

УДК 621.384.668.8

© Ю. И. Хасин, А. Н. Веренчиков, М. А. Гаврик, М. И. Явор

ПЛАНАРНЫЙ ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЙ АНАЛИЗАТОР В РЕЖИМЕ МНОГОКРАТНЫХ ОТРАЖЕНИЙ И ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Времяпролетный анализатор с зигзагообразной траекторией, формируемой планарными зеркалами и периодической системой линз, был ранее предложен авторами для повышения разрешающей способности при сохранении пропускаемого массового диапазона. Предельная разрешающая способность анализатора экспериментально исследовалась в режиме зацикливания ионных траекторий и при энергии 100 эВ достигала 200 000. В настоящей работе подобные исследования проведены при более высокой энергии 2 кэВ, достигнута длина пролета более 10 км и продемонстрирована разрешающая способность порядка 1000 000. Показано, что кратковременная нестабильность источников питания является наиболее лимитирующим фактором для достижения больших времен пролета и высокого разрешения.

ВВЕДЕНИЕ

Разрешающая способность, массовая точность и чувствительность являются одними из важнейших параметров масс-спектрометров. С введением многоотражательных и многооборотных [1–14] времяпролетных масс анализаторов (ВПМА) показано значительное повышение разрешающей способности до 200 000 в [4] и 350 000 в [13].

Разрешающая способность многоотражательных анализаторов увеличивается благодаря значительному удлинению ионной траектории, что позволяет уменьшить влияние временного разброса ионного пакета, сформированного в источнике ионов [7]. Вкратце, наибольший вклад в уширение пучка, как правило, вносит так называемое время разворота (turn-around-time) $\Delta T_v = \Delta V / A$, определяемое начальным скоростным разбросом ΔV ионного облака до ускорения и ускорением A в электрическом поле напряженностью E : $A = qE / m$. Начальный пространственный разброс ΔX при этом приводит к уширению энергетического распределения $\Delta \epsilon$ после ускорения как $\Delta \epsilon = \Delta X q E$. Напряженность поля выбирается так, чтобы максимально снизить время разворота и при этом не превысить энергетическую толерантность ВПМА. Оба учтенных фактора ограничивают разрешающую способность ВПМА как [7]

$$R = \frac{\Lambda V}{\Delta X \Delta V} \frac{\Delta \epsilon}{4 \epsilon} = \frac{1}{4} \frac{\Phi}{\Delta \Phi} \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon}, \quad (3)$$

где $\Phi = \Lambda V$ — фазовое пространство анализатора, определяемое как произведение эффективной длины ионной траектории Λ и скорости пролета V в дрейфовом пространстве, связанных через время

пролета как $\Lambda = V \cdot T$; $\Delta \epsilon / \epsilon$ — энергетическая толерантность анализатора для достижения желаемого уровня разрешения R (слабая функция от R); $\Delta \Phi$ — фазовое пространство пучка.

Б.А. Мамырин с сотрудниками улучшили разрешающую способность времяпролетных масс-спектрометров за счет введения ионного зеркала, создающего времяпролетную фокусировку по энергии [15, 16]. Фазовое пространство пучка уменьшено применением ортогонального ускорения с предварительным газовым охлаждением ионного пучка [17]. Увеличение фазового пространства анализатора является существенным и пока еще мало использованным резервом. Значительное удлинение пути пролета до десятков и сотен метров при разумных размерах прибора стало возможным за счет "складывания" ионной траектории. Многооборотные ВПМА позволяют достичь рекордной для ВПМС разрешающей способности до 350 000 [13] при замыкании ионной траектории в циклы. Однако такая схема существенно сужает анализируемый диапазон масс.

Л.М. Назаренко и др. [12] предложили перспективную схему с планарными бессеточными зеркалами и зигзагообразной ионной траекторией, что позволяет не замыкать ионные траектории в циклы и, таким образом, сохранить полный диапазон масс. Авторы данной статьи усовершенствовали планарную схему [1–7], уменьшив абберации зеркал и введя систему периодических линз в бесполом пространстве. Схема многоотражательного планарного времяпролетного масс-анализатора (МОП-ВПМА) с периодическими линзами изображена на рис. 1. Ионы вводятся в анализатор под малым углом к оси X , дрейфуют вдоль оси Z и периодически отражаются в направлении оси X .

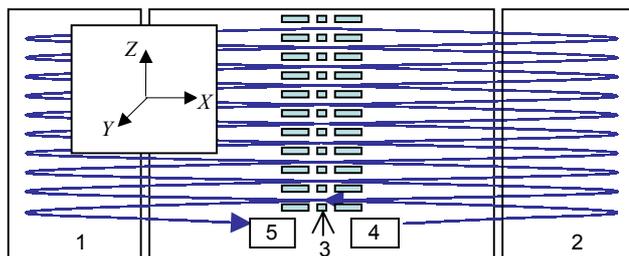


Рис. 1. Схема МОП-ВПМА с периодическими линзами без замыкания траектории и с сохранением полного диапазона масс. 1, 2 — ионные зеркала; 3 — блок линз; 4 — ионный источник; 5 — детектор

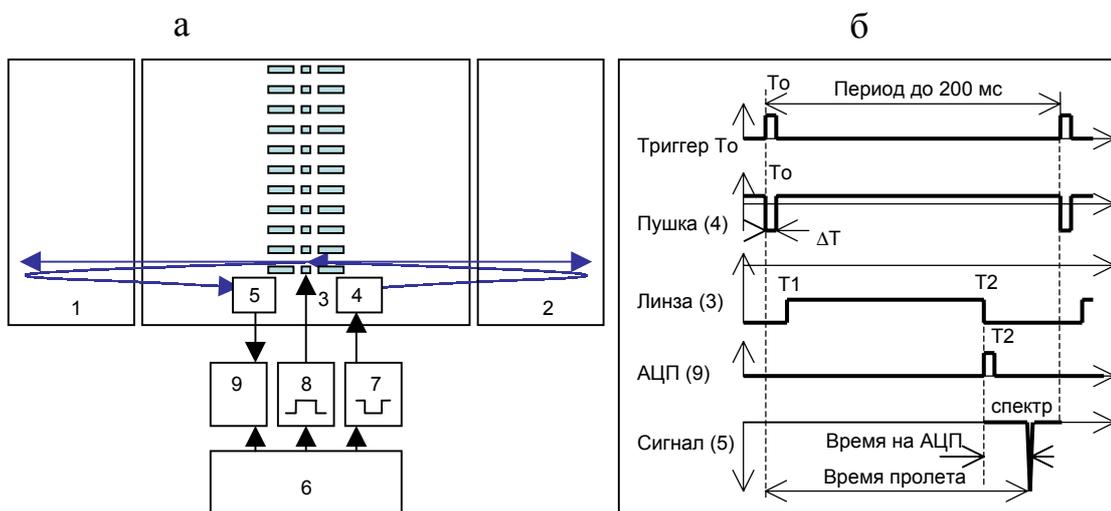


Рис. 2. Схема МОП-ВПМА с замыканием ионной траектории в одной линзе (а) и схема синхронизации импульсов (б). Обозначения 1–5 — те же, что на рис. 1; 6 — синхрогенератор; 7, 8 — генераторы высоковольтных импульсов; 9 — АЦП

Периодические линзы навязывают ионам шаг периода и предотвращают расплывание пучка вдоль оси Z [18, 19]. Зеркала оптимизированы для временной и пространственной фокусировки и стабильного удержания ионного пучка вдоль оси Y . В работах [1–7] проведена расчетная оптимизация многоотражательного планарного (МОП) анализатора, проанализированы его основные aberrации, теоретически и экспериментально показан третий порядок времяпролетной фокусировки по энергии. При низкой энергии ионов до 100 эВ реализован режим замыкания траекторий в циклы в одной линзе с длиной траектории до 700 м, ограниченной потерями ионов. Большие времена пролета и низкие aberrации анализатора позволили дос-

тигнуть разрешающей способности $R = 200\,000$, несмотря на большую (100 нс) длительность импульса, формируемого модельным источником ионов. Эксперименты с замыканием траекторий в циклы проводились для исследования предельной разрешающей способности, допускаемой ионно-оптическими свойствами зеркал и линз. Результаты этих экспериментов позволяют предположить, что аналогичное разрешение может быть реализовано без замыкания траекторий при использовании оптимального источника ионов с импульсами в единицы наносекунд и при технически достижимой длине зигзагообразной траектории в несколько десятков метров.

В настоящей работе многоотражательный

ВПМА исследован при более высокой энергии до 2 кэВ, что позволило снизить пространственные потери и влияние рассеивающих факторов неконсервативной природы, таких как магнитное поле вращающегося ротора турбонасоса и шумы на электродах от источников питания. В режиме многократных отражений в одной линзе достигнута длина пролета до 10 км при времени пролета до 200 мс и рекордная для ВПМС разрешающая способность порядка одного миллиона. Точное определение разрешающей способности анализатора ограничено шумами и кратковременной нестабильностью источников питания.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема установки приведена на рис. 2 и детально описана в предыдущих публикациях [2–7]. Основу анализатора составляют два симметричных зеркала 1 и 2. Зеркала собраны из одномиллиметровых стальных пластин, разделенных пластиковыми (РЕЕК) прецизионными двухмиллиметровыми (± 2 мкм) шайбами, и стянуты стержнями. Расстояние между крайними электродами зеркал равно 600 мм и параллельность электродов выдержана с точностью 10 мкм. Дрейфовое пространство находится под потенциалом -2 кВ и экранировано для устранения краевых полей. На его оси расположен блок 3 из 10 линз с шагом 15 мм.

Фокусирующие электроды в крайних линзах используются для коррекции угла ввода и вывода пучка, а также для реализации многооборотной схемы с электростатическим захватом импульсных ионных пакетов. Синхрогенератор 6 подает сигналы прямоугольной формы (график "триггер T_0 " на рис. 2, б) на генераторы высоковольтных импульсов 7 и 8, которые отпирают импульсную цезиевую пушку 4 и подают отклоняющий импульс на линзу 3. В результате ионы захватываются в линзе 3 на время импульса (от T_1 до T_2) и после его окончания выпускаются на детектор 5. АЦП 9 (AP-100, www.Acqiris.com) для регистрации сигнала с детектора 5 синхронизирован с фронтом T_2 отпирания линзы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Устойчивость движения ионов и потери в анализаторе

Как и в более ранних исследованиях [4], мы обнаружили экспоненциальное ослабление пучка по мере увеличения длины пролета (рис. 3). Однако показатель ослабления пучка стал заметно ниже, что объясняется более низким давлением газа (0.17 по сравнению с 0.42 мкторр) и, по-видимому, снижением сечения столкновения до приблизительно $3,4 \text{ \AA}^2$, связанным с повышением энергии

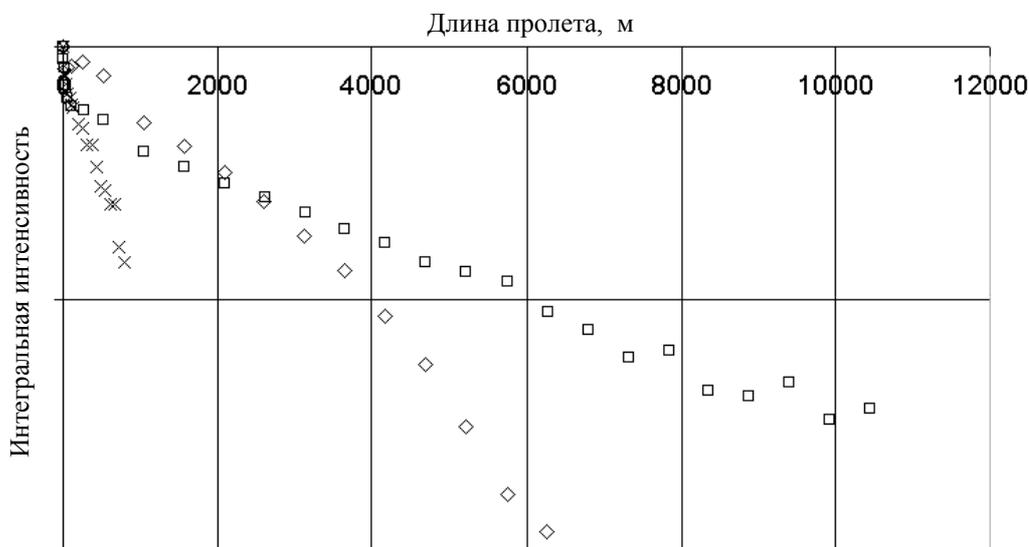


Рис. 3. Падение интенсивности сигнала в зависимости от длины ионной траектории. □ — $P = 1.7 \cdot 10^{-7}$ торр, $U = 2$ кВ; ◇ — $P = 2.7 \cdot 10^{-7}$ торр, $U = 2$ кВ; × — $P = 4.2 \cdot 10^{-7}$ торр, $U = 100$ В. При $U = 2$ кВ длина 10 км соответствует 200 мс времени пролета

ионов со 100 эВ до 2 кэВ. Например, рассмотрим данные при давлении $P = 0.17$ мкторр, соответствующем концентрации газа $n = 6.3 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$. Ослабление пучка в e раз происходит на длине пролета в $\lambda = 4000$ м и, следовательно, сечение столкновения $\sigma = 1/n\lambda = 4 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2 = 4 \text{ \AA}^2$. В результате стало возможным проведение времяпролетных экспериментов на гораздо большей длине пролета — до 10 км, что соответствует 8700 отражениям, и временах пролета до 200 мс. Такое длительное удержание в электростатической ловушке совпадает с представлениями работы [18], где выводится понятие эффективного потенциала электростатического поля, удерживающего пучок на бесконечном числе отражений.

В следующей серии экспериментов исследовалась устойчивость траекторий к внешним воздействиям. На одном статическом электроде планарной линзы вводилось дополнительное смещение потенциала, которое толкает ионы в одном и том же поперечном направлении при каждом проходе через линзу. Измерялось изменение амплитуды и ширины пика как функция напряжения смещения, нормированного ускоряющим напряжением (рис. 4). Обнаружен так называемый "коридор устойчивости" по величине относительного отклоняющего напряжения, в котором не меняются никакие характеристики пучка, включая амплитуду и ширину сигнала, а также показатель ослабления пучка со временем пролета. Ширина коридора составляет порядка 1 % от номинального напряжения на электродах линзы. При малом числе отражений границы коридора плавные, что отвечает обрезанию углового распределения ионного пакета на границах коридора. Благодаря этому обрезанию в ряде случаев удается сузить временной разброс в импульсе, что, по-видимому, связано с уменьшением времяпролетных aberrаций, возникающих за счет ширины пакета. На большом количестве отражений границы становятся резкими и, что самое главное, не меняющимися с числом оборотов. Такие закономерности хорошо совпадают с предсказанными удержанием пучка и сопротивляемостью внешним статическим воздействиям. Устойчивость пучка также предсказывает отсутствие ионных потерь за счет ионно-оптических aberrаций, что хорошо согласуется с интерпретацией потерь как следствия рассеяния на фоновом газе.

Разрешающая способность в многоотражательном режиме

По сравнению с предыдущими экспериментами [4] при переходе на более высокую энергию стало очевидным сужение временной длительности пика, формируемого источником ионов (цезиевой пушкой), до 30–50 нс (по сравнению со 100–120 нс в [4]).

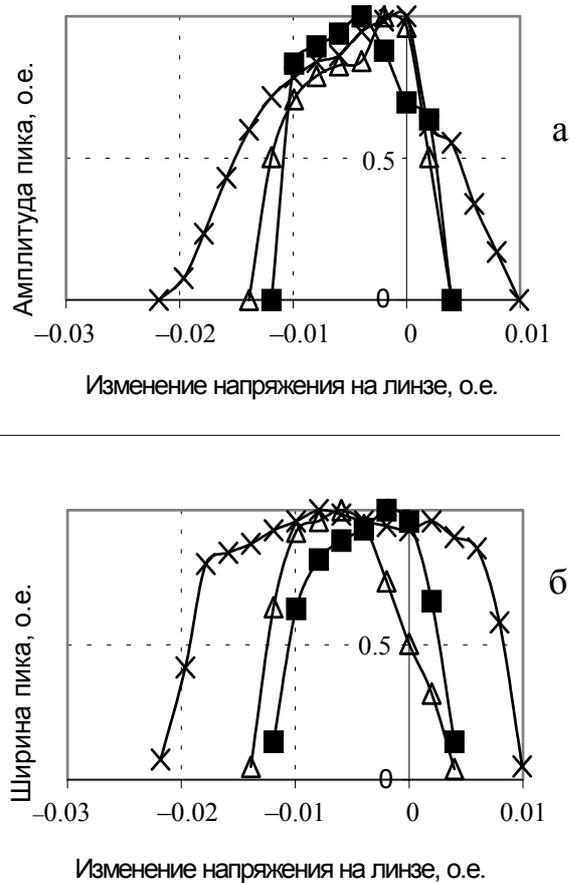


Рис. 4. Окно пропускания в зависимости от напряжения смещения в линзе для различного числа отражений N . а — интенсивность, б — ширина сигнала. \times — $N = 1$, Δ — $N = 54$, \blacksquare — $N = 1105$

Снижение временного разброса объясняется большей амплитудой модулирующего импульса в источнике, что в свою очередь стало возможным благодаря увеличению толерантности прибора к энергетическому разбросу. С уменьшением временного разброса улучшилась и разрешающая способность анализатора. Однако из-за нестабильности блоков питания даже на уровне единиц ppm (часть на миллион) возникает дрожание пика от старта к старту, особенно очевидное при длительных временах (100 мс) захвата ионов в анализаторе. При суммировании на цифровом осциллографе (TDS 300 Tektronix) пик существенно уширяется. Индивидуальные же спектры недостаточно представительны. В данных экспериментах интенсивность пучка ограничена несколькими сотнями ионов на старт. При длительном времени пролета

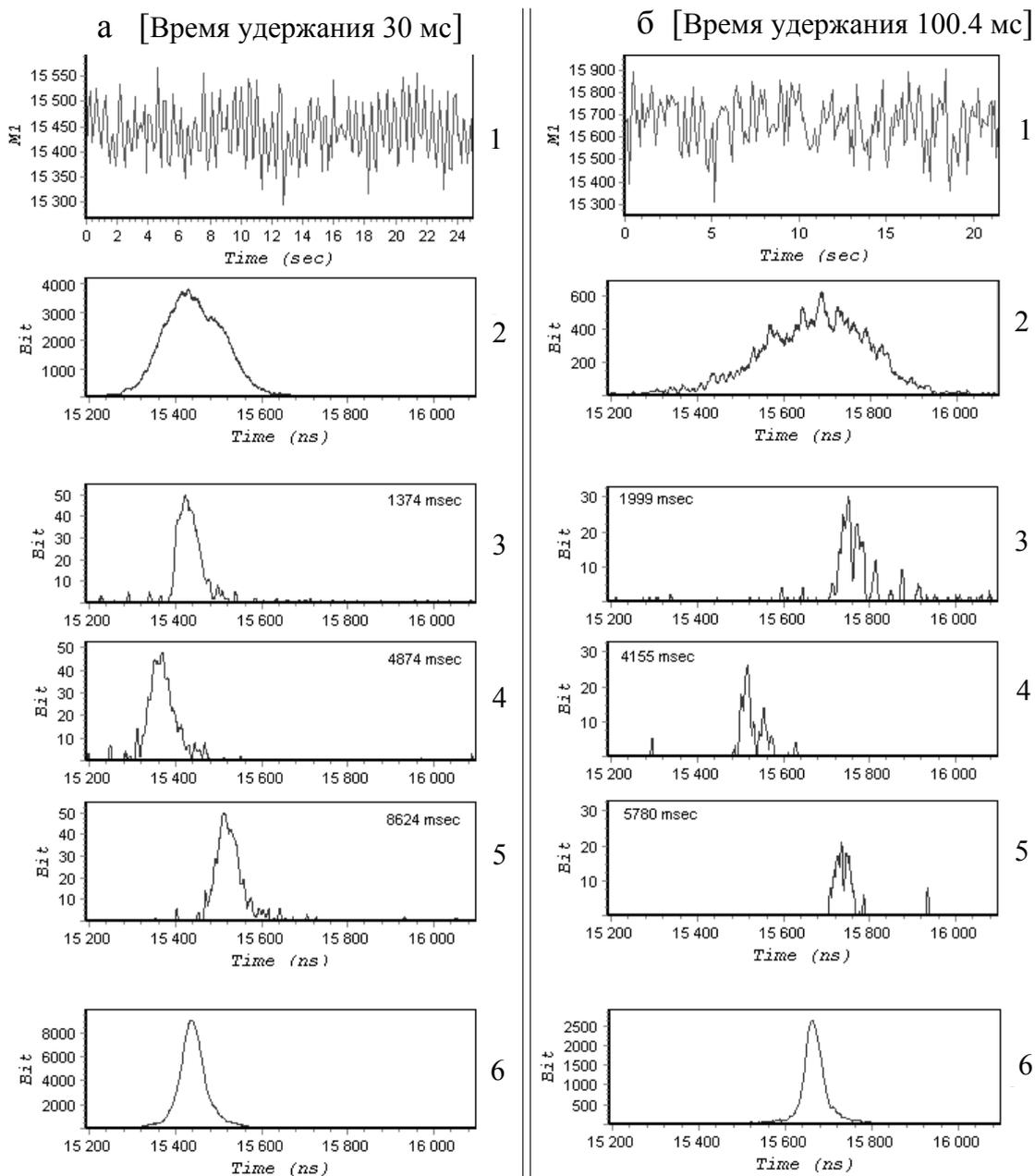


Рис. 5. Сигнал ионов цезия, многократно записанный на АЦП. Вертикальные колонки а, б соответствуют двум различным экспериментам при временах удержания 30 мс и 100.4 мс в анализаторе. В каждой колонке верхние панели 1 представляют зависимость положения центра пика от времени записи спектра, 2 — сумму всех последовательных спектров для данного эксперимента, 3–5 — индивидуальные спектры, 6 — сумму спектров с коррекцией по смещению центра индивидуальных пиков

интенсивность падает до десятков ионов на старт и статистика индивидуальных спектров становится довольно низкой для уверенного определения спектральных параметров — интенсивности, времени и ширины пика.

Смещение пика охарактеризовано при последовательной многократной записи спектров с помощью 1 ГГц АЦП (рис. 5). В обеих колонках — для времени удержания 30 мс (а) и для времени удержания 100.4 мс (б) — верхняя панель (1)

представляет зависимость времени пролета в индивидуальных спектрах от лабораторного времени записи спектров. В характере биений наблюдаются как быстрые, так и медленные компоненты. По индивидуальным спектрам 3–5 видно, что пик действительно смещается в большом диапазоне времен — до 200 нс при времени удержания 30 мс и до 50 нс при времени удержания 100 мс. В результате пик в суммарном спектре 2 существенно шире пиков индивидуальных спектров (3–5). Оценим разрешающую способность по времяпролетному спектру как $R = M/\Delta M = T/2\Delta T$, где T — время пролета, а ΔT — ширина пика на полувысоте. Для времени $T = 30$ мс ΔT составляет 150 нс, что соответствует $R = 100\,000$, а для времени $T = 102$ мс ширина $\Delta T = 240$ нс, т. е. $R = 200\,000$.

Для того чтобы компенсировать смещение центра пика, был использован алгоритм суммирования, при котором вносилась поправка на смещение центра, рассчитанного по корреляции (свертке) с гауссовым пиком. Заметим, что результаты очень слабо зависят от ширины вспомогательного гауссова пика. Результирующие спектры представлены на нижней панели (6). Легко заметить, что пик от скорректированного суммирования имеет ширину, характерную для индивидуальных спектров, и он намного уже, чем пик при простом

суммировании. Для времени пролета (удержания) 30 мс ширина пика составляет 60 нс, что соответствует $R = 250\,000$, а для времени 102 мс ширина пика равна 50 нс, т. е. $R > 1000\,000$.

Разрешающая способность более одного миллиона существенно превышает ранее опубликованные параметры времяпролетной масс-спектрометрии и приблизительно соответствует параметрам высокоразрешающих масс-спектрометров ион-циклотронного резонанса с преобразованием Фурье (ICR-FTMS) [20].

Результаты обработки множества подобных экспериментов приведены на рис. 6. Две серии экспериментов проведены при различной частоте стартов — 10 и 6.25 Гц. При сравнении серий 1 и 2 видно, что удачная синхронизация приводит к уменьшению влияний электронных шумов и наводок и к улучшению разрешающей способности для суммированных спектров. Как и ожидалось, частота синхронизации слабо влияет на разрешающую способность в спектрах с скорректированным суммированием (кривая 3), где снижено влияние дрейфа пика от времени. Кроме частоты синхронизации некоторое влияние оказывает и время удержания. На кривой 1 при временах, кратных 20 мс (50 Гц), разрешающая способность улучшается, а в промежутках — ухудшается.

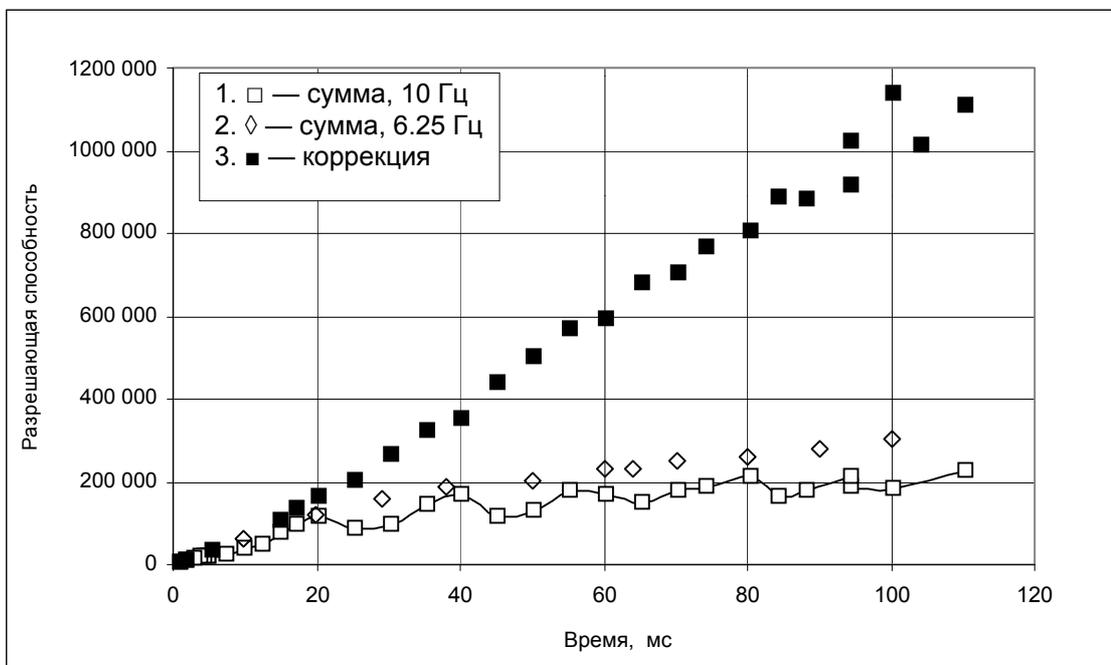


Рис. 6. Разрешающая способность в зависимости от времени захвата ионов в анализаторе

Вероятно, это означает, что шумы не только приводят к медленному смещению пика, но и к некоторому ухудшению разрешающей способности.

ИОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ОГРАНИЧИВАЮЩИЕ РАЗРЕШАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ

Исходя из экспериментально измеренной разрешающей способности можно оценить характеристики ионного пучка, ограниченные аксептансом прибора.

Аберрационный предел разрешающей способности анализатора зависит от координатного, углового и энергетического разбросов ионного пучка. Примеры величин аберрационного предела показаны в таблице. Последняя строка таблицы содержит вариант набора параметров пучка, обеспечивающих разрешающую способность 1000 000. Расчет эмиттанса источника позволяет оценить энергоразброс создаваемого им импульсного пучка как меньший 3 %, а координатный разброс пучка ограничен апертурой диаметром 1.5 мм. Расчетный угловой аксептанс анализатора составляет порядка 0.6 градуса. Таким образом, можно заключить, что на протяжении первых нескольких оборотов ионного пучка в анализаторе происходит некоторое пространственное отсечение пучка, позволяющее достичь экспериментально измеренной разрешающей способности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанные эксперименты с планарным многоотражательным времяпролетным масс-анализатором позволяют сделать заключение об эффективности выбора его ионно-оптической схемы,

Расчетный аберрационный предел разрешающей способности в зависимости от параметров ионного пучка

Координатный разброс, мм	Угловой разброс, град	Относительный энергоразброс, %	Разрешение, R
1	0.5	1	1300 000
2	0.5	1	600 000
1	0.5	5	500 000
1	1	1	300 000
1.3	0.4	2.5	1000 000

позволяющей комбинировать сохранение полного массового диапазона со стабильным удержанием ионного пучка и малыми времяпролетными аберрациями. Оценка аберрационного предела разрешающей способности анализатора и факторов, лимитирующих длину пролета ионов, была получена путем замыкания ионных траекторий в циклы при энергии ионов 2 кэВ. Такой путь был использован в связи с тем, что тестовый ионный источник — цезиевая пушка — на указанной энергии позволял создавать импульсы длительностью порядка 50 нс.

При указанной длительности ионного пакета реализация высокой разрешающей способности потребовала удержания ионного пакета в анализаторе в течение 100 мс, т. е. достижения длины пролета более 4 км. В результате *впервые для времяпролетных анализаторов достигнута разрешающая способность 1000 000*. Такая величина позволяет рассчитывать на создание времяпролетных анализаторов, работающих в полном диапазоне масс, с разрешающей способностью порядка сотен тысяч, а также времяпролетных анализаторов с узким диапазоном масс, аналогичных по параметрам FTMS-анализаторам.

Результаты исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. Увеличение длины пролета является значительным и еще пока слабо изученным ресурсом повышения разрешающей способности времяпролетных масс-спектрометров.

2. Экспериментальные результаты подтверждают, что планарный многоотражательный времяпролетный масс-анализатор позволяет устойчиво захватывать ионы вдоль центральной траектории длиной до 10 км.

3. При давлении порядка 10^{-7} торр ионные потери определяются лишь рассеянием ионов на газе, что не является принципиальным ограничением, поскольку в масс-спектрометрии используют глубокий вакуум до 10^{-12} торр.

3. Практическое оперирование на экспериментально достигнутом высоком уровне разрешающей способности порядка 1000 000 требует создания высокостабильных источников питания.

4. Теоретические расчеты показывают, что разрешающая способность более одного миллиона достижима в данном анализаторе при достаточно реалистических параметрах первичных ионных пакетов с размером менее 1.3 мм, углом расхождения менее 0.4 град и энергетическим разбросом менее 2.5 %.

5. Принципиальная возможность устойчивого захвата вдоль центральной траектории и высокая разрешающая способность подтверждены в схеме с замыканием ионной траектории. Однако схема и ее параметры могут быть реализованы без замыкания ионных траекторий и с сохранением полно-

го массового диапазона. Это потребует использования источника с малым начальным временным разбросом (единицы наносекунд) и анализатора с большим размером траектории (длиной траектории в сотни метров). При компактном сложении траектории такой анализатор может иметь размер порядка 1 м.

Благодарности. Авторы благодарят Институт аналитического приборостроения РАН, его директора Курочкина В.Е. и заведующего лабораторией экологической и биомедицинской масс-спектрометрии Краснова Н.В. за создание творческой обстановки. Авторы также благодарят Демидова В.Н. за разработку стабилизированной и малошумной электроники и Макарова В.В. за помощь в обработке результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Веренчиков А.Н.* Параллельный (МС-МС)-анализ во времяпролетном тандеме. Постановка задачи, метод и схема прибора // Научное приборостроение. 2004. Т. 14, № 2. С. 24–37.
2. *Явор М.И., Веренчиков А.Н.* Планарный многоотражательный времяпролетный масс-анализатор, работающий без ограничения диапазона масс // Научное приборостроение. 2004. Т. 14, № 2. С. 38–45.
3. *Verentchikov A.N., Hasin Yu.I., Yavor M.I.* Multireflecting time-of-flight mass analyzer retaining full mass range // Extended abstract ASMS 2004 (www.asms.org).
4. *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.
5. *Веренчиков А.Н., Явор М.И., Хасин Ю.И., Гаврик М.А.* Многоотражательный планарный времяпролетный масс-анализатор. I. Анализатор для параллельного тандемного спектрометра // ЖТФ. 2005. Т. 75, вып. 1. С. 74–83.
6. *Веренчиков А.Н., Явор М.И., Хасин Ю.И., Гаврик М.А.* Многоотражательный планарный времяпролетный масс-анализатор. II. Режим высокого разрешения // ЖТФ. 2005. Т. 75, вып. 1. С. 84–88.
7. *Verentchikov A.N., Yavor M.I., Hasin Yu. I., Gavrik M.A.* Multi-reflecting TOF analyzer for high resolution MS and parallel MS-MS // Extended abstract of International Conference Desorption 2004, St. Petersburg, September 2004. Published in Journal Mass Spectrometry.
8. *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. V. 227. P. 217–222.
9. *Wollnik H., Casares A., Radford D., Yavor M.* Multi-pass time-of-flight mass spectrometers of high resolving power // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 2004. V. 519, N 1-2. P. 373–379.
10. *Park M., Wu C., Wang Y., Dresh T., Giessmann U.* High resolution and M/Z range in coaxial multiple reflection TOF MS // Extended abstract of ASMS Conference, 2001. (www.asms.org).
11. *Hoyes J., Bateman R.H., Wildgoose J.L.* A high resolution TOF with selectable drift length // Extended abstract of ASMS, 2000. (www.asms.org).
12. *Назаренко Л.М., Секунова Л.М., Якушев Е.М.* Времяпролетный масс-спектрометр с многократным отражением. А.С. SU 1725289 А1, 1989.
13. *Toyoda M., Okumura D., Ishihara M., Katakuse I.* Multi-turn time-of-flight mass spectrometers with electrostatic sectors // J. Mass Spectrom. 2003. V. 38. P. 1125–1142.
14. *Okumura D., Toyoda M., Ishihara M., Katakuse I.* Application of multi-turn time-of-flight mass spectrometer, MULTUM II, to organic compounds ionized by MALDI // J. Mass Spectrom. 2004. V. 39. P. 86–90.
15. *Каратаев В.И., Мамырин Б.А., Шмигк Д.В.* Новый принцип фокусировки ионных пакетов во времяпролетных масс-спектрометрах // ЖТФ. 1971. Т. 41, вып. 7. С. 1498–1501.
16. *Мамырин Б.А., Каратаев В.И., Шмигк Д.В., Загулин А.* // ЖЭТФ. 1973. Т. 64. С. 82–87.
17. *Krutchinsky A.N., Chernushevich I.V., Spicer V.L., Ens W., Standing K. G.* Collisional damping interface for an electrospray ionization time-of-flight mass spectrometer // J. Am. Soc. Mass Spectrom. 1998. V. 9. P. 569–579.
18. *Веренчиков А.Н., Явор М.И.* Устойчивость ионного движения в периодических электростатических полях // Научное приборостроение. 2004. Т. 14, № 2. С. 46–58.
19. *Verentchikov A.N., Yavor M.I.* Dynamic well in electrostatic periodic systems // Extended abstract ASMS 2003 (www.asms.org).
20. *Marshall A.G., Hendrickson C.L., Jackson G.S.* Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry: a primer // Spectrom. Rev. 1998. V. 17. P. 1–35.

*Институт аналитического приборостроения РАН,
Санкт-Петербург*

Материал поступил в редакцию 12.04.2005.

PLANAR TIME-OF-FLIGHT ANALYZER IN THE MULTIPLE-REFLECTION AND HIGH-RESOLUTION MODE

Yu. I. Khasin, A. N. Verentchikov, M. A. Gavrik, M. I. Yavor

Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg

A time-of-flight analyzer with a jig-saw trajectory formed by planar mirrors and a periodic lens system has been recently proposed by the authors to increase the resolving power while retaining the accepted mass range. The limit of the analyzer resolving power was experimentally studied in the mode of locking ion trajectories into cycles, and at the 100 eV energy it reached 200 000. In the present work similar studies are performed at a higher energy of 2 keV. The flight path over 10 km is achieved and the resolving power of the order of 1000 000 is demonstrated. It is shown that the short-term instability of the power supplies is the most limiting factor for achieving longer flight times and a high resolving power.