Рисунок 8 – Схема ИОС с суперпозицией квадрупольного ВЧ и однородного статического полей для детектирования наведенных токов: 1 – детектирующий электрод с щелью 4 для ввода ионов, 2 – планарный дискретный электрод, 3 – рабочая область, 5 – режекторный фильтр, 6 – генератор импульса ввода ионов

Ионно-оптическая система «Монотрап» в простейшем варианте (рисунок 8) состоит из двух планарных электродов: 1 – сплошного и 2 – дискретного. Переменное линейное поле в рабочей области 3 ИОС образуется под действием противофазных напряжений $u_1 = -u_2 = V \cos \omega t$,

преобразуемых электродом 2 в дискретно-линейное в плоскости $x = x_a$ распределение ВЧ потенциала. Однородное статическое поле создается постоянной разностью потенциалов U_0 между электродами 1 и 2. Режекторный фильтр 5 снижает уровень ВЧ наводки на детектирующем электроде.

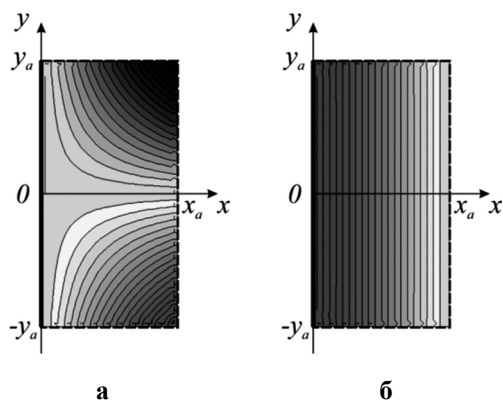


Рисунок 9 – Эквипотенциалы ВЧ (а) и статического (б) полей «Монотрап» с замкнутой ИОС

Во время ввода ионов от генератора 6 на электрод 1 через емкость C подаются импульсные пакеты ионов. Переходная R_0C цепочка обеспечивает экспоненциальное изменение напряжения на детектирующем электроде во время ввода ионов. Длительность ввода устанавливается постоянной времени $t_b \approx 3R_0C$.

Возможны два режима регистрации наведенных токов: составляющих с секулярными частотами Ω ; составляющих с секулярными Ω и ВЧ $\omega - \Omega$ и $\omega + \Omega$ частотами. Ввод ионов осуществляется через щель 4, расположенную на границе рабочей области ловушки.

Результаты моделирования траекторий и спектров наведенных токов в ионной ловушке «Монотрап» приведены на рисунке 10.

Анализ результатов моделирования показывает возможность образования с помощью планарных дискретных электродов суперпозиции высокоточных ВЧ и статических электрических полей, в которых параметры гармонических колебаний ионов – амплитуда, частота и фаза остаются неизменными в течение длительного времени измерения $t_{изм} = 10^5 T_\Omega$. Действительно, пространства колебаний ионов при различном числе периодов колебаний n совпадают, а ширина спектральных линий колебаний совпадает с секулярной частотой и зависит только от времени измерения [27]. Результаты компьютерного моделирования подтверждают эффективность ионной ловушки «Монотрап» как средства долговременного удержания заряженных частиц в ВЧ электрических полях и возможность ее ис-

пользования как детектора наведенных токов в масс-спектрометрах с преобразованием Фурье.

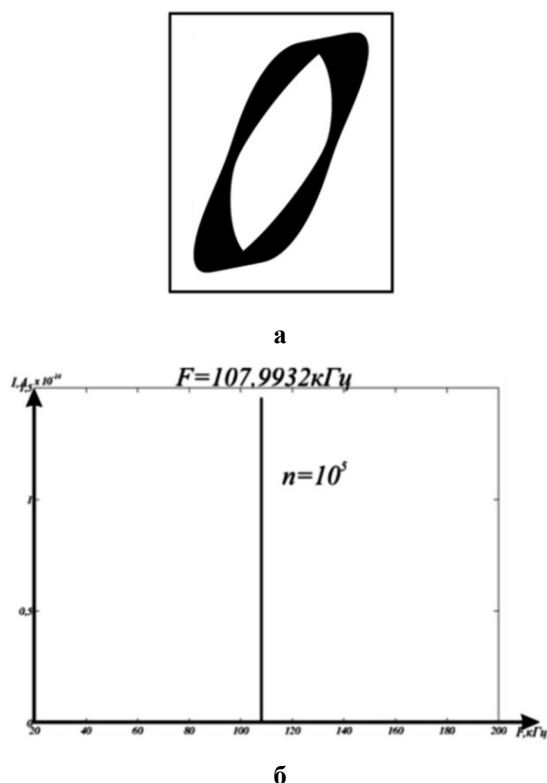


Рисунок 10 – Траектории (а) и спектр (б) колебаний ионов в ИОС с параметрами $r_0 = 28$ мм, $V = 1$ кВ, $f = 1$ МГц, $M = 40$ а.е.м., $g = 0,3$ при числе периодов колебаний $n = 10^3$

Заключение

Технология планарных дискретных электродов с распределенными делителями ВЧ и статического потенциалов позволяет создавать ВЧС с широким классом распределений электрических полей, в том числе и их суперпозиций. Технология является основой для разработки новых инновационных методов энерго- и масс-анализа заряженных частиц для аналитических приборов и систем с усовершенствованными характеристиками. Аналитическая теория, компьютерное моделирование и результаты экспериментального исследования показали эффективность методов масс-анализа ионов по времени пролета и с преобразованием Фурье наведенных токов, использующих ИОС с планарными дискретными электродами. Технология планарных дискретных электродов является средством для развития теории и практики удержания, транспортировки, сепарации и управления траекториями движения заряженных частиц в электрических полях аналитических приборов и систем.

Библиографический список

1. Mikhail Sudakov, Eugenij Mamontov, Fuxing Xu, Chongsheng Xu, Chuan-Fan Ding Possibility of

operating quadrupole mass filter at high resolution // International Journal of Mass Spectrometry. 2016. Vol. 408. pp. 9-19.

2. Судаков М. Ю., Мамонтов Е. В. Исследование квадрупольного фильтра масс с квадрупольным возбуждением методом уравнения огибающей // Журнал технической физики. 2016. Т. 86. № 11. С. 112-120.

3. Судаков М. Ю., Мамонтов Е. В. Использование полос стабильности для улучшения характеристик квадрупольных фильтров масс // Журнал технической физики. 2017. Т. 87. № 1. С. 97-105.

4. Мамонтов Е. В., Гуров В. С., Филиппов И. В., Дятлов Р. Н. Времяпролетное разделение ионов по удельному заряду в высокочастотных полях с квадратичным распределением потенциала // Журнал технической физики. 2007. Т. 77. № 7. С. 139-142.

5. Пат.2327245 Российская Федерация, МКП H01J 49/40. Способ масс-селективного анализа ионов по времени пролета и устройство для его осуществления / Е. В. Мамонтов, И. В. Филиппов, заявитель и патентообладатель Е. В. Мамонтов, И. В. Филиппов – Заявка: 2006115270/28, 03.05.2006. Опубликовано: 20.06.2008. Бюл. № 17. – 7 с. : ил.

6. Гуров В. С., Мамонтов Е. В., Дубков М. В., Дягилев А. А. Радиочастотные ионно-оптические системы для фокусировки и времяпролетного масс-разделения заряженных частиц // Радиотехника. 2012. № 3. С. 75-81.

7. Мамонтов Е. В., Гуров В. С., Дягилев А. А., Грачев Е. Ю., Журавлев В. В. Радиочастотные анализаторы для времяпролетного масс-разделения ионов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 39-2. С. 97-102.

8. Мамонтов Е. В., Кирюшин Д. В. Пространственно-временная фокусировка заряженных частиц в радиочастотных линейных электрических полях // Журнал технической физики. 2012. Т. 82. № 9. С. 63-68.

9. Мамонтов Е. В., Журавлев В. В., Двойнин В. Н., Саликов А. А. Ускорители ионов для радиочастотных времяпролетных масс-спектрометров // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 53. С. 127-133.

10. Гуров В. С., Мамонтов Е. В., Дягилев А. А. Электродные системы с дискретным линейным распределением ВЧ потенциала для масс-анализаторов заряженных частиц // Масс-спектрометрия. 2007. Т. 4. № 2. С. 139-142.

11. Мамонтов Е. В., Дягилев А. А., Грачев Е. Ю. Образование двумерных линейных электрических полей системами плоских дискретных эквипотенциальных электродов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2010. № 32. С. 84-88.

12. Пат.2387043 Российская Федерация, МКП H01J 49/22. Способ формирования двумерного линейного поля и устройство для его осуществления / Е. В. Мамонтов, заявитель и патентообладатель Е. В. Мамонтов – Заявка: 2008114117/28, 10.04.2008. Опубликовано: 20.04.2010. Бюл. № 11. – 7 с.: ил.

13. Пат.2398308 Российская Федерация, МКП H01J 49/36. Способ масс-разделения ионов по време-

ни пролета и устройство для его осуществления / Е. В. Мамонтов, В. С. Гуров, А. А. Дягилев, заявитель и патентообладатель ГОУВПО Рязан. гос. радиотех. ун-т. – Заявка: 2009118859/28, 20.05.2009. Опубликовано: 27.08.2010. Бюл. № 24. – 5 с.: ил.

14. **Мамонтов Е. В., Гуров В. С., Дягилев А. А., Грачев Е. Ю.** Радиочастотный масс-рефлектор для времяпролетного разделения ионов // Прикладная физика. 2011. № 6. С. 127-132.

15. **Пат.2422939** Российская Федерация, МКП H01J 49/22. Способ образования двумерного линейного электрического поля и устройство для его осуществления / Е. В. Мамонтов, В. С. Гуров, Е. Ю. Грачев, А. А. Дягилев, заявитель и патентообладатель ГОУВПО Рязан. гос. радиотех. ун-т. – Заявка: 2009143282/28, 25.11.2009. Опубликовано: 27.06.2011. Бюл. № 18. – 6 с.: ил.

16. **Мамонтов Е. В., Грачев Е. Ю., Дягилев А. А., Журавлев В. В.** Ионно-оптические системы из плоских дискретных электродов с переменной плотностью эквипотенциальных элементов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 2 (44). С. 96-101.

17. **Пат.2496178** Российская Федерация, МКП H01J 49/00. Способ образования двумерного линейного электрического поля и устройство для его осуществления / Е. В. Мамонтов, Е. Ю. Грачев, заявитель и патентообладатель ФГБОУВПО «Рязан. гос. радиотех. ун-т». – Заявка: 2011138617/07, 20.09.2011. Опубликовано: 20.10.2013. Бюл. № 29. – 7 с.: ил.

18. **Пат.2497226** Российская Федерация, МКП H01J 49/22. Способ образования двумерного линейного высокочастотного электрического поля и устройство для его осуществления / Е. В. Мамонтов, заявитель и патентообладатель ФГБОУВПО «Рязан. гос. радиотех. ун-т». – Заявка: 2012116433/07, 25.04.2012. Опубликовано: 27.10.2013. Бюл. № 30. – 8 с.: ил.

19. **Мамонтов Е. В., Журавлев В. В., Двойнин В. Н.** Образование композиций пространственно-временных вариаций электрических полей дискретными электродами из множества резисторно-емкостных делителей напряжения // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 49. С. 89-93.

20. **Мамонтов Е. В., Гуров В. С., Филиппов И. В., Дягилев А. А.** Времяпролетный масс-спектрометр с линейным ВЧ полем // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2008. № 23. С. 144-147.

21. **Пат.2367053** Российская Федерация, МКП H01J 49/22. Способ масс-селективного анализа ионов по времени пролета в линейном ВЧ поле и устройство для его осуществления / Е. В. Мамонтов, В. С. Гуров, А. А. Трубицын, А. А. Дягилев, заявитель и патентообладатель ГОУВПО Рязан. гос. радиотех. ун-т. – Заявка: 2008123637/28, 10.06.2008. Опубликовано: 10.09.2009. Бюл. № 25. – 6 с.: ил.

22. **Пат.2444083** Российская Федерация, МКП H01J 49/32. Способ времяпролетного разделения ионов по

массам и устройство для его осуществления / Е. В. Мамонтов, заявитель и патентообладатель ГОУВПО Рязан. гос. радиотех. ун-т. – Заявка: 2010119323/07, 13.05.2010. Опубликовано: 27.02.2012. Бюл. № 6. – 6 с.: ил.

23. **Пат. 2542722** Российская Федерация, МКП H01J 49/32. Способ времяпролетного масс-анализа и устройство для его осуществления / Е. В. Мамонтов, заявитель и патентообладатель ФГБОУВПО «Рязан. гос. радиотех. ун-т». – Заявка: 2012148852/07, 16.11.2012. Опубликовано: 27.02.2015. Бюл. № 6. – 8 с.: ил.

24. **Мамонтов Е. В., Гуров В. С., Журавлев В. В., Двойнин В. Н., Дягилев А. А., Грачев Е. Ю., Громова З. Ф.** Радиочастотный времяпролетный масс-анализатор ионов с планарными дискретными электродами // Приборы и техника эксперимента. 2015. № 4. С. 82-86.

25. **Пат.2565602** Российская Федерация, МКП H01J 49/32. Устройство для образования двумерных линейных электрических полей / Е. В. Мамонтов, В. В. Журавлев, В. Н. Двойнин, заявитель и патентообладатель ФГБОУВПО «Рязан. гос. радиотех. ун-т». – Заявка: 2014122646/07, 03.06.2014. Опубликовано: 20.10.2015. Бюл. № 29. – 8 с.: ил.

26. **Мамонтов Е. В., Кирюшин Д. В., Журавлев В. В., Грачев Е. Ю.** Ионная ловушка с суперпозицией линейных высокочастотных и однородных статических электрических полей // Научное приборостроение. 2014. Т. 24. № 1. С. 128-133.

27. **Мамонтов Е. В., Кирюшин Д. В., Журавлев В. В.** Колебания ионов в суперпозиции линейных высокочастотных и однородных статических электрических полей // Журнал технической физики. 2014. Т. 84. № 7. С. 110-114.

28. **Пат.2542723** Российская Федерация, МКП H01J 49/26. Способ масс-анализа с преобразованием Фурье / Е. В. Мамонтов, заявитель и патентообладатель ФГБОУВПО «Рязан. гос. радиотех. ун-т». – Заявка: 2013134288/07, 22.07.2013. Опубликовано: 27.02.2015. Бюл. № 6. – 5 с.: ил.

29. **Пат.2557009** Российская Федерация, МКП H01J 49/32. Способ и устройство разделения ионов по удельному заряду с преобразованием Фурье / Е. В. Мамонтов, В. В. Журавлев, Д. В. Кирюшин, заявитель и патентообладатель ФГБОУВПО «Рязан. гос. радиотех. ун-т». – Заявка: 2013125912/07, 04.06.2013. Опубликовано: 20.07.2015. Бюл. № 20. – 8 с.: ил.

30. **Мамонтов Е. В., Журавлев В. В., Двойнин В. Н., Саликов А. А.** Радиочастотная ионная ловушка с суперпозицией квадрупольных высокочастотных и однородных статических полей для масс-спектрометров с преобразованием Фурье // Радиотехника. 2016. № 11. С. 152-157.

31. **Мамонтов Е. В., Журавлев В. В., Двойнин В. Н., Саликов А. А.** Ввод заряженных частиц в масс-анализатор с преобразованием Фурье на основе радиочастотной ловушки Монотрап // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 57. С. 145-150.

UDC 621.384.82

PRODUCTION ENGINEERING OF PLANAR DISCRETE ELECTRODES FOR IONIC-OPTICAL SYSTEMS OF CHARGED PARTICLES MASS-ANALYSERS

E. V. Mamontov, PhD (physic mathematical sciences), full professor, RSREU, Ryazan;
mamontov.evgeny@mail.ru

V. S. Gurov, PhD (technical sciences), full professor, Rector, Head of the Department, RSREU, Ryazan;
gurov.v.s@rsreu.ru

E. Ju. Grachev, PhD, associate professor, RSREU, Ryazan; monopol_rus@mail.ru

A. A. Djagilev, PhD, associate professor, RSREU, Ryazan; a.dyagilew@gmail.com

V. N. Dvojnin, principal engineer, RSREU, Ryazan; joker92-elektro@mail.ru

V. V. Zhuravlev, PhD, engineer, RSREU, Ryazan; vladimir.rgrtu@mail.ru

D. V. Kirjushin, PhD, associate professor, RSREU, Ryazan; kiriushin_rtu@mail.ru

A. A. Salikov, post-graduate student, RSREU, Ryazan; joker92-elektro@mail.ru

***The aim of the work:** development of methods and tools for analytical research on the basis of technologies for the formation of electric fields of ion-optical systems with planar discrete electrodes. Distribution of potentials to boundary surfaces of ionic-optical system is formed by system of the distributed resistor-capacitor voltage dividers formed between metallized coverings of dielectric emulsion carriers. Using the technique offered the methods of ion mass division in electric fields on time of flight and with Fourier transform of induced currents are developed. The analytical theory of methods is confirmed by the results of computer modeling and experiments.*

***Key words:** mass-spectrometry, quadrupole fields, planar discrete electrodes, time-of-flight mass-separation of ions, Fourier transform of the induced currents.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2017-60-2-132-140

References

1. **Sudakov M., Mamontov E., Xu F., Xu Ch., Ding Ch.-F.** Possibility of operating quadrupole mass filter at high resolution. International Journal of Mass Spectrometry. 2016. Vol.408. pp. 9-19. (in English).
2. **Sudakov M. Ju., Mamontov E. V.** Issledovanie kvadropol'nogo fil'tra mass s kvadropol'nym vozbuzhdeniem metodom uravnenija ogibajushhej. Zhurnal tehnicheckoj fiziki. 2016. Vol. 86. no. 11. pp. 112-120. (in Russian).
3. **Sudakov M. Ju., Mamontov E. V.** Ispol'zovanie polos stabil'nosti dlja uluchshenija harakteristik kvadropol'nyh fil'trov mass. Zhurnal tehnicheckoj fiziki. 2017. Vol. 87. no. 1. pp.97-105. (in Russian).
4. **Mamontov E. V., Gurov V. S., Filippov I. V., Djatlov R. N.** Vremjaproletnoe razdelenie ionov po udel'nomu zarjazu v vysokochastotnyh poljah s kvadratichnym raspredeleniem potencijala. Zhurnal tehnicheckoj fiziki. 2007. Vol 77. no. 7. pp. 139-142. (in Russian).
5. **Pat.2327245** Rossijskaja Federacija, MKP H01J 49/40. Sposob mass-selektivnogo analiza ionov po vremeni proleta i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija / Mamontov E.V., Filippov I.V., zajavitel' i patentoobladatel' Mamontov E.V., Filippov I.V. – Zajavka: 2006115270/28, 03.05.2006, Opublikovano: 20.06.2008 Bjul. no. 17. – 7 p.: il. (in Russian).
6. **Gurov V. S., Mamontov E. V., Dubkov M. V., Djagilev A. A.** Radiochastotnye ionno-opticheskie sistemy dlja fokusirovki i vremjaproletnogo mass-razdelenija zarjazhennyh chastic. Radiotekhnika. 2012. no. 3. pp. 75-81. (in Russian).
7. **Mamontov E. V., Gurov V. S., Djagilev A. A., Grachev E. Ju., Zhuravlev V. V.** Radiochastotnye analizatory dlja vremjaproletnogo mass-razdelenija ionov. Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhniceskogo universiteta. 2012. no. 39-2. pp. 97-102.
8. **Mamontov E. V., Kirjushin D. V.** Prostranstvenno-vremennaja fokusirovka zarjazhennyh chastic v radiochastotnyh linejnyh jelektricheskijh poljah. Zhurnal tehnicheckoj fiziki. 2012. Vol. 82. no. 9. pp. 63-68. (in Russian).
9. **Mamontov E. V., Zhuravlev V. V., Dvojnin V. N., Salikov A. A.** Uskoriteli ionov dlja radiochastotnyh vremjaproletnyh mass-spektrometrov. Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhniceskogo universiteta. 2015. no. 53. pp. 127-133. (in Russian).
10. **Gurov V. S., Mamontov E. V., Djagilev A. A.** Jelektrodnye sistemy s diskretnym linejnym raspredeleniem VCh potencijala dlja mass-analizatorov zarjazhennyh chastic. Mass-spektrometrija. 2007. Vol. 4. no. 2. pp. 139-142. (in Russian).
11. **Mamontov E. V., Djagilev A. A., Grachev E. Ju.** Obrazovanie dvumernyh linejnyh jelektricheskijh polej sistemami ploskijh diskretnyh jek-

vipotencial'nyh jelektrodov. Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta. 2010. no. 32. pp. 84-88. (in Russian).

12. **Pat.2387043** Rossijskaja Federacija, MKP H01J 49/22. Sposob formirovanija dvumernogo linejnogo polja i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija / Mamontov E. V., zjavitel' i patentoobladatel' Mamontov E. V. – Zajavka: 2008114117/28, 10.04.2008, Opublikovano: 20.04.2010 Bjul. no. 11. – 7 p.: il. (in Russian).

13. **Pat.2398308** Rossijskaja Federacija, MKP H01J 49/36. Sposob mass-razdelenija ionov po vremeni proleta i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija / Mamontov E. V., Gurov V. S., Djagilev A. A., zjavitel' i patentoobladatel' GOUVPO Rjazan. gos. radioteh. un-t. Zajavka: 2009118859/28, 20.05.2009, Opublikovano: 27.08.2010 Bjul. no. 24. – 5 p.: il. (in Russian).

14. **Mamontov E. V., Gurov V. S., Djagilev A. A., Grachev E. Ju.** Radiochastotnyj mass-reflektorn dlja vremjaproletnogo razdelenija ionov. Prikladnaja fizika. 2011. no. 6. pp. 127-132. (in Russian).

15. **Pat.2422939** Rossijskaja Federacija, MKP H01J 49/22. Sposob obrazovanija dvumernogo linejnogo jelektricheskogo polja i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija / Mamontov E. V., Gurov V. S., Grachev E. Ju., Djagilev A. A., zjavitel' i patentoobladatel' GOUVPO Rjazan. gos. radioteh. un-t. Zajavka: 2009143282/28, 25.11.2009, Opublikovano: 27.06.2011 Bjul. no. 18. – 6 p.: il. (in Russian).

16. **Mamontov E. V., Grachev E. Ju., Djagilev A. A., Zhuravlev V. V.** Ionno-opticheskie sistemy iz ploskih diskretnykh jelektrodov s peremennoj plotnost'ju jekvipotencial'nyh jelementov. Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta. 2013. no. 2 (44). pp. 96-101. (in Russian).

17. **Pat.2496178** Rossijskaja Federacija, MKP H01J 49/00. Sposob obrazovanija dvumernogo linejnogo jelektricheskogo polja i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija. Mamontov E. V., Grachev E. Ju., zjavitel' i patentoobladatel' FGBOUVPO «Rjazan. gos. radio-teh. un-t». Zajavka: 2011138617/07, 20.09.2011, Opublikovano: 20.10.2013 Bjul. no. 29. – 7 p.: il. (in Russian).

18. **Pat.2497226** Rossijskaja Federacija, MKP H01J 49/22. Sposob obrazovanija dvumernogo linejnogo vysokochastotnogo jelektricheskogo polja i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija / Mamontov E. V., zjavitel' i patentoobladatel' FGBOUVPO «Rjazan. gos. radioteh. un-t». – Zajavka: 2012116433/07, 25.04.2012, Opublikovano: 27.10.2013 Bjul. no. 30. – 8 p.: il. (in Russian).

19. **Mamontov E. V., Zhuravlev V. V., Dvojnin V. N.** Obrazovanie kompozicij prostranstvenno-vremennykh variacij jelektricheskikh polej diskretnymi jelektrodami iz mnozhestva rezistorno-emkostnykh delitelej naprjazhenija. Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta. 2014. no. 49. pp. 89-93. (in Russian).

20. **Mamontov E. V., Gurov V. S., Filippov I. V., Djagilev A. A.** Vremjaproletnyj mass-spektrometr s linejnym VCh polem. Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta. 2008. no. 23. pp. 144-147. (in Russian).

21. **Pat.2367053** Rossijskaja Federacija, MKP H01J 49/22. Sposob mass-selektivnogo analiza ionov po vremeni proleta v linejnom vch pole i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija. Mamontov E. V., Gurov V. S., Trubi-

cyn A. A., Djagilev A. A., zjavitel' i patento-obladatel' GOUVPO Rjazan. gos. radioteh. un-t. Zajavka: 2008123637/28, 10.06.2008, Opublikovano: 10.09.2009 Bjul. no. 25. – 6 p.: il. (in Russian).

22. **Pat.2444083** Rossijskaja Federacija, MKP H01J 49/32. Sposob vremjaproletnogo razdelenija ionov po massam i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija. Mamontov E. V., zjavitel' i patentoobladatel' GOUVPO Rjazan. gos. radioteh. un-t. Zajavka: 2010119323/07, 13.05.2010, Opublikovano: 27.02.2012 Bjul. no. 6. – 6 p.: il. (in Russian).

23. **Pat.2542722** Rossijskaja Federacija, MKP H01J 49/32. Sposob vremjaproletnogo mass-analiza i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija / Mamontov E. V., zjavitel' i patentoobladatel' FGBOUVPO «Rjazan. gos. radioteh. un-t». – Zajavka: 2012148852/07, 16.11.2012, Opublikovano: 27.02.2015 Bjul. no. 6. – 8 p.: il. (in Russian).

24. **Mamontov E. V., Gurov V. S., Zhuravlev V. V., Dvojnin V. N., Djagilev A. A., Grachev E. Ju., Gromova Z. F.** Radiochastotnyj vremjaproletnyj mass-analizator ionov s planarnymi dis-kretnymi jelektrodami. Pribory i tehnika jeksperimenta. 2015. no. 4. pp. 82-86. (in Russian).

25. **Pat.2565602** Rossijskaja Federacija, MKP H01J 49/32. Ustrojstvo dlja obrazovanija dvumernykh linejnykh jelektricheskikh polej. Mamontov E. V., Zhuravlev V. V., Dvojnin V. N., zjavitel' i patento-obladatel' FGBOUVPO «Rjazan. gos. radioteh. un-t». Zajavka: 2014122646/07, 03.06.2014, Opublikovano: 20.10.2015 Bjul. no. 29. – 8 p.: il. (in Russian).

26. **Mamontov E. V., Kirjushin D. V., Zhuravlev V. V., Grachev E. Ju.** Ionnoj lovushka s superpoziciej linejnykh vysokochastotnykh i odnorodnykh staticheskikh jelektricheskikh polej. Nauchnoe priborostroenie. 2014. Vol. 24. no. 1. pp. 128-133. (in Russian).

27. **Mamontov E. V., Kirjushin D. V., Zhuravlev V. V.** Kolebanija ionov v superpozicii linejnykh vysokochastotnykh i odnorodnykh staticheskikh jelektricheskikh polej. Zhurnal tekhnicheskoi fiziki. 2014. Vol. 84. no. 7. pp. 110-114. (in Russian).

28. **Pat.2542723** Rossijskaja Federacija, MKP H01J 49/26. Sposob massanaliza s preobrazovaniem Fur'e / Mamontov E. V., zjavitel' i patentoobladatel' FGBOUVPO «Rjazan. gos. radioteh. un-t». Zajavka: 2013134288/07, 22.07.2013, Opublikovano: 27.02.2015 Bjul. no. 6. – 5 p.: il. (in Russian).

29. **Pat.2557009** Rossijskaja Federacija, MKP H01J 49/32. Sposob i ustrojstvo razdelenija ionov po udel'nomu zarjadu s preobrazovaniem Fur'e. Mamontov E. V., Zhuravlev V. V., Kirjushin D. V., zjavitel' i patentoobladatel' FGBOUVPO «Rjazan. gos. radioteh. un-t». Zajavka: 2013125912/07, 04.06.2013, Opublikovano: 20.07.2015 Bjul. no. 20. – 8 p.: il. (in Russian).

30. **Mamontov E. V., Zhuravlev V. V., Dvojnin V. N., Salikov A. A.** Radiochastotnaja ionnaja lovushka s superpoziciej kvadrupol'nykh vysokochastotnykh i odnorodnykh staticheskikh polej dlja mass-spektrometrov s preobrazovaniem Fur'e. Radiotekhnika. 2016. no. 11. pp. 152-157. (in Russian).

31. **Mamontov E. V., Zhuravlev V. V., Dvojnin V. N., Salikov A. A.** Vvod zarjazyennykh chastic v mass-analizator s preobrazovaniem Fur'e na osnove radiochastotnoj lovushki Monotrap. Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta. 2016. no. 3. pp.145-150. (in Russian).