
МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ ДЛЯ БИОТЕХНОЛОГИИ.

ПРИБОРЫ

УДК 621.384.668.8: 537.534.1/. 8

© Б. Н. Козлов, А. С. Труфанов, М. И. Явор, С. Н. Кириллов,
Д. Н. Алексеев, В. Н. Демидов, С. В. Максимов, М. З. Мурадымов, А. Н. Веренчиков

**МНОГООТРАЖАТЕЛЬНЫЙ ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЙ
МАСС-СПЕКТРОМЕТР С ИОННОЙ ЛОВУШКОЙ НА ВХОДЕ**

Источник ионов "электроспрей" совмещен с планарным многоотражательным времяпролетным масс-анализатором. Ионные пакеты формируются в накопительной линейной ловушке с аксиальным выбросом ионов. С учетом всех потерь эффективность конверсии в ловушке превышает 10 %. При длине траектории 20 м достигнута разрешающая способность до 50 000 в сочетании с полным массовым диапазоном и более 100 000 в многопроходном режиме.

ВВЕДЕНИЕ

Многоотражательный времяпролетный масс-анализатор (МО ВПМА) с зигзагообразной траекторией обладает высокой разрешающей способностью (от 20 000 до 200 000) и точностью определения масс (порядка 1 ppm) при сохранении полного массового диапазона [1, 2]. Высокая разрешающая способность достигается за счет увеличения длины траектории. Как следствие, сильно возрастает время на один цикл анализа. В конкретном случае разработанного нами прибора эффективная длина дрейфа ионов составляет около 20 м, что при энергии 2 кэВ занимает до 2 мс для ионов с соотношением массы к заряду m/z до 3000.

В случае непрерывных источников ионов это значит, что во избежание потерь ионы должны где-то накапливаться и "ожидать старта" в течение 2 мс. Очевидным решением проблемы является накопление ионов, поступающих из непрерывного пучка, в ионной ловушке. Помимо способности накопления и длительного удержания ионов, ловушка на входе многоотражательного масс-спектрометра с зигзагообразной траекторией должна обладать еще и свойством компактности, поскольку в разумном объеме прибора зигзагообразный ионный пучок должен обладать маленьким поперечным сечением. В нашем случае речь идет о поперечных размерах в 2–3 мм.

Мы выбрали в качестве такой ловушки на входе МО ВПМА квадрупольную линейную ловушку с аксиальным выталкиванием ионов [3, 4]. Такая ловушка позволяет накапливать и охлаждать ионы в желаемом масштабе времени, а также позволяет формировать короткие (до 6 нс) и пространственно компактные ионные пакеты. Таким образом, данная ловушка является хорошим кандидатом на роль импульсного конвертера для стыковки МО ВПМА с источником ионов "электроспрей".

СХЕМА УСТАНОВКИ

Прибор включает в себя:

- источник ионов с экстракцией ионов из расствора при атмосферном давлении ("электроспрей");
- интерфейс для ввода ионов из атмосферы в вакуум;
- вспомогательную линейную квадрупольную ловушку, используемую для накопления ионов, непрерывно поступающих от электроспрейного источника, и импульсно пересылающую их в основную ловушку;
- линейную ионную ловушку с импульсным аксиальным выталкиванием для охлаждения и импульсного выталкивания ионов в анализатор;
- многоотражательный времяпролетный масс-спектрометр с зигзагообразной траекторией пролета ионов (МО ВПМС) длиной 20 м.

Источник ионов

Мы использовали "электроспрей" с холодным распыляющим газом, позиционированный ортогонально к оси сопла и приблизительно в 1 см от сопла. Распыляющий газ (сухой воздух) имеет давление 4 атмосферы. В большинстве экспериментов мы используем образцы, растворенные до концентрации 10^{-5} М (грамицидин, полиэтиленимид (ПЭИ), бычий инсулин, цитохром С) в смеси воды и ацетонитрила с добавлением 0.1 % уксусной кислоты. Поток раствора 5 мкл/мин обеспечивается шприцевым насосом.

Интерфейс

Условная схема интерфейса и обеих ловушек показана на рис. 1. Собственно интерфейс, или блок сопло—скиммер, обозначен римской цифрой I. Сопло представляет собой конус с отверстием 0.3 мм

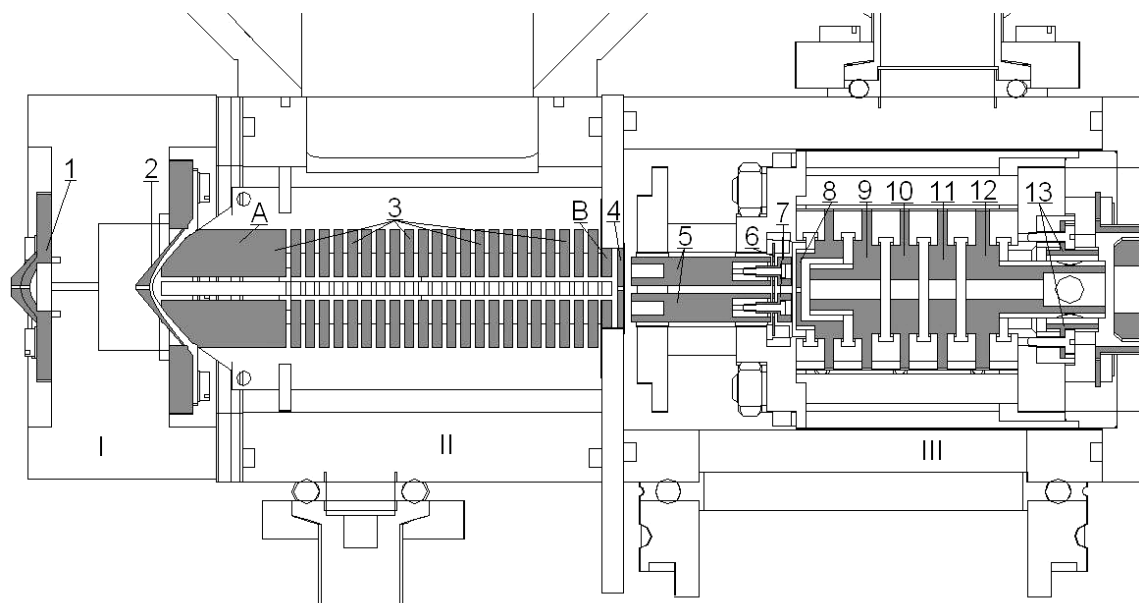


Рис. 1. Осевое сечение интерфейсного блока. Основные электроды показаны серым и темным цветом на срезе.

I — блок сопло—скиммер;

II — блок вспомогательной ловушки;

III — блок линейной ионной ловушки и следующих за ней линз и направляющих пластин.

Электроды: 1 — сопло; 2 — скиммер; 3 — вспомогательная квадрупольная ловушка (А — входная секция первого квадрупольного, В — выходная секция первого квадрупольного); 4 — выходная диафрагма вспомогательной ловушки; 5 — стержни основной квадрупольной ловушки; 6 — выталкивающий электрод ионной ловушки; 7 — улавливающие секции квадрупольной ионной ловушки (таблетки); 8 — вытягивающий электрод; 9–12 — линзовые электроды; 13 — отклоняющие пластины

с последующим 3 мм каналом. Для управляемой фрагментации на сопло подается положительный потенциал около 100 В (в большинстве экспериментов 80 В). Потенциал скиммера может импульсно переключаться из проводящего ионы состояния в полностью блокирующее. В нашем случае это +20 В и –20 В соответственно.

Ионы, дрейфующие по каналу от сопла, затягиваются в скиммер вместе с несущим газом, а также за счет перепада напряжений между соплом и скиммером. Обычный ток ионов через скиммер для образцов концентрации 10^{-5} М составляет около 100 пА.

В зависимости от соотношения времени пропускающего и задерживающего состояния скиммера можно регулировать количество ионов, поступающих в ловушку за цикл.

Вспомогательная ловушка

Сразу за скиммером располагается вспомогательная квадрупольная ионная ловушка II (рис. 1). Для лучшего прохождения ионов и накопления их в области выхода из ловушки квадрупольные электроды 3 выполнены секционированными.

Противоположные фазы ВЧ-напряжения (3.5 МГц и амплитудой от 50 до 500 В) подаются на две пары электродов. Слабое распределение статического потенциала секций (доли вольта на 10 см) создает продольное поле. У выходного края этот спад возрастает до 1 В/см. Этот спад в совокупности с положительным потенциалом (+10 В) выходной диафрагмы 4 создает потенциальную яму у выхода вспомогательной ловушки, где постепенно и накапливаются поступающие ионы.

Давление остаточного газа в этом модуле составляет около 5 мТорр. При этом давлении ионы вполне успешно удерживаются на оси квадрупольного высокочастотного поля, но быстро теряют исходную кинетическую энергию за счет частых столкновений с окружающим газом. При импульсной подаче отрицательного смещения (–10 В) на выходную диафрагму 8 практически все ионы из вспомогательной ловушки перетекают в основную ловушку за 20–100 мкс, после чего потенциал на диафрагме снова поднимается для накопления очередной порции ионов в вспомогательной ловушке и предотвращения высаживания на диафрагму ионов, прошедших в основную ловушку.

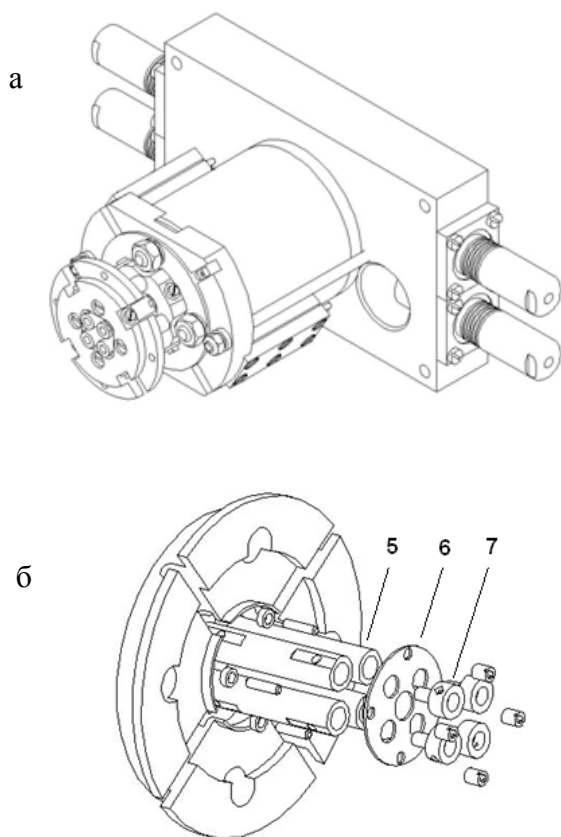


Рис. 2. Линейная ловушка с аксиальным выталкиванием ионов.

а — вид в сборе со стороны входа; блок линз за вытягивающей диафрагмой помещается в отдельно откачиваемом цилиндре и не виден.

б — "разобранный" вид (нумерация по рис. 1): 5 — основные стержни квадруполя; 6 — выталкивающий электрод; 7 — улавливающие секции квадруполя ("таблетки")

Квадрупольная ионная ловушка с аксиальным выталкиванием ионов

Нами разработана линейная квадрупольная ловушка с аксиальным выбросом ионов и с дополнительным выталкивающим электродом. Элементы ловушки изображены на рис. 2.

Как и во вспомогательной ловушке, ионы в основной ловушке накапливаются в потенциальной яме у выхода. Для этого на специально отделенные по постоянному потенциалу секции квадруполя 7 ("таблетки") подается отрицательное смещение от 2 до 10 В. На основных стержнях 5 и на выталкивающем электроде 6 обычно поддерживается нулевой потенциал. Ловушка запирается положительным потенциалом на выходной диафрагме

(не показана). Выходная диафрагма одновременно является вытягивающим электродом. Для создания симметричной ямы мы обычно используем значение запирающего потенциала равным, но противоположным по знаку статическому смещению улавливающей секции. Для большинства экспериментов эти значения равны +5 и –5 В соответственно.

Давление в камере ловушки регулируется в пределах 10^{-4} – 10^{-2} Торр при помощи вентиля для натекания воздуха из атмосферы. Давление в камере подбирается, как компромисс между слишком высоким давлением в камере, нужным для быстрой минимизации фазового объема ионного облака, с одной стороны, и слишком низким давлением, нужным для минимизации рассеяния ионов на остаточном газе при выталкивании их из ловушки. Поскольку цикл работы прибора с диапазоном масс до 3000 а.е.м./е составляет у нас 2 мс, мы использовали минимальное давление, дающее достаточное сжатие фазового объема за 2 мс. Оно составляет 2–3 мТорр. Обычно при таком давлении мы не наблюдали интенсивных осколочных ионов. Это не означает, что столкновений совсем нет, скорее, что единичные редкие столкновения не вызывают ионную фрагментацию или что практически все столкнувшиеся ионы выбывают из фазового аксептанса прибора.

Оценочные параметры охлажденного облака ионов (для массы 1000 а.е.м./е) составляют:

- длина вдоль оси ловушки — около 0.5 мм;
- диаметр в поперечном направлении для массы 1000 — около 0.5 мм;
- экспериментально оценивавшийся разброс скоростей ионов в два раза превышает разброс, соответствующий комнатной температуре.

Ранее [4] параметры пучка сильно искажались объемным зарядом. При увеличении числа ионов облако разрасталось и смещалось вглубь ловушки в основном из-за асимметрии потенциальной ямы в осевом направлении. Для уменьшения этого эффекта мы ввели дополнительный кольцевой электрод 6 между основными стержнями и улавливающей секцией квадруполя. В результате также улучшилась однородность и величина выталкивающего поля.

Для экстракции ионов подаются импульсы: выталкивания на выталкивающий электрод и вытягивания на вытягивающую диафрагму. Импульсы задают общий старт движения ионов. В ряде экспериментов мы организовывали так называемую задержанную экстракцию ионов, аналогичную [5]. Радиочастотное напряжение выключалось и выталкивающие импульсы подавались с регулируемой микросекундной задержкой. При выталкивании пакет ионов проходит (рис. 1) через простран-

ственный фокус, задаваемый провисанием вытягивающего поля через отверстие диафрагмы 8. Для создания параллельного пучка применяется блок линз 9–12. Отклоняющие пластины 13 дают возможность подправить пучок, задавая его направление в точности, как необходимо для траектории в МО ВПМА.

Многоотражательный времяпролетный масс-анализатор

Сечение масс-анализатора плоскостью ионной траектории изображено на рис. 3. Основными элементами разработанного многоотражательного времяпролетного масс-анализатора с зигзагообразной траекторией ионов являются:

- протяженные бессточные зеркала, состоящие из 5 электродов каждое (1 экранирующий электрод под ускоряющим напряжением) и распо-

ложенные друг напротив друга;

- блок периодических линз, расположенный между этими зеркалами.

Основная функция периодических линз (обозначенных цифрой 7 на рис. 3), расположенных между зеркалами, — удерживать пучок узким на протяжении всего дрейфа, чтобы избежать перекрывания траекторий ионов, прошедших разное количество отражений. Линзы составлены из параллельных пластин с удлиненными окнами. Средний линзовый электрод находится под отрицательным смещением, а крайние электроды находятся под ускоряющим напряжением или потенциалом дрейфа. Под этим же потенциалом находятся выходные электроды зеркал 5 и электроды, проводящие ионы из интерфейса 13 в масс-анализатор и после масс-анализатора на детектор 12.

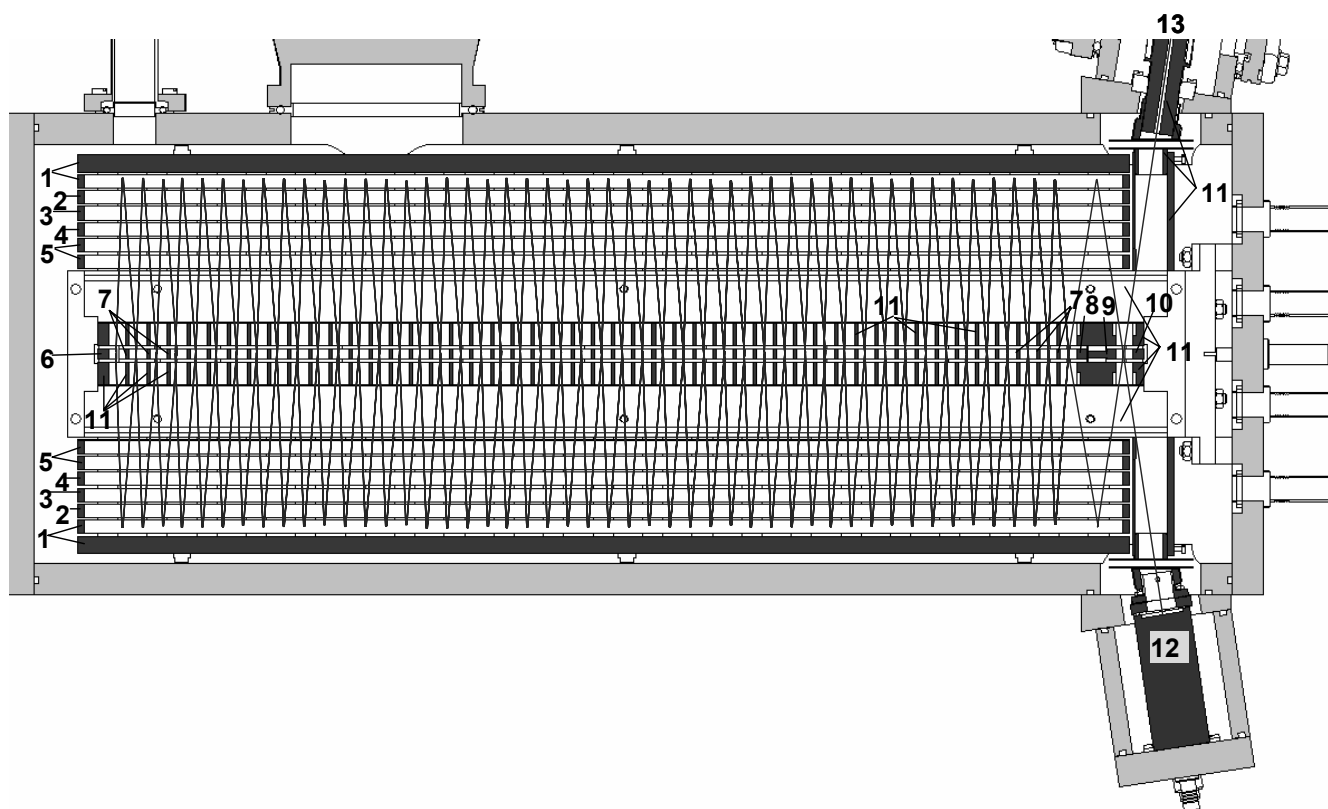


Рис. 3. Схема многоотражательного масс-анализатора:

- 1–5 — электроды отражательного масс-анализатора;
 1–5 — электроды зеркал;
 6 — концевой электрод блока линз, обеспечивающий поворот траектории;
 7 — линзовые электроды;
 8 — электрод смены угла траектории в блоке линз;
 9, 10 — электроды входной / выходной линзы;
 11 — электроды дрейфового пространства;
 12 — детектор;
 13 — вход ионного пучка, импульсно вытолкнутого из ловушки

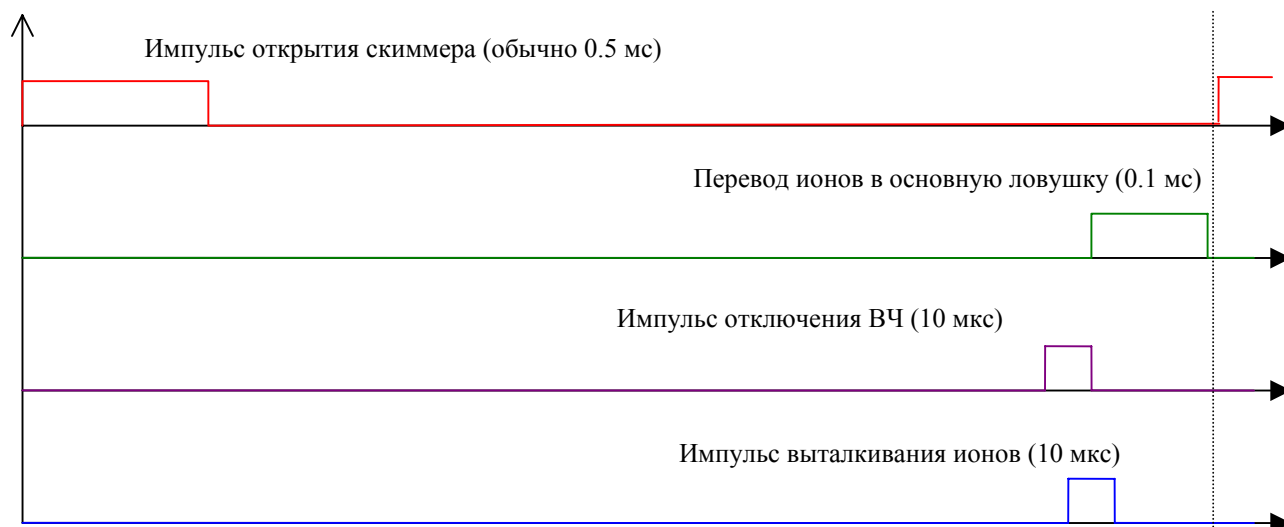


Рис. 4. Временная диаграмма работы прибора

Особенность представляемого многоотражательного ВПМС состоит в том, что ионный пучок вводится в пространство между зеркалами и выводится из него мимо края зеркал. Для пучка сечением до 3 мм и расстояния между зеркалами 215 мм угол наклона зигзагообразной траектории выбран 3.2° . Для ввода в рабочее поле между зеркалами, чтобы уменьшить влияние краевых эффектов, угол ввода выбран 8.5° . Соответственно первая и вторая линзы в блоке линз масс-спектрометра сделаны разрезными с отдельно подаваемыми потенциалами для отклонения пучка. Первая линза при необходимости подправляет направление пучка и задает угол сходимости. Вторая линза меняет угол траектории с 8.5° на 3.2° и обратно.

В 48-й по счету линзе пучок разворачивается на 6.4° и начинает смещаться в обратную сторону к детектору. Длина траектории составляет около 18 м. Эффективная длина траектории (произведение времени пролета иона на его скорость в дрейфе) — около 20 метров.

СИНХРОНИЗАЦИЯ И ВАРИАНТЫ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРИБОРА

Временная диаграмма работы прибора условно показана на рис. 4. Для синхронизации работы модулей использовался специально разработанный модуль таймера, выдающий на 8 выходов независимые последовательности прямоугольных импульсов с шагом дискретизации 100 нс и относительной стабильностью положения порядка 1 нс.

Таймер обеспечивает синхронизацию всех узлов, невзирая на то что полный цикл работы при-

бора (время прохождения иона от скиммера до детектора) составляет в 3 раза большее время (около 6 мс), чем максимальный период работы таймера (2 мс). Это становится возможным, поскольку в каждый момент времени мы имеем три группы ионов, находящиеся на разных стадиях прохождения цикла: одни накапливаются во вспомогательном квадруполе, другие охлаждаются в основной ловушке, а третьи дрейфуют во времяпролетном масс-спектрометре.

Первый этап начинается с поступлением открывающего импульса на скиммер. Ток ионов, протекающих через скиммер, не зависит от длительности пропускающего импульса в очень большом диапазоне времен (от 10 мкс до более чем 10 мс). Это проверено прямым измерением среднего тока ионов при помощи чувствительного усилителя постоянного тока. Таким образом, заряд, накопленный в первом квадруполе, прямо пропорционален длительности импульса пропуска. Это может быть использовано для регулирования величины сигнала и проверки линейности системы детектирования.

Мы измерили заряд, накапливаемый в ловушке (основной) при времени инжекции (открытого состояния скиммера), равном 1 мс. Для обычного режима электроспрейного источника ионов при распылении 10^{-5} М раствора грамицидина за миллисекунду в ловушке накапливается до 10^5 ионов. Это количество может вызывать отклонения, связанные с кулоновским расталкиванием ионов. Поэтому период накопления лучше бы уменьшить. Но его длительность задается требованиями на второй (охлаждение) и третьей (разделение

по массам) стадиях продвижения ионов в приборе. Для устранения этого противоречия время напуска ионов ограничено и составляет лишь часть полного периода.

Первый этап (накопление) заканчивается подачей импульса пропускания на выходную диафрагму вспомогательного квадруполя. Оптимальным является подача этого импульса перед импульсом открытия скиммера. Но на практике ионы очень медленно дрейфуют сквозь первый квадруполь, и вполне допускается перекрывание импульсов и даже и одновременное открывание и скиммера, и диафрагм обеих ловушек. Длительность импульса перевода ионов из вспомогательной ловушки в основную лежит в пределах 10–100 мкс. Более короткие импульсы могут не успеть пропустить (или подтолкнуть сменой полярности) тяжелые ионы. При длинных импульсах легкие ионы могут успеть отразиться от выходной диафрагмы основной ловушки и, вернувшись ко входу, высадиться на все еще отрицательной диафрагме разделяющей ловушки.

После попадания в основную ловушку ионы теряют энергию в газовых столкновениях и скапливаются в локальной потенциальной яме у выхода из ловушки. Нами была экспериментально определена константа охлаждения, составляющая около 3–5 мс·мТорр для большинства интересующих ионов из электроспрейного источника. Учитывая, что для разделения по массам в МО ВПМА требуется около 2 мс, а это время соответствует все еще приемлемому давлению в 2.5 мТорр,

именно 2 мс были выбраны как компромиссное время для всех стадий цикла прибора.

Третий этап (разделение по массам) начинается приложением импульсов вытягивания и выталкивания, дающих старт движению ионов в масс-спектрометре. За 1–2 мкс до этого подается сигнал для выключения ВЧ-поля квадруполя основной ловушки. Время выхода ионов из ловушки составляет до 1 мкс. Длительность вытягивающего импульса выбрана с запасом равной 10 мкс, чтобы дать возможность самым тяжелым ионам уйти далеко из поля действия выходной диафрагмы.

Возможные режимы работы

В основном режиме работы прибор обеспечивает регистрацию полного диапазона масс без перекрытий. Траектория движения ионов в основном режиме приведена на рис. 5, а и обсуждалась ранее. Режим включает один полный проход, состоящий из 96 отражений в зеркалах и однократный поворот в концевой линзе.

В дополнение к основному возможны еще 3 режима работы времяпролетного масс-спектрометра, различающиеся формой ионных траекторий, как показано на рис. 5. В режимах, показанных на рис. 5, в, г (многопроходном и "челноке"), требуется импульсное управление отклонением во второй линзе масс-анализатора. Задержка и длительность этого импульса зависят от выбранного для анализа диапазона масс.

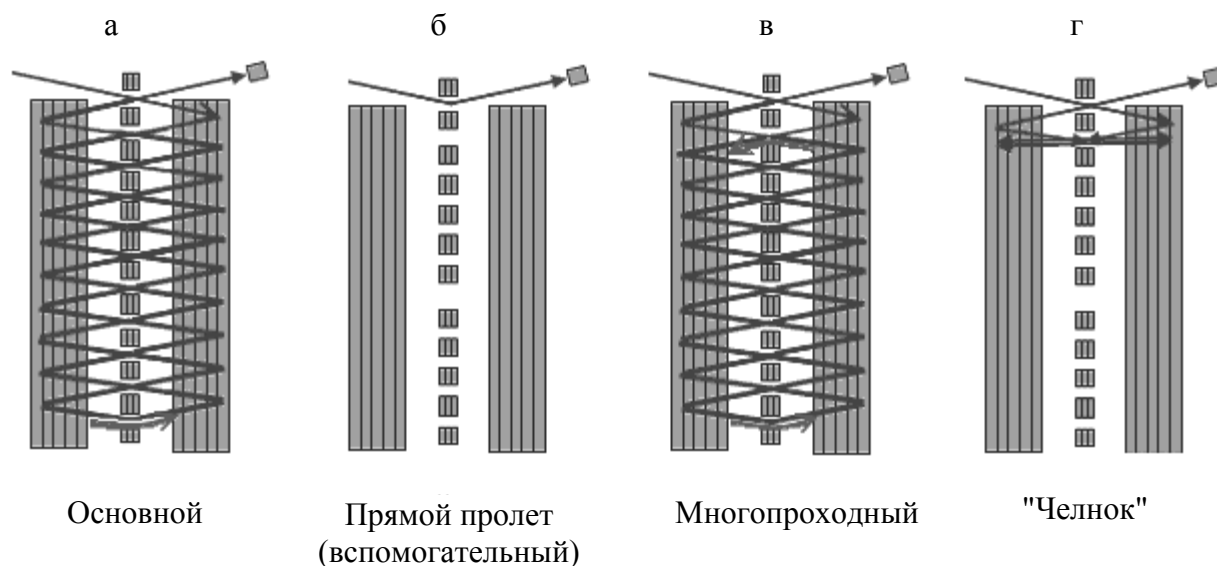


Рис. 5. Режимы работы многоотражательного времяпролетного масс-спектрометра.

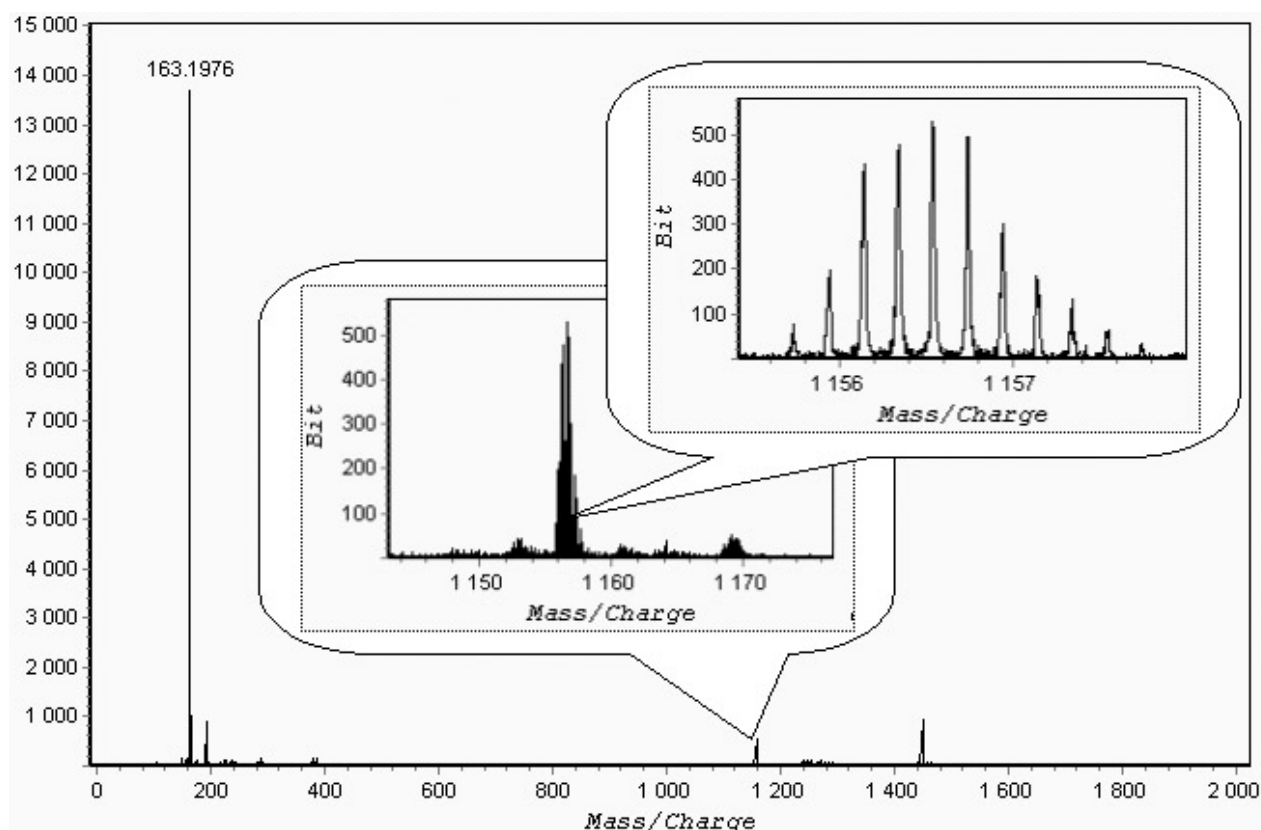


Рис. 6. Масс спектр инсулина. На фрагментах показано ступенчатое раскрытие области пика пятизарядного молекулярного иона

Ниже дана краткая характеристика режимов.

1) Обычный режим (полный диапазон масс) (рис. 5, а). Напряжения на электродах масс-спектрометра постоянны и соответствуют номиналам. Траектория движения ионов нигде не накладывается сама на себя. Все ионы последовательно достигают детектора в порядке, соответствующем возрастанию масс (зависимость времени пролета от массы вида $T(\sqrt{m})$).

2) Прямой пролет (вспомогательный режим для оптимизации настроек интерфейса и проверки потерь в масс-спектрометре) (рис. 5, б). Для получения такого режима к электродам входной линзы масс-спектрометра прикладываются напряжения, равные -4300 В и -2400 В. Все без исключения ионы направляются мимо края второго зеркала непосредственно на детектор. Разрешение по массам в таком режиме невелико и достигает 200 при оптимальной подстройке амплитуд выталкивающего и вытягивающего импульсов.

3) Многопроходный режим (рис. 5, в). Импульсно переключая напряжение на первом элек-

троде второй линзы (обозначенном цифрой 8 на рис. 3) можно перенаправить часть ионов на многократный проход масс-спектрометра. Напряжение "защелкивания" на этом электроде составляет -2112 В, пропускания на вход или выход — соответственно -3418 В, как во всех других режимах. В многопроходном режиме за счет увеличения длины дрейфа для избранного диапазона масс ионов можно достигнуть более высокого разрешения.

4) "Челнок" (рис. 5, г). Этот режим соответствует циклическому движению ионов через единственную (вторую) линзу. Напряжение на первом электроде этой линзы исходно должно быть -3814 В для поворота пучка ортогонально зеркалам и импульсно переключаться на -2762 В для защелкивания ионов без смещения вдоль зеркал. Диапазон масс в этом режиме падает катастрофически (в число раз, соответствующее квадрату числа циклов), но разрешение может быть улучшено за счет уменьшения вклада aberrаций, вызванных поворотами пучка при перенаправлении его взад и вперед вдоль зеркал.

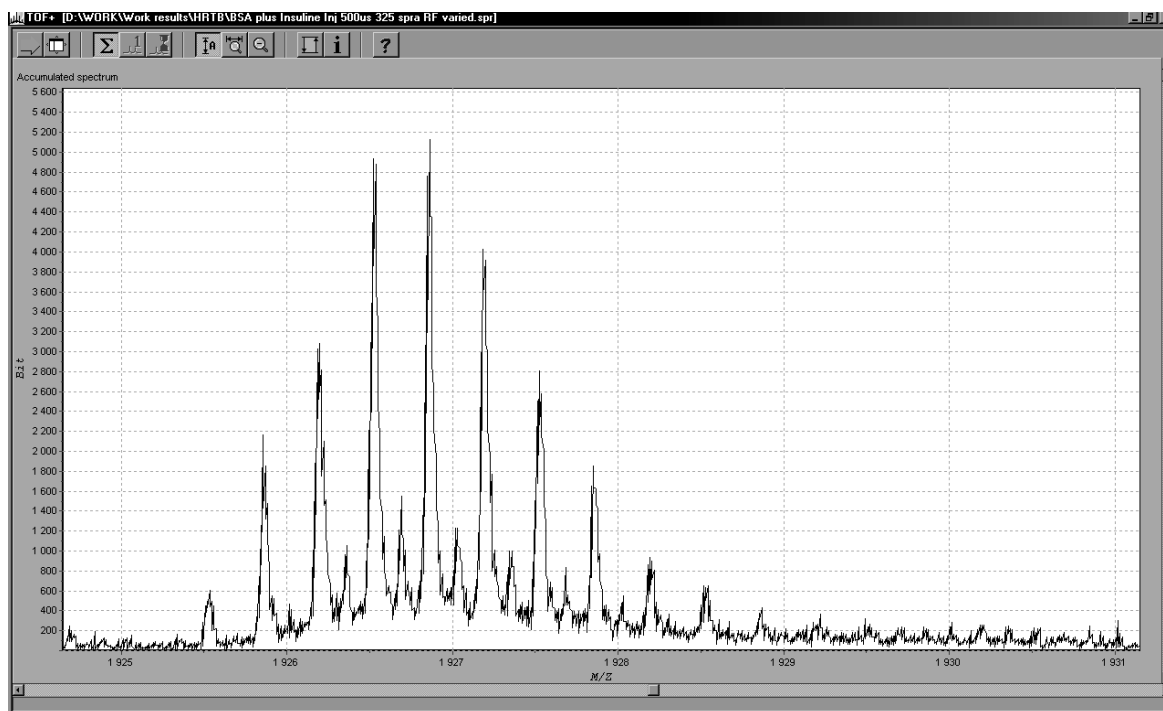


Рис. 7. Фрагмент масс-спектра инсулина в области масс 1925–1930

ПРИМЕРЫ ПОЛУЧАЕМЫХ СПЕКТРОВ

На рис. 6 приведен масс-спектр, полученный при распылении 10^{-5} М раствора инсулина. Полный спектр дает представление о диапазоне масс прибора. Этот диапазон ограничен возможностями ловушки на входе масс-спектрометра. Слишком легкие ионы (менее 100 а.е.м.) не удерживаются в ней, поскольку для них не выполняется условие адиабатичности и они раскачиваются высокочастотным полем вместо того, чтобы удерживаться на оси. Для слишком тяжелых же ионов эффективный удерживающий потенциал высокочастотного поля слишком мал. Обычно удается захватывать и удерживать ионы в массовом диапазоне, составляющем не менее порядка. Так, на приведенном спектре мы можем наблюдать пики в массовом диапазоне от 120 (виден большой пик массы 163) до трехзарядного иона инсулина (масса на единицу заряда около 1927 а.е.м.). На вставках даны фрагменты спектра, демонстрирующие разрешение пиков по массе, соответствующее 50 000 по полувысоте пика.

На рис. 7 приведен фрагмент масс-спектра инсулина, содержащий наложенные пики 3-зарядного молекулярного иона и 6-зарядного димера инсулина.

Зарядовый эффект (грамцидин)

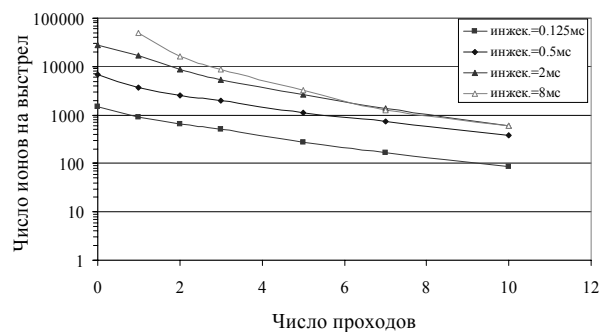


Рис. 8. Трансмиссия через анализатор как функция числа полных проходов. Полный проход соответствует 96 отражениям в зеркалах и 20 м траектории. Кривые различаются по времени инжекции ионов в ловушку

ТРАНСМИССИЯ ИОНОВ ЧЕРЕЗ АНАЛИЗАТОР

Трансмиссия ионов через многоотражательный прибор определена как достаточно эффективная. На рис. 8 проведено сравнение ионных сигналов на детекторе как функция числа полных проходов. Видно медленное падение сигнала, соответствующее

щее 20 % потерь на каждый оборот с 96 отражениями в зеркалах. Заметная часть этих потерь вызвана рассеянием ионов на газе при давлении порядка 10^{-7} Торр в анализаторе. Измерения потерь в зависимости от размера ионов показали, что рассеяние становится доминирующим фактором потерь для ионов с молекулярной массой более 1000.

Интересно оценить абсолютное число ионов на детекторе. Поскольку в предыдущем эксперименте число ионов на выстрел большое (100–10 000), то счет ионов затруднен и сравниваются аналоговые сигналы. Сервисный режим с прямым детектированием пучка за ловушкой принят за нулевой проход. В таком режиме были проведены прямые коллекторные измерения среднего тока перед детектором. Средний ток 0.5 пА соответствует ионному потоку в $7 \cdot 10^6$ ионов в секунду, или 14 000 ионов на выстрел. Хотя частота повторения импульсов низкая, сигнал существенно превосходит обычную интенсивность ионных потоков в ортогональных ВПМС, где применяется счет ионов и полный поток редко превышает 10^5 ионов в секунду.

Мы проводили сравнение спектров для одних и тех же образцов на рассматриваемом многоотражательном ВПМС с ловушкой и на обычном времяпролетном масс-спектрометре с ортогональным выталкиванием (также построенном в нашей лаборатории) и получили преимущество по чувствительности на новом приборе в 30–100 раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предварительные эксперименты с многоотражательным времяпролетным масс-спектрометром с линейной квадрупольной ионной ловушкой в качестве источника ионов показывают возможность достижения уникально высокого для времяпролетных масс-спектрометров разрешения. При этом чувствительность оказывается даже выше, чем

в обычных времяпролетных масс-спектрометрах с источником ионов с ортогональным выталкиванием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хасин Ю.И., Веренчиков А.Н., Гаврик М.А., Явор М.И. Первые экспериментальные исследования планарного многоотражательного ВПМС // Научное приборостроение. 2004. Т. 14, № 2. С. 59–71.
2. Хасин Ю.И. и др. Планарный времяпролетный многоотражательный масс-спектрометр с ортогональным вводом из непрерывных источников ионов // Этот выпуск. С. 30–39.
3. Веренчиков А.Н. и др. Газонаполненная линейная квадрупольная ловушка с аксиальным выбросом как источник для многоотражательного времяпролетного масс-спектрометра // Научное приборостроение. 2005. Т. 15, № 2. С. 95–111.
4. Kozlov B.N. et al. Linear ion trap with axial ejection as a source for a TOF MS // Abstracts of ASMS conference, 2005. (www.asms.org).
5. He L., Liang L., Lubman D.M. // Anal. Chem. 1995. V. 67. P. 4127.
6. Doroshenko V.M., Cotter R.J. A quadrupole ion trap/time-of-flight mass spectrometer with a parabolic reflectron // J. Mass Spectrom. 1998. V. 33, N 4. P. 305–318.
7. Doroshenko V.M., Cotter R.J. Injection of externally generated ions into an increasing trapping field of a quadrupole ion trap mass spectrometer // J. Mass Spectrom. 1997. V. 32, N 6. P. 602–615.

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург

Материал поступил в редакцию 5.06.2006.

MULTIREFLECTING TIME-OF-FLIGHT MASS SPECTROMETER WITH AN ION TRAP SOURCE

B. N. Kozlov, A. S. Trufanov, M. I. Yavor, S. N. Kirillov, D. N. Alexeev, V. N. Demidov, S. V. Maximov, M. Z. Muradymov, A. N. Verentchikov

Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg

An electrospray ion source was coupled to a planar multireflecting time-of-flight mass analyzer. Ion packets were formed using an accumulating linear ion trap with axial ion ejection. Taking into account all ion losses the duty cycle of the trap exceeds 10 %. For the analyzer with a 20 m flight path, the resolving power reaches 50 000 in the full mass range mode and exceeds 100 000 in the multi-pass mode.