

P15-2011-47

А. М. Родин, А. В. Белозеров, Д. В. Ванин, С. Н. Дмитриев,
М. Г. Иткис, Я. Климан, Л. Крупа, А. Н. Лебедев,
Ю. Ц. Оганесян, В. С. Саламатин, И. Сивачек,
Е. В. Чернышева, С. А. Юхимчук

**МАСС-СПЕКТРОМЕТР MASHA —
РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВ НА ПУЧКЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ**

Направлено в журнал «Nuclear Instruments and Methods»

Описан масс-спектрометр MASHA, созданный для идентификации сверхтяжелых элементов. Измерены эффективность и быстродействие в автономном режиме с использованием четырех калиброванных течей инертных газов. На пучке ^{40}Ar измерена суммарная эффективность и быстродействие установки с горячей ловушкой и ЭЦР-источником. Проведены тестовые эксперименты с регистрацией в фокальной плоскости спектрометра альфа-радиоактивных изотопов ртути и радона, синтезированных в реакциях полного слияния: $^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Sm} \rightarrow ^{\text{nat}-xn}\text{Hg} + xn$, $^{40}\text{Ar} + ^{166}\text{Er} \rightarrow ^{206-xn}\text{Rn} + xn$. Определено быстродействие методики и относительные выходы изотопов в указанных реакциях.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Description of mass-spectrometer MASHA, developed for the mass identification of superheavy elements, is given. The efficiency and operation speed in the off-line mode were measured with four calibrated leakages of noble gases. The total efficiency and operation speed of mass-spectrometer with hot catcher and ECR ion source were determined using the ^{40}Ar beam. The test experiment was carried out by measuring the alpha decay of Hg and Rn isotopes, produced in fusion reactions $^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Sm} \rightarrow ^{\text{nat}-xn}\text{Hg} + xn$ and $^{40}\text{Ar} + ^{166}\text{Er} \rightarrow ^{206-xn}\text{Rn} + xn$, in the focal plane of mass-spectrometer. The operation speed of the given technique and relative yields of isotopes in the test reactions were determined.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

ВВЕДЕНИЕ

Открытие новых сверхтяжелых элементов с $Z = 113$ – 118 , а также новых нейтронно-избыточных изотопов элементов 104 – 112 явилось одним из наиболее ярких научных результатов последнего десятилетия. Приоритетные эксперименты были выполнены в Дубне (Россия) на ускорительном комплексе У-400 Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ [1]. Синтез осуществлен в реакциях полного слияния дважды магического ядра ^{48}Ca с нейтронно-избыточными ядрами актиноидов (^{238}U , ^{237}Np , $^{242,244}\text{Pu}$, ^{243}Am , ^{249}Cm , ^{249}Cf , ^{249}Bk).

Относительно высокие времена жизни ряда новых нуклидов позволили провести независимую химическую идентификацию элементов 112 – 115 и выполнить пионерские эксперименты по изучению химических свойств элементов 112 и 114 [2]. Позднее полученные в Дубне результаты синтеза элементов 112 , 114 и 116 были подтверждены в GSI (Дармштадт, Германия) [3, 4] и LBNL (Беркли, США) [5].

Синтез новых нуклидов стимулировал работы по развитию методов их идентификации с использованием классических масс-спектрометрических методов. Однако в отличие от классической масс-спектрометрии измерение масс новых нуклидов должно проводиться *on line*, т. е. непосредственно в ходе их синтеза на пучках ускоренных тяжелых ионов подобно хорошо известному ISOL-методу [7]. Для этой цели в ЛЯР ОИЯИ был спроектирован и изготовлен масс-спектрометр MASHA — Mass Analyzer of Super Heavy Atoms [6]. Уникальные возможности масс-спектрометра связаны с его способностью измерять массы синтезируемых изотопов сверхтяжелых элементов и одновременно регистрировать их альфа-распады и (или) спонтанное деление.

Основная цель настоящей работы — разработка методики измерения масс изотопов элементов 112 и 114 , синтезируемых в реакциях $^{242,244}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$. При этом ключевыми вопросами являлись быстроедействие (время жизни нуклидов от $0,6$ до 30 с) и эффективность (сечение указанных реакций составляет около 5 пб).

СХЕМА УСТАНОВКИ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Установка, схема которой изображена на рис. 1, состоит из мишенного узла с горячей ловушкой, ЭЦР-источника ионов, магнитооптической анализирующей части на основе четырех дипольных магнитов (D1, D2, D3a, D3b),

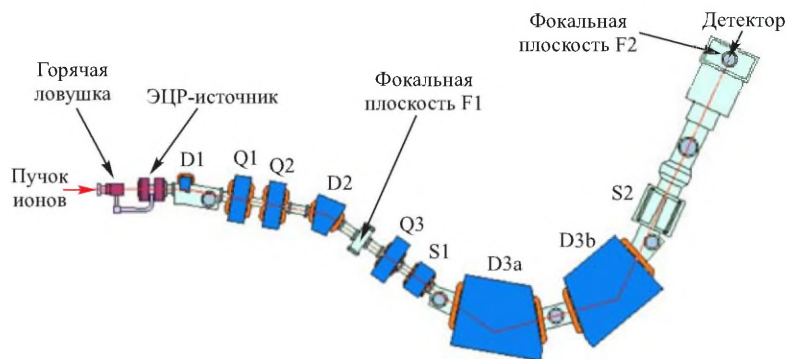


Рис. 1. Схема масс-спектрометра MASHA

трех квадрупольных линз (Q1, Q2, Q3), двух секступольных линз (S1, S2) и системы регистрации в фокальной плоскости. Детально ионно-оптическая схема масс-спектрометра и его характеристики рассмотрены в работе [6]. В данном разделе описаны отдельные узлы установки и представлены результаты измерений основных характеристик.

Источник ионов. Для ионизации продуктов ядерных реакций выбран источник ионов на основе электронного циклотронного резонанса (ЭЦР-источник) с рабочей частотой СВЧ-генератора 2,45 ГГц. Описание такого источника и его характеристики приведены в [8]. В ЭЦР-источнике атомы ионизируются до зарядности $Q = +1$, ускоряются с помощью двухэлектродной системы и формируются в пучок, который затем сепарируется магнито-оптической системой масс-спектрометра. Источник позволяет получать токи ионов, состоящие почти на 100% из однократно ионизованных атомов, а эффективность ионизации для инертных газов достигает 90%.

Оптимизация режимов ЭЦР-источника осуществлялась путем подбора мощности и частоты СВЧ-излучения, а также давления буферного газа в камере ионизатора. В качестве буферного газа использовался гелий, давление которого регулировалось с помощью управляемого пьезоэлектрического вентиля. Оптимальные параметры источника получались при давлении гелия в диапазоне $(1-2) \cdot 10^{-5}$ мбар и мощности СВЧ-генератора ~ 30 Вт.

Мишенное устройство и горячая ловушка. В экспериментах по измерению масс изотопов 112-го и 114-го элементов для инъекции продуктов реакций полного слияния в ЭЦР-источник будет использоваться горячая ловушка. Конструктивно она является частью мишенного узла, который показан на рис. 2. Вначале первичный пучок тяжелых ионов проходит через систему диагностики, состоящей из разрезной диафрагмы и измерительной фольги. Разрезная диафрагма разделена на четыре сектора, каждый из которых измеряет часть тока пучка, не попавшего в отверстие диафрагмы. Эта система

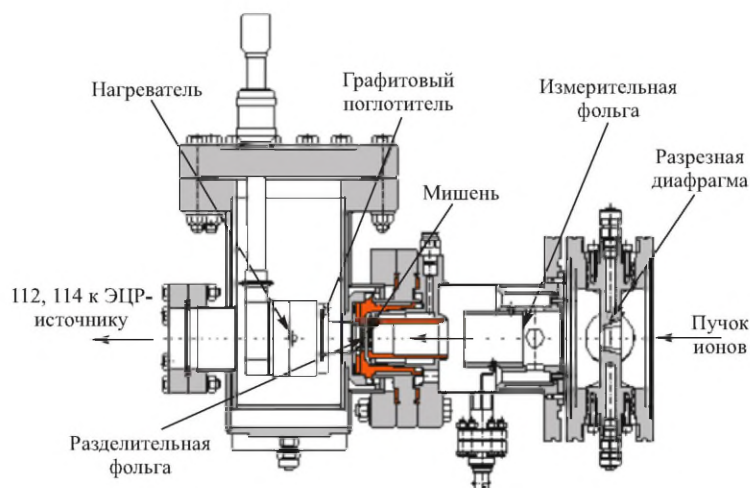


Рис. 2. Мишенный узел с горячей ловушкой

позволяет контролировать положение пучка относительно оси ионопровода. Измерительная фольга (Ti толщиной 2 мкм) укреплена на электрически изолированной рамке после разрезной диафрагмы по ходу пучка и служит для мониторинга тока в процессе эксперимента. После системы диагностики расположена неподвижная мишень, которая крепится между двумя решетками, охлаждаемыми водой и имеющими сотовую структуру с прозрачностью 85%. Диаметр активной части мишени 15 мм. Продукты ядерных реакций, включая ядра сверхтяжелых элементов, вылетают из мишени, проходят разделительную фольгу и останавливаются в графитовом поглотителе, который нагревается до температуры 1500–2000 К. Далее продукты ядерных реакций в виде атомов диффундируют из графитового поглотителя в вакуумный объем горячей ловушки и, двигаясь по трубопроводу, попадают в ЭЦР-источник. Разделительная фольга не позволяет части продуктов реакций двигаться навстречу пучку, исключая их потерю. Оценки показывают, что полное время диффузии из графитового поглотителя и транспорт в объем источника не будет превышать 3 с.

В качестве материала поглотителя в горячей ловушке используется фольга из терморасширенного графита плотностью 1 г/см^3 и толщиной 0,6 мм. Удельная поверхность данного материала достигает $10^3 \text{ м}^2/\text{г}$, а размер частиц в поперечном сечении составляет 0,5–1,0 мм при толщине 30–50 нм. Графитовый поглотитель имеет форму диска диаметром 30 мм, который закрепляется в подвешенном состоянии на расстоянии 30 мм за мишенью по ходу пучка ионов. Поглотитель нагревается тепловым излучением танталовой ленты, че-

рез которую пропускается постоянный ток. Танталовая лента имеет ширину 15 мм, толщину 50 мкм и длину между электрическими зажимами 50 мм. Расстояние между нагревателем и графитовым поглотителем равно 2 мм.

Калибровка по температуре графитового поглотителя была сделана инфракрасным пирометром, установленным снаружи вакуумной камеры мишенного узла до экспериментов на пучке. Пирометром регистрировалось излучение от нагретого графита, которое проходило наружу через сапфировое окно. Геометрия мишенного узла не позволяла контролировать температуру в процессе экспериментов, поэтому в это время температура графитового поглотителя устанавливалась по току нагревателя.

Система регистрации и управления. Для настройки режимов ЭЦР-источника, а также калибровки спектрометра был изготовлен специальный стриповый детектор, предназначенный для регистрации малых постоянных токов. Он представляет собой точную копию фронтальной части кремниевого детектора и выглядит как медная многостриповая структура на стеклотекстолите. Ширина отдельного стрипа равна 1 мм, расстояние между стрипами 0,25 мм, общее число стрипов 192. Во время настройки и калибровки масс-спектрометра этот детектор устанавливается перед кремниевым детектором с помощью вакуумного ввода. Для измерения малых токов для этого детектора был разработан специальный многоканальный электронный модуль [9], в котором используется преобразование тока в напряжение и напряжения в цифровой код. Один модуль обслуживает 64 канала. Нижний порог измеряемого тока для отдельного тракта составляет 60 пА, а верхний предел 5 мкА. Модули монтируются на вакуумной камере с детекторами. Данные с модулей передаются непосредственно в персональный компьютер через специальную плату.

Для регистрации распадов продуктов ядерных реакций в фокальной плоскости масс-спектрометра установлен кремниевый детектор типа «колодец». Плоскость фронтальной части детектора расположена по нормали к направлению пучка. Схема детектора с указанием основных размеров показана на рис. 3. Фронтальная часть детектора перекрывает 240×35 мм фокальной плоскости и состоит из трех кремниевых кристаллов. Каждый кристалл шириной 80 мм и высотой 35 мм разделен на 64 полоски. Для увеличения эффективности регистрации вокруг фронтальной части детектора установлены четыре боковых детектора. Верхний и нижний детекторы состоят из четырех кремниевых кристаллов размером 60×60 мм, каждый из которых разделен на 16 полосок. Левый и правый детектор сделаны из кристаллов 80×35 мм, которые также разделены на 16 полосок. Кристаллы имеют одинаковую толщину 300 мкм с толщиной мертвого слоя на входе не более 50 нм. Вся сборка детектора фокальной плоскости смонтирована в единой металлической рамке. Стандартное рабочее смещение детекторов -40 В, разрешение при регистрации альфа-частиц от источника ^{226}Ra составляет около 30 кэВ.

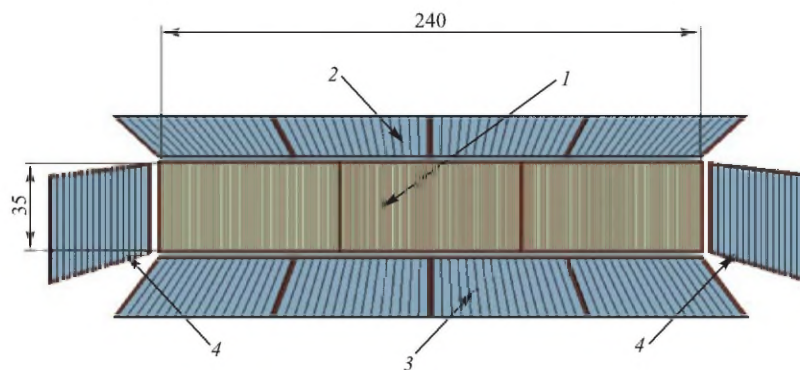


Рис. 3. Кремниевый детектор фокальной плоскости: 1 — фронтальная часть (3 кристалла 80×35 мм по 64 полоски); 2 — верхняя часть (4 кристалла 60×60 мм по 16 полосок); 3 — нижняя часть (4 кристалла 60×60 мм по 16 полосок); 4 — боковые детекторы (2 кристалла 80×35 мм по 16 полосок)

Описанная геометрия детекторной сборки позволяет регистрировать не менее 90 % альфа-частиц, испускаемых при распаде ядра, происходящего в центре фронтальной части детектора.

Сигналы с каждой полоски кремниевого детектора регистрируются независимыми спектрометрическими трактами. Вначале сигналы с полосок поступают на вход шестнадцатиканальных зарядочувствительных предусилителей, которые установлены снаружи вакуумной камеры. С выхода предусилителей сигналы поступают на вход восьмиканальных усилителей-формирователей со встроенным мультиплексором. У каждого канала усилителя есть два независимых тракта усиления, различающихся по величине в 10 раз. Один из них настроен на максимальный диапазон по энергии 20 МэВ и предназначен для регистрации альфа-частиц, другой — на 200 МэВ и предназначен для регистрации осколков деления. Оба тракта имеют фиксированную временную формировку, равную 1 мкс. С выходов усилителей оба сигнала с разными коэффициентами усиления поступают на вход независимых быстрых аналого-цифровых преобразователей со временем преобразования 2 мкс. Электронные блоки, за исключением предусилителей, изготовлены в стандарте САМАС. Данные с крейгов САМАС передаются на основной компьютер, установленный в экспериментальном зале, рядом с масс-спектрометром. Управление этим компьютером, а также чтение и визуализация данных осуществляется по сети с помощью удаленного компьютера, установленного в измерительном центре.

В экспериментах используются две независимые программы сбора и накопления данных: одна для кремниевого детектора, другая для стрипового детектора, измеряющего малые постоянные токи. Программа, обслуживающая

кремниевый детектор, позволяет просматривать одномерные энергетические спектры с каждой полоски, а также двумерные спектры зависимости энергии от номера полоски для каждого кристалла. Для стрипового детектора можно просматривать спектр всех 192 токов в фокальной плоскости, который еже-секундно обновляется.

Система управления отдельными элементами масс-спектрометра, вакуумной системой, ЭЦР-источником сделана на основе стандартного пакета LabVIEW, а горячей ловушкой — на основе QNX. Управление осуществляется с помощью персональных компьютеров, установленных в измерительном центре установки MASHA.

Параметры установки. После монтажа масс-спектрометра на специально созданном канале выведенных пучков ускорителя У-400М первые измерения проведены в автономном режиме. Целью этих измерений была оптимизация режимов ЭЦР-источника и ионно-оптической системы спектрометра. Измерения проводились без горячей ловушки. Продукты ядерных реакций имитировались с помощью специальных калиброванных течей инертных газов, которые добавлялись в гелий, служивший буферным газом. Течи обеспечивали потоки атомов инертных газов с естественным изотопным составом до $(1-3) \cdot 10^{-7}$ мбар·л/с. Вакуумные условия позволяли получать в разрядной камере давление на уровне $5 \cdot 10^{-7}$ мбар при откачке через экстракционное отверстие диаметром 5 мм в отсутствие подачи буферного газа и СВЧ-излучения. При таких условиях ток, извлекаемый из источника, на 90–95 % состоял из гелия, примерно 3 % было ионов инертного газа, поступающего из калиброванной течи, а остальная часть тока была обусловлена примесями остаточных газов и других ионов, возникающих в СВЧ-плазме источника.

На рис. 4 представлен спектр масс изотопов ксенона, измеренный с помощью описанной методики. Массовое разрешение, определенное на поло-

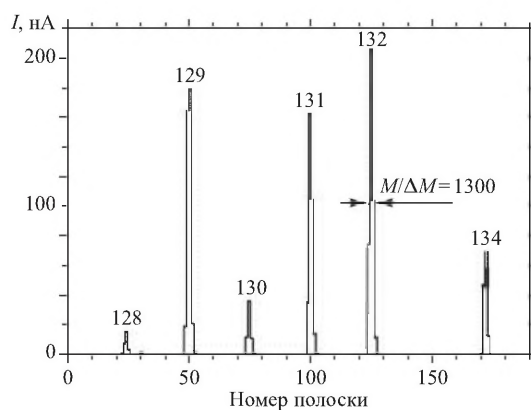


Рис. 4. Массовый спектр изотопов ксенона

вине высоты пика, равно $R = M/\Delta M = 1300$, что близко к расчетной величине.

На рис. 5 приведена зависимость эффективности установки от массового числа инертных газов. Эффективность определялась как отношение суммы интенсивностей ионов всех изотопов данного инертного газа в фокальной плоскости масс-спектрометра (ион/с) к потоку атомов этого газа, поступающего из калиброванной течи в разрядную камеру ЭЦР-источника (атом/с). Погрешность относительных измерений, представленных на данном графике, составляла $\pm 10\%$. Из рисунка видно, что эффективность линейно растет с ростом массового числа инертного газа и для ксенона составляет 84%. Это означает, что для такого элемента, как радон, можно ожидать эффективность не менее 90%.

Одним из основных параметров, определяющих применимость представляемой методики для измерения масс элементов 112 и 114, является время транспорта продуктов реакций полного слияния от момента их торможения в горячем поглотителе до момента их попадания в ЭЦР-источник. (Время ионизации в источнике составляет несколько микросекунд, поэтому в данном случае им можно пренебречь.) Это время складывается из времени диффузии продуктов из горячего поглотителя и времени их движения по вакуумному трубопроводу из объема горячей ловушки до объема источника. Для определения последней составляющей было измерено время откачки газа из объема горячей ловушки через экстракционное отверстие диаметром 5 мм в камере ионизации ЭЦР-источника. Результаты показаны на рис. 6. Процесс откачки газа из объема имеет экспоненциальный характер, поэтому на графике приведены значения постоянных времени τ . Из рисунка видно, что зависимость скорости откачки газа подчиняется закону $v \sim \sqrt{M_g}$ (сплошная линия на графике), где M_g — масса удаляемого газа. Погрешности измерений были

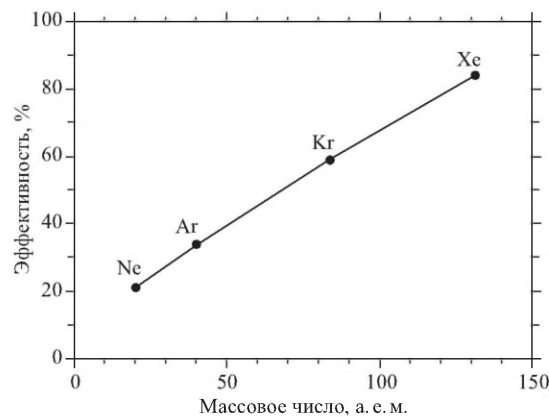


Рис. 5. Зависимость эффективности от массового числа инертного газа

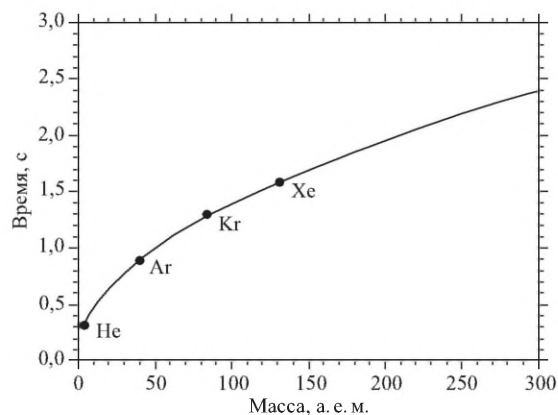


Рис. 6. Зависимость времени откачки камеры ЭЦР-источника и горячей ловушки через экстракционное отверстие ЭЦР-источника от массы инертного газа

приблизительно $\pm 10\%$. Для ксенона концентрация газа уменьшается экспоненциально с постоянной времени $\tau_v(\text{Xe}) \approx 1,6$ с. Следовательно, для массы $A = 202$ (один из изотопов радона) это время составит около 2 с. Это время является одним из факторов, ограничивающих быстрдействие всей методики.

Следующим этапом было определение времени диффузии из горячего графита и полного времени транспорта от горячей ловушки до фокальной плоскости спектрометра. Поскольку элементы 112 и 114 по своим химическим свойствам близки к инертным газам, то для проверки всей методики мы выбрали пучок ^{40}Ar . Для измерения времени транспорта атомов аргона от горячей ловушки до ЭЦР-источника и далее к фокальной плоскости спектрометра использовалась методика прерывания пучка с помощью цилиндра Фарадея, установленного на расстоянии 1 м перед горячей ловушкой. Временная структура пучка формировалась так, что вначале мишень облучалась в течение 60 с пучком, а следующие 60 с пучок перекрывался цилиндром Фарадея. Время прерывания пучка составляло $\approx 0,5$ с, аргон регистрировался стриповым детектором. На рис. 7 представлена зависимость тока аргона в фокальной плоскости спектрометра от времени при торможении пучка в графитовом поглотителе во время облучения и во время паузы, когда пучок перекрывался цилиндром Фарадея. Температура графитового поглотителя в данном измерении была 1300°C . Из рисунка видно, что суммарное время падения интенсивности атомов аргона составляет $\tau(\text{Ar}) \approx 2,5$ с. Эта постоянная времени является суммой времени диффузии атомов аргона из горячего графита, времени их доставки до ЭЦР-источника, а также времени прерывания пучка с помощью цилиндра Фарадея. С учетом времени прерывания

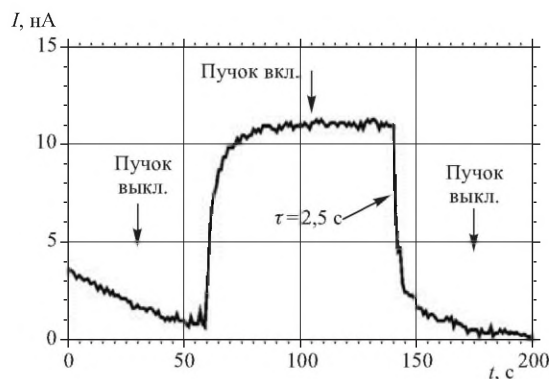


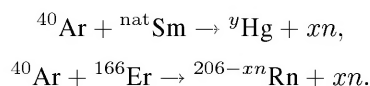
Рис. 7. Зависимость тока аргона в фокальной плоскости спектрометра от времени при измерениях с прерывающимся пучком

пучка и измеренного времени откачки для Ar можно сделать вывод, что постоянная времени диффузии из горячего графита ($t_{\text{гр}} = 1300^\circ\text{C}$) составляет примерно 1 с. В этих же измерениях была определена и эффективность всей установки как отношение интенсивности ионов аргона в фокальной плоскости спектрометра (пон/с) к интенсивности пучка (пон/с). Эффективность для аргона при температуре графита $t_{\text{гр}} = 1300^\circ\text{C}$ составила 25 %. Точность этих измерений была на уровне $\pm 20\%$.

ТЕСТОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ПУЧКЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Целью тестовых экспериментов было моделирование условий, максимально приближенных к условиям реального эксперимента по измерению масс сверхтяжелых элементов. Задача формулировалась следующим образом: зарегистрировать в фокальной плоскости спектрометра альфа-распад изотопов ртути, полученных в реакциях полного слияния. Так как элемент 112 является химическим аналогом ртути, то это было бы хорошей проверкой всей методики. Поскольку основные параметры установки (быстродействие и эффективность) определялись с использованием калиброванных течей инертных газов и на прямом пучке аргона, то было решено дополнительно проверить эти данные в модельной реакции полного слияния с синтезом альфа-радиоактивных изотопов радона.

Синтез изотопов ртути и радона осуществлялся в следующих реакциях полного слияния:



Энергия пучка ^{40}Ar , ускоренного на циклотроне У-400М, составляла 284 МэВ. Точность определения энергии по времени пролета с помощью датчиков «pick-up» была $\pm 2,5\%$. Энергия менялась с помощью поглотителей из титановой фольги, которые устанавливались в той же рамке, что и мишень. В эксперименте использовались неподвижные мишени из природного $^{\text{nat}}\text{Sm}$ и моноизотопа ^{166}Er со степенью обогащения 98,5%. Мишени в виде окислов Sm_2O_3 и Er_2O_3 наносились на подложку из титана толщиной 3,14 мкм методом молекулярного электроосаждения. Диаметр рабочей области мишени составлял 15 мм. Со стороны графитового поглотителя мишени закрывались титановой фольгой толщиной 2 мкм, закрепленной на расстоянии 3 мм от поверхности мишени. Эта фольга служила тепловым экраном, защищающим вещество мишени от разрушения за счет нагрева излучением графитового поглотителя.

В эксперименте с самарием толщина мишени была $0,63 \text{ мг/см}^2$ (в пересчете на Sm), энергия пучка ^{40}Ar на половине толщины мишени равнялась 255 МэВ. Полный интеграл пучка, прошедшего через мишень, составил $3,7 \cdot 10^{17}$ ионов. Температура графитового поглотителя в этом измерении поддерживалась на уровне 1600°C . В фокальной плоскости продукты реакции полного слияния регистрировались кремниевым детектором типа «колодец», который был описан выше. Так как энергия продуктов реакции после вылета из ЭЦР-источника составляет всего 30 кэВ, то все они останавливались в мертвом слое фронтальной части кремниевого детектора (толщина мертвого слоя $\sim 50 \text{ нм}$) и потом испытывали альфа-распад. Около 50% этих альфа-частиц регистрировались той же полоской детектора, в которой они затормозились. В итоге формировалась двумерная матрица зависимости энергии альфа-частиц от номера полоски. Поскольку номер полоски однозначно связан с координатой X фокальной плоскости, то по значению поля в анализирующих дипольных магнитах масс-спектрометра определялась масса, соответствующая этой координате. Спектр альфа-частиц давал дополнительную информацию о зарегистрированном продукте.

На рис. 8 показан двумерный спектр альфа-частиц изотопов ртути в зависимости от номера полоски фронтальной части кремниевого детектора. Массовый спектр изотопов ртути, полученный после проекции двумерного спектра на ось X (номер полоски) показан на рис. 9. Из спектра видно, что интенсивность изотопов монотонно падает с уменьшением массового числа. Провал для массового числа $A = 184$ связан с тем, что вилка по отношению к альфа-распаду для этого изотопа намного меньше (1,3%), чем для соседних изотопов (11,7% для ^{183}Hg). То, что в спектре присутствуют изотопы с временами жизни 2,56 с (^{180}Hg) и 3,6 с (^{181}Hg), а их относительный выход ложится на плавную зависимость от массового числа, косвенно свидетельствует о быстродействии всей методики, которое, по-видимому, не более 4 с.

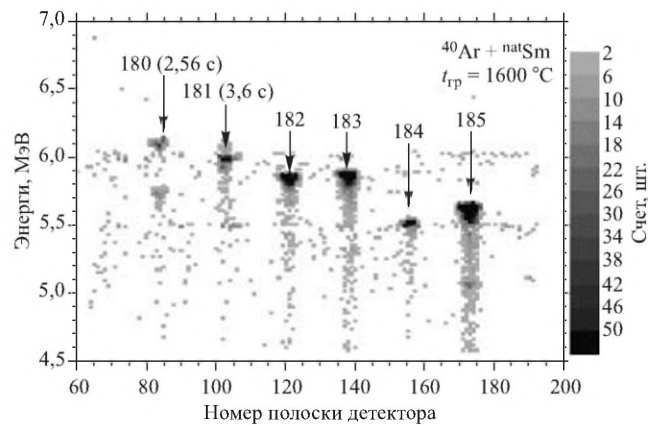


Рис. 8. Двумерный спектр энергий альфа-частиц после распада изотопов ртути в зависимости от номера полоски фронтальной части детектора фокальной плоскости

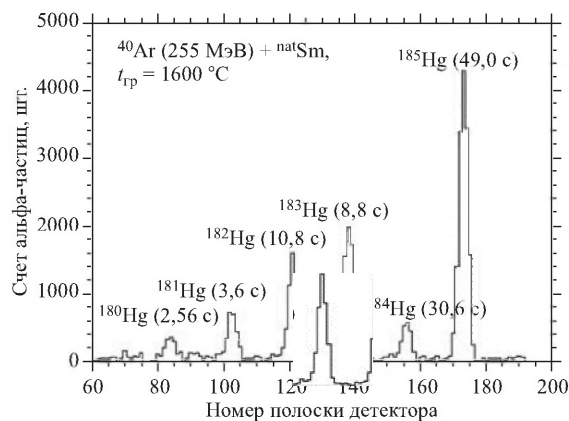


Рис. 9. Массовый спектр изотопов ртути

На рис. 10 показан альфа-спектр для массового числа $A = 182$. В спектре кроме линии, отвечающей распаду ^{182}Hg ($E = 5860$ кэВ), видна линия, соответствующая распаду дочернего ядра ^{178}Pt ($E = 5440$ кэВ). Из спектра видно, что измеренные энергии альфа-частиц совпадают с табличными значениями с точностью 5–6 кэВ (табличные значения даны в скобках), а полная ширина линий на половине высоты составляет ≈ 40 кэВ.

Изотопы радона синтезировались в реакциях полного слияния $^{40}\text{Ar} + ^{166}\text{Er}$ при энергиях пучка 202, 217 и 231 МэВ. Толщина мишени была $0,67$ мг/см² (в пересчете на Er), изотопная чистота мишени составляла 98%. На рис. 11

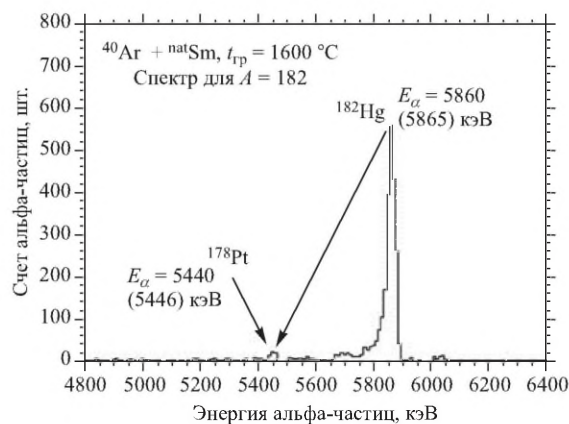


Рис. 10. Энергетический спектр альфа-частиц для массы $A = 182$

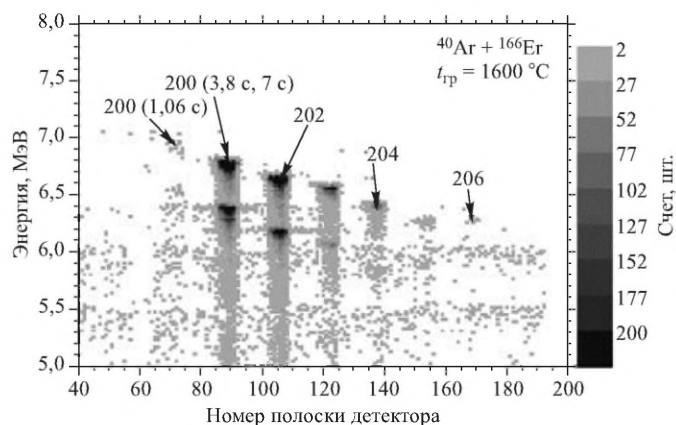


Рис. 11. Двумерный спектр энергий альфа-частиц, испущенных при распаде изотопов радона, в зависимости от их позиции в фокальной плоскости спектрометра

представлен двумерный спектр энергий альфа-частиц изотопов радона в зависимости от номера полоски фронтальной части кремниевого детектора, а на рис. 12 — проекция двумерного спектра на ось X (номер полоски). Значительный выход изотопов ^{206}Rn , ^{205}Rn и ^{204}Rn связан, по-видимому, с реакциями на изотопных примесях мишени ^{166}Er . В энергетическом спектре для массы $A = 202$, приведенном на рис. 13 в качестве примера, присутствуют две линии, отвечающие распаду ^{202}Rn (6635 кэВ) и его дочернему продукту ^{198}Po (6180 кэВ). Как и при регистрации распада изотопов ртути, здесь положения линий совпадают с табличными с точностью 5–6 кэВ.

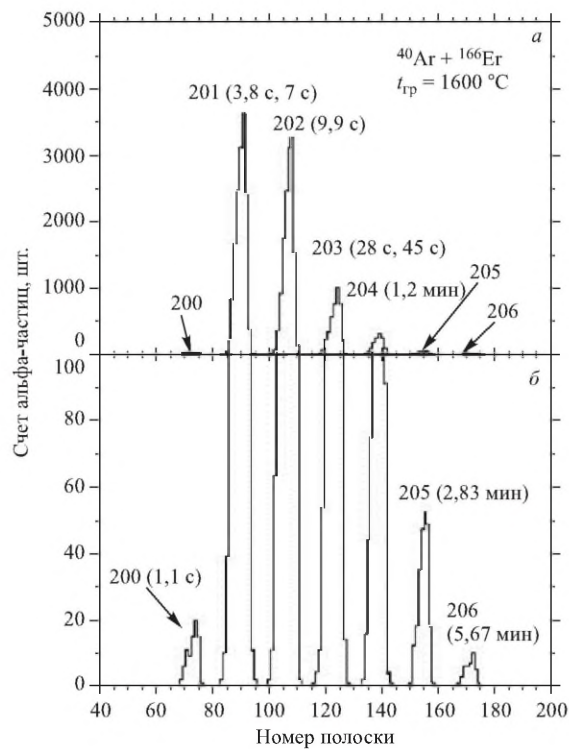


Рис. 12. Массовый спектр изотопов радона

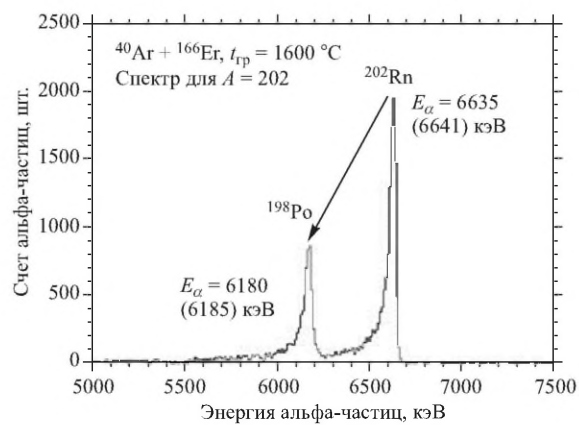


Рис. 13. Энергетический спектр альфа-частиц для массового числа $A = 202$

На рис. 14 приведены выходы изотопов радона, измеренные при энергии пучка ^{40}Ar 202 МэВ. Полный поток ионов ^{40}Ar через мишень составил $N = 4 \cdot 10^{17}$. Обращает на себя внимание резкое падение выхода изотопа ^{200}Rn по сравнению с соседним изотопом ^{201}Rn . Это косвенно свидетельствует о том, что время доставки продуктов реакций из горячего графита до ЭЦР-источника больше 1 с (период полураспада ^{200}Rn $\tau = 1,1$ с), но, по-видимому, меньше 5 с (среднее значение периода полураспада изомерного и основного состояний ^{201}Rn составляет 5,4 с).

В таблице приведены выходы изотопов радона для трех значений энергии пучка $E(^{40}\text{Ar})$ 202, 217 и 231 МэВ. Данные нормированы на полный поток ионов ^{40}Ar через мишень $N = 4 \cdot 10^{17}$.

К сожалению, из полученных результатов не удалось извлечь данных об эффективности регистрации продуктов реакций полного слияния. Основная причина — отсутствие экспериментальных данных о сечениях образования альфа-радиоактивных изотопов, получающихся в представленных реакциях.

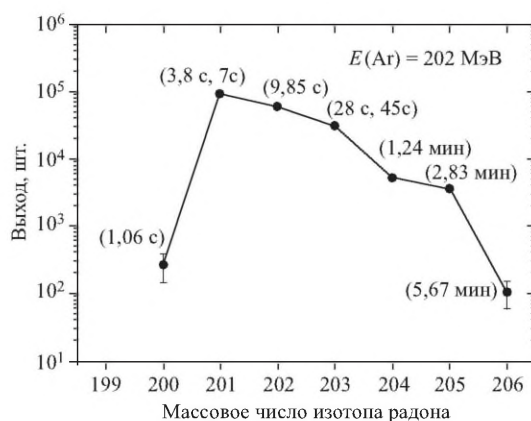


Рис. 14. Относительные выходы изотопов радона

Выходы изотопов радона (шт.) в реакции $^{40}\text{Ar} + ^{166}\text{Er}$ при разных значениях энергии пучка в лабораторной системе

$E(\text{Ar})$, МэВ	^{199}Rn	^{200}Rn	^{201}Rn	^{202}Rn	^{203}Rn	^{204}Rn	^{205}Rn	^{206}Rn
202		266	90729	58535	30309	5169	3575	105
217		1597	10635	5603	4047	969	243	
231	21	94	378	279	140	24		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием калиброванных течей инертных газов произведена настройка ионно-оптической системы спектрометра MASHA и отлажены режимы работы ЭЦР-источника ионов. В автономном режиме произведены измерения эффективности и быстродействия без горячей ловушки. На ускоренном пучке ^{40}Ar произведена отладка режимов горячей ловушки, определены эффективность и быстродействие методики.

В реакциях полного слияния $^{40}\text{Ar} + \text{natSm}$ и $^{40}\text{Ar} + ^{166}\text{Er}$ синтезировались изотопы ртути и радона, которые по ряду химических свойств (энергия адсорбции на поверхности) близки к свойствам элементов 112 и 114. В экспериментах применялась методика on-line сепарации продуктов ядерных реакций с использованием горячей ловушки. Спектры альфа-частиц после распада изотопов в фокальной плоскости регистрировались кремниевым детектором типа «колодец». Определено быстродействие установки, которое составило ≤ 4 с. Измерены относительные выходы изотопов радона при трех значениях энергии аргона. Полученные результаты свидетельствуют о том, что достигнутые параметры масс-спектрометра MASHA близки к проектным, и установка готова к экспериментам по измерению масс сверхтяжелых элементов.

Благодарности. В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить группу сотрудников конструкторского бюро ЛЯР ОИЯИ во главе с Г. Н. Ивановым за разработку комплекса мишенного блока и горячей ловушки, сотрудников инженерно-технических служб ЛЯР за монтаж и помощь в наладке масс-спектрометра на новом канале выведенных пучков циклотрона У-400М, коллектив сотрудников циклотрона У-400М за обеспечение работы ускорителя во время экспериментов, руководство компании УНИХИМТЕК (г. Климовск Московской обл.) за предоставление образцов терморасширенного графита, а также Г. К. Востокина за изготовление мишеней и В. Д. Кулика за подготовку установки к эксперименту. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 09-02-12225-офи_м).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Oganessian Yu.* Heaviest nuclei from ^{48}Ca -induced reactions // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2007. V. 34. P. 165–242.
2. *Oganessian Yu. Ts., Dmitriev S. N.* Superheavy elements in D. I. Mendeleev's Periodic Table // Russ. Chem. Rev. 2009. V. 78, No. 12. P. 1077–1087.
3. *Hofmann S. et al.* The reaction $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{286}112^*$ studied at the GSI-SHIP // Eur. Phys. J. A. 2007. V. 32. P. 251–260.

4. *Düllmann Ch. E. et al.* Production and decay of element 114: high cross sections and the new nucleus ^{277}Hs // *Phys. Rev. Lett.* 2010. V. 104. P. 252701.
5. *Stavsetra L. et al.* Independent verification of element 114 production in the $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu}$ reaction // *Phys. Rev. Lett.* 2009. V. 103. P. 132502.
6. *Oganessian Yu. Ts. et al.* The project of the mass separator of atomic nuclei produced in heavy ion induced reactions // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2003. V. 204. P. 606–613.
7. *Kugler E. et al.* The new CERN-ISOLDE on-line mass-separator facility at the PS-Booster // *Nucl. Instr. Meth. B.* 1992. V. 70. P. 41–49.
8. *Efremov A. et al.* // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2003. V. 204. P. 368–371.
9. *Кузнецов А. Н., Кузнецов Е. А.* Многоканальный измеритель малых токов. Препринт ОИЯИ Р13-2009-108. Дубна, 2009. 6 с.

Получено 18 мая 2011 г.

Редактор *Е. В. Сабаева*

Подписано в печать 29.06.2011.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,13. Уч.-изд. л. 1,35. Тираж 250 экз. Заказ № 57358.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/