

УДК 519.23:535.317.1/.7

© А. Г. Каменев, И. В. Чубинский-Надеждин

ПРИМЕНЕНИЕ ДЕТЕКТОРОВ ИОНОВ С БОЛЬШИМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ В МАСС-СПЕКТРОМЕТРАХ

Рассмотрены устройство, основные характеристики и примеры использования гибридного электронного умножителя и электронно-оптического позиционно-чувствительного детектора ионов. Представлены методические основы изотопного анализа ультратонких проб актинидов на термоионизационном масс-спектрометре и результаты анализа реальных образцов.

Исследования в области создания более совершенных детекторов заряженных частиц для научных приборов не теряют актуальности, поскольку сохраняется постоянная потребность в приборах со все более широкими аналитическими возможностями. Достаточно отметить, что в аналитической химии привычными становятся такие словосочетания, как фемто- (10^{-15}) и атто- (10^{-18}) граммовые количества изучаемых веществ. Все сказанное напрямую относится к масс-спектрометрии как одному из наиболее чувствительных методов аналитической химии и к масс-спектрометрическим приборам.

Одним из путей улучшения характеристик детекторов частиц является построение их по схемам с последовательным преобразованием сигнала. В отличие от детекторов на базе простых вторично-электронных умножителей (ВЭУ) в таких детекторах, помимо первичного преобразования детектируемых частиц или излучений в электроны, имеются дополнительные ступени (каскады) с преобразованием вида носителей информации и использованием различных физических процессов для передачи и/или усиления сигнала. Например, в некоторых типах детекторов, используемых в масс-спектрометрах, электронных спектрометрах и микроскопах, осуществляются преобразования «электрон—фотон—электрон» (детекторы Дейли, электронно-оптические позиционно-чувствительные детекторы ионов или электронов, детекторы Эберхарта—Торнли). Другим примером могут служить т. н. гибридные (вакуумно-полупроводниковые) фотоэлектронные умножители и приемники оптического изображения (преобразование «фотоэлектрон в вакууме—электрон в полупроводнике»). Подобные схемы обеспечивают гибкость в выборе оптимальной конструкции детектора и режима работы, могут способствовать повышению стабильности, чувствительности, быстродействия и расширению динамического диапазона.

Для разработки и эффективного использования новых детекторов на базе современных сложных схем необходимо проведение теоретических и экспериментальных исследований, в т. ч. исследований методических особенностей применения детекторов. Это окупается значительным расширением аналитических возможностей научных приборов вплоть до появления принципиально новых методов анализа.

В лаборатории «Детектирования частиц и излучений» Института аналитического приборостроения РАН созданы прототипы двух типов детекторов: гибридный электронный умножитель (ГЭУ), предназначенный для систем регистрации частиц в режиме счета и для времяпролетных масс-спектрометров, а также позиционно-чувствительный детектор (ПЧД) электронно-оптического типа для регистрации пространственных распределений потоков ионов и электронов на выходе масс- и энергоанализаторов. Детекторы характеризуются возможностью работы в широком динамическом диапазоне интенсивностей потоков частиц и по ряду параметров превышают мировой уровень.

Разработан масс-спектрометрический метод определения ультраследовых содержаний изотопов актинидов, создание которого стало возможным благодаря использованию специальной многоканальной системы детектирования на базе ПЧД в составе термоионизационного масс-спектрометра.

ГИБРИДНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ

Базовая схема ГЭУ содержит последовательно установленные сборку двух микроканальных пластин (МКП), электронно-оптическую систему сбора потока электронов с выхода МКП и электроночувствительную полупроводниковую мишень с внутренним усилением [1–2].

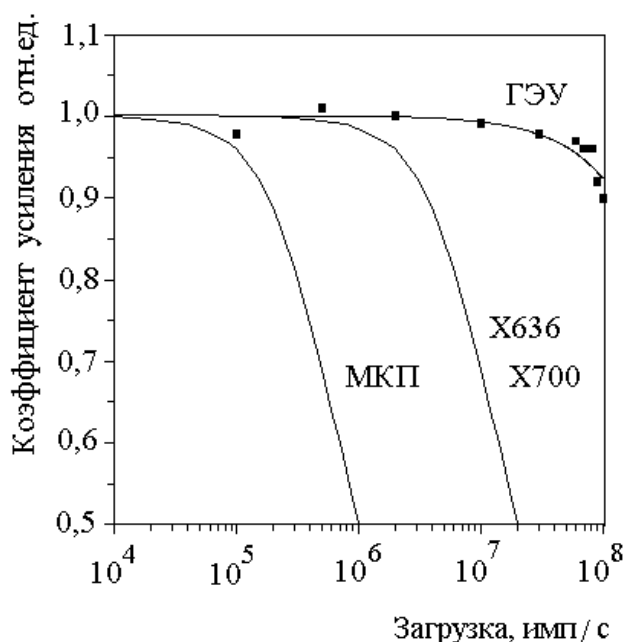


Рис. 1. Относительное изменение коэффициента усиления различных ВЭУ с увеличением загрузки

Принцип работы мишени основан на эффекте катодоусиления в p - n -переходе при его бомбардировке электронами. Каждый электрон с энергией 5–10 кэВ образует в обедненной области перехода по несколько сотен пар носителей заряда, дрейф которых вызывает ток во внешней цепи, пропорциональный числу бомбардирующих электронов. Таким образом, устройство имеет внутреннее усиление порядка 10^2 – 10^3 , при этом характеризуется быстродействием и линейностью вплоть до значений среднего выходного тока порядка миллиампер и до значений импульсного выходного тока порядка ампер.

Последовательная установка МКП и электроночувствительной мишени в электронном умножителе (гибридная схема) позволяет снизить коэффициент усиления МКП на несколько порядков при сохранении высокого коэффициента усиления всего умножителя. Соответственно снижается плотность выходного тока МКП, и предельная допустимая загрузка ГЭУ оказывается в несколько десятков-сотен раз больше по сравнению с обычными ВЭУ при равном усилении. Предельное значение загрузки ГЭУ пропорционально рабочей площади его входа, поэтому при регистрации узких пучков частиц целесообразно предпринимать меры для увеличения сечения пучка перед входом ГЭУ (например, расфокусировать пучок или установить дополнительный динод).

Снижение усиления ГЭУ начинается только при плотности потока частиц около 10^8 $\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ при коэффициенте усиления 10^7 . На рис. 1 показаны

относительные изменения коэффициента усиления канальных ВЭУ фирмы PHILIPS (с расширенным динамическим диапазоном), ГЭУ и МКП с рабочей площадью около 1 см^2 при одинаковом для всех приборов начальном усилении 10^7 . Темновая скорость счета ГЭУ меньше 1 имп/с. Минимальная длительность выходного импульса не более 3 нс (при сопротивлении нагрузки 50 Ом), что позволяет снизить мертвое время системы регистрации в режиме счета в несколько раз по сравнению с канальными и жалюзийными ВЭУ. Предел линейности ГЭУ при измерении импульсных потоков частиц составляет около 1 А в импульсе выходного тока. Исследования параметров ГЭУ проводились при регистрации постоянных и импульсных потоков электронов модулируемой электронной пушки.

Умножитель испытывался также в качестве детектора ионов магнитного статического масс-спектрометра и времяпролетного масс-спектрометра с лазерным источником ионов. В первом случае измерялся спектр изотопов калия, отношение естественных содержаний которых достигает почти 10^4 : ^{39}K (93,26 %), ^{40}K (0,012 %) и ^{41}K (6,73 %). Перед входом ГЭУ был установлен динод-конвертор, на который падал узкий пучок ионов, проходящий через выходную щель масс-анализатора. Плоскость входной поверхности ГЭУ располагалась параллельно пучку ионов. Вторичные электроны вытягивались электрическим полем от конвертора ко входу ГЭУ.

Линейность системы регистрации в режиме счета, определявшаяся по изменениям отношения амплитуд пиков $^{39}\text{K}/^{41}\text{K}$, сохранялась постоянной (с учетом поправки на мертвое время счетчика) в пределах $\pm 0,5$ % вплоть до токов старшего изотопа приблизительно 10^{-11} А. При длительности однократной развертки спектра трех изотопов 300 мс и интервале дискретизации 1 мс в вершине пика ^{39}K регистрировалось около 6×10^4 импульсов на точку спектра, а в вершине пика ^{40}K — несколько импульсов. Эти результаты иллюстрируют возможность использования большого динамического диапазона детектора на базе ГЭУ при создании систем регистрации в режиме счета частиц (не только для масс-спектрометров, но и для электронных спектрометров и других приборов).

Представляется перспективным использование ГЭУ в детекторах ионов времяпролетных масс-спектрометров, построенных на основе современных схем анализаторов с малой расходимостью или фокусировкой ионных пучков. Это особенно актуально при анализе следовых количеств компонентов в присутствии интенсивных спектральных линий матрицы. Оценки показывают, что неперегружающийся электронный умножитель с коэффициентом усиления порядка 10^6 позволяет в одном спектре совместить режим счета ионов

в малоинтенсивных пиках и аналоговый режим регистрации пиков, содержащих до 10^5 – 10^6 ионов в пакете, без переключений усиления детектора и потерь участков спектра. При этом выходной ток ГЭУ в интенсивных спектральных линиях может достигать 1 А, а средняя амплитуда выходных импульсов одиночных ионов составляет доли миллиампера, и они могут быть зарегистрированы счетчиком.

Для экспериментальной проверки осуществимости подобной системы были проведены испытания ГЭУ на времяпролетном масс-спектрометре с лазерным ионным источником. Регистрировались спектры компонентов раствора уранилнитрата, нанесенного на танталовую подложку. Большой перепад величин ионных пакетов в спектре создавался в связи с наличием интенсивной спектральной линии ^{181}Ta наряду с пиками анализируемого вещества (^{238}U , UO , UO_2). В состав макета системы регистрации входили широкополосный осциллограф, цифровой осциллограф С9-27 и стробируемый счетчик импульсов в окне шириной 50 нс. Входы счетчика и цифрового осциллографа были защищены диодами Шоттки. Спектральные пики имели длительность 15–30 нс на полувысоте. Время отклика детектора (менее 3 нс) практически не ухудшало разрешающей способности анализатора.

При коэффициенте усиления около 2×10^6 импульсный выходной ток ГЭУ в спектральном пике тантала ^{181}Ta достигал 1,1 А. Через 80–100 нс после пика ^{181}Ta можно было регистрировать фон рассеянных ионов в режиме счета. Соотношения пиков в области масс урансодержащих компонентов с различной интенсивностью спектральных линий при регистрации в режиме счета хорошо соответствовали измеренным с помощью цифрового осциллографа в аналоговом режиме с накоплением нескольких десятков спектров. Эти экспериментальные оценки показывают возможность построения на базе ГЭУ системы регистрации времяпролетных спектров с широким динамическим диапазоном.

ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР

К середине 80-х годов были предложены практически все известные схемы ПЧД [3]. Весьма перспективным для применения в электронных и масс-спектрометрах представлялся т. н. электронно-оптический ПЧД (ЭОД) [4–6]. Быстрое развитие в последнее десятилетие элементной базы электронной техники (многоэлементных фотопри-

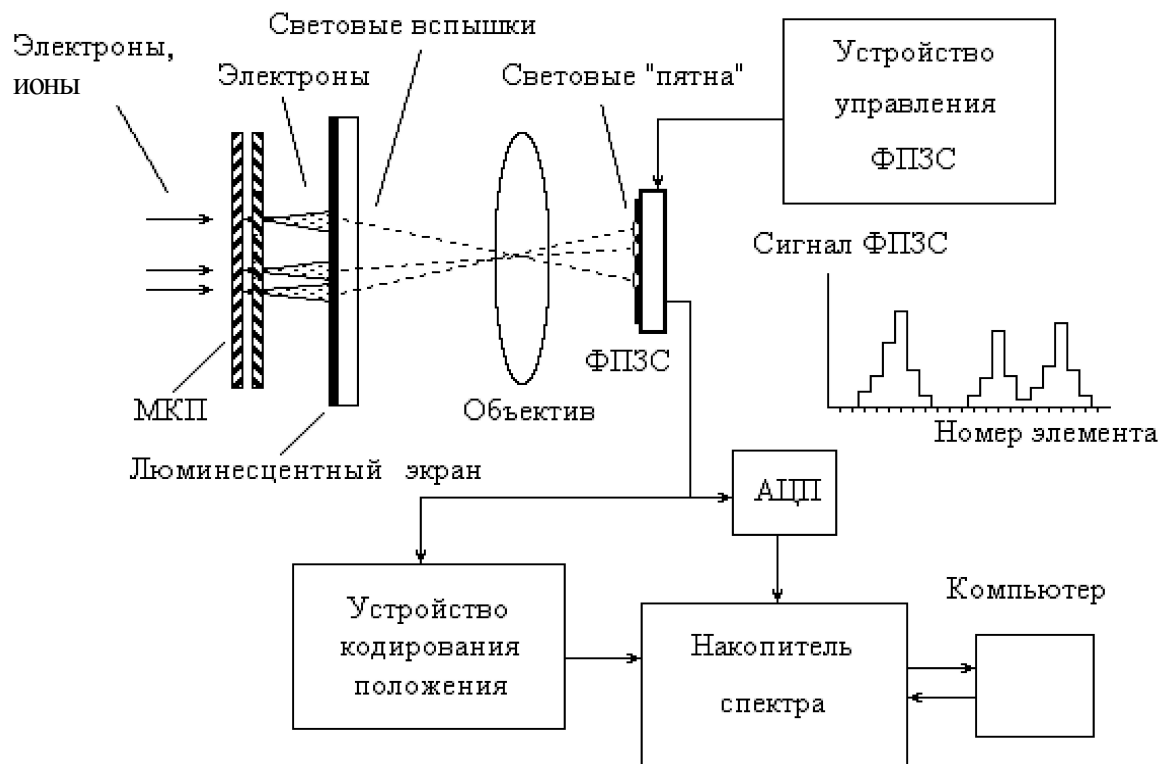


Рис. 2. Схема электронно-оптического позиционно-чувствительного детектора

емников) и вычислительной техники обусловило значительное улучшение характеристик ЭОД. Детектор представляет собой схему с последовательным преобразованием сигнала (рис. 2), в состав которой входят сборка двух МКП, люминесцентный экран, объектив (или волоконно-оптическая система передачи изображения) и многоэлементный фотоприемник, например матричный фоточувствительный прибор с зарядовой связью (ФПЗС) или линейка фотодиодов. ЭОД может использоваться для регистрации двухмерных пространственных распределений потоков частиц, но обычно при установке в фокальной плоскости энерго- или масс-анализатора детектор должен быть одномерным, с пространственным разрешением только вдоль направления дисперсии анализатора.

Электроны или ионы падают на входную поверхность сборки МКП. Пакеты электронов с выхода МКП (каждый пакет соответствует входной частице) преобразуются люминофором в потоки фотонов. Световые вспышки на люминесцентном экране отображают пространственное распределение попадающих на вход детектора частиц. Это изображение с уменьшением масштаба переносится объективом на оптический вход ФПЗС, выходной регистр которого ориентирован вдоль направления дисперсии анализатора. Выходной сигнал детектора формируется при последовательном опросе элементов выходного регистра ФПЗС.

По сравнению с альтернативными схемами детекторов ЭОД обладает некоторыми преимуществами, которые могут быть важны при использовании в спектрометрах частиц. Геометрической структурой фоточувствительных элементов ФПЗС (с учетом изменения масштаба изображения объективом) осуществляется однозначная пространственная дискретизация распределения потока регистрируемых частиц в пределах всей входной поверхности ЭОД. Таким образом однозначно задается и шкала масс или энергий спектрометра. Линейность амплитудной характеристики ФПЗС в динамическом диапазоне более 10^3 позволяет работать в аналоговом режиме регистрации потоков частиц. При этом имеется возможность изменения чувствительности детектора на несколько порядков (изменением усиления МКП). Малые шумы и высокая чувствительность современных ФПЗС обеспечивают возможность регистрации в режиме счета частиц при коэффициенте усиления МКП в 3–10 раз ниже, чем в других схемах ПЧД, что способствует соответствующему расширению динамического диапазона. Различные участки ЭОД работают независимо друг от друга, локальная перегрузка ограниченной области рабочей поверхности детектора может практически не отразиться на работоспособности других областей.

В аналоговом режиме работы ЭОД выходные сигналы элементов ФПЗС пропорциональны яркости свечения определенных участков люминесцентного экрана, т.е. произведению среднего числа частиц, пришедших в данную точку за время, равное периоду опроса ФПЗС, и коэффициента усиления МКП. Сигналы преобразуются в цифровую форму аналого-цифровым преобразователем (АЦП) и запоминаются в памяти накопителя спектра, управляемого компьютером.

В режиме счета частиц период опроса ФПЗС намного меньше среднего интервала времени между световыми вспышками, вызванными входными частицами. Во время цикла опроса сигналы элементов выходного регистра ФПЗС, соответствующих положению светового пятна, обнаруживаются пороговым устройством и регистрируются многоканальным счетчиком накопителя спектра. Циклы опроса следуют непрерывно один за другим, и «мертвое» время ЭОД, работающего в режиме счета, приблизительно равно длительности цикла.

В ИАиП РАН была предложена система регистрации сигналов ЭОД, отличительной чертой которой является обнаружение центра световых пятен на ФПЗС при работе детектора в режиме счета частиц. Это приводит к существенному улучшению пространственного разрешения. В общем виде принцип регистрации положения центра светового пятна поясняется на рис. 3.

При очередном цикле опроса выходного регистра ФПЗС пороговое устройство обнаруживает положение «начала» (левого края) светового пятна — номер соответствующего элемента выходного регистра — и положение «окончания» (правого края). Устройство кодирования положения вырабатывает код положения центра светового пятна, и к содержимому соответствующего этому коду элемента памяти накопителя спектра добавляется единица. Сигналы записываются в темпе опроса ФПЗС, при этом за один цикл опроса может быть обнаружено и зарегистрировано несколько десятков сигналов с различным положением вдоль выходного регистра. На рис. 3 показано, что по обнаруженным номерам координата центра светового пятна может быть определена с точностью до половины размера элемента выходного регистра. Следовательно, место попадания частицы на входную поверхность ЭОД определяется с точностью до шага пространственной дискретизации, равного произведению половины размера элемента ФПЗС и масштабного коэффициента оптической системы, передающей изображение с люминесцентного экрана на ФПЗС. На верхней диаграмме рис. 3 видно, что число элементов пространственной дискретизации входа ЭОД вдвое превышает число рабочих элементов выходного регистра ФПЗС. Таким образом, в режиме счета

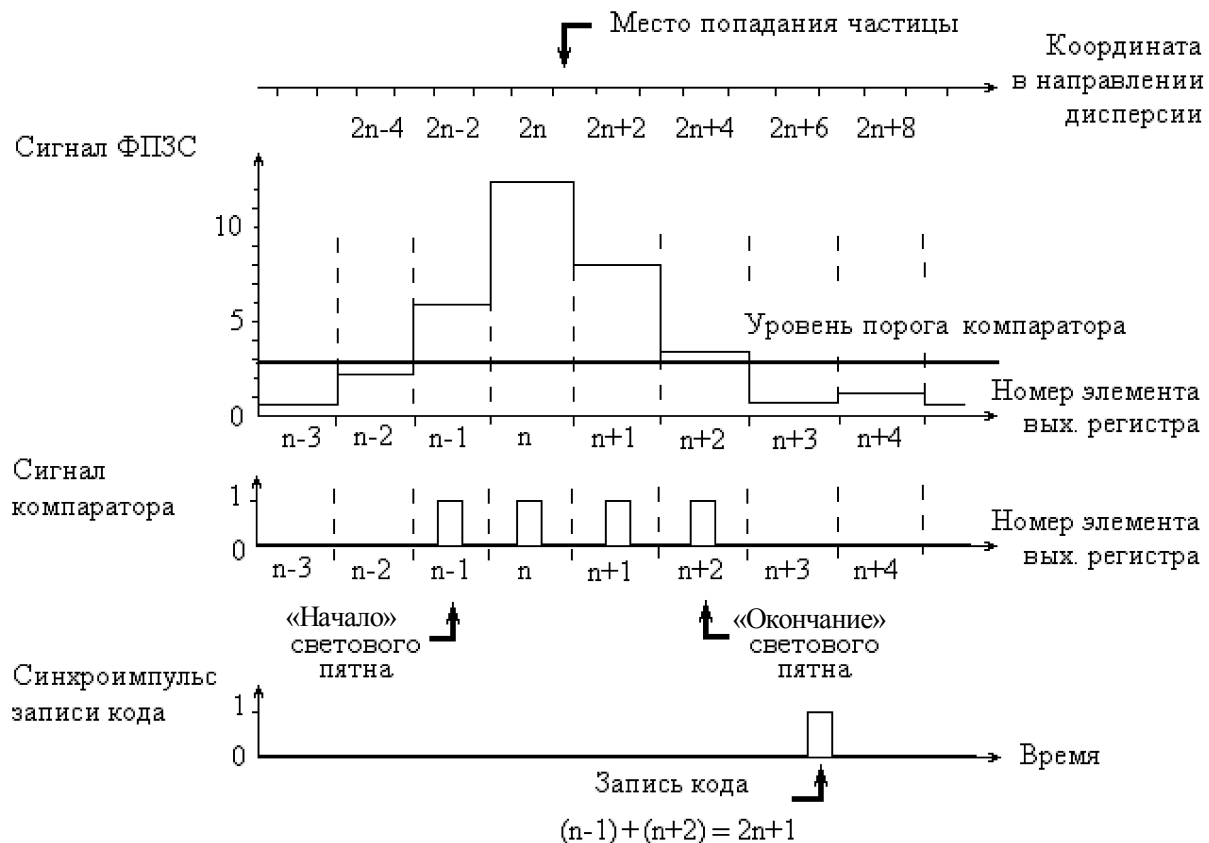


Рис. 3. Принцип регистрации координаты прихода частицы на вход ЭОД

частиц существенно улучшается пространственное разрешение, поскольку оно ограничивается уже не пространственными размерами световых пятен, а погрешностью определения положения их центра.

Для создания базы проектирования ЭОД с требуемыми характеристиками потребовалось провести целый ряд теоретических, расчетных и экспериментальных работ. Результаты теоретических исследований, позволяющие произвести расчет сигнала и шума на выходе ЭОД, представлены в работе [7]. Показано, каким образом отношение сигнал/шум при работе в аналоговом режиме связано с пространственным разрешением. Полученные соотношения могут быть применены для расчета параметров любого приемника изображения, содержащего каскады преобразования с функцией размытия точки, близкой к гауссоиду, и имеющего на выходе пространственно-дискретизирующую структуру чувствительных элементов. Некоторые основные характеристики первых прототипов ЭОД, полученные в ходе их испытаний в составе секторного магнитного масс-спектрометра МИ 1320, представлены в работе [8]. Показано, в частности, что разрешающая способность детек-

тора в режиме счета приблизительно вдвое лучше, чем в аналоговом режиме (для одного из прототипов, соответственно, 60 мкм и 110 мкм). Для обоснования алгоритма регистрации в режиме счета частиц с определением центра световых пятен оказалось целесообразным провести компьютерное моделирование процесса регистрации с использованием метода Монте-Карло. Это позволило уточнить требования к основным функциональным элементам детектора и их взаимосвязь, а также оценить реально достижимый уровень параметров ЭОД. На основании этих результатов и ряда экспериментальных оценок показана принципиальная возможность построения ЭОД со следующими характеристиками: 1) отношение протяженности рабочей области к пространственному разрешению — не менее 400; 2) максимальная нагрузка в режиме счета — до 5×10^3 част./с на 1 мм^2 и более 3×10^5 част./с на весь детектор; 3) динамический диапазон — до 5×10^5 .

Характеристики действующего прототипа ЭОД позволили применить его при разработке высокочувствительного масс-спектрометрического метода анализа ультрамалых проб. Этот вариант ЭОД

имел размеры входной поверхности приблизительно 14 мм в направлении дисперсии анализатора и 8 мм по «высоте» пучка ионов. Разрешающая способность в режиме счета — менее 50 мкм. Рабочая часть пространственной шкалы детектора содержала 340 каналов (около 40 мкм/канал). Собственные шумы системы детектирования не превышали 0,01 имп/с на спектральный пик. Максимальная загрузка на спектральный пик равнялась $1,2 \times 10^3$ ионов/с. Относительная неоднородность чувствительности по рабочей поверхности детектора оказалась в пределах $\pm 5\%$.

ТЕРМОИОНИЗАЦИОННЫЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗОТОПНОГО АНАЛИЗА УЛЬТРАМАЛЫХ КОЛИЧЕСТВ АКТИНИДОВ

При определении содержания радиоактивных изотопов трансурановых элементов техногенного происхождения в образцах окружающей среды — плутония (^{239}Pu , ^{240}Pu), непутия (^{237}Np), америция (^{241}Am) и кюрия (^{242}Cm , ^{244}Cm) — нередко требуется проведение анализов на уровне следовых количеств компонентов в пробе, когда концентрации изотопов находятся в диапазоне от 10^{-9} г/г до 10^{-12} г/г и ниже [9]. Из масс-спектрометрических методов, как наиболее чувствительных, для этих целей используются масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) [10] и термоионизационная масс-спектрометрия (ТИМС). Если по ряду причин общее количество образца, доступное для анализа, существенно ограничено, то применение ТИМС оказывается более предпочтительным благодаря значительно меньшему расходу пробы. В этих случаях необходимо использовать масс-спектрометры с многоканальными детекторами ионов, работающими в режиме счета частиц, чтобы обеспечить максимальную эффективность использования образца [11–13].

Цель наших исследований заключалась в разработке термоионизационного масс-спектрометрического метода изотопного анализа следовых количеств актинидов в ультрамалых образцах, а также в образцах, не подвергнутых предварительной подготовке для обогащения анализируемым компонентом и/или удаления мешающих компонентов.

Результаты этих исследований изложены в работах [13,14]. Все измерения проводились на масс-спектрометре МИ 1320 с термоионизационным источником ионов трехленточного типа. Прибор был оснащен разработанным нами ЭОД ионов, характеристики которого были приведены выше. Это обеспечивало одновременную регистрацию спектра в диапазоне масс от минимальной ($M_{\min}$) до максимальной ($M_{\max}$), удовлетворяющем соотношению $M_{\max}/M_{\min} \geq 1,06$, что идеально подхо-

дило для одновременной регистрации масс-спектральных линий ионов изотопов трансурановых элементов (U, Np, Pu, Am), которые располагаются в диапазоне масс 232–246 а.е.м. В работе [14] на примерах анализа как модельных многокомпонентных проб, содержащих растворенные в азотной кислоте U, Np и Pu, так и на реальных образцах, не подвергнутых очистке и радиохимической обработке (раствор почвенной вытяжки, микропробы золота, растворенного в царской водке, и серебра, растворенного в азотной кислоте), было показано, что испарение таких проб в трехленточном источнике ионов с термической ионизацией сопровождается фракционированием как входящих в их состав, так и образующихся соединений. Для соединений каждого из актинидов существует свой достаточно четко выраженный температурный диапазон испарения, когда отношение сигнал/фон максимально. В случае урана наблюдается даже два таких температурных диапазона, если образец испаряется с поверхности вольфрамовых лент. Тот факт, что при нагревании образца испаряются химические соединения актинидов, а не сами актиниды как химические элементы, был проверен нами экспериментально для урана путем масс-спектрометрического определения состава пара при испарении уранилнитрата и ионизации продуктов испарения электронным ударом. Установлено, что в масс-спектре продуктов испарения уранилнитрата, кроме молекулярных ионов состава $(\text{UONO}_3)^+$, $(\text{UO}_2\text{NO}_3)^+$ и $[\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2]^+$, присутствуют также ионы окислов $(\text{UO}_2)^+$, $(\text{UO}_3)^+$, $(\text{U}_2\text{O}_5)^+$, $(\text{U}_2\text{O}_6)^+$, $(\text{U}_3\text{O}_7)^+$, $(\text{U}_3\text{O}_8)^+$, $(\text{U}_3\text{O}_9)^+$ и $(\text{U}_4\text{O}_9)^+$. Появление и исчезновение этих ионов в спектре, соотношение их интенсивностей определяется температурой испарения образца и его температурной «предысторией».

Обнаруженные различия в скоростях испарения соединений актинидов дали возможность предложить новую термоионизационную масс-спектрометрическую методику изотопного анализа ультрамалых проб. Она сочетает управляемое фракционирование входящих в образец соединений актинидов, происходящее в процессе испарения образца в источнике ионов, с одновременным многоканальным детектированием ионов всех изотопов актинидов в режиме счета с непрерывным накоплением сигналов. Одновременная регистрация ионов во всей области масс актинидов, как уже отмечалось, дает возможность устанавливать температуры испарения для любого анализируемого компонента образца, которые отвечают максимальной величине отношения сигнал/фон. Это обеспечивает улучшение пределов обнаружения и идентификацию некоторых изотопов актинидов [14].

Возможности метода демонстрируют результаты анализа одного из ультрамалых образцов.

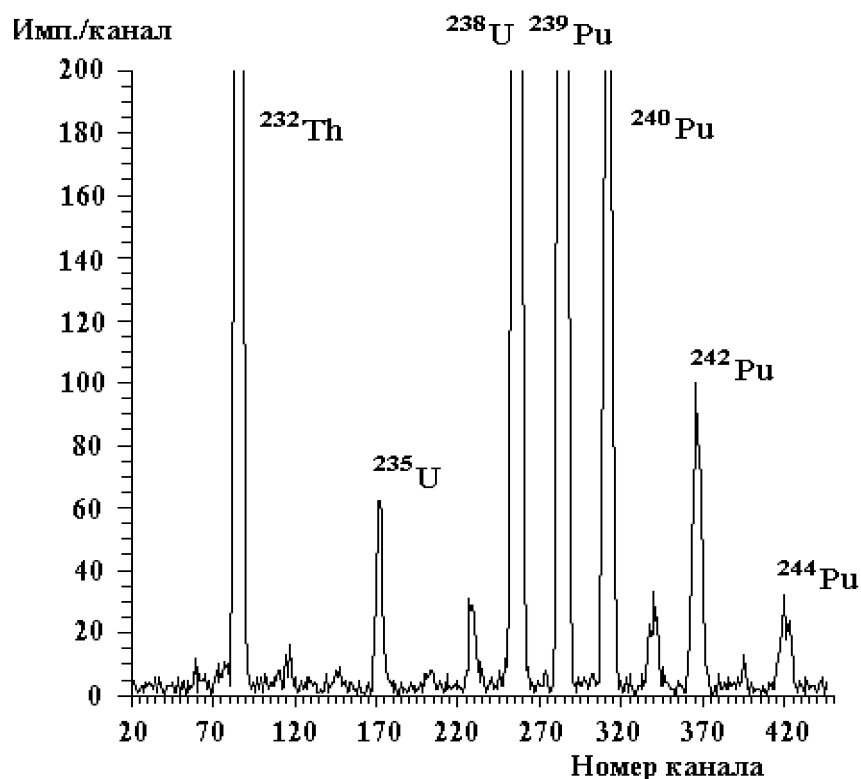


Рис. 4. Один из масс-спектров, полученный при температуре испарения образца в ионном источнике, оптимальной для регистрации Pu

Работа проведена совместно с НПО Радиевый институт им. В.Г. Хлопина. С помощью метода изотопного разбавления (метки ^{233}U и ^{242}Pu) было определено общее содержание урана и плутония в исходном образце: 10,9 нг и 2,6 пг соответственно. Количество изотопа ^{244}Pu — наименьшего по содержанию — составляло в образце около 20 фг. Порог обнаружения для Pu составил 10 фг/мл в анализируемом растворе (объем раствора — менее 100 мкл). На рис. 4 приведен один из зарегистрированных масс-спектров. Отметим, что общее количество изотопа ^{244}Pu , расходуемое при проведении одного масс-спектрометрического анализа, составляло около 0,2 фг.

Изотопный состав урана был измерен с погрешностью 1,5–20 % для области концентраций меньших изотопов от 0,3 нг/мл до 1 пг/мл. Изотопный состав плутония был измерен с погрешностью 5–30 % для области концентраций меньших изотопов от 1,5 пг/мл до 40 фг/мл.

В заключение следует отметить, что в настоящее время продолжают исследования и разработки, направленные на создание многоканально-

го детектора с улучшенными характеристиками. Наряду с ним создается специализированная система детектирования ионов, которая позволит упростить алгоритм измерений изотопных отношений с использованием предложенного нами метода анализа ультрамалых проб. Это приведет к повышению точности и чувствительности.

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории Ю.В. Куликову, В.С. Сняткову, И.А. Ефимову за участие в работах по созданию детекторов и в проведении исследований. Авторы очень признательны А.В. Степанову и Т.П. Макаровой, сотрудникам НПО Радиевый институт им. В.Г. Хлопина, за плодотворное сотрудничество и поддержку работ по созданию новой масс-спектрометрической методики анализа ультрамалых проб актинидов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каменев А.Г., Чубинский-Надеждин И.В. Гибридный электронный умножитель с большим

- динамическим диапазоном // ПТЭ. 1990. № 5. С. 168–171.
2. Каменев А.Г., Лебедев Г.В., Чубинский-Надеждин И.В. Электронный умножитель. Патент Российской Федерации № 1780128, зарегистрирован 12.05.1993 г.
 3. Рихтер и Хо. Характеристики локализирующих детекторов применительно к спектроскопии энергетических потерь электронов с разрешением по времени // Приб. науч. исслед. 1986. № 8. С. 3–19.
 4. Louter G.J., Buijserd A.N. A very sensitive electro-optical simultaneous ion detection system // Int. J. Mass Spectrom. Ion Phys. 1983. V. 50. P. 245–257.
 5. Hill J.A., Biller J.E., Martin S.A. et al. Design considerations, calibration and applications of an array detector for a four-sector tandem mass spectrometer // Int. J. Mass Spectrom. Ion Processes. 1989. V. 92. P. 211–230.
 6. Murphy D., Mauersberger K. Operation of a microchannel plate counting system in a mass spectrometer // Rev. Sci. Instrum. 1985. V. 50, № 2. P. 220–226.
 7. Чубинский-Надеждин И.В., Каменев А.Г. Сигнал и шум на выходе детектора частиц, содержащего ЭОП и многоэлементный фотоприемник // Радиотехника и электроника. 1991. Т. 36, № 11. С. 2216–2225.
 8. Каменев А.Г., Чубинский-Надеждин И.В., Ефимов И.А. и др. Исследование характеристик детекторов заряженных частиц для аналитических приборов // Научное приборостроение. 1991. Т. 1, № 1. С. 107–114.
 9. Павлоцкая Ф.И., Мясоедов Б.Ф. Определение трансурановых элементов в объектах природной среды // Радиохимия. 1996. Т. 38, № 3. С. 193–209.
 10. Kerl W., Becker J.S., Dietze H.-J., Dannecker W. Isotopic and Ultratrace Analysis of Uranium by Double-Focusing ICP-MS // J. Anal. At. Spectrom. 1996. V. 10. P. 723–726.
 11. Richter Ott U., Begemann F. Multiple ion counting in isotope abundance mass spectrometry // Int. J. Mass Spectrom. Ion Processes. 1994. V. 132. P. 91–110.
 12. Беляев Б.Н., Гаврилов В.М., Домкин В.Д. и др. Изотопный состав плутония в почвах и возможности идентификации источника загрязнения // Тез. докл. Межд. конференции «Радиоактивные отходы — хранение, транспортировка, переработка. Влияние на человека и окружающую среду». С.-Петербург, 14–18 октября 1996. В–61.
 13. Каменев А.Г., Чубинский-Надеждин И.В., Ефимов И.А. Обнаружение следовых количеств актинидов в пробах, содержащих около 1мкг/мл урана, методом термоионизационной масс-спектрометрии // Атомная энергия. 1996. Т. 80, № 1. С. 43–47.
 14. Каменев А.Г., Куликов Ю.В., Снятков В.С., Чубинский-Надеждин И.В. Анализ следовых количеств элементов на термоионизационном масс-спектрометре, оснащённом многоканальным детектором ионов // Научное приборостроение. 1999. Т. 9, № 1. С. 39–42.

*Институт аналитического приборостроения РАН,
Санкт-Петербург*

Материал поступил в редакцию 19.01.99.

APPLICATION OF ION DETECTORS WITH A WIDE DYNAMIC RANGE IN MASS-SPECTROMETERS

A. G. Kamenev, I. V. Chubinski-Nadezhdin

Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg

The operating principles, performance and examples of application of a hybrid electron multiplier and an electron-optical array detector are considered. A technique of isotope analysis of actinides in ultra-small samples by thermal ionization mass spectrometry is presented and some analytical results are shown.