

УДК 543.422; 543.9

© А. С. Бердников, Л. Н. Галль, Н. Р. Галль

ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ СОВРЕМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ИОНОВ С ПОВЕРХНОСТНОЙ ИОНИЗАЦИЕЙ ДЛЯ ИЗОТОПНОГО АНАЛИЗА УРАНА И ТРАНСУРАНОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ТВЕРДОЙ ФАЗЕ (ОБЗОР)

Рассмотрены принципы разработки современных источников ионов с поверхностной ионизацией, предназначенные для изотопного анализа, в первую очередь в отношении задач атомной промышленности. Указано, что лишь две конфигурации многоленточных источников — двух- и трехленточные — остаются значимыми в современных серийных приборах. Проанализированы атомные физико-химические процессы на ленте-ионизаторе и указано на физические причины ограничения коэффициента использования пробы. Сделан вывод, что для существенного повышения точности изотопных измерений методом поверхностной ионизации необходимо перейти к одновременному на атомном уровне рассмотрению всей совокупности процессов: зарождения, транспортировки, масс-анализа и регистрации ионов пробы.

Кл. сл.: поверхностная ионизация, изотопный анализ, точность, источник ионов

ВВЕДЕНИЕ

Близкое истощение источников углеводородного топлива настойчиво выдвигает ядерную энергетику на передний план как основной источник обеспечения энергией современной экономики. Однако запасы ископаемого урана также невелики, и нет сомнения, что ядерная энергетика завтрашнего дня будет базироваться на реакторах-бридерах и смешанном топливе, содержащем делящиеся изотопы урана, плутония и других трансураниевых элементов. В связи с этим уже сейчас встает вопрос о методах оперативного определения элементного и изотопного состава таких топливных смесей.

Требуемая точность определения элементного и изотопного состава топливных смесей сильно варьируется от задачи к задаче и лежит в диапазоне от 1–2 % при технологических измерениях до $5 \cdot 10^{-2}$ % при сертификации продукции. Требования к динамическому диапазону измерений практически всегда очень высоки, т. к. даже минорный компонент с относительным содержанием 10^{-5} и ниже может вносить значительный вклад и в суммарную активность и в поглощение нейтронов [1].

На сегодня единственным по-настоящему надежным методом, обеспечивающим необходимые точности и высокие чувствительности, требующиеся для работы с высокоактивными пробами, является масс-спектрометрия. При этом поверхностная термоионизация (ПИ), несмотря на ряд присущих ей недостатков, по-прежнему остается важнейшим методом получения ионов для изотопного анализа

в твердой фазе, особенно для систем с изотопными соотношениями, далекими от природных [2].

Целью настоящей работы является критическое рассмотрение принципов функционирования источников ионов с поверхностной термоионизацией, ориентированных на анализ урана и трансураниевых элементов, и формулировка требований к их конструированию. Отметим, что в рамках современного подхода к разработке изотопных масс-спектрометров, состоящего в едином расчете ионно-оптического тракта прибора от места рождения ионов до точки их регистрации, ионный источник не может рассматриваться изолированно от всего масс-спектрометра [3]. Тем не менее источники ионов сохраняют относительную автономию, выражающуюся в том, что их базовые конструктивные признаки вытекают из характера используемых проб и аналитических требований к прибору, в то время как непосредственное согласование с масс-анализатором достигается за счет адекватного выбора ионно-оптической системы, что при современных методах расчета всегда возможно [4]. Такой подход позволяет в некоторых пределах рассматривать поверхностно-ионизационные источники, и в особенности их высокотемпературные части, вне зависимости от других элементов масс-спектрометра.

1. ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Масс-спектрометры для изотопного анализа урана в твердой фазе для нужд развивающейся

атомной науки и промышленности успешно разрабатывались и выпускались в СССР с начала 60-х годов, причем в последующие два десятилетия СССР оставался несомненным лидером в разработке и выпуске таких приборов [5]. В 1960 г. в СКБ АП АН СССР в Ленинграде была закончена разработка уникального по тем временам изотопного прибора МИ1306, специализированного для анализа твердых проб урана. Для этого прибора был впервые предложен и реализован трехленточный источник ионов с поверхностной термоионизацией, позволивший получить рекордную по тому времени в мире чувствительность по урану — 10^{-12} г [6]. Этот источник, повторенный в масс-спектрометре МИ1320, а затем в МИ1201Т (фирма СЕЛМИ, Украина), до настоящего времени используется в изотопных масс-спектрометрах на предприятиях Минатома РФ. В настоящее время основной парк масс-спектрометрической аппаратуры, используемой для изотопного анализа веществ в твердой фазе на предприятиях ядерно-топливного цикла России, составляют масс-спектрометры МИ1201Т всех последовательных модификаций, а также импортные твердофазные масс-спектрометры различных фирм, в основном Finnegan (ныне Thermo Scientific) и VG (до недавнего времени существовала под именем GV).

В 2007 г. в рамках программы производства нового поколения изотопных приборов закончена разработка второго масс-спектрометра этого ряда — прибора МТИ350ТМ для изотопного анализа урана, плутония и МОХ-топлива в твердой фазе [7]. Этот прибор обладает двухленточным поверхностно-ионизационным источником, который и обеспечивает специфику его работы и все аналитические параметры.

2. ПИ В ПРИМЕНЕНИИ К ИСТОЧНИКАМ ИОНОВ ДЛЯ ИЗОТОПНЫХ МАСС-СПЕКТРОМЕТРОВ

Поверхностная термоионизация — на сегодня основной метод изотопного анализа твердых проб (окислов и солей элементов) урана и трансуранических элементов, обеспечивающий возможность не только идентификации, но и высокоточного определения микроколичеств изотопов. Для изотопов одного элемента характерно совпадение всех практически важных физических характеристик, кроме массы и магнитного момента ядра. Потенциалы ионизации изотопов идентичны с точностью до четвертого знака, что и делает масс-спектрометрию с ионизацией на поверхности особенно привлекательной для изотопного анализа. Степень идентичности потенциалов ионизации изотопов немонотонно зависит от номера элемен-

та, но в среднем возрастает с его увеличением, обеспечивая для урана и трансуранических элементов очень близкие вероятности ионизации изотопов одного вещества на поверхности нагретого ионизатора.

Эффективность поверхностной ионизации N^+/N^0 на ионизаторе с работой выхода Φ и температурой T для элемента с потенциалом ионизации V_i определяется соотношением Саха—Ленгмюра:

$$N^+/N^0 = C \cdot \exp [e(\Phi - V_i)/kT],$$

где C — отношение статсумм для нейтрального и ионизованного состояний атома — с достаточной точностью можно считать константой для подавляющего большинства исследуемых атомов [8]. Для увеличения эффективности ионизации в реальном источнике ионов используют материал ионизатора с возможно более высокой работой выхода Φ и температурой плавления $T_{пл}$. Как правило, это вольфрам или рений, что позволяет за счет увеличения рабочей температуры ионизатора T получать достаточно высокую эффективность выхода ионов N^+ даже для веществ с потенциалом ионизации $V_i > \Phi$.

По сути в источнике ионов с ПИ можно выделить два важных блока задач: получение максимально возможного числа ионов из пробы (это задача узла ионизации) и формирование этих ионов в пучок, согласованный со свойствами выбранного масс-анализатора. Эти задачи плотно увязаны между собой, но с учетом сделанных оговорок могут быть рассмотрены отдельно.

Современные методы расчета ионно-оптических систем позволяют в достаточно широких пределах варьировать начальный эмиттанс ионного пучка, хотя такой расчет является достаточно сложной и нетривиальной задачей. Тем не менее основное внимание уделяется конструкции узла ионизации, т. к. именно здесь закладываются основы аналитических параметров прибора в целом.

Многоленточные узлы ионизации

Комплекс положительных свойств метода поверхностной ионизации: высокая чувствительность, малая, до уровня нанogramм, масса навески анализируемых проб и практическое отсутствие изотопной дискриминации анализируемого вещества давно сделали источник ионов с поверхностной ионизацией основным, а в прецизионных применениях единственным источником ионов изотопного анализа веществ в твердой фазе. Основные усилия при разработке источников этого типа сейчас направляются на их тщательную конструкторскую проработку с целью прежде всего удобства работы и сокращения времени, затрачиваемого на подготовку и смену проб.

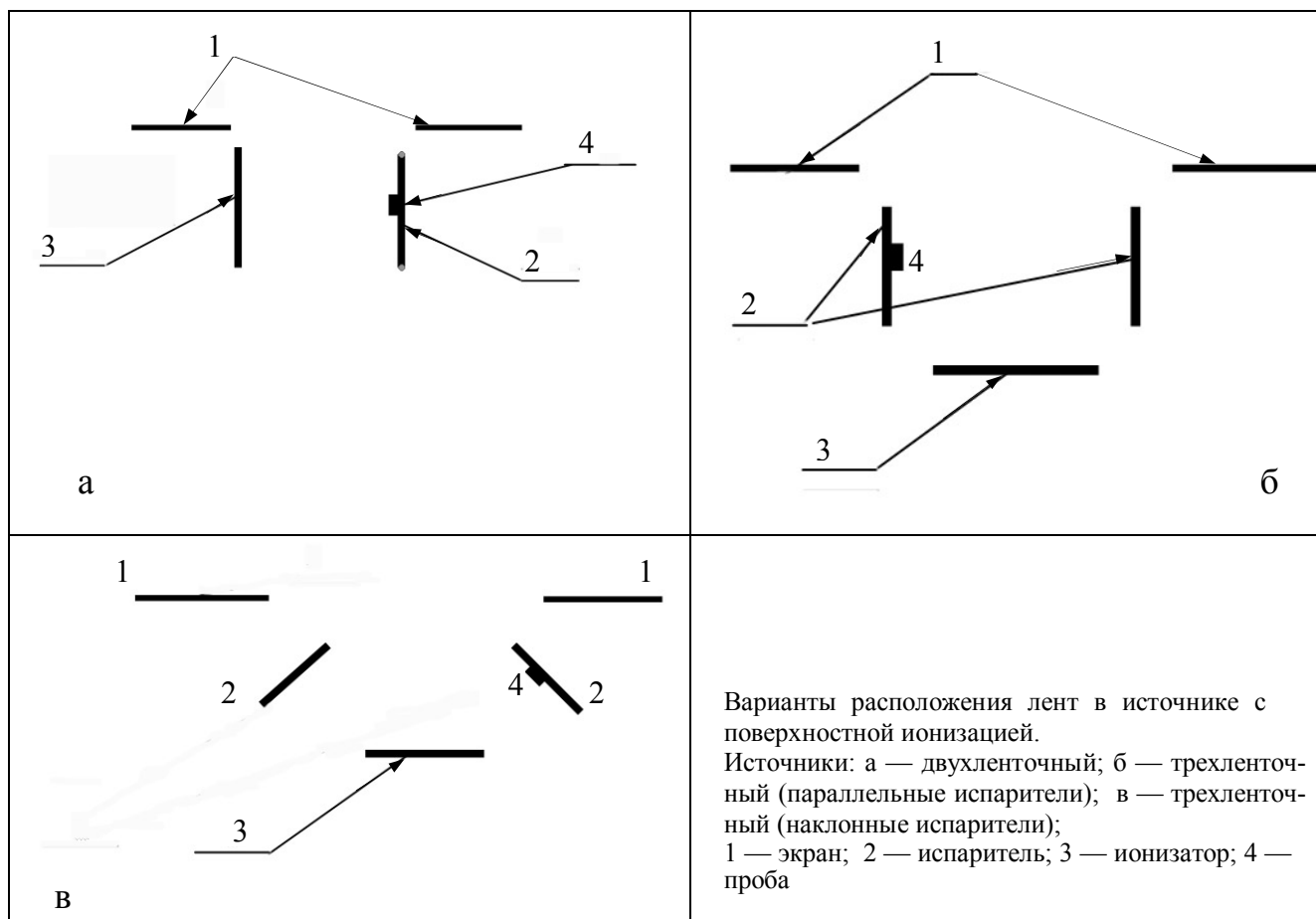
У абсолютного большинства веществ, анализируемых методом поверхностной термоионизации,

температура начала интенсивного испарения существенно ниже той температуры, при которой имеет место высокая эффективность ионизации. Кроме того, проба, нанесенная на поверхность металла существенно искажает (обычно понижает) его работу выхода, а значит и эффективность ионообразования. В связи с этим в узле ионизации источника ионов с поверхностной ионизацией обычно используются два элемента — испаритель и ионизатор, нагреваемые до разных температур. В качестве испарителей и ионизаторов используются узкие ленты из фольги рения, вольфрама или тантала. Из них наибольшую температуру плавления имеет вольфрам — около 3700 К, а наибольшую работу выхода поверхности — рений, в среднем около 5 эВ.

Увеличение числа нагреваемых элементов всегда ведет к усложнению конструкции, однако одноленточные источники (ионизатор, непосредственно на который наносится проба) можно использовать только для анализа элементов с очень низким потенциалом ионизации (цезий, рубидий) или же с очень высокой температурой испарения (соли свинца). Реализуемый при этом процесс ионизации, называемый термоионизацией, представ-

ляет собой сложную смесь процессов теплового и электрохимического разложения солей пробы, испарения, диффузии и ионизации. Поскольку работа выхода поверхности изменяется в процессе анализа, то методики нанесения и испарения пробы оказываются очень критичными, и трудно добиться точности и воспроизводимости измерений.

При анализе элементов с высоким потенциалом ионизации ($V_i > \Phi$) и достаточно низкой температурой испарения, к которым относятся уран, плутоний и другие трансурановые элементы, функции испарения и ионизации пробы должны быть обязательно разделены (режим "поверхностной ионизации"). Испарение исследуемых проб происходит при температуре более низкой, чем температура, необходимая для ионизации. В 60–80 годы было предложено много сильно различающихся конструктивных решений — от цилиндрических ионизаторов до скрещенного расположения лент [2, 5] — однако подавляющее большинство из них имеет только историческое значение. На сегодня "выжили" и значимы для серийных приборов лишь два варианта исполнения режима поверхностной ионизации — двухленточный и трехленточный (см. рисунок).



Трехленточное исполнение узла ионизации было впервые предложено и реализовано в масс-спектрометре МИ1306 (СКБ АП) и затем воспроизведено в МИ1320 и в МИ3306 (СКБ АП), МИ1201Т (СЕЛМИ) и в масс-спектрометрах концерна VG (модель Sector 354 E и более ранние). Двухленточное исполнение — в масс-спектрометрах фирмы Финнеган МАТ (модели 260, 261, 262), и СЕЛМИ (МИ1201АТ).

В двухленточном варианте ленты испарителя и ионизатора располагаются симметрично относительно оси пучка параллельно друг другу, плоскость симметрии совпадает с осью источника ионов. Образование ионов происходит только на одной ленте — ионизаторе, а на другую ленту — испаритель наносится проба (рисунок, а). Двухленточная конструкция проще трехленточной, однако в ней формируется ионный пучок, заведомо несимметричный относительно средней плоскости.

В трехленточном варианте ионизатор располагается на оси симметрии источника ионов так, что его поверхность перпендикулярна этой оси. Симметрично ионизатору располагаются 2 испарителя, на один из которых наносится проба, а второй устанавливается для симметризации области ионизации либо на него также наносится проба. Испарители могут располагаться перпендикулярно к плоскости ионизатора (рисунок, б) или быть к нему наклонены (рисунок, в).

Процессы на испарителе и на ионизаторе

Для оптимизации работы узла ионизации необходимо раздельное на атомном уровне рассмотрение процессов, протекающих на испарителе и на ионизаторе. Они неоднократно рассматривались в литературе [2, 8, 9], и тем не менее в физике протекающих там процессов остается достаточно много белых пятен. Отметим лишь те из них, которые оказывают непосредственное влияние на аналитические характеристики масс-спектрометра.

Процессы на ионизаторе включают в себя диссоциацию частиц, падающих на поверхность ленты, и последующую десорбцию ионов исследуемого элемента. В подавляющем большинстве случаев справедливо предположение о 100% диссоциации всех молекул и кластеров, поступающих на поверхность при ее температуре 2300–2500 К [10]. Высвобождающиеся атомы металла оказываются адсорбированными на поверхности, время их жизни в адсорбированном состоянии мало по сравнению со временем эксперимента, но велико по атомным масштабам, так что каждый из атомов приобретает среднюю энергию, соответствующую температуре ионизатора. Десорбция этих атомов протекает по первому порядку, т. е. каждый из них покидает поверхность независимо от других час-

тиц в нейтральной или ионной форме [11]. Степень ионизации освобождающихся атомов определяется формулой Саха—Ленгмюра (1).

При анализе трудно ионизируемых элементов, к которым относятся уран и трансураны, эффективность поверхностной ионизации достаточно мала. Так, для урана с потенциалом ионизации $V_i = 6.01$ эВ на рении, имеющем работу выхода $\Phi = 5.15$ эВ (это соответствует грани (10-10), наиболее часто выходящей на поверхность при текстурировании ленты переменным током [12]) при температуре ионизатора $T = 2300$ К, соответствующей началу интенсивного испарения рения, эффективность ионизации не превышает $5 \cdot 10^{-4}$. При рутинных измерениях изотопного состава солей (окислов) урана, когда количество пробы не ограничено, обычно используется навеска пробы порядка 10^{-6} г (1 мкг).

Собственно анализ выполняется за 10–20 минут, и в течение этого времени ионный ток на коллекторе приемника ионов масс-спектрометра составляет $(1-2) \cdot 10^{-11}$ А. Проба порядка 1 мкг весьма компактна, занимает малый объем и может быть размещена на испарителе шириной 0.6–0.8 мм на участке длиной 1–2 мм. В 1 мкг урана содержится $\sim 2.5 \cdot 10^{15}$ частиц; при размещении их на ленте шириной 1 мм и длиной пятна 2.5 мм толщина получаемого покрытия равна ~ 100 мономолекулярным слоям.

Оценим возможное влияние пробы на работу выхода ионизатора. Полагая что потери ионов в оптических элементах источника и в масс-анализаторе суммарно составляют не более 50 %, можно считать, что суммарный поток десорбции с ленты-ионизатора составляет $(2-4) \cdot 10^8$ ионов/с и с учетом эффективности ионизации — $(4-8) \cdot 10^{11}$ атомов/с. Площадь ионизатора, с которой происходит десорбция ионов, определяется размером нанесенного пятна пробы на испарителе, угловым распределением десорбирующихся частиц и расстоянием между лентами. При стандартных размерах ленты-ионизатора $10 \cdot 0.8 \cdot 0.02$ мм эта площадь не превосходит 8 мм², что можно принять за верхнюю оценку. Тогда поток десорбции с ионизатора составит:

$$v_{\text{des}} = (4-8) \cdot 10^{11} \text{ атомов} \cdot \text{с}^{-1} / 8 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2 = (0.5-1) 10^{13} \text{ атомов} / (\text{с} \cdot \text{см}^2).$$

При высоких температурах 2300–2500 К хемосорбция атомов урана, трансуранов или других элементов происходит независимо, а их десорбция протекает по первому порядку:

$$v_{\text{des}} = N_{\text{ML}} \cdot \theta \cdot W_{\text{des}}.$$

Здесь N_{ML} — концентрация частиц в монослое, для грани Re(10-10), чаще всего выходящей на поверхность, эту величину можно считать порядка

$8 \cdot 10^{14}$ ат/см² вне зависимости от природы элемента; θ — степень заполнения поверхности, а W_{des} — вероятность десорбции, описываемая формулой Френкеля:

$$W_{\text{des}} = C \cdot \exp[-E_{\text{des}}/kT],$$

где C — предэкспоненциальный множитель порядка 10^{13} с^{-1} [11], E_{des} — энергия активации десорбции, k — постоянная Больцмана, а T — абсолютная температура. При малых покрытиях для f-металлов, в том числе для урана и трансуранов, $E_{\text{des}} = 5.5\text{--}6.0$ эВ [13]; это дает для величины $W_{\text{des}} = (0.8\text{--}8)$ при $T = 2500$ К. Т. о., можно рассчитать равновесное покрытие, создающееся на ленте-ионизаторе из-за поступления на ее поверхность частиц с испарителя:

$$\begin{aligned} \theta &= v_{\text{des}} \cdot (W_{\text{des}} \cdot N_{\text{ML}})^{-1} = \\ &= (0.5\text{--}1) \cdot 10^{13} / \{(0.8\text{--}8) \cdot 8 \cdot 10^{14}\} = \\ &= (1.5\text{--}0.1) \cdot 10^{-2}. \end{aligned}$$

Такие малые покрытия практически не искажают работу выхода рения и могут привести к ее понижению максимум на 0.1 эВ.

При переходе к плутонию и трансуранам из-за высокой активности используются нанопробы. Отметим, что 1 нг Pu содержит $4 \cdot 10^{-12}$ моля, т. е. $\sim 2.4 \cdot 10^{12}$ атомов. При нанесении этого количества вещества на ленту-испаритель при площади в 1 мм² покрытие окажется субмонослойным, $\theta \sim 0.3$. Это означает, что характер испарения нанограммовой и микрограммовой проб очень сильно различается по физическим процессам, протекающим на испарителе.

Значительное увеличение коэффициента использования пробы (до, приблизительно, $2 \cdot 10^{-3}$) в многоленточных системах создается за счет многократного перенапыления пробы с испарителя на ионизатор и обратно. При этом весьма важными оказываются факторы пространственного расположения лент испарителя и ионизатора и их форма.

Для моделирования процесса переиспарения пробы нами была написана программа, позволяющая разыгрывать сценарии этого процесса. Предполагалось, что угловые зависимости процесса одинаковы на ленте-испарителе и ленте-ионизаторе и соответствуют закону косинуса. В этих условиях при реальных параметрах двухленточного источника (ширина лент 0.8 мм, расстояние между ними 0.8 мм) увеличение коэффициента использования пробы по сравнению с расчетом по формуле Саха—Лэнгмюра достигало 4 раз и быстро падало с увеличением межленточного расстояния (скажем, при 1 мм этот выигрыш составлял чуть менее 2 раз).

Современные методы изотопного анализа и установки лент обеспечивают высокую точность анализа, до 10^{-1} % по плутонию, 10^{-2} % по урану и

до 10^{-4} % по стронцию, т. е. при наиболее благоприятных условиях анализа. Технологически наиболее важными являются меры, включающие обеспечение однородного нагрева лент, сохранения ими формы и расположения в процессе нагрева, полного выгорания пробы на ленте испарителя и интегрирования ионных токов. Эти меры устраняют группу причин, наиболее сильно влияющих на точность анализа и широко обсуждавшихся в литературе [2, 9, 14], так сказать, эффектов 1-го порядка. Дальнейшее повышение точности требует более детального и одновременного анализа процессов на обеих лентах, а также ионно-оптической части и приемнике масс-спектрометра.

Как показал опыт эксплуатации твердофазных масс-спектрометров разных марок, основные параметры анализа (чувствительность, точность, разрешающая способность), практически достигаемые на масс-спектрометрах с двухленточным и трехленточным исполнением узлов ионизации, весьма близки друг к другу. В связи с этим наиболее значимыми становятся эксплуатационные соображения (приборы с трехленточным узлом ионизации проще в настройке, а в приборах с двухленточным узлом ионизации анализ экономичнее и т. д.) и выбор типа узла ионизации в значительной степени зависит от пристрастий разработчика прибора.

На сегодняшний день поверхностная ионизация в значительной мере теряет свой статус единственного надежного метода ионизации для изотопных измерений. Плазменные методы, в первую очередь источники с индуктивно связанной плазмой (ICP MS), выступают как мощные конкуренты, способные обеспечить требуемую точность измерений во всяком случае для стандартных проб [15], в том числе и для задач геохронологии, предъявляющей на сегодняшний день наиболее высокие требования к точности измерений. Другим конкурентом является метод электроспрея с управляемой "in-source" фрагментацией — ЭРИАД [16]. Тем не менее поверхностная термоионизация по-прежнему остается главным технологическим методом в атомной промышленности, где из-за искусственного изотопного состава проб плохо работает метод ICP [17]. Кроме того, поверхностная термоионизация остается пока бесспорным эталоном точностных изотопных измерений безотносительно к типу задачи и составу пробы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Конструкции современных поверхностно-ионизационных источников ионов хорошо отработаны технически и на современном уровне требований к точности и воспроизводимости измерений

определяются в основном эксплуатационными и технологическими соображениями. Для дальнейшего повышения уровня точности и воспроизводимости анализа необходим существенно более детальный и одновременный учет физико-химических процессов на всех стадиях образования, транспорта и регистрации ионов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Glasstone S., Edlund M.C.* The Elements of nuclear reactor theory. Toronto-NY-L, 1952.
2. *Сысоев А.А., Артаев В.Б., Кащеев В.В.* Изотопная масс-спектрометрия. М.: Энергоатомиздат, 1993. 286 с.
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. *Курочкин В.Е., Галль Л.Н.* Разработка масс-спектрометрической техники для решения приоритетных задач науки, технологии и промышленности // Научное приборостроение. 2002. Т. 12, № 2. С. 3–9.
5. *Галль Р.Н., Галль Л.Н.* Развитие масс-спектрометрического приборостроения: от СКБ АП АН СССР до ИАнП РАН // Научное приборостроение. 2002. Т. 12, № 3. С. 3–9.
6. *Галль Л.Н., Галль Р.Н., Рутгайзер Ю.С., Шерешевский А.М.* Трехленточный источник ионов // ЖТФ. 1962. Т. 32, № 2. С. 202–207.
7. *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.
8. *Зандберг Э.Я., Ионов Н.И.* Поверхностная ионизация. М.: Наука, 1969. 432 с.
9. *Галль Н.Р., Галль Л.Н.* Изотопные эффекты при поверхностной ионизации // Тезисы докладов 2-й Всероссийской конференции по масс-спектрометрии, Москва, ноябрь, 2005. С. ИУ-7.
10. *Tontegode A.Ya.* Carbon on transition metal surface // Progress in Surface Science. 1991. V. 38, N 3-4. P. 201.
11. *Roberts M.W., McKee C.S.* Chemistry of the Metal-Gas Interface. Oxford, 1978.
12. *Галль Н.Р., Рутьков Е.В., Михайлов С.Н., Тонтегоде А.Я.* Химическое состояние углерода на поверхности рения // Поверхность. 1986. № 8. С. 58–65.
13. *Kolaczkiwicz J., Bauer E.* The adsorption on Eu, Gd, and Tb on the W(110) surface // Surf. Sci. 1986. V. 175. P. 487–507.
14. *Соловьев С.М., Блаженков Н.М., Галль Н.Р., Соловьева Е.В., Галль Л.Н.* Контроль и стабилизация температуры ионизатора в масс-спектрометре с поверхностно ионизационным источником ионов // Масс-спектрометрия. 2005. Т. 2, вып. 3. С. 193–198.
15. Inductively coupled plasma mass spectrometry / Montaser Akbar. Wiley VCH Inc., 1998. 964 p.
16. *Галль Л.Н., Баженов А.Н., Шкуров В.А., Бабаин В.А., Галль Н.Р.* Масс-спектрометрия ЭРИАД (электроспрей) как новый метод изотопного и элементного анализа // Масс-спектрометрия. 2007. Т. 4, № 1. С. 11–18.
17. *Gonzales E.R., Garcia S.R., Mahan C., Hang Wei.* Evaluation of mass spectrometry and radiation detection for the analysis of radionuclides // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2005. V. 263, N 2. P. 457–465.

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

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 5.07.2010.

PRINCIPLES OF IONIZATION UNIT DEVELOPMENT FOR ISOTOPIC ANALYSIS OF U AND TRANSURANIUMS IN SOLID PHASE (REVIEW)

A. S. Berdnikov¹, L. N. Gall¹, N. R. Gall²

¹*Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg*

²*A.F. Ioffe Physical Technical Institute RAS, Saint-Petersburg*

Principles of development of modern ion sources with surface thermoionization, for isotopic analysis in atomic industry have been discussed. It has been shown that only two configurations of multi-ribbon ion sources

are important for modern commercial instruments: two and three-ribbon ones. Atomic physical-chemical processes on the ionization ribbon have been analyzed, and physical limitations for the sample utilization coefficient have been pointed out. It was concluded that an essential increase in accuracy of isotopic measurements by surface thermoionization can be achieved only through simultaneous atomic consideration of all ion processes in the instrument including its burn, transportation, mass-analysis, and registration.

Keywords: surface thermoionization, isotopic analysis, precision, ion source