
**ИССЛЕДОВАНИЯ, МОДЕЛИ, МЕТОДЫ
И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ**

УДК 621.384.668.8: 537.534.7

© М. И. Явор, С. Н. Кириллов, А. Н. Веренчиков

**ИНТЕРФЕЙС ДЛЯ ВВОДА ИОНОВ В ЯЧЕЙКУ
СТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ДИССОЦИАЦИИ ВО ВРЕМЯПРОЛЕТНОМ
ТАНДЕМЕ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ АНАЛИЗОМ**

В работе предложена ионно-оптическая схема интерфейса для транспортировки и ввода ионов в ячейку столкновительной диссоциации во времяпролетном тандеме с параллельным анализом родительских ионов. Фокусирующая система интерфейса позволяет практически без потерь инжектировать в ячейку через узкое отверстие ионы с малой энергией и стопроцентным относительным энергоразбросом. Схема основана на сочетании предварительной фокусировки с последующим замедлением в однородном электростатическом поле.

В работе [1] был предложен принцип параллельного времяпролетного тандемного анализа молекулярных ионов, основанный на "медленном" времяпролетном разделении первичных ионов с последующим вводом последовательности этих ионов в ячейку столкновительной фрагментации и времяпролетным анализом фрагментов во втором, "быстром" анализаторе. Принципиальные элементы такого тандема — "медленный" анализатор родительских ионов и ячейка столкновительной диссоциации (СИД) — исследовались теоретически и экспериментально в работах [2–5]. Разделение первичных ионов проводится за время 5–10 мс при энергии ионов 300–500 эВ и временной протяженности пакета ионов одной массы порядка нескольких микросекунд, а время пролета через второй каскад тандема составляет порядка 30 мкс. Соответственно время, разделяющее пакеты родительских ионов различных масс после анализа в первом каскаде, должно составлять порядка 10 мкс, и сравнимым с ним должно быть время фрагментации ионов и их вывода из ячейки фрагментации.

Указанное условие определяет функционирование ячейки фрагментации [5], представляющей собой короткий (длиной несколько сантиметров) промежуток, радиальное удержание ионов в котором обеспечивается радиочастотным полем, а быстрая транспортировка происходит под воздействием продольного протягивающего электростатического поля. Объем ячейки заполнен буферным газом (воздухом) под давлением порядка 50 мТорр. Оптимальная и наиболее информативная фрагментация происходит при начальной энергии ионов в ячейке около 50 эВ и зависит от типа первичных ионов.

Сравнительно большое давление в ячейке столкновительной фрагментации требует организации многокаскадной системы дифференциальной откачки между времяпролетным масс-ана-

лизатором родительских ионов и ячейкой. При этом крайне желательно, чтобы давление в каскаде откачки, непосредственно предвещающем ячейку, было по возможности более низким, а длина этого каскада — минимальной. Это необходимо для того, чтобы минимизировать вероятность столкновений ионов с газом до входа в ячейку, поскольку такие столкновения, в особенности происходящие при больших кинетических энергиях, заметно уменьшают энергию ионов и приводят к рассеянию и потерям ионов на входной апертуре ячейки СИД. Достижение приемлемого уровня давления в рассматриваемом каскаде дифференциальной откачки (порядка 0.5 мТорр) возможно при диаметре входной апертуры ячейки фрагментации 1–2 мм.

Схема последовательности каскадов дифференциальной откачки показана на рис. 1. Для поддержания низкого давления в камере "медленного" времяпролетного анализатора порядка 10^{-7} Торр и высокого давления порядка 5×10^{-2} Торр в ячейке СИД необходимо разделить устройства двумя дополнительными ступенями дифференциальной откачки. Апертура между дополнительными ступенями может быть около 3 мм. Тогда давление в каскадах составит порядка 10^{-5} Торр в первой ступени и 5×10^{-4} Торр во второй ступени. Камера времяпролетного анализатора может быть отделена от второго каскада дифференциальной откачки либо такой же апертурой, либо длинным и широким каналом, как показано на рис. 1. Последнее решение представляется предпочтительным, поскольку наличие двух узких апертур дифференциальной откачки, находящихся на значительном расстоянии друг от друга, потребовало бы установки дополнительных юстировочных ионно-оптических элементов (дефлекторов) между этими апертурами и усложнило бы процесс практической настройки интерфейса.

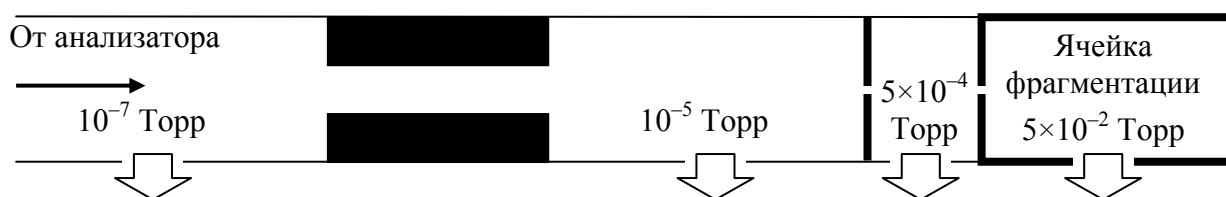


Рис. 1. Схема дифференциальной откачки в интерфейсе

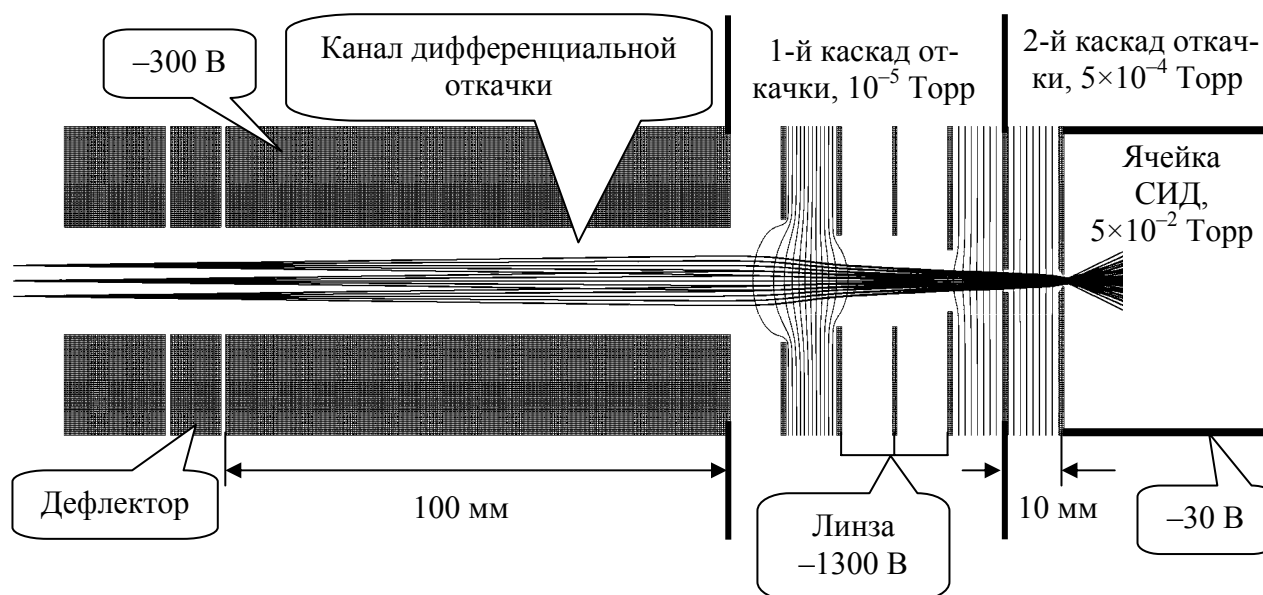


Рис. 2. Схема интерфейса между времяпролетным анализатором и ячейкой СИД

Основную сложность в осуществлении ввода ионов в СИД-ячейку представляет не сам фазовый объем пучка, предположительно составляющий $4 \text{ мм} \times 0.5^\circ$, а хроматическая абберация системы фокусировки пучка ионов на входную апертуру ячейки. Действительно, при средней кинетической энергии ионов во времяпролетном анализаторе родительских ионов 300–500 эВ энергоразброс этих ионов может достигать величины 30–50 эВ. Перед вводом в ячейку фрагментации ионы должны быть замедлены до средней энергии 50 эВ, что означает, что относительный энергоразброс этих ионов на входной апертуре ячейки может достигать 100 %. Стандартные схемы электростатических линз при таком энергоразбросе не способны обеспечить фокусировку пучка ионов с фазовым объемом порядка $4 \text{ мм} \times 0.5^\circ$ в апертуру диаметром 1–2 мм. Дополнительную трудность в выборе оптической схемы интерфейса представляет наличие двух расположенных на небольшом расстоянии друг от друга (порядка 1 см) узких апертур на входе и выходе второго каскада дифференциальной откачки.

Для преодоления указанных сложностей была предложена схема интерфейса, основанная на комбинации фокусирующей линзы, расположенной в области относительно высоких энергий ионов (до их торможения), и последующего однородного тормозящего поля. Оптическая схема интерфейса показана на рис. 2. Ионы, вышедшие из времяпролетного анализатора со средней энергией 300 эВ, проходят через длинный (100 мм) канал диаметром 14 мм, разделяющий камеру анализатора и первый каскад дифференциальной откачки. На входе канала установлен юстировочный дефлектор. Ионно-оптическая система между каналом и входом в ячейку фрагментации представляет собой систему круглых апертур, находящихся на расстоянии 10 мм друг от друга. Часть этих апертур электрически объединена в фокусирующую линзу, на которую подано ускоряющее напряжение порядка –1300 В. Между линзой и входной апертурой ячейки фрагментации, имеющей диаметр 1.5 мм, создается однородное замедляющее поле. Апертура, разделяющая первый и второй каскады дифференциальной откачки и имею-

щая диаметр 3 мм, расположена посередине области однородного поля.

Преимущество предложенной схемы заключается в том, что фокусирующее ионы поле линзы расположено в области, где ионы имеют относительно большую кинетическую энергию и, следовательно, малый (меньше 10 %) относительный энергоразброс. Поэтому хроматическая aberrация, создаваемая такой линзой, невелика. Однородное же замедляющее поле обладает очень малой хроматической aberrацией, поэтому диаметры пучков, создаваемых ионами различных энергий, практически одинаковы. Указанные пучки, как видно из рис. 2, испытывают сильную расходимость только после прохождения входной апертуры ячейки СИД, поскольку формируемое этой апертурой линзовое поле имеет большую хроматическую aberrацию. Однако такая расходимость компенсируется столкновительным охлаждением и радиочастотным сжатием пучка ионов в ячейке.

Дополнительное удобство рассматриваемой схемы состоит в том, что перестройка входной энергии ионов в ячейку фрагментации в широких пределах (от 20 до 100 эВ) не требует изменения фокусирующих напряжений и осуществляется лишь подстройкой потенциала входной апертуры ячейки (и связанного с ним через делитель напряжений потенциала апертуры между первым и вторым каскадами дифференциальной отстройки).

Численное моделирование предлагаемого интерфейса, выполненное с помощью программы SIMION по методике работы [6] с учетом ион-молекулярных столкновений в области второго каскада дифференциальной отстройки, показывает, что интерфейс способен с высокой эффективностью собирать в ячейку фрагментации пучки ионов с фазовым объемом, существенно превышающим средние параметры ионного пучка на выходе из времяпролетного анализатора: диаметр пучка до 6 мм с угловым разбросом до 1 градуса. При

этом потери ионов за счет столкновений с молекулами газа до входа в ячейку не превышают 20 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веренчиков А.Н. Параллельный (МС-МС)-анализ во времяпролетном тандеме. Постановка задачи, метод и схемы приборов // 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. 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.
4. Козлов Б.Н., Труфанов А.С., Явор М.И. и др. Многоотражательный времяпролетный масс-спектрометр с ионной ловушкой на входе // Научное приборостроение. 2006. Т. 16, № 3. С. 40–48.
5. Кириллов С.Н., Замятин А.В., Алексеев Д.Н. и др. Исследование ячейки для быстрой фрагментации и столкновительного охлаждения // Научное приборостроение. 2006. Т. 16, № 3. С. 67–79.
6. Явор М.И., Никитина Д.В., Веренчиков А.Н. и др. Расчет параметров ионного пучка, выходящего из газонаполненного радиочастотного квадрупольного // Научное приборостроение. 2005. Т. 15, № 3. С. 40–53.

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург

Материал поступил в редакцию 31.01.2008.

INTERFACE FOR ION INJECTION INTO A COLLISION INDUCED DISSOCIATION CELL IN A TIME-OF-FLIGHT TANDEM WITH A PARALLEL ANALYSIS

M. I. Yavor, S. N. Kirillov, A. N. Verenchikov

Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg

In the paper an ion-optical scheme is proposed of an interface for transport and injection of ions into a collision induced dissociation cell in a time-of-flight tandem with the parallel analysis of parent ions. The focusing system of the interface allows injection of ions with small energy and 100 % relative energy spread through a narrow bore practically without losses. The scheme is based on a combination of preliminary focusing with succeeding retardation in a homogeneous electrostatic field.