

УДК 543.422; 543.9

© Л. Н. Галль, А. С. Бердников, Ю. И. Хасин, Н. Р. Галль

ФОРМИРОВАНИЕ ПУЧКА ИОНОВ В СОВРЕМЕННОМ ПОВЕРХНОСТНО-ИОНИЗАЦИОННОМ ИСТОЧНИКЕ МАСС-СПЕКТРОМЕТРА МТИ-350Т ДЛЯ ИЗОТОПНОГО АНАЛИЗА УРАНА И ТРАНСУРАНОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ТВЕРДОЙ ФАЗЕ

Статья посвящена формированию ионных пучков в источнике ионов с поверхностной ионизацией. Для получения высоких аналитических параметров работы прибора необходимо, с одной стороны, обеспечить максимальное использование ионов пробы, образующихся на поверхности ленты-ионизатора, а с другой — сформировать ионный пучок, в максимальной степени удовлетворяющий аксептансу масс-анализатора. Показано, что сквозное компьютерное моделирование от области образования ионов до места их регистрации позволяет обеспечить требуемое согласование

Кл. сл.: масс-спектрометрия, изотопы, поверхностная ионизация, эмиттанс, источник ионов

ВВЕДЕНИЕ

Истощение источников углеводородного топлива делает ядерную энергетику перспективным источником обеспечения энергией будущей экономики. Масс-спектрометрический анализ является наиболее достоверным методом определения изотопного состава ядерного топлива [1]. Поверхностная термоионизация, несмотря на ряд присущих ей недостатков, является важнейшим методом получения ионов для изотопного анализа в твердой фазе, особенно для систем с изотопными соотношениями, далекими от природных.

Целью настоящей работы является рассмотрение принципов формирования пучков ионов в источниках с поверхностной ионизацией (ПИ), ориентированных на использование в современных масс-спектрометрах.

УСТРОЙСТВО ПИ-ИСТОЧНИКА ИОНОВ. ОПИСАНИЕ НАЧАЛЬНОГО ЭМИТТАНСА

В современных приборах используются двух- или трехленточные источники, обеспечивающие высокую точность и воспроизводимость анализов [2]. Для обеспечения возможности работать не только с ураном, но и с высокоактивными трансурановыми элементами, ленты испарителя и ионизатора помещают в закрытый блок, который обеспечивает их точное позиционирование по отношению к ионно-оптическим элементам источника. Обычный размер лент $10 \times 0,8 \times 0,02$ мм, ленты расположены на расстоянии 1 мм рабочими сторона-

ми друг к другу и торцами к ионно-оптической системе

Со стороны ионно-оптической системы (ИОС) источника ионов блок лент всегда закрыт экраном, находящимся под потенциалом ионизатора. Отбор ионов, образовавшихся на ионизаторе, производится электрическим полем, создаваемым вытягивающим электродом, и проникающим через щель экрана. Электронно-оптические свойства блока ионизации являются определяющими в работе как источника ионов, так и масс-спектрометра в целом, и выбор, и оптимизация ионно-оптической системы источника ионов целиком подчинены возможностям узла ионизации. Задача ионно-оптической системы — это, с одной стороны, максимальный отбор ионов, образовавшихся при ионизации, а с другой — формирование из этих ионов ионного пучка, эмиттанс (фазовый объем пучка) которого был бы в максимальной степени согласован с аксептансом (фазовым объемом) масс-анализатора, для совместной работы с которым этот источник предназначен [3].

Экран блока ионизации выполняет двоякую функцию: с одной стороны этот экран — деталь узла ионизации, он участвует в физических процессах формирования ионов и защищает другие узлы ионно-оптической системы от запыления высокоактивной пробой, а с другой — более важной стороны, этот экран является первым электродом ионно-оптической системы, во многом определяющей эмиттанс вытягиваемого пучка.

В качестве объекта моделирования использовался ионный источник масс-спектрометра МТИ-

350Т, разработанного для нужд российской атомной промышленности в 2008 г. [4]. По ширине область возникновения ионов ограничивается шириной ленты-ионизатора, по высоте она задавалась равной 4 и 1 мм. В первом случае предполагалось, что проба, нанесенная на ленту, существенно расплывается вдоль нее в процессе испарения, во втором случае этот эффект считался несущественным. Имеющиеся на сегодня экспериментальные данные и теоретические оценки носят противоречивый характер и, видимо, зависят от состава пробы и условий ее нанесения. Начальные углы вылета ионов разыгрывались в диапазоне от -90° до $+90^\circ$, начальные энергии предполагались тепловыми и задавались в пределах 0.1–0.3 эВ. Ширина выходной щели источника составляла 0.2 мм.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУЧКА

Для проведения процедуры моделирования источника ионов в ИАП РАН разработан программный комплекс, включающий в себя программу SIMION 3D, версия 7.0, и специализированные интерфейсные модули GENIO и SIMDRAW. Модуль GENIO — это модуль генерации начальных параметров моделируемого ионного пучка, модуль SIMDRAW — модуль анализа параметров сформированного пучка и графического, и количественного представления результатов в терминах теории транспортировки (фазового пространства) в виде двумерных эмиттансов. Эти модули были разработаны ранее для моделирования ИОС газового источника ионов масс-спектрометра МТИ-350Г с ионизацией электронным ударом, и их

эффективность экспериментально подтверждена параметрами, полученными на этом приборе. Комплекс разработанных программ решает проблему создания рабочей процедуры согласования источника ионов с ИОС анализатора статического магнитного масс-спектрометра, что является непременным условием получения предельно высоких параметров, и в первую очередь — чувствительности приборов. Особенность расчетов твердофазных систем состоит в том, что при моделировании источника ионов с двухленточным блоком ионизации асимметрия системы приводит к увеличению объема моделирования вдвое, требует соответственно большей оперативной памяти ЭВМ и увеличивает продолжительность процедуры расчета поля. Файл начальных условий, создаваемый модулем GENIO, позволял моделировать образование нескольких тысяч (как правило, пяти-шести тысяч) ионов на поверхности ленточки-ионизатора. В качестве начальных условий бралась область, описание которой содержится в предыдущем разделе настоящей статьи.

В Приложении на рис. П1–П3 приведены результаты моделирования, приведенные к плоскости входа в магнитное поле. При описанных выше условиях через выходную щель источника ионов проходит 80.5 % образовавшихся ионов, но лишь 40.1 % оказываются в пределах границ аксептанса анализатора, т. е. достигают приемника масс-спектрометра.

Результаты моделирования хорошо демонстрируют характерные особенности формирования ионного пучка в двухленточном блоке с поверхностной ионизацией, а именно существенную несимметрию распределения интенсивности ионов

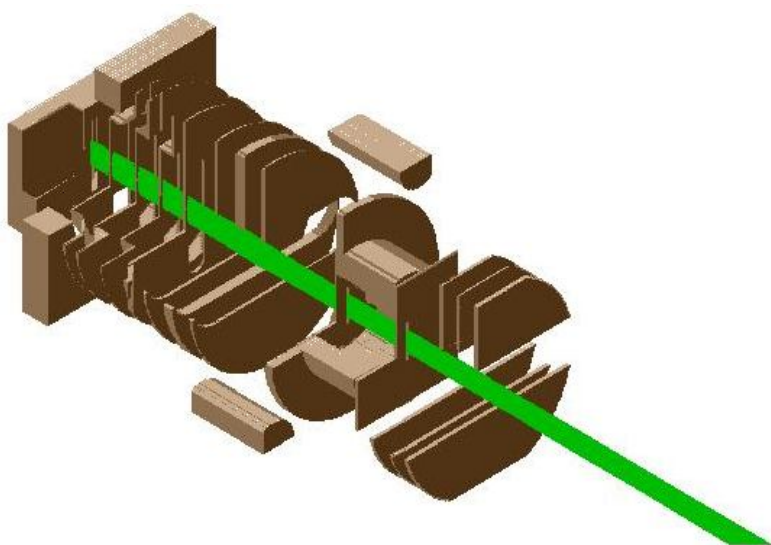


Рис. 1. Трехмерная модель ИОС источника ионов масс-спектрометра МТИ-350Т; часть электродов вырезана для наглядности

по угловой координате в горизонтальной плоскости. Моделирование показало сильную зависимость формируемого пучка от расстояния между лентами и увеличение коэффициента использования пробы (КИП) при сближении лент испарителя и ионизатора. Однако реализовать очень малые расстояния (меньше чем 0.8 мм) технически не представляется возможным, также как и уменьшить расстояние между торцами лент и экраном до 0.5 мм. Более применимым на практике может быть результат, полученный при моделировании, из которого следует, что КИП может быть повышен при подаче на ленту-испаритель небольшого тянущего напряжения по отношению к ионизатору. Это, конечно, усложняет блоки питания лент, но может быть весьма полезным при анализе сверхмалых проб

Следует заметить, что все ионы, "не вписавшиеся" в аксептанс масс-анализатора, должны быть отколлимированы до входа в него, ибо именно они определяют ухудшение изотопической чувствительности анализа в целом. Пространственная модель ионно-оптической системы источника ионов, формирующего эмиттанс ионного пучка, представленный на рис. П1–П3, изображена на рис. 1. На ней видно расположение коллимирующих диафрагм, ограничивающих эмиттанс ионного пучка.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

В работе [4] представлены экспериментальные данные, относящиеся к работе масс-спектрометра МТИ-350Т, оснащенного описанным здесь источником ионов. Рассчитанный нами КИП в ионно-

оптической части прибора, составил ~40 %. В то же время величина КИП, измеренная экспериментально на ионах Cs^+ , составила $(36 \pm 5) \%$. Использование цезия как элемента, испытывающего 100 % ионизацию на ленте-ионизаторе, позволяет измерять лишь ионно-оптическую часть КИП, игнорируя ту часть, которая определяется эффективностью поверхностной ионизации и зависит от потенциала ионизации атомов пробы и работы выхода эмиттера. С другой стороны, эффект "перепыления" с ленты на ленту полностью учитывается данными измерениями. Как видно, имеет место очень хорошее совпадение расчета и эксперимента, что даже удивительно с учетом достаточно грубого описания начальных условий ионообразования на ленте, использованного в настоящем моделировании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Проведено моделирование процесса формирования ионного пучка в источнике с поверхностной ионизацией масс-спектрометра МТИ-350Т для изотопного анализа урана и трансуранов в твердой фазе. Показано, что современные методы моделирования позволяют с высокой точностью воспроизводить поведение ионов как в ионно-оптических системах фокусировки и транспортировки пучка, так и в области возникновения ионов на поверхности твердотельного эмиттера, а также обеспечивают хорошее согласование параметров пучка и аксептанса масс-анализатора.

ПРИЛОЖЕНИЕ

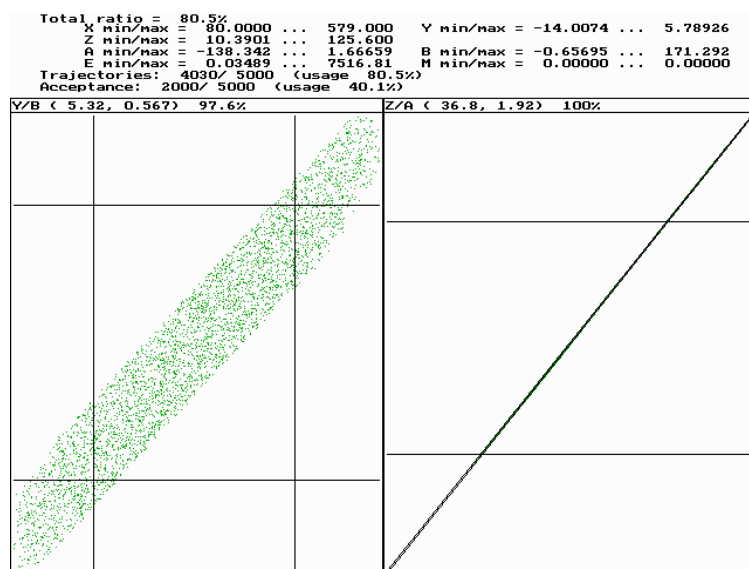


Рис. П1. Диаграмма эмиттансов ионного пучка в вертикальной (Y/B) и горизонтальной (Z/A) плоскостях. Расстояние между ленточками 0.8 мм. Прямыми линиями обозначен аксептанс масс-анализатора МТИ-350Т

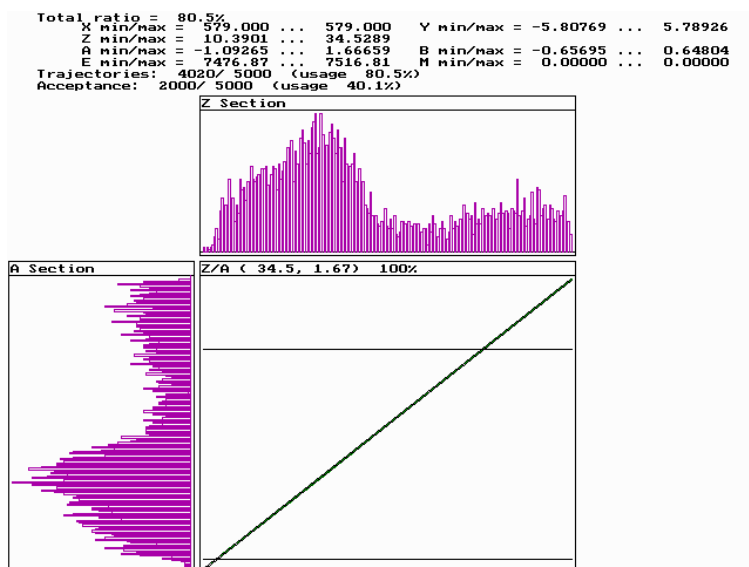


Рис. П2. Распределения интенсивности ионов в пучке по углу (слева) и по координате (сверху) в горизонтальной плоскости; расстояние между ленточками 0.8 мм

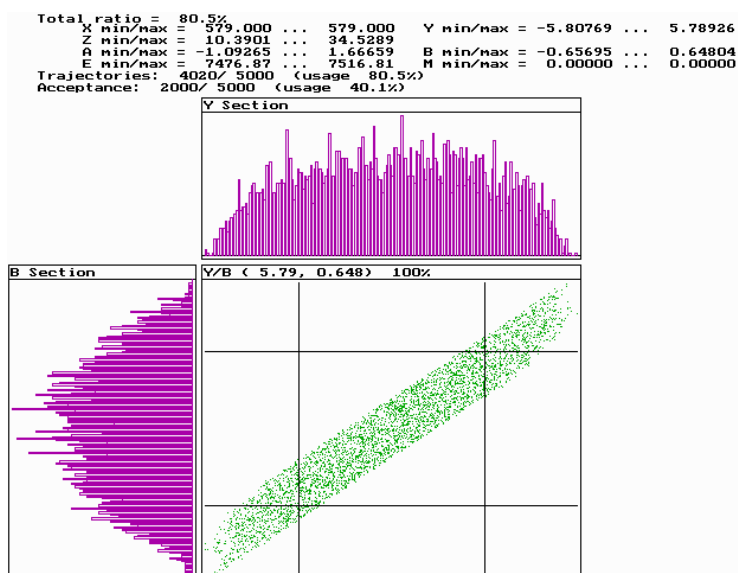


Рис. П3. Распределения интенсивности ионов в пучке по углу (слева) и по координате (сверху) в вертикальной плоскости; расстояние между ленточками 0.8 мм

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сысоев А.А., Артаев В.Б., Кацеев В.В. Изотопная масс-спектрометрия. М.: Энергоатомиздат, 1993. 288 с.
2. Галль Л.Н., Саченко В.Д., Соколов Б.Н. и др. Принципы и методы расчета ионно-оптических схем масс-спектрометров для изотопно-химического анализа // Научная аппаратура. 1988. Т. 3, № 4. С. 3–17.
3. Бердников А.С., Галль Л.Н., Хасин Ю.И. Методика согласования источника ионов статического масс-спектрометра с масс-анализатором // Научное приборостроение. 2001. Т. 11, № 4. С. 28–34.
4. Штань А.С. и др. Масс-спектрометр для прецизионного определения изотопного состава урана,

плутония и смешанного топлива в твердой фазе. (МТИ-350Т) // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика и автоматизация. 2008. Т. 63. С. 1–38.

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

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Санкт-Петербург (Галль Н.Р.)

Контакты: Галль Николай Ростиславович,
gall@ms.ioffe.rssi.ru

Материал поступил в редакцию 29.04.2010.

**ION BEAM FORMATION IN THE MODERN SURFACE
THERMO-IONIZED SOURCE OF MASS-SPECTROMETER MTI-350T
FOR ISOTOPIC ANALYSIS OF U AND TRANSURANIUMS
IN SOLID STATE**

L. N. Gall, A. S. Berdnikov, Yu. I. Hasin, N. R. Gall*

Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg

**A.F. Ioffe Physical-Technical Institute RAS, Saint-Petersburg*

The paper concerns ion beam formation in the surface thermo-ionized source. To get high analytical features, it is necessary, on the one hand, to get the maximal utilization of sample ions originating on the surface of the ionizer ribbon; on the other hand, to form the ion beam fitting well the mass-analyzer acceptance. The throughout computer simulation from the place of ion origination down to the region of their registration, allows to provide the necessary matching.

Keywords: mass-spectrometry, isotopes, surface thermoionization, emittance, ion source