

УДК 681.2.084, 537.534.7

© Т. В. Помозов, А. Н. Веренчиков, М. И. Явор

КВАЗИПЛАНАРНЫЕ БЕССЕТОЧНЫЕ ИОННЫЕ ЗЕРКАЛА В МНОГООТРАЖАТЕЛЬНЫХ ВРЕМЯПРОЛЕТНЫХ МАСС-АНАЛИЗАТОРАХ

В работе рассмотрен способ периодической фокусировки ионов в направлении дрейфа во многоотражательном времяпролетном анализаторе с зигзагообразной траекторией движения ионов, основанный на периодической пространственной модуляции электростатического поля в ионных зеркалах в указанном направлении. Указанный способ позволяет не только осуществлять удержание ограниченных размеров пакетов ионов в направлении дрейфа, но также в комбинации с набором периодических одиночных линз формировать свойство пространственной изохронности ионных пакетов во втором абберационном порядке в этом направлении.

Кл. сл.: многоотражательный времяпролетный масс-анализатор, бессеточное ионное зеркало, фокусировка, пространственная изохронность

ВВЕДЕНИЕ

Развитие многоотражательных времяпролетных масс-спектрометров (МОВПМС) в последнее десятилетие идет все возрастающим темпом, поскольку эти приборы считаются наиболее перспективными для достижения сочетания высоких параметров: разрешающей способности, скорости анализа, чувствительности и динамического диапазона анализа. Принцип работы рассматриваемых приборов основан на "упаковке" ионных траекторий большой длины в малый физический объем с помощью либо периодических поворотов этих траекторий в секторных полях [1–3], либо периодических отражений ионов в бессеточных ионных зеркалах [3, 4]. При этом последний способ обеспечивает больший энергетический аксептанс времяпролетного анализатора благодаря высокому порядку фокусировки времени пролета ионов по энергии, а также большее удобство настройки анализатора [5].

Зеркальные МОВПМС формируют либо замкнутые периодические ионные траектории (такие приборы используются в основном в ядерной физике и в космических исследованиях [6–9]), либо разомкнутые траектории, позволяющие проводить анализ ионов в широком диапазоне масс — задаче, характерной для биохимических приложений. Наиболее простым методом формирования "сложенной" разомкнутой ионной траектории является периодическое отражение ионов от пары планарных (удлиненных в одном направлении) бессеточных ионных зеркал. Такие зеркала благодаря сво-

им фокусирующим свойствам обеспечивают удержание на большой длине пролета малого размера ионных пакетов в направлении y , перпендикулярном плоскости зигзагообразного движения ионов. Планарный многоотражательный анализатор впервые был предложен в работе Назаренко и др. [10]. Электроды зеркал анализатора выполнены в виде пары пластин, симметрично расположенных относительно общей для обоих зеркал средней плоскости xz и вытянутых в направлении дрейфа заряженных частиц z . Ионные пакеты инжектируются в масс-анализатор под небольшим углом дрейфа в направлении z , движутся вдоль зигзагообразной оптической оси, лежащей в плоскости xz , и в итоге попадают в окно детектора (рис. 1, а). Фокусирующие свойства поля зеркал удерживают пучок сжатым в перпендикулярном плоскости движения ионов направлении y .

Недостатком анализатора, предложенного в работе [10], является отсутствие полей, фокусирующих ионы в направлении дрейфа заряженных частиц, т. е. в плоскости xz . Поскольку ионные пакеты, инжектируемые в пространство между зеркалами, неизбежно обладают определенными разбросами по компонентам скоростей в направлении z , то они по мере движения ионов расплываются в этом направлении, что ограничивает общее количество отражений и длину пролета ионов. Для предотвращения расхождения ионного пучка в планарных МОВПМС в работах [11–13] было предложено разместить в дрейфовом пространстве между зеркалами набор двумерных электростатических линз (рис. 1, б), осуществляющих

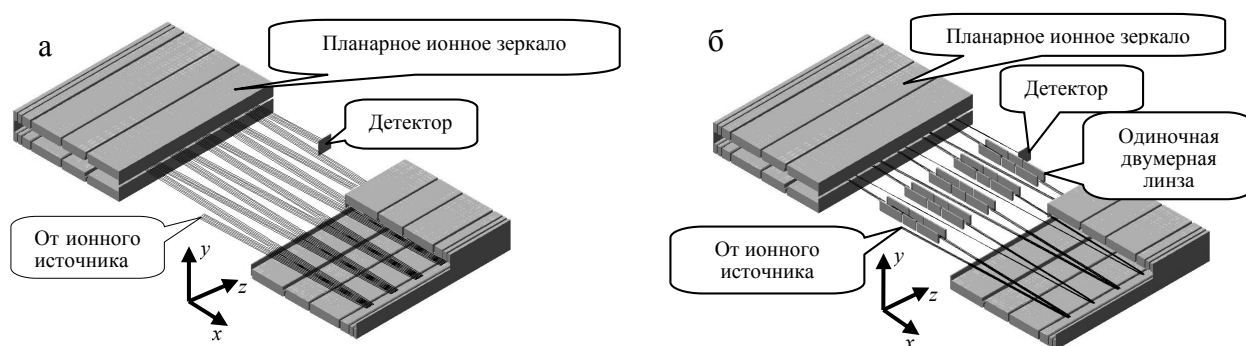


Рис. 1. Схема многоотражательного масс-анализатора на основе планарных бессеточных ионных зеркал без фокусировки ионов в направлении z (а) и с фокусировкой ионов периодическими двумерными зеркалами (б) (для наглядности часть одного из зеркал не показана).

периодическую фокусировку ионов в направлении дрейфа и обеспечивающих устойчивое ограничение пространственного разброса ионных пакетов в этом направлении.

Прогресс в развитии теории высококачественных бессеточных ионных зеркал, обеспечивающий 4–5-й порядок фокусировки времени пролета по энергии ионов и 3-й порядок фокусировки времени пролета по пространственному разбросу ионов в пакетах в направлении y [14], позволил достичь абберационного предела разрешающей способности по массе таких зеркал, превышающего 1 000 000. Однако достижению подобной разрешающей способности многоотражательного планарного времяпролетного анализатора препятствуют абберации 2-го порядка времени пролета по пространственному разбросу ионов в пакетах в направлении дрейфа z . Поэтому актуальной задачей является создание альтернативных способов удержания ионов в указанном направлении, не создающих соответствующих аббераций.

В настоящей работе рассмотрен способ периодической фокусировки ионов в направлении z в многоотражательном времяпролетном анализаторе с зигзагообразной траекторией движения ионов, основанный на периодической пространственной модуляции электростатического поля в ионных зеркалах в z -направлении. Указанный способ был предложен в работе [15] и позволяет осуществлять удержание ограниченных размеров пакетов ионов в направлении дрейфа, а также в комбинации с набором периодических одиночных линз формировать свойство пространственной изохронности ионных пакетов во втором абберационном порядке в направлении z .

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ФОКУСИРОВКА ИОННЫХ ПАКЕТОВ В НАПРАВЛЕНИИ ДРЕЙФА В КВАЗИПЛАНАРНЫХ ИОННЫХ ЗЕРКАЛАХ

Одним из условий функционирования МОВПМС является устойчивое пространственное удержание размера пакетов ионов в направлениях y и z на большой длине пролета. Такое удержание осуществляется в планарных МОВПМС с помощью периодической фокусировки ионов в электростатических полях [16]. Пространственная фокусировка в направлении y обеспечивается ионными зеркалами, а в направлении z — двумерными линзами, расположенными между этими зеркалами.

Известно, что линзы неизбежно дают положительную абберацию 2-го порядка Δ_{zz} , величина которой зависит от силы линз, выраженной, например, через фокусное расстояние. В свою очередь, необходимая для устойчивой работы МОВПМС сила линз зависит не только от разбросов параметров ионных пакетов, а и от величины возмущающих факторов, таких как непараллельность электродов, зарядка поверхностей, переменная составляющая источников питания, наводки и магнитные поля. Как правило, для полной трансмиссии пучка фокусное расстояние линз должно не превышать длину 3–5 полных отражений. Также известно, что положительная абберация 2-го порядка может быть компенсирована в ионных зеркалах, что уже давно используется при вертикальной фокусировке по направлению y в бессеточных ионных зеркалах. Поэтому периодическую пространственную фокусировку заряженных

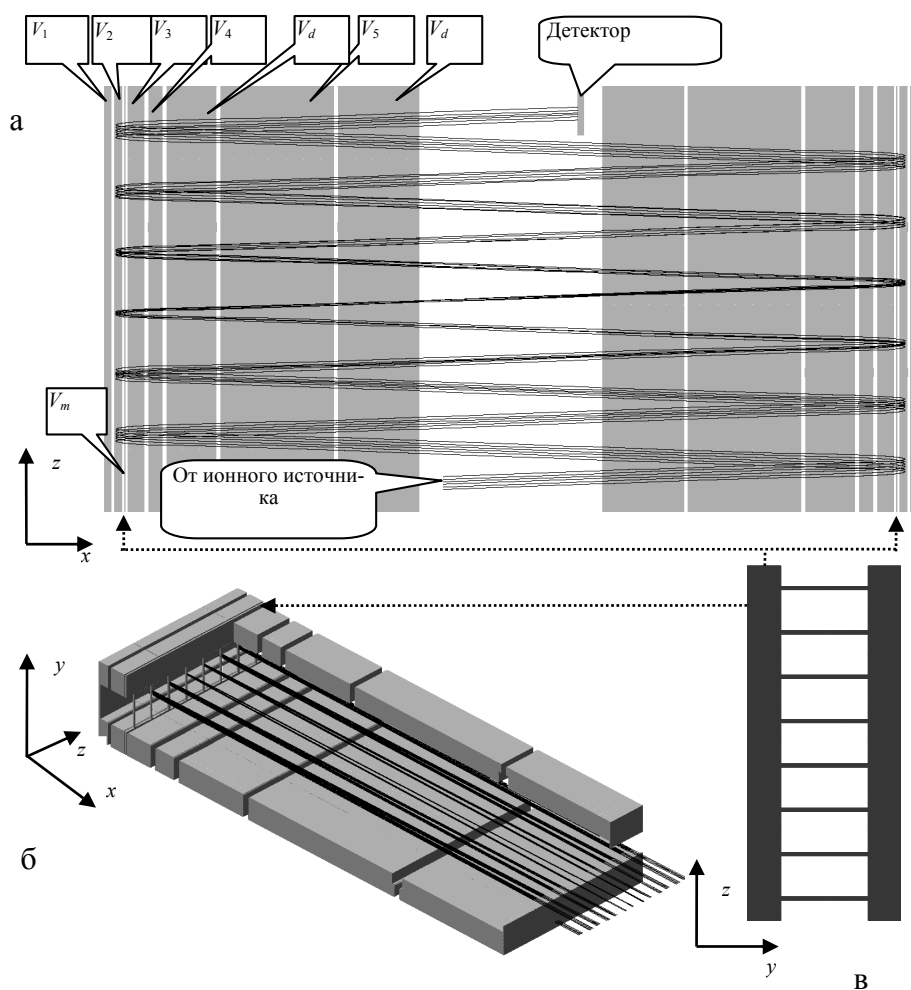


Рис. 2. Схема квазипланарных бессеточных ионных зеркал с периодической структурой электростатического поля в направлении дрейфа ионных пакетов, формируемой при помощи дополнительных электродов-масок, размещенных между двумя смежными электродами зеркал с потенциалами V_2 и V_3 . а — схема в плане (xz); б — фрагмент объемного изображения; в — электрод-маска

частиц в направлении дрейфа z имеет смысл выполнять путем введения слабой периодической неоднородности распределения электростатического поля в указанном направлении в ионных зеркалах. Этот альтернативный периодическим линзам способ фокусировки был предложен в работе [15], а соответствующие модифицированные зеркала были названы в этой работе "квазипланарными".

Наиболее удобным на практике способом формирования периодической структуры электростатического поля в направлении дрейфа z ионных пакетов в квазипланарных зеркалах является введение в промежутки между электродами обычного планарного зеркала дополнительных электродов-масок с периодически расположенными окнами. На рис. 2 показан пример такой маски, расположенной между двумя смежными планарными электродами зеркала с потенциалами V_2 и V_3 . Расстояние между центрами окон электродов-масок в направлении y должно соответствовать

шагу ионных траекторий в этом направлении. Отметим, что для эффективной работы масок этот шаг должен быть сравнимым с величиной межэлектродного зазора планарных зеркал, поскольку слишком малый по сравнению с межэлектродным зазором шаг приводит к существенному нарушению маской структуры электростатического поля в вертикальном направлении y , а слишком большой шаг приводит к экранированию планарными электродами неоднородности поля по дрейфовому направлению z . Величина электростатического потенциала $V_{\text{маска}}$, прикладываемого к электродам-маскам, как правило, несущественно отличается от величины потенциала, средней между потенциалами смежных электродов ионного зеркала. Механизм осуществления фокусировки заряженных частиц иллюстрирует рис. 3, на котором в плоскости yz показаны эквипотенциальные линии и силовые компоненты электростатического поля, действующие на положительно заряженные частицы. Таким образом, электроды-маски с периодической

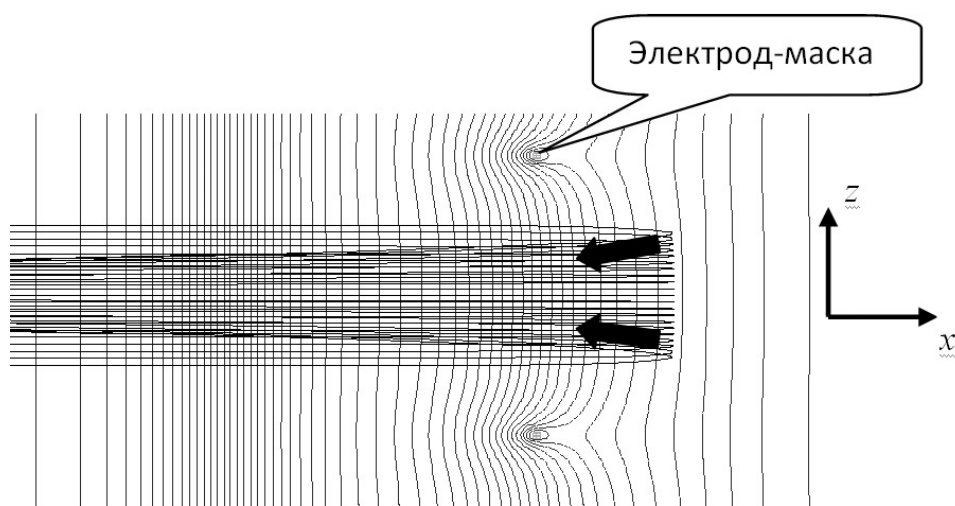


Рис. 3. Экипотенциальные линии и силовые компоненты электростатического поля, действующие на положительно заряженные ионы в плоскости xz в окрестности электрода-маски

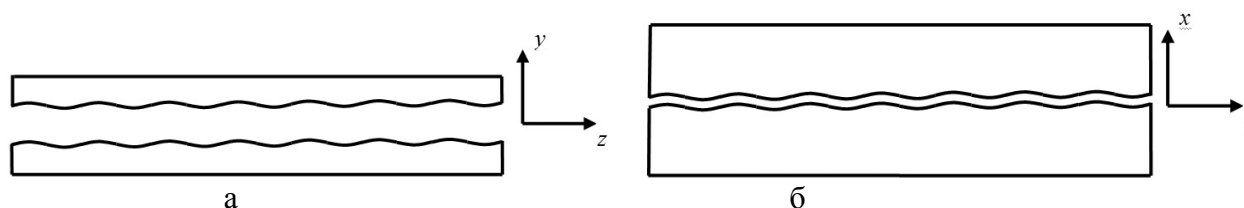


Рис. 4. Схематическое представление электродов квазипланарного ионного зеркала с периодической геометрической модуляцией высоты (а) и толщины (б)

геометрической структурой формируют в направлении дрейфа периодические фокусирующие линзы, выполняющие ту же задачу, что и периодические линзы в анализаторах с планарными зеркалами — устойчивое пространственное ограничение размера пакетов ионов в направлении z на большой длине пролета, только в отличие от периодических линз с возможностью существенного снижения сопутствующих aberrаций.

Хотя на рис. 3 показано симметричное относительно средней плоскости анализатора $x = 0$ расположение масок в обоих зеркалах, очевидно, что периодическая пространственная фокусировка ионов может быть реализована при помощи маски, размещенной только в одном из ионных зеркал масс-анализатора. Вообще говоря, электроды-маски могут размещаться между любыми парами смежных электродов ионного зеркала, однако оптимальным является их расположение в окрестности точки поворота ионов, поскольку именно в данном варианте реализуется независимость от настройки потенциала маски угла дрейфа ионных пакетов.

Периодическая структура распределения электростатического поля в направлении дрейфа ионных пакетов в квазипланарных ионных зеркалах может быть осуществлена не только с помощью электродов-масок, но также и путем формирования периодической геометрической структуры непосредственно в электродах ионного зеркала, например модуляцией их высоты (рис. 4, а) или толщины (рис. 4, б), однако такие варианты сложнее как при расчетной оптимизации геометрий, так и в практической реализации конструкций. Кроме того, поскольку величины потенциалов электродов оптимизируются для обеспечения наилучшей времяпролетной фокусировки ионных пакетов, подстройка этих потенциалов для изменения фокусирующих свойств квазипланарного зеркала в направлении z оказывается связанной с изменением свойств зеркал в вертикальном направлении и, как следствие, влияет на форму временных пиков и разрешающую способность масс-анализатора.

**КОМПЕНСАЦИЯ ВРЕМЯПРОЛЕТНЫХ
АБЕРРАЦИЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА
ПО ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ПЕРЕМЕННЫМ
ИОННОГО ПАКЕТА В НАПРАВЛЕНИИ
ДРЕЙФА В КВАЗИПЛАНАРНЫХ
ИОННЫХ ЗЕРКАЛАХ**

В планарных МОВПМС зависимость времени пролета ионов, зарегистрированного на детекторе, от начальных разбросов координат y_0 и z_0 в пучке, соответствующих угловых переменных $a_0 = dz/dx$ и $b_0 = dy/dx$ и относительного энергоразброса $\delta = (K - K_0)/K_0$, где K — кинетическая энергия иона, K_0 — средняя кинетическая энергия ионов в пучке, может быть выражена в виде абберационного разложения [17]

$$\begin{aligned} t = t_0 &+ (t|\delta)\delta + (t|\delta\delta)\delta^2 + (t|\delta\delta\delta)\delta^3 + \\ &+ (t|\delta\delta\delta\delta)\delta^4 + (t|\delta\delta\delta\delta\delta)\delta^5 + (t|\delta\delta\delta\delta\delta\delta)\delta^6 + \dots \\ &+ (t|yy)y_0^2 + (t|yb)y_0b_0 + (t|bb)b_0^2 + \\ &+ (t|yy\delta)y_0^2\delta + (t|yb\delta)y_0b_0\delta + (t|bb\delta)b_0^2\delta + \dots \\ &+ (t|zz)z_0^2 + (t|za)z_0a_0 + (t|aa)a_0^2 + \\ &+ (t|zz\delta)z_0^2\delta + (t|za\delta)z_0a_0\delta + (t|aa\delta)a_0^2\delta + \dots \end{aligned} \quad (1)$$

В современных бессеточных зеркалах МОВПМС выполняются условия по крайней мере 3-го порядка фокусировки времени пролета по энергии ионов [11]: $(t|\delta) = (t|\delta\delta) = (t|\delta\delta\delta) = 0$ и, кроме того, условия 2-го порядка фокусировки времени пролета по пространственным переменным в направлении y : $(t|yy) = (t|yb) = (t|bb) = 0$. В более сложных зеркалах выполняются условия и более высоких порядков — до 5-го порядка фокусировки времени пролета по энергии и до 3-го — по пространственным переменным в направлении y [14]: $(t|\delta\delta\delta\delta) = (t|\delta\delta\delta\delta\delta) = 0$ и $(t|yy\delta) = (t|yb\delta) = (t|bb\delta) = 0$. В этом случае разрешающая способность время-

пролетного анализатора ограничивается неизбежно присутствующими в системах с двумерными электростатическими линзами абберациями 2-го порядка времени пролета по пространственным переменным в направлении z : $(t|zz)$, $(t|za)$ и $(t|aa)$.

Поскольку движение ионов в масс-анализаторе проходит через набор одинаковых зеркально-симметричных "ячеек" от центральной плоскости масс-анализатора $x = 0$ с отражением от зеркала обратно до той же плоскости, то движение ионов в проекции на плоскость xz устойчиво при выполнении соотношения $-1 > (z|z) < 1$, причем условием наилучшей стабильности ионного движения является условие $(z|z) = 0$, что эквивалентно фокусировке типа "параллель—точка" в указанной проекции после прохождения такой ячейки [16]. Кроме того, в условиях малости угла дрейфа наклона зигзагообразной траектории к оси x в силу условий симметрии справедливо следующее утверждение: если после пролета одной ячейки выполняются условия $(z|z) = 0$ и $(t|zz) = 0$, то обращается в ноль и абберационный коэффициент $(t|aa) = 0$, а после последовательного прохождения двух таких ячеек, т. е. после полного "оборота" ионного пакета, осуществляется равенство нулю абберационного коэффициента $(t|za) = 0$. Таким образом, осуществление пространственной изохронности ионного движения во втором абберационном порядке в направлении дрейфа $(t|zz) = (t|aa) = (t|za) = 0$ после целого количества оборотов заряженных частиц в масс-анализаторе требует осуществления двух условий после прохождения зеркально-симметричной ячейки: $(z|z) = (t|zz) = 0$. Второе из этих условий не может быть выполнено в анализаторе с двумерными периодическими линзами, поскольку у таких линз абберация $(t|zz)$ всегда строго положительна. В этом случае ионы, летящие с отклонениями по координате z от средней траектории движения (оптической оси), прибывают на детектор с временной задержкой по сравнению с ионами, движущимися вдоль оптической оси, и величина этой временной

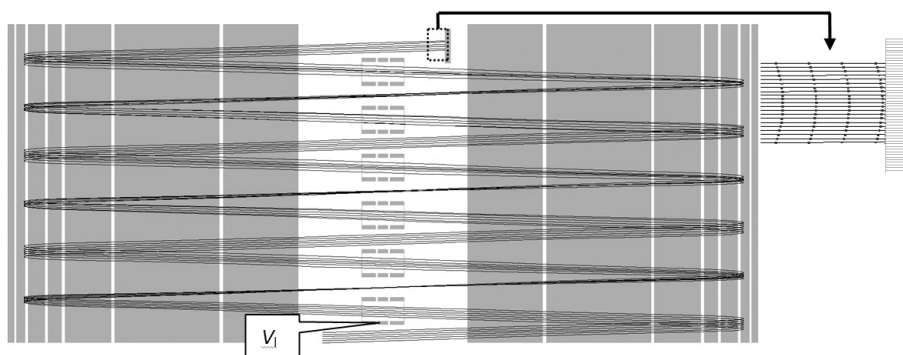


Рис. 5. Формирование временных фронтов ионных пакетов в направлении z в МОВПМС, в котором периодическая фокусировка заряженных частиц в направлении дрейфа осуществляется при помощи набора одиночных линз

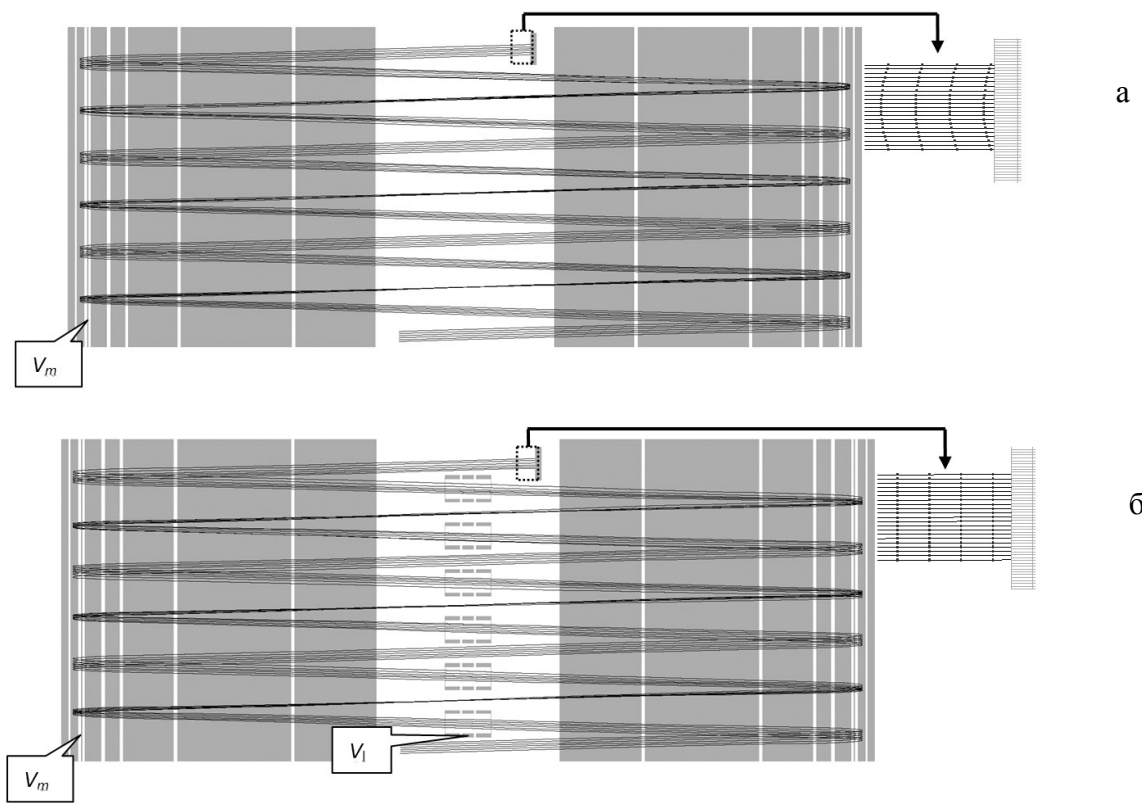


Рис. 6. Формирование временных фронтов ионных пакетов в направлении z в МОВПМС, в котором периодическая фокусировка заряженных частиц в направлении дрейфа осуществляется при помощи электродов-масок (а) и комбинации электродов-масок и одиночных линз (б)

задержки пропорциональна квадрату начального отклонения от оптической оси, как это показано на рис. 5. Однако при фокусировке ионных пакетов не в линзах, а в зеркалах знак aberrации ($t|zz$) может быть сделан как положительным, так и отрицательным (последний случай показан на рис. 6, а). Поэтому комбинирование периодических двумерных линз с положительной aberrацией ($t|zz$) и квазипланарной фокусирующей структуры зеркал с отрицательной aberrацией позволяет добиться выполнения двух условий $(z|z) = (t|zz) = 0$ одновременно, как показано на рис. 6, б.

Отметим, что при практической настройке анализатора пространственная фокусировка $(z|z) = 0$ ионов легко осуществляется изменением потенциала одиночных двумерных линз, в то время как значение aberrационного коэффициента второго порядка ($t|zz$) наиболее чувствительно к изменению потенциала, прикладываемого к электроду-маске в том случае, если этот электрод расположен в окрестности точки поворота ионов в зеркале. Как показывают расчеты, описанный вариант осуществления пространственной изохронности движения ионов в направлении z во втором порядке то-

лерантен к распределению электростатического потенциала вдоль оптической оси ионных зеркал и пространственному периоду электродов-масок.

Возможны и другие варианты компенсации времяпролетных aberrаций второго порядка по пространственным переменным ионных пакетов в направлении z . Такая компенсация, например, возможна в квазипланарных ионных зеркалах с двумя электродами-масками. Существует также вариант комбинации квазипланарных ионных зеркал, в которых пространственная модуляция электростатического поля в направлении дрейфа достигается за счет электрода-маски зеркала с периодической геометрической структурой, с одиночными двумерными линзами. К сожалению, реализация перечисленных вариантов существенно зависит от распределения электростатического потенциала вдоль оптической оси ионных зеркал и задаваемого пространственного периода модуляции электростатического поля, определяемого углом инжекции заряженных частиц в масс-анализатор, и сопряжена с трудностью настройки. Например, очевидно, что использование электрода-крышки с периодической структурой в направ-

лении дрейфа становится бессмысленным при значительной удаленности его от точки поворота ионных пакетов. Как показывают расчеты, ионно-оптическая система с двумя электродами-масками сложна в настройке вследствие существенной неразделенности настройки ионно-оптических свойств зеркал в направлениях y и z .

Следует отметить, что введение квазипланарной периодической структуры распределения электростатического поля в направлении z в ионных зеркалах, как правило, увеличивает величины смешанных aberrаций 3-го порядка ($t|zz\delta$) и ($t|aad$) в уравнении (1). Однако положительный эффект компенсации временных aberrаций 2-го порядка перевешивает этот недостаток квазипланарных зеркал.

В целом применение квазипланарных бессточных зеркал для достижения фокусировки времени пролета 2-го порядка по направлению z позволяет существенно повысить предел достижимой разрешающей способности МОВПМС. На рис. 7 приведены расчетные кривые, характеризующие зависимость разрешающей способности на полувысоте от количества оборотов в планарном МОВПМС, квазипланарном МОВПМС, обладающим свойством пространственной изохронности ионного движения во втором aberrационном порядке в направлении дрейфа z , и в планарном МОВПМС в отсутствие пространственного и углового разбросов ионных пакетов в направлении дрейфа (параметры модельного пучка заряженных частиц перечислены в надписи на поле рисунка).

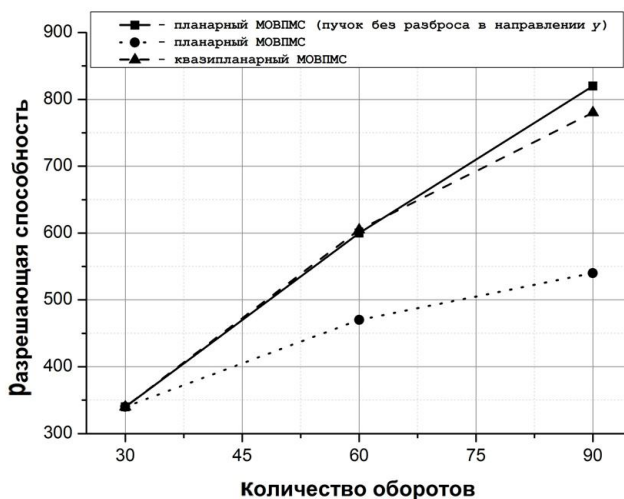


Рис. 7. Зависимость разрешающей способности на полувысоте от количества оборотов в планарном МОВПМС, в квазипланарном МОВПМС и в планарном МОВПМС без учета пространственного разброса ионных пакетов в направлении дрейфа

Численное моделирование проводилось в программном пакете SIMION [18]. Параметры модельного ионного пучка были выбраны следующими: энергия ионов в дрейфе $K = 4.5$ кВ; начальный временной разброс ионных пакетов — гауссов с полной шириной на полувысоте (FWHM) 2 нс; энергоразброс ионов — гауссов с FWHM = 130 эВ; распределение плотности ионов по координате y однородное с $\Delta y = \pm 2$ мм; угловой разброс в плоскости yz — гауссов с FWHM = 0.2°; разброс по координате z — гауссов с FWHM = 1 мм; угловой разброс в плоскости xz — гауссов с FWHM = 0.1°. В зеркалах и периодических линзах имеются апертуры, ограничивающие высоту ионных пакетов в направлениях x и y на уровне ± 2.5 мм. Фокусировка "параллель—точка" в направлении дрейфа осуществляется через 2 полных оборота ионов. Зеркала сравниваемых масс-анализаторов обладают свойствами пространственной изохронности ионного движения в направлении y и фокусировки 4-го порядка времени пролета по энергии.

Как видно из представленных на рис. 7 результатов, в планарном МОВПМС увеличение количества оборотов ионов выше определенного предела становится практически бессмысленным: рост разрешающей способности масс-анализатора с увеличением времени пролета в существенной степени ограничивается накапливаемыми времяпролетными aberrациями 2-го порядка по пространственным переменным ионных пакетов, вносимыми периодическими одиночными линзами. Напротив, квазипланарный МОВПМС позволяет исключить этот фактор, и в таком случае разрешающая способность растет линейно с числом оборотов. Действительно, из рис. 7 видно, что в рассматриваемом случае величина разрешающей способности практически совпадает с таковой для планарного МОВПМС в отсутствие пространственного и углового разбросов заряженных частиц в направлении дрейфа и достигает величины 780 000 после 90 оборотов. Таким образом, использование квазипланарных ионных зеркал является перспективным как для создания МОВПМС, функционирующих в режиме сверхвысокой разрешающей способности, так и для увеличения пространственного и углового акцептанса МОВПМС при фиксированном уровне разрешения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты численного моделирования показывают, что квазипланарные ионные зеркала с периодической пространственной модуляцией электростатического поля в направлении дрейфа ионных пакетов могут с успехом использоваться в МОВПМС как для осуществления устойчивого ограничения пространственного и углового раз-

бросов ионных пакетов после большого количества отражений, так и для создания МОВПМС с пространственной изохронностью ионного движения во втором абберационном порядке в направлении дрейфа заряженных частиц. Наиболее универсальным способом устранения времяпролетных аббераций 2-го порядка по пространственным переменным ионных пакетов в направлении дрейфа является комбинирование квазипланарных ионных зеркал с дополнительным электродом-маской, размещенным в окрестности точки поворота заряженных частиц, и периодических одиночных линз. Возможность устранения рассматриваемых времяпролетных аббераций в МОВПМС на основе квазипланарных ионных зеркал является одним из ресурсов повышения разрешающей способности времяпролетных приборов в диапазоне разрешающей способности порядка 1 000 000.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Toyoda M., Okumura D., Ishihara M., Katakuse I. Multi-turn time-of-flight mass spectrometers with electrostatic sectors // *J. Mass Spectrom.* 2003. Vol. 38, no. 11. P. 1125–1142. doi: 10.1002/jms.546.
2. Satoh T., Tsuno H., Iwanaga M., Kammei Y. The design and characteristic features of a new time-of-flight mass spectrometer with a spiral ion trajectory // *J. Am. Soc. Mass Spectrom.* 2005. Vol. 16. P. 1969–1975. doi: 10.1016/j.jasms.2005.08.005.
3. Wollnik H. History of mass measurements in time-of-flight mass analyzers // *Int. J. Mass Spectrom.* 2013. Vol. 349–350. P. 38–46. doi: 10.1016/j.ijms.2013.04.023.
4. Wollnik H., Przewloka M. Time-of-flight mass spectrometers with multiply reflected ion trajectories // *Int. J. Mass Spectrom. Ion Processes.* 1990. Vol. 96. P. 267–274. doi: 10.1016/0168-1176(90)85127-N.
5. Явор М.И., Веренчиков А.Н. Сравнительный анализ многопроходных времяпролетных масс-анализаторов на основе зеркал и секторных полей // *Научное приборостроение.* 2006. Т. 16, № 3. С. 21–29.
6. Wollnik H., Casares A. An energy-isochronous multi-pass time-of-flight mass spectrometer consisting of two coaxial electrostatic mirrors // *Int. J. Mass Spectrom.* 2003. Vol. 227, no. 2. P. 217–222. doi: 10.1016/S1387-3806(03)00127-1.
7. Yavor M.I., Plaß W.R., Dickel T. et al. Ion-optical design of a high-performance multiple-reflection time-of-flight mass spectrometer and isobar separator // *Int. J. Mass Spectrom.* 2015. Vol. 381–382. P. 1–9. doi: 10.1016/j.ijms.2015.01.002.
8. Wolf R.N., Wienholtz F., Atanasov D. et al. ISOLTRAP's multi-reflection time-of-flight mass separator / spectrometer // *Int. J. Mass Spectrom.* 2013. Vol. 349–350. P. 123–133. doi: 10.1016/j.ijms.2013.03.020.
9. Schury P., Wada M., Ito Y. et al. A high-resolution multi-reflection time-of-flight mass spectrograph for precision mass measurements at RIKEN / SLOWRI // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B.* 2014. Vol. 335. P. 39–53. doi: 10.1016/j.nimb.2014.05.016.
10. Nazarenko L.M., Sekunova L.M., Yakushev E.M. Time-of-flight mass spectrometer with multiple reflection. SU Patent 1725289, 1992.
11. Веренчиков А.Н., Явор М.И. Планарный многоотражательный времяпролетный масс-анализатор, работающий без ограничения диапазона масс // *Научное приборостроение.* 2004. Т. 14, № 2. С. 38–45.
12. Веренчиков А.Н., Явор М.И., Хасин Ю.И. и др. Многоотражательный планарный масс-анализатор. I. Анализатор для параллельного тандемного спектрометра // *ЖТФ.* 2005. Т. 75, № 1. С. 74–83.
13. Yavor M., Verentchikov A., Hasin Yu. et al. Planar multi-reflecting time-of-flight mass analyzer with a jigsaw ion path // *Physics Procedia.* 2008. Vol. 1, no. 1. P. 391–400. doi: 10.1016/j.phpro.2008.07.120.
14. Помозов Т.В., Явор М.И. О возможности улучшения характеристик планарных бессеточных ионных зеркал // *Научное приборостроение.* 2011. Т. 21, № 2. С. 90–97.
15. Verentchikov A., Yavor M. Quasi-planar multi-reflecting time-of-flight mass spectrometer. US Patent 2011/0186729, 2011.
16. Verentchikov A., Berdnikov A., Yavor M. Stable ion beam transport through periodic electrostatic structures: linear and non-linear effects // *Physics procedia.* 2008. Vol. 1, no. 1. P. 87–97. doi: 10.1016/j.phpro.2008.07.082.
17. Ristroph T., Flory C.A. Time-of-flight mass spectrometer with curved ion mirrors. US Patent 2011/0168880 A1.
18. Manura D.J., Dahl D.A. SIMION™ 8.0 User Manual. Sci. Instrument Services Inc. Idaho. Nat. Lab., 2006.

**Институт аналитического приборостроения РАН,
г. Санкт-Петербург**

Контакты: Явор Михаил Игоревич,
mikhail.yavor@gmail.com

Материал поступил в редакцию: 22.07.2015

QUASI-PLANAR GRIDLESS ION MIRRORS IN MULTI-REFLECTION TIME-OF-FLIGHT MASS ANALYZERS

T. V. Pomezov, A. N. Verentchikov, M. I. Yavor

Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint-Petersburg, RF

In the paper a method of periodic focusing of ions in the drift direction in a multi-reflection time-of-flight analyzer with zig-zag ion trajectories is considered. The method is based on a periodic modulation of spatial electrostatic field distribution in gridless ion mirrors in this direction. The considered way is alternative to conventionally used periodic lenses in planar multi-reflection time-of-flight analyzers. It allows confining ion packet sizes in the drift direction along the whole ion path. Besides, in combination with periodic lenses the described method enables forming spatial isochronosity of ion packets in the drift direction in the second aberration order and thus increasing the mass resolving power of the analyzer up to 1 000 000.

Keywords: multi-reflecting time-of-flight mass analyzer, gridless ion mirror, focusing, spatial isochronosity

REFERENCES

1. Toyoda M., Okumura D., Ishihara M., Katakuse I. Multi-turn time-of-flight mass spectrometers with electrostatic sectors. *J. Mass Spectrometry*, 2003, vol. 38, no. 11, pp. 1125–1142. doi: 10.1002/jms.546.
2. Satoh T., Tsuno H., Iwanaga M., Kammei Y. The design and characteristic features of a new time-of-flight mass spectrometer with a spiral ion trajectory. *J. Am. Soc. Mass Spectrom.*, 2005, vol. 16, pp. 1969–1975. doi: 10.1016/j.jasms.2005.08.005.
3. Wolnik, H. History of mass measurements in time-of-flight mass analyzers. *Int. J. Mass Spectrom.*, 2013, vol. 349–350, pp. 38–46. doi: 10.1016/j.ijms.2013.04.023.
4. Wollnik, H., Przewlaka M. Time-of-flight mass spectrometers with multiply reflected ion trajectories. *Int. J. Mass Spectrom. Ion Processes*, 1990, vol. 96, pp. 267–274. doi: 10.1016/0168-1176(90)85127-N.
5. Yavor M.I., Verentchikov A.N. [Comparative analysis of multipass time-of-flight mass analyzers based on mirrors and sector fields]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Science Instrumentation], 2006, vol. 16, no. 3. pp. 21–29. (In Russ.).
6. Wollnik H., Casares A. An energy-isochronous multi-pass time-of-flight mass spectrometer consisting of two coaxial electrostatic mirrors. *Int. J. Mass Spectrom.*, 2003, vol. 227, no. 2, pp. 217–222. doi: 10.1016/S1387-3806(03)00127-1.
7. Yavor M.I., Plaß W.R., Dickel T. et al. Ion-optical design of a high-performance multiple-reflection time-of-flight mass spectrometer and isobar separator. *Int. J. Mass Spectrom.*, 2015, vol. 381–382, pp. 1–9. doi: 10.1016/j.ijms.2015.01.002.
8. Wolf R.N., Wienholtz F., Atanasov D. et al. ISOL-TRAP's multi-reflection time-of-flight mass separator / spectrometer. *Int. J. Mass Spectrom.*, 2013, vol. 349–350, pp. 123–133. doi: 10.1016/j.ijms.2013.03.020.
9. Schury P., Wada M., Ito Y. et al. A high-resolution multi-reflection time-of-flight mass spectrograph for precision mass measurements at RIKEN / SLOWRI. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B.*, 2014, vol. 335, pp. 39–53. doi: 10.1016/j.nimb.2014.05.016.
10. Nazarenko L.M., Sekunova L.M., Yakushev E.M. *Time-of-flight mass spectrometer with multiple reflection*. SU Patent 1725289, 1992.
11. Verentchikov A.N., Yavor M.I. [Planar multireflection time-of-flight mass analyzer with unlimited mass range]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Science Instrumentation], 2004, vol. 14, no. 2, pp. 38–45. (In Russ.).
12. Verentchikov A.N., Yavor M.I., Hasin. Yu.I. et al. [Multi-reflective planar mass analyzer. I. The analyzer for a parallel tandem spectrometer]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of technical physics], 2005, vol. 75, no. 1, pp. 4–83. (In Russ.).
13. Yavor M., Verentchikov A., Hasin Yu., et al. Planar multi-reflecting time-of-flight mass analyzer with a jigsaw ion path. *Physics Procedia*, 2008, vol. 1, no. 1, pp. 391–400. doi: 10.1016/j.phpro.2008.07.120.
14. Pomezov T.V., Yavor M.I. [Possibility of performance improvement of planar gridless ion mirrors]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Science Instrumentation], 2011, vol. 21, no. 2, pp. 90–97. (In Russ.).
15. Verentchikov A., Yavor M. *Quasi-planar multi-reflecting time-of-flight mass spectrometer*. US Patent 2011/0186729, 2011.
16. Verentchikov A., Berdnikov A., Yavor M. Stable ion beam transport through periodic electrostatic structures: linear and non-linear effects. *Physics procedia*, 2008, vol. 1, no. 1, pp. 87–97. doi: 10.1016/j.phpro.2008.07.082.
17. Ristroph T., Flory C.A. *Time-of-flight mass spectrometer with curved ion mirrors*. US Patent 2011//0168880 A1.
18. Manura D.J., Dahl D.A. *SIMION TM 8.0 User Manual*. Sci. Instrument Services. Inc. Idaho, Nat. Lab., 2006.

Contacts: *Yavor Michail Igorevich*,
mikhail.yavor@gmail.com

Article received in edition: 22.07.2015