

УДК 621.384.8

© А. С. Бердников, Л. Н. Галль, Ю. Н. Залесов, В. А. Калашников, В. А. Леднев,  
А. Б. Малеев, Ю. И. Хасин

## ИСТОЧНИК ИОНОВ ДЛЯ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ИЗОТОПНОГО АНАЛИЗА ГАЗОВ.

### III. РАЗРАБОТКА ИСТОЧНИКА ИОНОВ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО МАСС-СПЕКТРОМЕТРА МТИ350Г ДЛЯ ИЗОТОПНОГО АНАЛИЗА ГЕКСАФТОРИДА УРАНА

В статье описывается процедура создания ионно-оптической системы источника ионов масс-спектрометра МТИ350Г, предназначенного для изотопного анализа урана в газовой фазе. Показано, как учет некоторых особенностей физико-химических свойств анализируемого вещества (в данном случае — гексафторида урана) может влиять на выбор приоритетов при определении параметров системы.

#### ВВЕДЕНИЕ

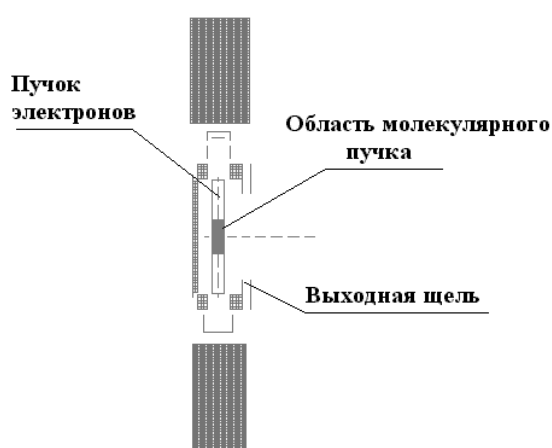
Масс-спектрометр МТИ350Г является специализированным прибором, предназначенным для эффективного решения только одной задачи — изотопного анализа урана в газовой фазе. Следует заметить, что специализация прибора в основном заключена в источнике ионов, в особенностях его конструкции. В первой из данной серии статей [1] уже было показано, что стремление достичь наивысших результатов в разных направлениях изотопного анализа газов приводит к появлению целого семейства изотопных масс-спектрометров для анализа газов, существенно отличающихся друг от друга не только масс-анализаторами, но и тонкими особенностями источников ионов. Во второй части работы [2] были описаны методика и программные средства, позволяющие создавать источники ионов, формирующие ионные пучки, оптимально согласованные с масс-анализатором. Применение этой методики позволяет не просто декларировать единство ионно-оптической системы масс-спектрометра (анализатор плюс источник ионов), но и дает в руки разработчикам доступное и реально работающее средство достижения такого единства, по крайней мере, для магнитных статических масс-спектрометров. Именно такой подход, состоящий в учете основных особенностей изотопного анализа и в оптимальном сочетании пучка ионов с масс-анализатором, был реализован при разработке источника ионов масс-спектрометра МТИ350Г.

На момент начала разработки МТИ350Г в мире существовало лишь два масс-спектрометра, предназначенных для изотопного анализа урана в газовой фазе: MAT281 фирмы ThermoFinnigan (Герма-

ния) и МИ1201АГМ-01, выпускаемый АО SELMI (Украина). По своим аналитическим характеристикам они достаточно близки, но MAT281 несколько превышает МИ1201АГМ по основным параметрам и существенно превышает по надежности. Естественно, что вновь разрабатываемый прибор по своим аналитическим параметрам не должен был уступать масс-спектрометру MAT281, что и было заложено в техническое задание на его разработку. В статье описывается процедура разработки источника ионов нового масс-спектрометра МТИ350Г и приводятся значения основных аналитических характеристик, полученных на его опытных образцах

#### О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ПРОЦЕДУРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Одной из конструктивных особенностей разрабатываемого источника ионов является ионизационная камера сравнительно большого размера. Выбор размера ионизационной камеры определяется требованием исключения попадания анализируемого вещества, легко разлагающегося и вводимого в камеру в виде молекулярного пучка, на ее стенки. При этом собственно область, занимаемая молекулярным пучком, гораздо меньше размеров камеры. Но ионы, которые должны попадать в анализатор, образуются в ионизационной камере именно в этой области, где пересекаются молекулярный поток анализируемого вещества и пучок электронов. Из экспериментальных данных, полученных в процессе эксплуатации системы молекулярного ввода вещества, можно оценить размеры молекулярного пучка в центре ионизационной



**Рис. 1.** Сечение модели ионизационной камеры источника ионов, вертикальная плоскость

камеры, а именно: высота молекулярного пучка достигает 6–7 мм, а его ширина не превышает 2 мм. Как уже говорилось, высокая абсолютная и высокая изотопическая чувствительности масс-спектрометра в значительной степени связаны с формированием параметров ионного пучка в вертикальной плоскости, определяющих возможности его 100% транспортировки через камеру масс-анализатора.

При выборе элементов ионно-оптической системы источника ионов можно двояко подойти к процедуре формирования пучка ионов в вертикальной плоскости:

1) попытаться ограничить выход ионов из ионизационной камеры высотой выходной щели, выбрав ее такой, чтобы только ионы, образованные при ионизации молекулярного пучка, могли проходить через эту щель;

2) не препятствовать выходу из ионизационной камеры всех ионов, образовавшихся в области, занятой пучком ионизирующих электронов, но в масс-анализаторе расположить дополнительные диафрагмы таким образом, чтобы исключить попадание в него ионов, не относящихся к молекулярному пучку.

В первом случае сравнительно низкая щель ионизационной камеры оказывается активным оптическим элементом, сильно влияющим на параметры формируемого ионного пучка в вертикальной плоскости вплоть до образования промежуточного кроссовера. Последующие линзовые элементы уже не в состоянии преобразовать такой пучок в квазипараллельный или даже в слабо сходящийся на входном плече масс-анализатора, равном 500 мм. Во втором случае высокая выходная щель не оказывает сколько-нибудь заметного влияния на формирование ионного пучка в вертикальной

плоскости в той его части, которую составляют ионы анализируемого вещества. Эти особенности формирования пучка в вертикальной плоскости, связанные с высотой щели, были выявлены в процессе анализа ионно-оптической системы (ИОС) источника ионов и определили стратегию моделирования ИОС в процессе разработки нового источника ионов. На рис. 1 приведено сечение модели ионизационной камеры в том виде, в котором она использовалась при моделировании с помощью программы SIMION 3D v. 7.0. Из рисунка видно, что высота выходной щели ионизационной камеры (18 мм) существенно превышает размер области, занятой молекулярным пучком (7 мм).

Такой подход к формированию ионного пучка оказался весьма плодотворным. На рис. 2а приведены результаты моделирования параметров ионного пучка в вертикальной плоскости: эмиттанс пучка, совмещенный с фазовой плоскостью на входе в масс-анализатор. Внутренний квадрат на этой плоскости — границы акцептанса масс-анализатора. Точки, попадающие в пределы границ акцептанса, соответствуют той доле сформированного источником ионного пучка, который полностью проходит через масс-анализатор, обеспечивая при этом заданную разрешающую способность. Точки, оказавшиеся за пределами границ акцептанса, соответствуют той доле ионного пучка, которая через масс-анализатор не пройдет. На рис. 2б представлены результаты расчета только для ионов, образовавшихся из молекулярного пучка. Приведенные диаграммы иллюстрируют результат, полученный с помощью процедуры моделирования с высокой выходной щелью ионизационной камеры совместно с процедурой согласования ионного пучка с масс-анализатором: ионы, образовавшиеся в области молекулярного пучка, почти полностью проходят через масс-анализатор, а ионы, образовавшиеся вне области молекулярного пучка, хотя и попадают в формируемый источником пучок, практически через анализатор не проходят.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НОВОГО ИСТОЧНИКА ИОНОВ

Создание ионно-оптической системы (ИОС) нового источника ионов проходило путем модернизации ИОС источника масс-спектрометра МАТ281 как наиболее отвечающего требованиям решаемой изотопной задачи. Изменения в схему ИОС базового источника вносились исходя из следующих положений и факторов, выявленных в результате анализа этого источника:

- высота молекулярного пучка в новом источнике выше на 1–2 мм;

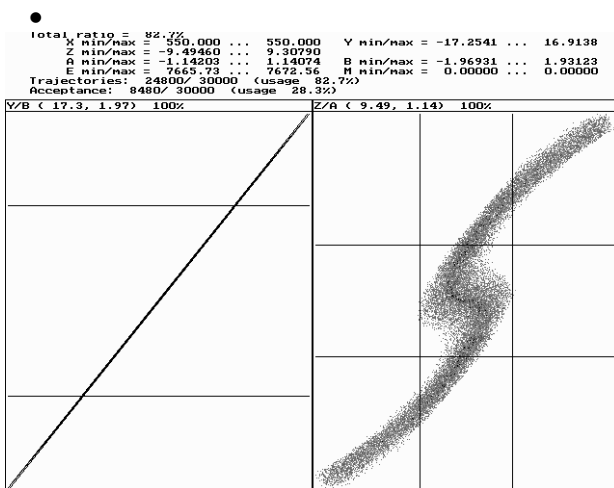


Рис. 2а. Диаграммы эмиттанса и аксептанс масс-анализатора. Отбор ионов из ионизационной камеры в случае высокой выходной щели

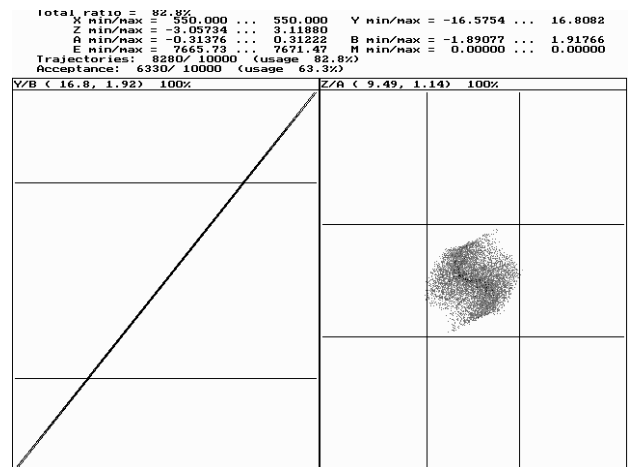


Рис. 2б. Диаграммы эмиттанса и аксептанс масс-анализатора. Отбор ионов только из области молекулярного пучка

- экспериментально найдено, что применение в ионизационной камере выталкивающего центрального электрода не дает требуемого эффекта, но существенно усложняет конструкцию;

- масс-анализатор нового масс-спектрометра МТИ350Г обладает большей, чем анализатор масс-спектрометра МАТ281, величиной горизонтального аксептанса по угловой координате.

На рис. 3 приведены результаты расчета эмиттанса пучка, формируемого ИОС источника ионов масс-спектрометра МАТ281. Этот эмиттанс наложен на аксептанс масс-анализатора МТИ3350Г. Из рисунка видно, что наложение не оптимально и соответствует пропусканию порядка 30 %, и что параметры формируемого пучка следует откорректировать, а именно: угол расходимости пучка в горизонтальной плоскости может быть увеличен с  $0.656^\circ$  до  $1^\circ$ , а в вертикальной плоскости следует принять меры против коллимации пучка на электродах линз.

Для оптимизации согласования источника с масс-анализатором в схему ИОС источника были последовательно введены следующие изменения в схему:

- изменены размеры диафрагм в электродах линз вертикальной фокусировки (размеры диафрагм увеличены с  $15 \times 8$  до  $18 \times 12$  мм);
- применена схема вытягивающей верхней разрезной крышки ионизационной камеры (вытягивающее напряжение — до 30 В относительно ионизационной камеры);
- изменено положение выходной щели источника.

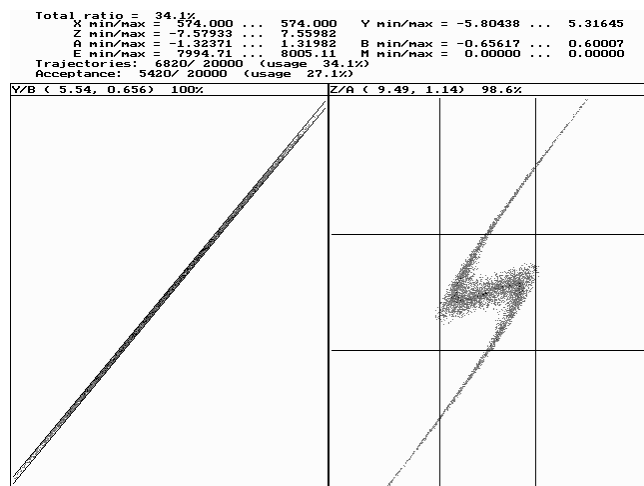


Рис. 3. Диаграммы эмиттанса пучка и границы аксептанса анализатора МТИ350Г (ИОС источника МАТ281)

На каждом этапе подбирались такие значения потенциалов на всех электродах системы, при которых достигалось попадание максимального числа частиц в область аксептанса анализатора.

Таким образом, моделирование ИОС источника явилось поиском компромисса, в котором пропускание системы наиболее удачно сочетается с совмещением проекций эмиттанса пучка с проекциями аксептанса анализатора. Введенные изменения позволили повысить эффективность ИОС источника в сочетании с анализатором. На рис. 4 приведены диаграммы эмиттанса пучка нового источника.

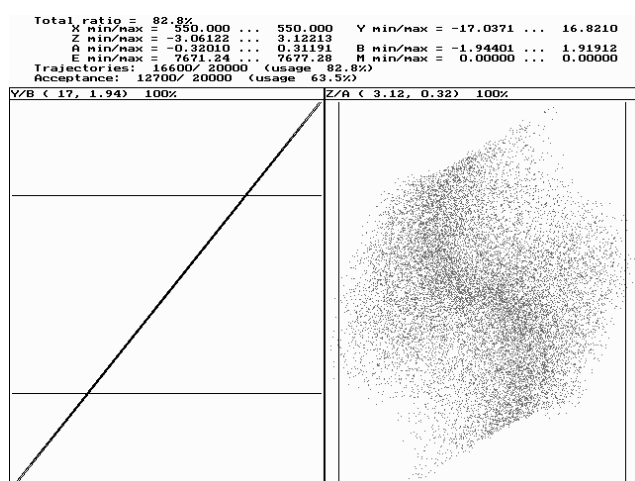


Рис. 4. Диаграммы эмиттанса пучка и аксептанс анализатора МТИ350Г (ИОС нового источника)

Из приведенных диаграмм следует, что при тех же начальных условиях эффективность пропускания источника ионов и тракта анализатора возросли примерно вдвое.

Проведенные государственные испытания двух опытных образцов масс-спектрометров МТИ350Г подтвердили высокий уровень всех аналитических параметров новых масс-спектрометров. Экспериментально полученное значение чувствительности почти вдвое превышает чувствительность масс-спектрометра МАТ281. Достижение столь высоких параметров в значительной степени обеспечено качеством ИОС источника ионов и высоким уровнем согласования источника с масс-анализатором.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданные в Институте аналитического приборостроения РАН интерфейсные программы, работающие с программой SIMION 3D 7.0, позволяют проводить поиск и моделирование ИОС источников ионов статических масс-спектрометров на новом, более высоком уровне достоверности. Комплекс этих программ позво-

ляет не только моделировать объемные пучки заряженных частиц и учитывать влияние наложенного магнитного поля, но впервые реализует практическую методику поиска оптимального сочетания эмиттанса пучка, формируемого источником, с аксептансом анализатора. Во многих случаях именно это позволяет достигать высокой чувствительности масс-спектрометра. Разработанная методика успешно реализована при создании нового источника ионов для масс-спектрометра МТИ350Г. Вопросам влияния магнитного поля на формирование пучка ионизирующих электронов и выход образовавшихся ионов будет посвящена специальная работа.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галль Л.Н., Лохов К.И., Хасин Ю.И. Источник ионов для масс-спектрометрического изотопного анализа газов. I. Сравнительный анализ экспериментальных характеристик источников ионов масс-спектрометров для изотопного анализа газов // Научное приборостроение. 2001. Т. 11, № 4. С. 16–20.
2. Хасин Ю.И., Бердников А.С., Галль Л.Н. Источник ионов для масс-спектрометрического изотопного анализа газов. II. Теоретическое сравнение источников ионов для изотопного анализа методом математического моделирования // В этом номере. С. 30–34.

*Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург (Бердников А.С., Галль Л.Н., Хасин Ю.И.)*

*ЗАО "СКБ СПЕКТРОН-АНАЛИТ" (Леднев В.А.)*

*Уральский электрохимический комбинат Минатома России (Залесов Ю.Н., Калашиников В.А., Малеев А.Б.)*

Материал поступил в редакцию 27.12.2001.

**ION SOURCE FOR MASS SPECTROMETRIC  
ISOTOPIC GAS ANALYSIS.****III. DEVELOPMENT OF A SPECIAL ION SOURCE  
FOR THE МТИ350Г MASS SPECTROMETER  
FOR ISOTOPIC ANALYSIS OF URANIUM HEXAFLUORIDE**

**A. S. Berdnikov, L. N. Gall, Yu. N. Zalesov<sup>2</sup>, V. A. Kalashnikov<sup>2</sup>,  
V. A. Lednev<sup>1</sup>, A. B. Maleev<sup>2</sup>, Yu. I. Khasin**

*Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg*

*<sup>1</sup>SKB SPEKTRON-ANALIT Close Joint-Stock Company*

*<sup>2</sup>The Urals Electrochemical Industrial Complex, Ministry of Atomic Energy of the Russian Federation*

The paper presents a procedure for the development of an ion-optical system of the ion source used with the МТИ350Г mass spectrometer for isotopic gas-phase analysis of uranium. It is shown that taking into account some special features of the physicochemical properties of the analyte (uranium hexafluoride in our case) may influence the choice of priorities in defining the system parameters.