

# Газоразрядный ионный источник для электромагнитного масс-сепаратора на пучке циклотрона тяжелых ионов

(Часть первая)

Н. И. ТАРАНТИН, А. В. ДЕМЬЯНОВ, Н. С. ИВАНОВ, А. П. КАВАЧЕНКО

УДК 621.384.8

В ядерной физике для разделения смеси радиоактивных изотопов очень часто используются электромагнитные масс-сепараторы. Это позволяет однозначно определять массовые числа исследуемых ядер и существенно упрощает изучение их радиоактивного распада. Однако возможности применения обычных масс-сепараторов для идентификации и изучения короткоживущих ядер ограничены, потому что для проведения электромагнитной сепарации, как правило, требуется сравнительно большое время, измеряемое минутами, а иногда и десятками минут. Поэтому не случайно, что в последнее время начали разрабатываться электромагнитные масс-сепараторы, работающие непосредственно на пучках заряженных частиц или нейтронов и обладающие малым временем сепарации. Подобные сепараторы соединяются с ускорителем заряженных частиц или ядерным реактором таким образом, что атомы, образующиеся в ядерных реакциях, быстро вводятся в ионный источник непрерывно действующего сепаратора. Далее, как и в обычном сепараторе, атомы ионизуются, а образовавшиеся ионы ускоряются, формируются в пучок и сортируются по массам магнитным полем. Измерение и регистрация излучений, сопровождающих распад сепарированных радиоактивных атомов, производятся сразу по мере их сепарации детекторами, расположеннымными в приемной камере сепаратора.

Первая установка такого типа появилась в 1951 г. [1]. Она представляла собой масс-спектрометр, ионный источник которого был соединен металлической трубкой с контейнером, содержащим смесь урана и карбоната аммония. Инертные газы, образующиеся при делении урана нейтронами, быстро диффундировали из толщи вещества и переносились по трубке в источник. Сепарированные ионы принимались на тонкую алюминиевую фольгу, служившую входным окном счетчика  $\beta$ -частиц. С помощью этой методики из продуктов деления урана были выделены и исследованы короткоживущие изотопы криптона и его продукты распада с временем жизни 10 сек и более.

Хотя после первых опытов прошло более 15 лет, однако широкий интерес к установкам такого типа появился лишь в самое последнее

время. Не останавливаясь на развитии этого нового методического направления (см., например, [2—4]), отметим, что электромагнитные масс-сепараторы и масс-спектрометры на пучках создаются в настоящее время во многих физических лабораториях и некоторые из них уже работают. К числу установок, регулярно используемых в физических исследованиях, следует отнести в первую очередь масс-спектрометр, разработанный в лаборатории проф. Р. Бернаса [5]. Этот масс-спектрометр оборудован специальным термоионным источником, позволяющим осуществлять масс-спектрометрическую идентификацию щелочных продуктов ядерных реакций, вызываемых протонами высоких энергий, с периодами полураспада более нескольких десятых секунды.

В настоящее время и в ЛЯР ОИЯИ электромагнитный масс-сепаратор [6] работает на пучке тяжелых ионов циклотрона У-300. Этот сепаратор используется для идентификации и исследования свойств радиоактивных ядер, образующихся в реакциях под действием ускоренных тяжелых ионов.

Разработка и созданию этого электромагнитного сепаратора предшествовали опыты по выявлению физических основ возможных вариантов быстродействующего ионного источника [7, 8] и изучению некоторых специфических особенностей работы газоразрядного источника в режиме, близком к режиму работы на пучке [9].

В настоящей статье дается описание и приводятся некоторые характеристики газоразрядного источника для электромагнитного масс-сепаратора, работающего на пучке циклотрона тяжелых ионов.

Выбор типа и конструкции ионного источника для масс-сепаратора определялся в нашем случае следующими обстоятельствами.

Во-первых, для того чтобы иметь возможность получать ионы многих элементов, необходимо было использовать газоразрядный ионный источник, который, как известно, не имеет узкой селективности ионизации в зависимости от ионизационного потенциала в отличие, например, от термоионизационного источника.

Во-вторых, для отделения продуктов реакций, образующихся под действием тяжелых

шени, от вещества мишени и введения их в линейный источник представлялось целесообразным использовать широко применяемую в экспериментах с энергичными тяжелыми ионами методику выбивания. В случае ионов улдерода — аргона, ускоренных до энергии 8—9 МэВ на нуклон, пробеги продуктов реакции, обусловленные передаваемым бомбардирующей частицей импульсом, достигают нескольких миллиграммов вещества на 1 см<sup>2</sup>, поэтому мишень такой толщины не вызывает существенного поглощения выбиваемых атомов. С другой стороны, в силу больших ионизационных потерь энергии тяжелыми ионами и относительно малого их пробега такая мишень является достаточно толстой с точки зрения использования способности ускоренных тяжелых ионов вызывать ядерные реакции.

В-третьих, для остановки выбитых атомов было решено применить нагретую до высокой температуры пластинку — стопор из молибдена, tantalа или вольфрама, обеспечивающую, согласно результатам работ [7, 8], быструю диффузию и испарение вбитых в пластинку атомов.

В-четвертых, из соображений упрощения конструкции ионного источника представлялось целесообразным использовать нагретый до высокой температуры металлический стопор как катод-эмиттер электронов в газоразрядном источнике. В этом случае в результате ионной бомбардировки поверхность катода-стопора очищается от окисных соединений, которые могут приводить к снижению скорости испарения [8] вбитых атомов.

Устройство ионного источника представлено на рис. 1 и 2.

Разрядная камера выполнена из молибдена. Катод полуцилиндрической формы с радиусом кривизны  $r_k = 11 \text{ мм}$  изготовлен из листового tantalа толщиной 0,2 мм, крепится клиновидными прижимами к молибденовым держателям и имеет эмиссионную щель размером  $30 \times 1 \text{ мм}^2$ , совпадающую с щелями того же размера в изоляторе и разрядной камере. Анод сделан из вольфрамовой проволоки диаметром 1 мм; изоляторы катода и анода — из нитрида бора. Держатель мишени выполнен из меди и охлаждается водой. Термовые экраны перед держателем сделаны из листового молибдена. Вакуумная камера электромагнитного сепаратора соединена непосредственно с одним из выводов пучка ускоренных ионов циклотрона.

Принцип действия ионного источника сводится к следующему. Между катодом, нагретым

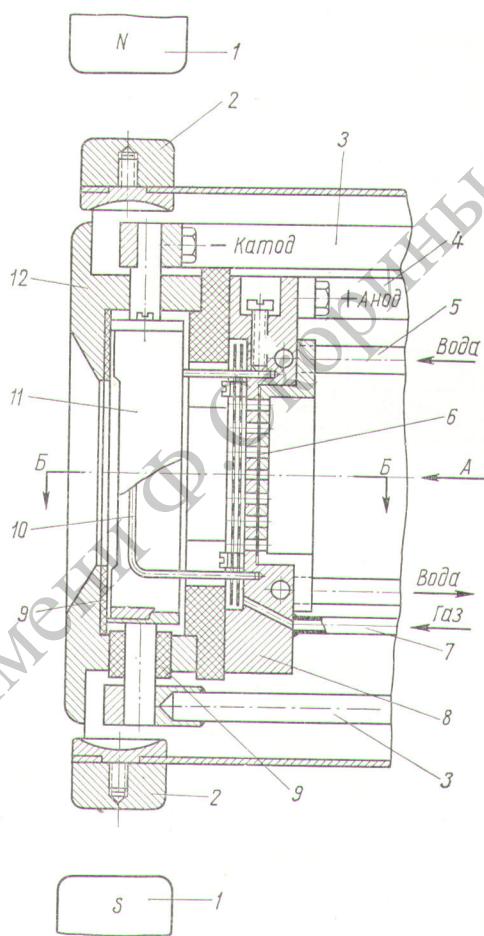


Рис. 1. Схема ионного источника:

1 — электромагнит; 2 — промежуточные полюсные наконечники; 3 — токовые шины катода; 4 — токовая шина анода; 5 — трубка подачи воды; 6 — мишень; 7 — трубка подачи газа; 8 — держатель мишени и анода; 9 — электрические изоляторы катода; 10 — анод; 11 — катод (он же стопор продуктов ядерных реакций); 12 — разрядная камера.

выпрямленным током до температуры  $\approx 2500^\circ \text{C}$ , и анодом зажигается электрический газовый разряд на аргоне. Ускоренные тяжелые ионы бомбардируют тонкую мишень по направлению стрелки  $A$ , выбивая из мишени продукты ядерных реакций. Выбитые атомы пролетают через плазму разряда и внедряются в нагретый катод-стопор на глубину до нескольких микрон. Внедренные атомы диффундируют к поверхности катода-стопора и испаряются. Далее, как и в обычном газоразрядном источнике, поступившие в разрядную камеру атомы ионизуются; образовавшиеся ионы извлекаются через эмиссионную щель и ускоряются до стро-

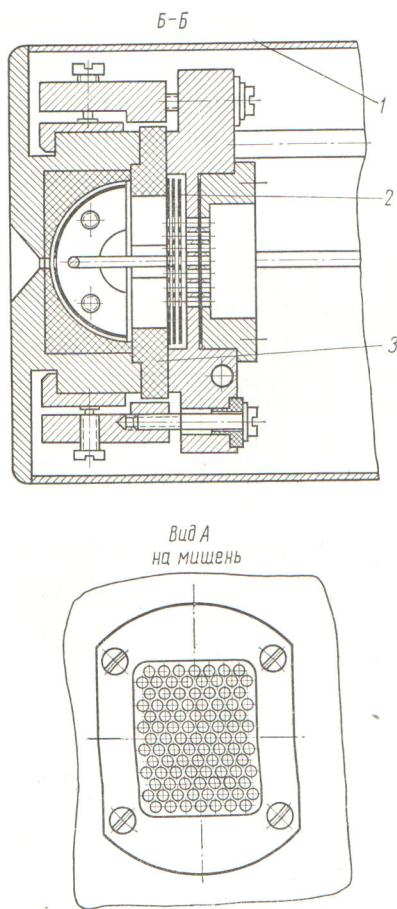


Рис. 2. Схема разреза *Б-Б* и вид *А* на мишень ионного источника:

1 — корпус источника; 2 — тепловые экраны; 3 — электрический изолятор анода.

в качестве ионных источников в литературе по существу нет, поэтому представлялось целесообразным исследовать основные характеристики ионного источника описанной выше конструкции.

Особенность инверсо-магнетрона заключается в том, что электрическое поле вблизи катода при отсутствии плазмы в разрядном промежутке относительно мало. Поэтому условия для отбора от катода электронов в инверсо-магнетроне хуже, чем в случае, например, плоскопараллельных электродов, и еще хуже, чем в случае прямого варианта магнетрона. К тому же минимальное значение разности потенциалов, при которой электроны, испущенные катодом, достигают анода при наличии осевого магнитного поля, оказывается значительно выше для инверсо-магнетрона.

Эти особенности вакуумного инверсо-магнетрона не могли рассматриваться как положительные при попытке использовать его в качестве ионного источника. Однако ожидалось, что в случае газового наполнения различия двух вариантов магнетрона должны будут сгладиться из-за эффекта рассеяния электронов на атомах газа и изменения распределения потенциала между электродами в результате образования плазмы.

Это давало основания предполагать улучшение стартовых условий и условий для интенсификации разряда в инверсо-магнетронном варианте источника до уровня условий широко используемого газоразрядного источника магнетронного типа. Как показали исследования основных характеристик обращенного варианта источника магнетронного типа, эти предположения подтвердились.

В экспериментах [10] выяснилось, что газоразрядный источник ионов инверсо-магнетрона по своим основным качествам: стабильности и надежности работы, эффективности ионизации, условиям формирования ионного пучка — вполне удовлетворяет общим требованиям, предъявляемым к ионным источникам. Оставалось выяснить возможность его использования на пучке циклотрона тяжелых ионов.

На первом этапе исследований, в экспериментах по проверке эффективности и разрешающей способности источника и масс-сепаратора, мы ограничились опытами только со сравнительно долгоживущими продуктами реакций. Использовались радиоактивные изотопы радона  $Rn^{206-212}$  с периодами полураспада более 5 мин. Эти изотопы радона получались путем облучения 5-микронной платиновой фольги

го определенной энергии, обеспечивающей превращение ионов по массам магнитным анализатором масс-сепаратора.

Представленный на рис. 1 и 2 ионный источник можно рассматривать как обращенный вариант газоразрядного источника магнетронного типа. Для источника этого типа характерно наличие двух вложенных один в другой цилиндрических электродов, из которых внешний используется как катод, и однородного магнитного поля, параллельного оси цилиндров. Отличие описываемого ионного источника от классического варианта газонаполненного инверсо-магнетрона состоит в том, что в нашем случае вместо внешнего цилиндра используется полуцилиндр, а анод (внутренний цилиндрический электрод) расположен некоаксиально с катодом (в нашем случае наименьшее расстояние между анодом и катодом варьировалось от 3 до 10 мм).

Публикаций по теории и практике использования газонаполненных инверсо-магнетронов

с природным содержанием изотопов ионами  $O^{16}$  и  $O^{18}$  с энергией 80—90 МэВ в реакциях:



где  $x = 4 \div 5$ .

Непосредственно перед экспериментом ионный источник настраивался на максимум эффективности по примеси ксенона, добавленной в основной газ — аргон; затем магнитное поле перестраивалось на сепарацию ионов с массами 195—225; включался циклотрон, и одновременно с облучением проводилась электромагнитная сепарация. Радиоактивные изотопы радона принимались на алюминиевую или медную фольгу, укрепленную на приемнике сепаратора. После окончания облучения фольга извлекалась из приемной камеры, и  $\alpha$ -активность собранных изотопов радона и их продуктов распада измерялась спиритуальным ZnS-счетчиком. Эффективность сепарации определялась путем сопоставления активности, собранной на приемнике, с  $\alpha$ -активностью продуктов реакций (в основном изотопов радона и их продуктов распада), выбитых из мишени в ионный источник. Для этого в дополнительных опытах непосредственно за держателем мишени, перед тепловыми экранами, располагалась алюминиевая фольга, задерживающая выбиваемые из мишени продукты реакций. Ионный источник в этих экспериментах не включался. После облучения фольга вынималась для измерения  $\alpha$ -активности.

Как показали эксперименты, эффективность сепарации изотопов радона в экспериментах на пучке оказалась равной 40—60%.

Следует заметить, что приблизительно 20% выбиваемых из мишени атомов оседало на боковых стенках отверстий в держателе мишени из-за непараллельности пучка выбиваемых атомов. Эти потери имелись всегда при использовании методики выбивания, и при определении эффективности масс-сепаратора, как можно понять из схемы экспериментов, они не учитывались.

Для определения разрешения при работе на пучке приемная фольга разрезалась на полоски шириной 3 мм, и  $\alpha$ -активность каждой полоски измерялась. На рис. 3 приводится один из примеров распределения  $\alpha$ -активности изотопов радона и их продуктов распада на приемнике сепаратора, расположенным под углом 45° к направлению главного луча. Представлены кривые, полученные в разные момен-

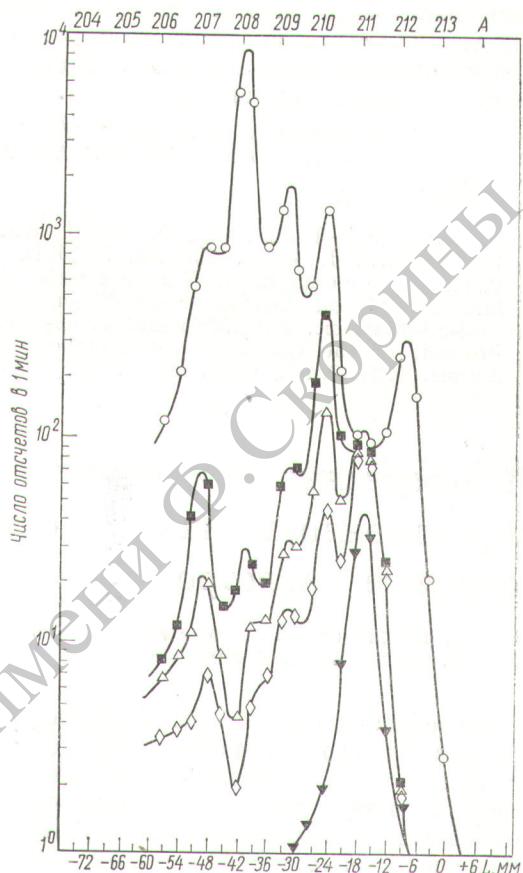


Рис. 3. Распределение  $\alpha$ -активности изотопов радона и их продуктов распада на приемнике электромагнитного масс-сепаратора по истечении 10 мин (○), 4 ч (■), 8 ч (△), 12 ч (▽) и 35 ч (▼) после окончания часовой сепарации — облучения  $Pt + O^{18}$ .

ты времени после окончания одночасовой сепарации — облучения  $Pt + O^{18}$  током ионов кислорода 0,5 мкА. За начало отсчета расстояния на приемной фольге взято положение пучка ионов  $TaO_2^+$  ( $A = 213$ ), образующихся в ионном источнике наряду с ионами  $Ta^+$ ,  $TaO^+$ . Положение массы  $A = 213$  использовано и для калибровки верхней шкалы. Разрешение при работе на пучке равно  $\sim 500$  на полувысоте пиков.

Измерение времени, необходимого для обратной диффузии, испарения и ионизации внедренных в катод-стопор атомов, потребовало создания специальной измерительной методики, описание которой вместе с результатами измерений будет дано отдельно.

В заключение авторы выражают благодарность академику Г. Н. Флорову и Е. Д. Воробьеву, под руководством которых выполня-

лась настоящая работа. Авторы благодарны Ю. А. Дьячихину за участие в конструировании ионного источника и Ю. Г. Зорину за помощь в проведении экспериментов.

Поступила в Редакцию 19/IX 1968 г.  
В окончательной редакции 30/XII 1968 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. O. Kofoed-Hansen, K. Nielsen. Mat. Fys. Medd. Vid. Selsk., 26, No. 7 (1951).
2. Г. Н. Флёрков, Н. И. Тарантин. Abhandlungen der Deutschen Akademie Wissenschaften zu Berlin. (Mathem., Phys., Techn.), 1, 49 (1967).
3. Proceed. of the Conference on Isotope Separators Archus, 1965. Nucl. Instr. Meth., 38 (1965).
4. Proceed. of the Lysekil Symposium, 1966. Arkiv fys., 36 (1967).
5. R. Klapisch, R. Bergnas. Nucl. Instrum. and Methods, 38, 291 (1965).
6. N. I. Tagantsev et al. Там же, 38, 103 (1965); Н. И. Тарантин, А. В. Демьянин. «Приборы и техника эксперимента», 1, 41 (1966); А. В. Демьянин и др. Там же, 2, 28 (1966).
7. Н. И. Тарантин, В. В. Гордеев, А. В. Демьянин. «Атомная энергия», 22, 280 (1967).
8. Б. Амов, В. П. Пермяков, Н. И. Тарантин. Препринт ОИЯИ, Р13-3019. Дубна, 1966.
9. А. В. Демьянин и др. См. настоящий выпуск, стр. 308.
10. Н. И. Тарантин и др. Препринт ОИЯИ, Р13-4061, Дубна, 1968.

## Исследование возможности применения ионного источника магнетронного типа в электромагнитном масс-сепараторе на пучке циклотрона

А. В. ДЕМЬЯНОВ, А. П. КАБАЧЕНКО, О. П. ЛОГИНОВ,  
Н. И. ТАРАНТИН, Х. ТЫРРОФ

УДК 621.384.8

Потребности быстрой идентификации и исследования свойств короткоживущих радиоактивных ядер привели в последнее время к необходимости создания специальных быстродействующих масс-спектрометров и электромагнитных сепараторов изотопов, работающих на пучках ускорителей заряженных частиц или ядерных реакторов (см., например, обзоры [1, 2]).

Отличительная особенность установок этого типа состоит в том, что образующиеся в ядерных реакциях радиоактивные атомы быстро вводятся в ионный источник непрерывно действующего масс-спектрометра или сепаратора, а регистрация радиоактивного распада сепарированных атомов и измерение характеристик их излучений проводятся по мере разделения с помощью счетно-измерительной аппаратуры, установленной внутри приемной камеры. Условия работы ионного источника в таких установках значительно отличаются от условий в обычных спектрометрах или сепараторах изотопов. Поэтому в связи с созданием в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ быстродействующего электромагнитного масс-сепаратора на пучке циклотрона тяжелых ионов нами были предприняты исследования одного из типов газоразрядного источника с целью уточнения специфики его работы в режиме, близком к режиму работы на пучке. Эксперименты

проводились с источником магнетронного типа [3], аналогичным источнику [4].

Одна из особенностей работы электромагнитного масс-сепаратора на пучке ускорителя заряженных частиц состоит в том, что число радиоактивных атомов, образующихся в ядерных реакциях и подлежащих электромагнитной сепарации, очень мало. Поведение в ионном источнике таких малых количеств вещества, измеряемых миллионными долями микрограмма, может существенно отличаться от поведения более весомых количеств. Это, в частности, связано с тем, что разрозненные атомы не образуют единой твердой или жидкой фазы и, например, их испарение не характеризуется соответствующими макроскопическими физико-химическими константами данного вещества: температурой и теплотой парообразования. В этом случае определяющими являются не процессы испарения и конденсации данного вещества, а процессы десорбции и сорбции данных атомов на различных веществах, входящих в конструкцию ионного источника. При этом не исключена полная адсорбция ультрамалых количеств. Поэтому температурный и другие режимы работы ионного источника, оптимальные, например, для обеспечения максимальной эффективности, могут быть различными при работе с макро- или ультрамикроколичествами одного и того же вещества.