
МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ ДЛЯ БИОТЕХНОЛОГИИ.

ПРИБОРЫ

УДК 621.384.668.8: 537.533.34

© М. И. Явор, А. Н. Веренчиков

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МНОГОПРОХОДНЫХ ВРЕМЯПРОЛЕТНЫХ МАСС-АНАЛИЗАТОРОВ НА ОСНОВЕ ЗЕРКАЛ И СЕКТОРНЫХ ПОЛЕЙ

В работе проведен сравнительный анализ свойств многопроходных времяпролетных масс-анализаторов на основе двух типов ионно-оптических элементов: электростатических зеркал и секторных полей. Сделан вывод о том, что анализаторы на основе бессточных зеркал в целом имеют преимущества в возможности достижения высокой разрешающей способности и чувствительности.

ВВЕДЕНИЕ

Термин "многопроходные" характеризует времяпролетные масс-анализаторы, в которых траектории ионов "сложены" для достижения большой полной длины в сравнительно небольшом занимаемом объеме. Формирование ионных траекторий достигается их периодическим поворотом с помощью ионно-оптических элементов. Траектории ионов в многопроходном анализаторе могут быть представлены как последовательности большого числа N однотипных периодов движения. Большая длина ионных траекторий позволяет повысить разрешающую способность анализатора по массам, которая в многопроходном анализаторе может быть представлена как

$$R_m = \frac{NT_1}{2[(\Delta t_0) + N(\Delta t_1)]}, \quad (1)$$

где T_1 — время одного периода движения, Δt_0 — длительность временного импульса ионов после выхода из источника, Δt_1 — временное уширение импульса ионов на одном периоде движения. Фактически увеличение длины пролета уменьшает вклад в разрешающую способность длительности временного импульса, формируемого источником.

Как известно, длительность импульса ионов, формируемого источником, определяется так называемым "turn-around time" — временем разворота ионов, имеющих в момент включения поля E , выталкивающего ионы из источника, скорость v , направленную против этого поля. Это время разворота равно $\Delta t_0 = mv/(qE)$, где q — заряд иона, m — его масса. Напряженность выталкивающего поля E ограничена, во-первых, амплитудой потенциала, который возможно сформировать импульсным генератором, а во-вторых, требованием ограниченности энергоразброса в сформированном ионном импульсе $\Delta K = qE(\Delta z)$, где Δz — ширина

области, занимаемой ионами в момент включения выталкивающего поля. Энергоразброс приводит к уширению ионного пакета в тракте времяпролетного прибора. Его допустимая величина зависит от качества ионно-оптической системы анализатора, т. е. от ее способности компенсировать зависимость времени пролета ионов от их энергии. Способы такой компенсации рассмотрены в следующем разделе работы. Однако в любом случае величина Δt_0 в реальных времяпролетных системах не опускается ниже нескольких единиц наносекунд для типичной величины массы $m = 1000$ а.е.м., и именно эта величина, как правило, ограничивает разрешение по массам в большинстве современных времяпролетных приборов. Отсюда и вытекает стремление увеличить длину ионных траекторий.

В настоящей работе рассматриваются и сравниваются два типа современных многопроходных времяпролетных анализаторов: один, в котором траектории ионов периодически отражаются в ионных зеркалах, и второй, где поворот траекторий ионов осуществляется секторными электростатическими полями. В разделе 1 работы кратко рассмотрены времяпролетные свойства указанных ионно-оптических элементов. В разделе 2 описаны типы современных многопроходных времяпролетных анализаторов и сравниваются их характеристики.

1. ИОННЫЕ ЗЕРКАЛА И СЕКТОРНЫЕ ПОЛЯ КАК ЭЛЕМЕНТЫ ИЗОХРОННЫХ ВРЕМЯПРОЛЕТНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ

Временное уширение ионного сигнала в тракте времяпролетного масс-анализатора происходит из-за зависимости времени пролета от энергий индивидуальных ионов и различного положения их траекторий. При этом доминирующий вклад в рассматриваемое уширение вносит энергетический

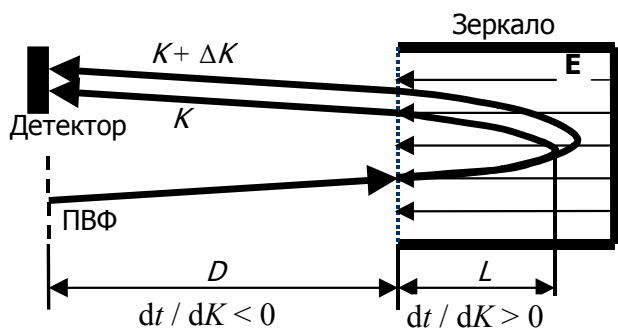


Рис. 1. Фокусировка времени пролета по энергии в анализаторе с ионным зеркалом. ПВФ — первичный временной фокус

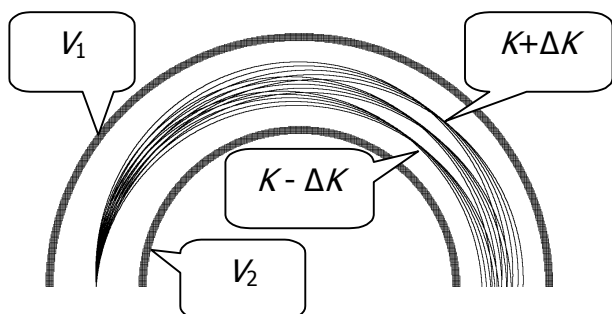


Рис. 2. Фокусировка и дисперсия по энергии ионов в цилиндрическом конденсаторе

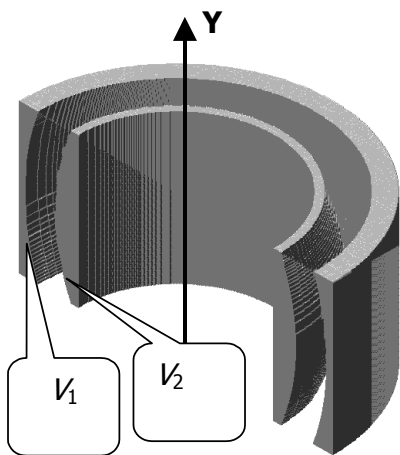


Рис. 3. Геометрия электродов тороидального конденсатора

разброс, формируемый в ионном источнике, поскольку этот разброс обратно пропорционален достигаемой в источнике величине Δt_0 . Во второй половине прошлого века был предложен способ

[1] компенсации зависимости времени пролета ионов от их энергии. Он заключался в отражении ионов, прошедших некоторое расстояние в бесполеовом пространстве, в поле однородного электростатического зеркала, как показано на рис. 1. Поскольку ионы больших энергий K глубже проникают в зеркало, то их время пролета через зеркало больше, чем время пролета ионов меньших энергий. При длине бесполеового промежутка D , вдвое превышающей глубину проникновения ионов в зеркало L , положительная производная времени пролета по энергии в зеркале компенсирует отрицательную производную времени пролета по энергии в бесполеовом пространстве, так что на детекторе выполняется условие независимости времени пролета от энергии в первом порядке: $dt/dK = 0$. Применение зеркал с однородным полем позволило поднять разрешающую способность времяпролетных масс-спектрометров до величины порядка 10 000 при энергоразбросе в ионном пучке порядка 1–3 %. Увеличение энергоразброса приводит к падению разрешающей способности, поскольку в масс-анализаторе с рассматриваемым зеркалом время пролета зависит от энергии во втором порядке, т. е. $d^2t/dK^2 > 0$. Указанный недостаток может быть устранен применением зеркал с двумя промежутками, в которых создаются однородные поля с различной напряженностью [2]. В зеркалах с фокусировкой второго порядка времени пролета по энергии величины разрешающей способности 10 000 можно достичь уже при большем энергоразбросе порядка 4–6 %.

В работе [3] было предложено для компенсации зависимости времени пролета ионов от энергии использовать секторные электростатические поля. Простейшее секторное поле создается цилиндрическим конденсатором с коаксиальными электродами, на которые подаются различные потенциалы V_1 и V_2 (см. рис. 2). Цилиндрический конденсатор обладает дисперсией по энергии, т. е. он пространственно разделяет пучки ионов с различными энергиями K_1 и K_2 , а также фокусирующим свойством в плоскости дисперсии. Для того чтобы пространственная фокусировка ионов имела место также и в плоскости Y , перпендикулярной плоскости дисперсии, используют тороидальные конденсаторы, у которых электроды имеют кривизну в этой плоскости (см. рис. 3).

Тороидальное поле также можно получить, используя цилиндрический конденсатор, высота которого (в направлении Y) ограничена плоскими электродами (см. рис. 4), так называемыми пластинами Мацуды [4]. На эти электроды подается потенциал V_M , отличающийся от среднего между V_1 и V_2 . В этом случае, как показано на рис. 4, эквипотенциали электростатического поля приобретают кривизну в плоскости, проходящей через ось Y , так что в некоторой ограниченной области

межэлектродного зазора поле можно считать тороидальным.

Компенсация зависимости времени пролета ионов от энергии в анализаторах с секторными полями достигается так же, как и при применении зеркал. Именно, в секторном поле ион с большей энергией проходит больший путь, а кроме того, движется ближе к внешнему электроду в области с тормозящим потенциалом (см. рис. 5). Поэтому время пролета иона через секторное поле тем больше, чем больше его энергия. Выбором определенного сочетания угла поворота в дефлекторе (или его радиуса) и длин беспольевых промежутков движения ионов можно достичь выполнения условия $dt/dK = 0$.

Обратим внимание на несколько существенных отличий зеркал и секторных полей как ионно-оптических элементов для создания энергетически изохронных времяпролетных масс-анализаторов. Во-первых, в секторном поле, в отличие от зеркала нет степеней свободы, позволяющих достичь фокусировки второго или более высокого порядка

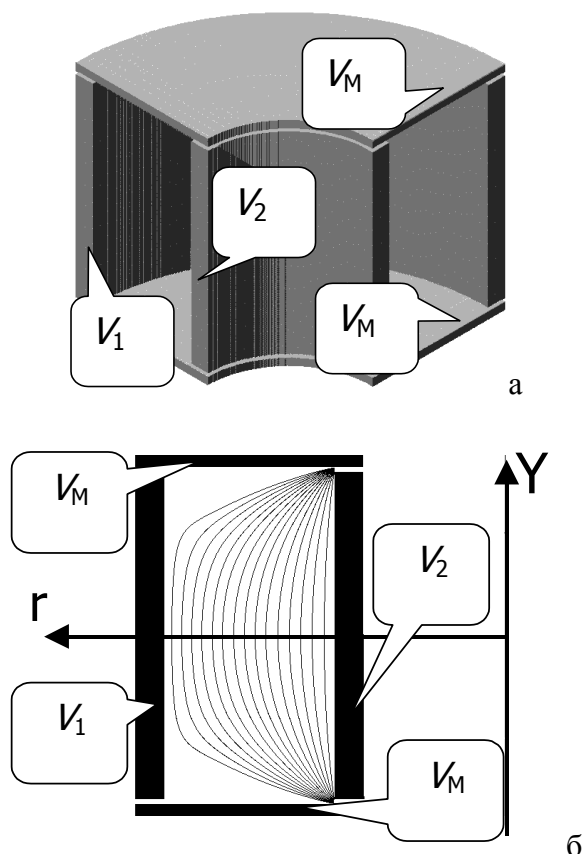


Рис. 4. Создание поля тороидального типа в цилиндрическом конденсаторе с пластинами Мауды: а — геометрия электродов, б — эквипотенциалы электростатического поля

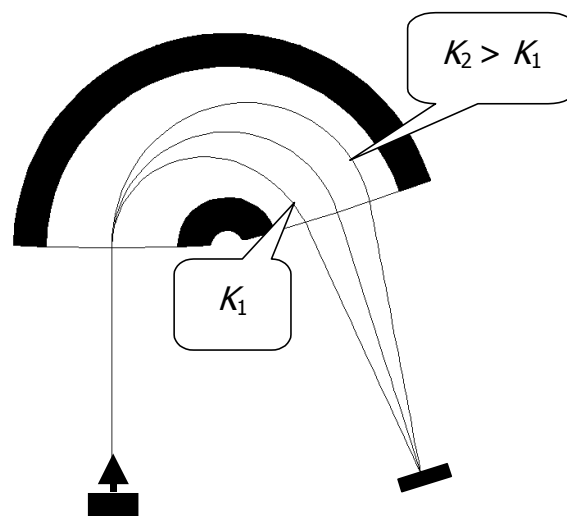


Рис. 5. Фокусировка времени пролета по энергии в анализаторе с секторным полем

времени пролета по энергии. Во-вторых, в то время как настройка зеркала возможна изменением напряженности поля в нем (или напряженностей поля в различных его секциях), т. е. электрически, настройка анализатора с секторным полем фиксирована его геометрическими параметрами. И наконец, еще одно отличие состоит в количестве параметров ионного пучка, влияющих на время пролета иона через анализатор. В случае зеркала с однородным (или кусочно-однородным) полем единственным параметром, от которого зависит время пролета, является энергия иона, точнее, ее продольная составляющая, параллельная направлению напряженности поля зеркала. Действительно, координаты входа иона в зеркало не имеют значения из-за трансляционной симметрии системы, а изменение угла входа равносильно изменению продольной составляющей энергии иона. Таким образом, разность между временем пролета t через анализатор произвольного иона с кинетической энергией K и временем пролета T иона с "номинальной" кинетической энергией K_0 может быть записана в виде разложения в ряд по степеням относительного отклонения энергии от номинальной

$$t - T = \frac{dt}{d\delta} \delta + \frac{1}{2} \frac{d^2t}{d\delta^2} \delta^2 + \frac{1}{6} \frac{d^3t}{d\delta^3} \delta^3 + \dots, \quad (2a)$$

или в обозначениях, принятых в ионной оптике,

$$t - T = (t|\delta)\delta + (t|\delta\delta)\delta^2 + (t|\delta\delta\delta)\delta^3 + \dots \quad (2б)$$

Для секторного поля дело обстоит иначе. Даже в моноэнергетическом пучке ионы, пролетающие в секторном конденсаторе ближе к внешнему электроду, находятся в области тормозящего по-

тенциала, и, таким образом, время их пролета через конденсатор больше, чем у ионов, пролетающих ближе к внутреннему электроду. Поэтому в анализаторах с секторными полями в общем случае время пролета зависит от пространственных координат и углов ионов на входе в конденсатор: $dt/dx \neq 0$, $dt/d\alpha \neq 0$, где x — координата в плоскости дисперсии, α — угол наклона траектории по отношению к оптической оси в этой плоскости. Таким образом, в анализаторах с секторными полями разложение (2а) усложняется и принимает вид:

$$\begin{aligned} t - T = & \frac{dt}{d\delta}\delta + \frac{dt}{dx}x + \frac{dt}{d\alpha}\alpha + \\ & + \frac{1}{2}\frac{d^2t}{d\delta^2}\delta^2 + \frac{1}{2}\frac{d^2t}{dx^2}x^2 + \frac{d^2t}{dx d\alpha}x\alpha + \frac{1}{2}\frac{d^2t}{d\alpha^2}\alpha^2 + \\ & + \frac{1}{2}\frac{d^2t}{dy^2}y^2 + \frac{d^2t}{dy d\beta}y\beta + \frac{1}{2}\frac{d^2t}{d\beta^2}\beta^2 + \\ & + \frac{1}{6}\frac{d^3t}{d\delta^3}\delta^3 + \dots, \end{aligned} \quad (3а)$$

или в обозначениях, принятых в ионной оптике,

$$\begin{aligned} t - T = & (t|\delta)\delta + (t|x)x + (t|\alpha)\alpha + \\ & + (t|\delta\delta)\delta^2 + (t|xx)x^2 + (t|x\alpha)x\alpha + (t|\alpha\alpha)\alpha^2 + \\ & + (t|yy)y^2 + (t|y\beta)y\beta + (t|\beta\beta)\beta^2 + \\ & + (t|\delta\delta\delta)\delta^3 + \dots \end{aligned} \quad (3б)$$

(члены первого порядка по y и β отсутствуют)

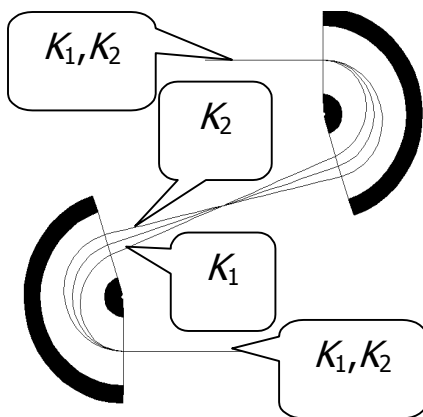


Рис. 6. Пространственно-изохронная (ахроматичная) система на основе секторных полей

в разложении из-за симметрии системы относительно плоскости $y = 0$).

Достижение изохронности движения ионов в анализаторах с секторными полями даже в линейном приближении требует оптимизации их ионно-оптических схем для выполнения условий

$$(t|x) = (t|\alpha) = 0. \quad (4)$$

Из общей теории ионной оптики известно [5], что выполнение условий пространственной изохронности (4) равносильно выполнению условий пространственной ахроматичности

$$(x|\delta) = (\alpha|\delta) = 0. \quad (5)$$

Условия (5) означают, что ионы различных энергий, входящие в систему вдоль одной и той же траектории, должны выходить из этой системы также вдоль одной и той же траектории в линейном приближении. Такому требованию можно удовлетворить, например, располагая друг за другом два одинаковых анализатора, показанных на рис. 5, в которых пространственная дисперсия на выходе анализатора обращается в ноль. Подобная двухкаскадная система показана на рис. 6.

Секторные конденсаторы проигрывают зеркалам не только в возможности достижения высокой разрешающей способности времяпролетных приборов, но и в трансмиссии, поскольку пропускаемый конденсатором фазовый объем пучка ограничен межэлектродным зазором конденсатора.

Следует также отметить, что применение секторных конденсаторов во времяпролетных системах требует большой точности в их сборке. Если в одиночном секторном конденсаторе влияние небольшой вариации межэлектродного зазора (смещение и наклон траектории иона) может быть легко скомпенсировано простым изменением разности потенциалов на электродах, то в ахроматичных системах, состоящих из нескольких конденсаторов, ситуация выглядит по-другому. Если электроды всех конденсаторов подсоединены к одной и той же паре от источников питания, то одновременное изменение разности потенциалов на всех парах электродов равносильно изменению энергии настройки системы конденсаторов. Однако, поскольку в ахроматичной системе положение и направление траектории иона на выходе не зависит от его энергии, подстройка разности потенциалов не влияет на эти положение и направление. Таким образом, компенсация смещения траектории возможна только изменением разности потенциалов на отдельном конденсаторе, однако практически такая компенсация затруднена, поскольку неизвестно, в каком из конденсаторов требуется такая компенсация. Расчет показывает, что в отличие от секторных полей даже в сложных многоэлектродных зеркалах требования к точности сборки в несколько раз слабее.

Табл. 1. Сравнение зеркал и секторных полей как элементов времяпролетных масс-анализаторов

Зеркала		Секторные поля	
Оценка	Свойство	Оценка	Свойство
+	Достижима изохронность по энергии высокого порядка	–	Достижима изохронность по энергии только первого порядка
+	Пространственная изохронность в первом порядке выполняется автоматически	–	Пространственная изохронность в первом порядке требует оптимизации системы
+	Оптимальные параметры подстраиваемы потенциалами	–	Оптимальные параметры фиксированы геометрией
+	Большой аксептанс	–	Аксептанс ограничен межэлектродным зазором
+	Умеренные требования к точности сборки	–	Высокие требования к точности сборки
–	Энергия ионов ограничена 10–15 кВ	+	Возможна работа с ионами энергии 30–40 кВ
–	Высокие требования к стабильности источников питания	+	Умеренные требования к стабильности источников питания
–	Наличие сеток в зеркалах простых конструкций; бессеточные зеркала многоэлектродны и требуют тщательной оптимизации конструкции и потенциалов	+	Отсутствие сеток

Наряду с проанализированными выше недостатками секторные поля как элементы времяпролетных систем обладают и некоторыми преимуществами перед зеркалами. Во-первых, в секторном поле средняя кинетическая энергия ионов остается неизменной, а значит, к электродам конденсатора не требуется приложения высоких напряжений для торможения пучка ионов. Например, для поворота ионов в секторном конденсаторе с радиусом траектории 40 мм и межэлектродным зазором 10 мм требуется разность потенциалов на электродах, примерно в два раза меньшая, чем ускоряющий потенциал, задающий кинетическую энергию ионов. Поэтому в системах с секторными полями возможен анализ ионов больших энергий, чем в зеркальных системах. Увеличение кинетической энергии позволяет достичь больших значений разрешающей способности, поскольку при таком увеличении увеличивается отношение времени пролета к временной длительности импульса, формируемого источником ионов. Применение источников питания с меньшими напряжениями также облегчает борьбу с влиянием паразитных шумов и нестабильностей этих источников.

Еще одним преимуществом секторных полей

является отсутствие сеток на входе и выходе ионного пучка. Это обстоятельство делает секторные элементы привлекательными для использования в качестве элементов многопроходных масс-анализаторов, где наличие многочисленных сеток на пути ионов неприемлемо из-за потерь трансмиссии и эффектов рассеяния. Реализация бессеточных зеркал также возможна, но требует применения многоэлектродных конструкций и их тщательной оптимизации.

В целом, сравнение зеркал и секторных полей как элементов времяпролетных масс-анализаторов можно суммировать таблицей (см. табл. 1).

2. ТИПЫ МНОГОПРОХОДНЫХ ВРЕМЯПРОЛЕТНЫХ МАСС-АНАЛИЗАТОРОВ

Многопроходные времяпролетные масс-анализаторы в настоящее время разрабатываются как на основе секторных полей, так и зеркал. Исторически развитие многопроходных анализаторов началось с систем, в которых ионы многократно проходят через один и тот же набор ионно-оптических элементов. Организация циклического движения требует наличия переключаемых эле-

ментов, обеспечивающих "запирание" ионов в анализаторе после входа в него и "отпирание" анализатора для выпуска ионов. Ионы устойчиво удерживаются внутри анализатора с помощью фокусировки в периодических электростатических полях [6].

Многопроходный времяпролетный масс-анализатор на основе бессеточных зеркал был разработан Вольником и Казаресом [7]. Ионный пучок в анализаторе совершает челночные движения между двумя зеркалами, одно из которых состоит из 7, а другое из 11 полых цилиндрических электродов (см. рис. 7). Потенциалы на электродах подобраны так, что поле каждого зеркала создает линзовый эффект и ионы удерживаются внутри системы периодической фокусировкой. Кроме того, зеркала обеспечивают изохронность по энергии в первом порядке после каждого цикла движения ионов в анализаторе: $(t|\delta) = 0$. Условия изохронности первого порядка по пространственным переменным $(t|x) = (t|\alpha) = (t|y) = (t|\beta) = 0$ выполняются автоматически из-за того, что оптическая ось пучка ионов в анализаторе — прямая и линейная пространственная дисперсия по энергии в таком анализаторе отсутствует. Для впуска ионов в пространство между зеркалами и выпуска ионов на детектор используется импульсное отключение внешних электродов соответствующего одного из зеркал.

При длине траектории ионов на одном обороте 0.6 м рассматриваемый анализатор показывал разрешающую способность по массам порядка 35 000 при диаметре ионного пучка 3 мм и относительном энергоразбросе 3 % после прохождения примерно 300 циклов челночного движения. Основными факторами, ограничивающими разрешающую способность, являлись, по-видимому, временные aberrации второго порядка по энергии и пространственным переменным, а также наводки на потенциалы электродов, вызванные импульсным переключением напряжений.

Альтернативная конструкция многопроходного времяпролетного масс-анализатора была разработана Тойодой и др. [8] на основе секторных электростатических дефлекторов с углом поворота 157° . Движение в анализаторе происходит по 8-образной траектории, как показано на рис. 8. Геометрия анализатора оптимизирована таким образом, что после половины прохода каждого цикла в анализаторе обеспечиваются условия энергетической и пространственной изохронности первого порядка: $(t|\delta) = (t|x) = (t|\alpha) = (t|y) = (t|\beta) = 0$. В работе [8] предложены два варианта компоновки ионно-оптической схемы для обеспечения геометрической фокусировки в плоскости, перпендикулярной плоскости рис. 8. В одном из вариантов (MULTUM) такая фокусировка производится с помощью квадрупольных линз, помещенных на

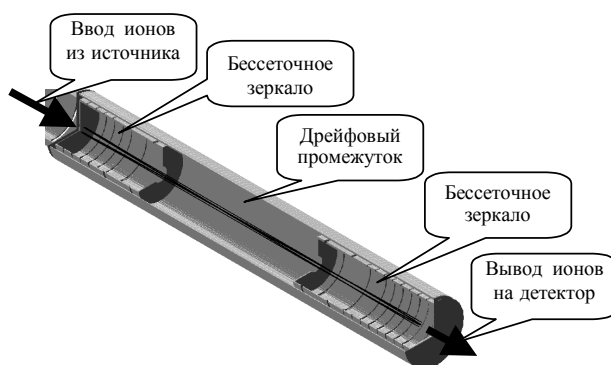


Рис. 7. Разрез геометрии зеркал многопроходного анализатора работы [7]

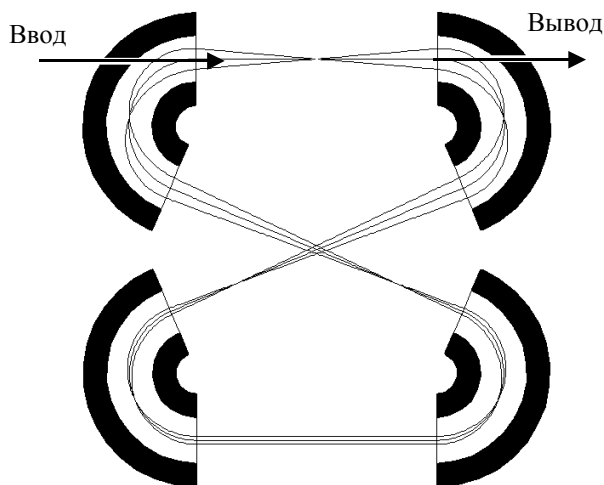


Рис. 8. Схема многопроходного анализатора работы [8]

входе и выходе каждого из цилиндрических секторных конденсаторов, а в другом варианте (MULTUM II) в самих секторных конденсаторах формируются тороидальные поля с помощью пластин Мацуды. Для впуска ионов в анализатор и выпуска их на детектор во внешних электродах двух конденсаторов проделаны щели, как показано на рис. 8. В момент впуска и выпуска пучка потенциалы на электродах соответствующего конденсатора импульсно выключаются.

При длине одного оборота 1.3 м в анализаторе с цилиндрическими конденсаторами было достигнуто значение разрешающей способности 350 000, а в анализаторе с тороидальными секторными полями получена разрешающая способность по массам порядка 50 000. Такие значения были показаны при энергоразбросе в ионном пучке порядка 1 % и диаметре пучка порядка 1 мм. Существенная разница показанных в двух вариантах анализатора

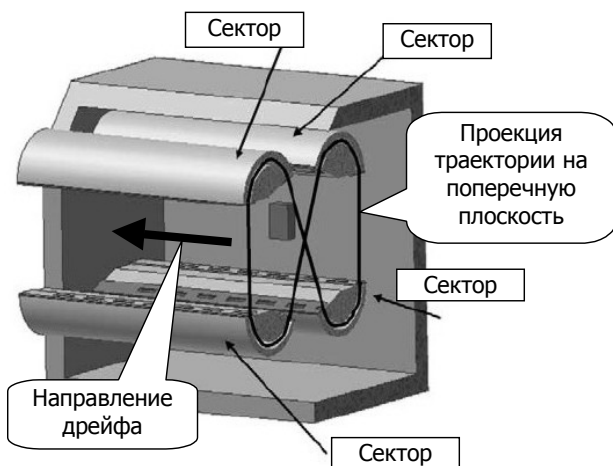


Рис. 9. Геометрия анализатора со спиральным движением ионов

результатов, возможно, объясняется влиянием в режиме работы, использованном в анализаторе с квадрупольными линзами, явления автофокусировки, вызванного наличием объемного заряда в пучке ионов [9]. Отметим, что упомянутые результаты достигались при количестве оборотов порядка 500.

Большое количество замкнутых циклов движения в рассмотренных выше многопроходных анализаторах является их наиболее серьезным недостатком, поскольку приводит к существенному ограничению диапазона масс ионов, анализируемого прибором. Действительно, этот диапазон должен быть настолько узок, чтобы ионы минимальной и максимальной массы совершали в анализаторе одно и то же количество циклов. Зависимость отношения максимальной массы иона M к минимальной m при таком условии имеет вид

$$\frac{M}{m} < \left(\frac{N}{N-1} \right)^2.$$

Избавиться от этого недостатка можно, лишь избегая замыкания ионных траекторий в циклы. Последние разработки многопроходных времяпролетных масс-анализаторов развиваются именно в этом направлении.

"Размыкание" циклов ионного движения в масс-анализаторе типа MULTUM, основанном на использовании секторных полей, возможно организацией спирального движения, при котором ионы, сохраняя 8-образную проекцию траектории на плоскость пространственной дисперсии, медленно смещаются в "направлении дрейфа", поперечном этой плоскости. Такая конструкция анализатора была реализована в работе [10]. При сохранении

всех поперечных размеров анализатора MULTUM II электроды цилиндрических секторных конденсаторов в рассматриваемом анализаторе были растянуты в направлении дрейфа до длины 0.8 м, как показано на рис. 9. Внутри межэлектродных зазоров на расстояниях 50 мм друг от друга были вставлены пластины Мацуды. Таким образом, смещение в направлении дрейфа за один период 8-образного движения составило 50 мм, а общая длина ионной траектории — 20 м. Импульсный пучок ионов размером 1×6 мм формировался ортогональным ускорителем. При транспортной энергии 7 кэВ относительный энергоразброс в ионном пучке составлял 1 %. В указанном режиме работы на анализаторе была достигнута разрешающая способность по массам 35 000.

Многопроходный времяпролетный масс-анализатор с незамкнутой ионной траекторией на основе бессеточных зеркал был предложен в работах [11, 12]. Его основу составляют два планарных четырехэлектродных зеркала, протяженные в "направлении дрейфа". Пучок ионов движется по зигзагообразной траектории, периодически отражаясь от зеркал и медленно смещаясь в направлении дрейфа, как показано на рис. 10. Удержание ионов в узкой окрестности зигзагообразной траектории в плоскости этой траектории производится блоком линз, расположенным между зеркалами. Крайние линзы блока работают так же, как дефлекторы: первая на пути пучка линза обеспечивает нужный угол зигзагообразного движения, а последняя возвращает ионы после прохождения анализатора назад, удваивая таким образом длину пути ионов. Первая линза также может служить переключателем для закливания ионных траекторий в анализаторе и увеличения разрешающей способности за счет сокращения анализируемого массового диапазона (zoom-мода).

Ионно-оптические свойства планарного времяпролетного масс-анализатора подробно рассмотрены в работе [11]. Оптимизация геометрии и распределения электростатического потенциала бессеточных зеркал позволила добиться высокого порядка времяпролетной фокусировки в анализаторе. По энергии достигнута временная фокусировка третьего порядка: $(t|\delta) = (t|\delta\delta) = (t|\delta\delta\delta) = 0$, а по пространственным переменным — второго порядка в направлении, перпендикулярном плоскости зигзагообразного движения: $(t|y) = (t|\beta) = (t|yy) = (t|y\beta) = (t|\beta\beta) = 0$. В плоскости зигзагообразного движения имеет место времяпролетная фокусировка первого порядка $(t|x) = (t|\alpha) = 0$. Указанные свойства позволили в прототипе анализатора с общей длиной пути ионов 20 м [13] устойчиво показывать разрешающую способность 35 000 для ионов с $m/z = 570$ и кинетической энергией 2 кэВ при использовании радиочастотного ловушечного источника с накоплением ионов, на выходе которого

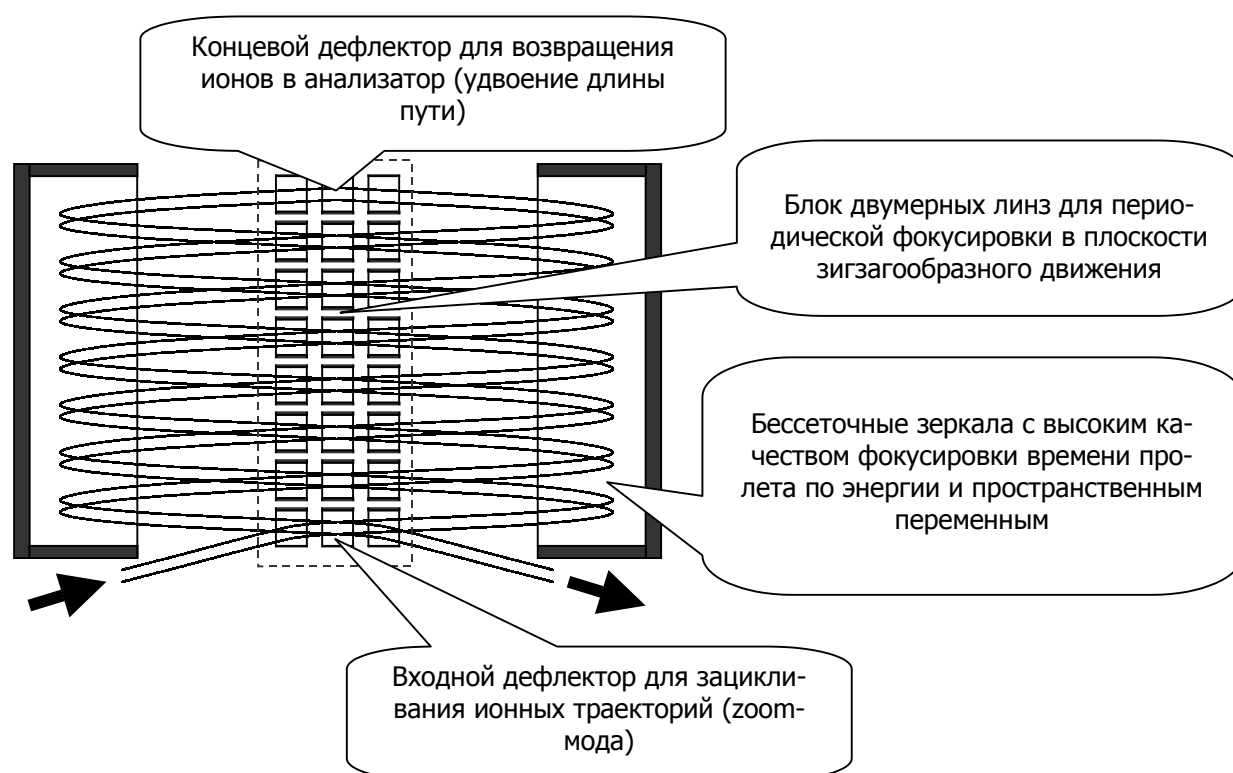


Рис. 10. Схема движения ионов в планарном многопроходном анализаторе

Табл. 2. Сравнительные параметры планарного и спирального многопроходных анализаторов (импульсный источник ионов с ортогональным ускорителем (ОУ))

Параметры анализатора	Планарный анализатор	Спиральный анализатор
Длина ионного пакета вдоль ОУ, мм	7	6
Длина ионного пакета поперек ОУ, мм	2	1
Энергоразброс ионов, %	7	1
Размеры камеры анализатора, (W×H×L) мм	250 × 100 × 700	400 × 400 × 1000
Длина пути ионов, м	20	20
Кинетическая энергия ионов, кэВ	2	7
Разрешающая способность	35 000	35 000

формировался пучок с энергоразбросом около 7 % и диаметром 2 мм. При закликивании ионных траекторий удавалось повысить разрешающую способность до уровня, превышающего 100 000. Аналогичный результат был достигнут и при использовании источника с ортогональным ускорением ионов [14].

Отметим, что временная фокусировка второго порядка в направлении, перпендикулярном плоскости зигзагообразного движения, теоретически позволяет расширить ионный пучок в этом на-

правлении до 7 мм при расстоянии между крайними (отражающими) электродами зеркал 600 мм. В анализаторе с ловушечным источником этот резерв остается невостребованным, однако он может быть задействован при использовании импульсного источника ионов с ортогональным ускорителем (ОУ). С такой поправкой интересно сравнить параметры рассматриваемого планарного анализатора и анализатора со спиральным движением ионов, описанного в работе [10]. Указанное сравнение приведено в табл. 2.

Проанализируем данные табл. 2. Прежде всего заметим, что анализаторы имеют одинаковую длину пути ионов 20 м при том, что объем камеры планарного анализатора примерно в 10 раз меньше. Разрешающая способность также одинакова, при том что транспортная энергия в планарном анализаторе в 3.5 раз меньше (т. е. можно ожидать повышение разрешающей способности планарного анализатора в $\sqrt{3.5} = 1.9$ раз при такой же, как у спирального анализатора, транспортной энергии). Наконец, аксептанс планарного анализатора примерно в 20 раз больше аксептанса спирального анализатора. Таким образом, суммарный выигрыш в параметрах достигает 200 раз.

Из проведенного анализа можно сделать вывод, что в целом в настоящее время многопроходные анализаторы на основе бессеточных зеркал представляются предпочтительными. Нишей для применения секторных анализаторов являются задачи, в которых по тем или иным причинам важно малое время анализа, поскольку секторные поля позволяют проводить анализ на более высоких энергиях ионов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиханов С.Г. // ЖЭТФ. 1956. Т. 31, № 3. С. 517–521.
2. Каратаев В.И., Мамырин Б.А., Шмикк Д.В. // ЖТФ. 1971. Т. 41. С. 1498–1501.
3. Poschenrieder W.P. // Int. J. Mass Spectrometry. Ion Phys. 1972. V. 9. P. 357–365.
4. Matsuda H. // Rev. Sci. Instrum. 1961. V. 32. P. 850–852.
5. Вольник Г. Оптика заряженных частиц. СПб.: Энергоатомиздат, 1992. 280 с.
6. Веренчиков А.Н., Явор М.И. // Научное приборостроение. 2004. Т. 14, № 2. С. 46–58.
7. Wollnik H., Casares A. // Int. J. Mass Spectrometry. 2003. V. 227, N 2. P. 217–222.
8. Toyoda M., Okumura D., Ishihara M., Katakuse I. // J. Mass Spectrometry. 2003. V. 38. P. 1125–1142.
9. Strasser D., Heber O., Goldberg S., Zajfman D. // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2003. V. 36. P. 953–959.
10. Satoh T., Tsuno H., Iwanaga M., Kammei Y. // J. Am. Soc. Mass Spectrometry. 2005. V. 16. P. 1969–1975.
11. Явор М.И., Веренчиков А.Н. // Научное приборостроение. 2004. Т. 14, № 2. С. 38–45.
12. Verenchikov A.N., Yavor M.I. Patent WO 2005/001878A2.
13. Козлов Б.Н. и др. // Этот выпуск. С. 40–48.
14. Хасин Ю.И. и др. // Этот выпуск. С. 30–39.

Институт аналитического приборостроения РАН,
Санкт-Петербург

Материал поступил в редакцию 16.05.2006.

COMPARATIVE ANALYSIS OF MULTIPASS TIME-OF-FLIGHT MASS ANALYZERS BASED ON MIRRORS AND SECTOR FIELDS

M. I. Yavor, A. N. Verentchikov

Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg

In the present paper, a comparative analysis is undertaken of multiturn time-of-flight mass analyzers based on two types of ion-optical elements: electrostatic mirrors and sector fields. It is concluded that the analyzers based on gridless mirrors generally have advantages in possibility to achieve high resolving power and sensitivity.