

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. Флёрв, 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. Klarisch, R. Bernas. Nucl. Instrum. and Methods, 38, 291 (1965).
6. Н. И. Тарантин et al. Там же, 38, 103 (1965); Н. И. Тарантин, А. В. Демьянов. «Приборы и техника эксперимента», 1, 41 (1966); А. В. Демьянов и др. Там же, 2, 28 (1966).
7. Н. И. Тарантин, В. В. Гордеев, А. В. Демьянов. «Атомная энергия», 22, 280 (1967).
8. Б. Амов, В. П. Пермяков, Н. И. Тарантин. Препринт ОИЯИ, P13-3019, Дубна, 1966.
9. А. В. Демьянов и др. См. настоящий выпуск, стр. 308.
10. Н. И. Тарантин и др. Препринт ОИЯИ, P13-4061, 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. ТЫРРОФФ

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.



Выявлению этого возможного различия была посвящена первая часть настоящей работы.

Электрический разряд в ионном источнике горел на аргоне, к которому в небольшой доле добавлялся ксенон или радиоактивный свинец. В этом случае, как и при работе на пучке ускорителя, параметры газового разряда определялись поступлением главного компонента питающего газа (аргона) и практически не зависели от примесей. Характерные зависимости взаимной связи параметров разряда для используемого в опытах источника приведены в работе [3].

Эти зависимости отражают основные закономерности разряда в плазменных ионных источниках с поперечным магнитным полем, наиболее детально исследованные в работе [5]. Ток разряда  $I_{a-k}$ , представляющий собой в основном ток испускаемых катодом электронов, определяется электронной эмиссией катода и напряженностью электрического поля, отсасывающего эмиттируемые электроны. Величина электронной эмиссии в свою очередь определяется размерами катода и его температурой, зависящей от тока накала катода  $I_k$ , а напряженность отсасывающего поля — величиной и распределением в разрядном промежутке приложенной разности потенциалов анод — катод  $V_{a-k}$ . Распределение потенциала зависит, как известно, от заполнения разрядного промежутка плазмой, которое в конечном счете зависит от скорости поступления нейтральных атомов в разряде  $\kappa$ , потока  $I_{a-k}$ , энергии  $V_{a-k}$  и длины траекторий ионизирующих электронов, определяемой индукцией  $B$  магнитного поля в ионном источнике.

Ток экстрагируемых из источника ионов  $I_i$  не находится в прямой зависимости от тока разряда  $I_{a-k}$ . Это и понятно, поскольку ток ионов, извлекаемых из источника, в случае постоянства внешних условий экстракции определяется непосредственно плотностью и температурой ионов в плазме разряда вблизи эмиссионного отверстия, связанных сложной зависимостью с параметрами разряда.

Закономерности выхода отдельных компонентов ионного пучка исследовали на электромагнитном масс-сепараторе [6—8]. С помощью токового коллектора, установленного на приемнике масс-сепаратора, измеряли ток однозарядных ионов изотопов аргона и ксенона, добавленного в количестве 1,0% к аргону, и путем сопоставления величины тока и скорости поступления газа в ионный источник определяли коэффициент использования вещества. Опти-

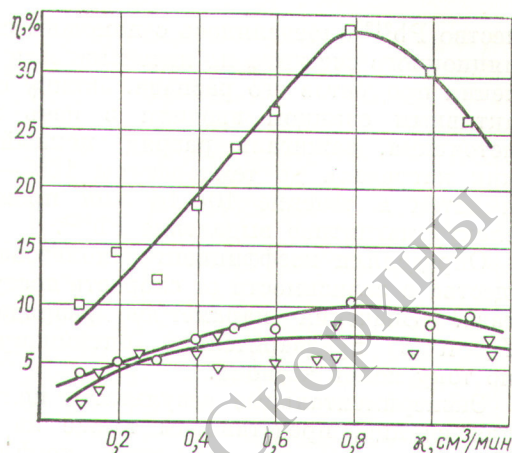


Рис. 1. Коэффициент использования вещества в зависимости от скорости поступления газа в ионный источник:

○ — аргон; □ — примесь (1,0%) ксенона; ▽ —  $Pb^{212}$ .

мальные значения параметров разряда  $V_{a-k}$ ,  $I_k$  и  $B$  выбирали непосредственно по максимальному или наибольшему возможному току однозарядных ионов на коллектор при фиксированном значении  $\kappa$ .

Зависимость коэффициента использования вещества от скорости поступления газа приведена на рис. 1. Оптимальные значения  $V_{a-k}$ ,  $I_k$  и  $B$  приблизительно одни и те же для аргона и ксенона и равны  $V_{a-k} = 60-80$  в;  $I_k = 140-150$  а,  $B = 200-300$  гс. Оптимум  $\kappa$ , как видно из рисунка, также приблизительно один и тот же и равен  $\sim 0,8$  см³/мин. Разница в абсолютных значениях коэффициента использования вещества для аргона и ксенона может быть связана с различием потенциалов ионизации атомов этих двух элементов (для аргона — 15,7 в, для ксенона — 12,1 в) и худшими условиями прохождения через камеру сепаратора ионного пучка аргона из-за существенно большей величины ионного тока ( $I_{i Ar} = 5$  ма,  $I_{i Xe} = 50$  мка).

В опытах с ультрамалыми примесями использовался радиоактивный свинец  $Pb^{212}$  — продукт распада  $Th^{232}$ . Для введения радиоактивного свинца в тигель печи источника без нарушения вакуума в основном объеме использовали специальный шлюз на вакуумной камере масс-сепаратора.

Загрузочную ложку предварительно помещали в эманатор, заполненный гидроокисью тория, и за 20—30 ч электростатического собирания на поверхности ложки накапливалось  $\sim 10^8$  атомов ( $\sim 3 \cdot 10^{-14}$  г) радиоактивного свинца. Коли-



чество  $\text{Pb}^{212}$  определялось с помощью сцинтилляционного счетчика по интенсивности  $\alpha$ -излучения продуктов его распада. Ложку с радиоактивным свинцом вводили в печь ионного источника, зажигали разряд, ионный источник нагревали до температуры  $1000\text{--}1300^\circ\text{C}$  и затем в течение  $10\text{--}15$  мин проводилось электромагнитное выделение  $\text{Pb}^{212}$ .

Определяли коэффициент использования вещества в зависимости от скорости поступления газа. Значения параметров разряда  $V_{a-k}$ ,  $I_k$  и  $B$  предварительно оптимизировались по току ионов ксенона.

Экспериментальные результаты, полученные для свинца, представлены также на рис. 1. Кривая изменения величины коэффициента использования вещества для свинца аналогична кривым для аргона и ксенона. Меньшая величина коэффициента, по-видимому, обусловлена худшей летучестью свинца и его возможной частичной адсорбцией внутри ионного источника. Полной адсорбции таких ультрамалых количеств свинца не наблюдалось.

Отметим, что введение в разряд паров  $\text{CCl}_4$  или  $\text{PbCl}_2$  с целью образования более летучих хлористых соединений радиоактивного свинца не привело к увеличению выхода ионов  $\text{Pb}^{212}$ . Выход  $\text{Pb}^{212}$  не увеличивался также, когда вместо аргона в качестве основного компонента питающего газа использовался водород, гелий или неон.

Полученные результаты показывают, что величина коэффициента использования вещества, определяющая эффективность электромагнитной сепарации, зависит приблизительно одинаково от основных параметров разряда как для основного компонента питающего газа ( $\text{Ar}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{He}$ ,  $\text{Ne}$ ), так и для малых ( $\text{Xe}$ ) или чрезмерно малых ( $\text{Pb}$ ) примесных компонентов. Поэтому при работе сепаратора на пучке ускорителя настройку ионного источника, например, на максимальную эффективность ионизации можно проводить (и это практически удобнее), используя газообразные примеси, специально добавленные в газ, питающий ионный источник.

Другая важная характеристика электромагнитного сепаратора — качество фокусировки ионных пучков, обеспечивающее определенную степень сепарации. Размеры фокальных пятен сепарированных ионных пучков зависят как от ионно-оптических характеристик магнитного анализатора и системы электростатической фокусировки, так и от величины и постоянства тока ионного пучка, определяющих величину

пространственного заряда пучка, вызывающего дефокусировку. Поэтому настройка ионного источника на максимум разрешения различна для пучка ионов основного компонента питающего газа силою в несколько миллиампер и пучка ионизованных продуктов реакций очень малой интенсивности.

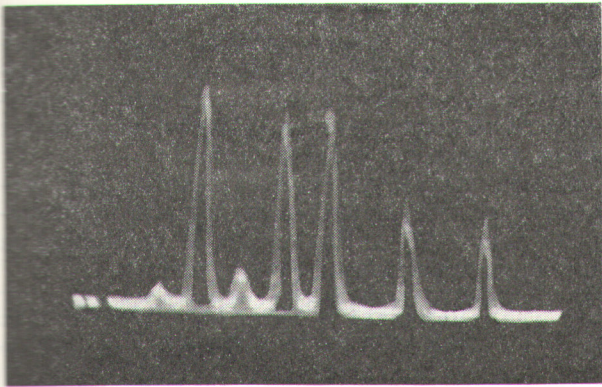
Мы сравнивали качество фокусировки пучка ионов примеси ксенона ( $\sim 1\%$ ) и радиоактивного свинца  $\text{Pb}^{212}$  ( $\sim 10^8$  атомов). Режим ионного источника, потенциал фокусирующего электрода, положение приемной плоскости сепаратора подбирали так, чтобы получить минимальную ширину фокальных пятен пучков ионов изотопов ксенона. Ток ионов изотопов ксенона составлял при этом  $10\text{--}50$  мка.

Наблюдение за распределением ионного тока в фокальном пятне проводили с помощью осциллографа. На вертикальную развертку луча осциллографа подавался сигнал с тонкого ( $0,2$  мм) измерительного зонда, укрепленного на приемнике сепаратора, а горизонтальная развертка луча управлялась пилообразным напряжением, которое одновременно модулировало ускоряющее напряжение сепаратора на глубину  $\sim 10\%$ . Затем в работающий ионный источник при выключенном ускоряющем напряжении вводили загрузочную ложку с радиоактивным  $\text{Pb}^{212}$ , магнитное поле перестраивали на массу 212, включали ускоряющее напряжение и проводили сепарацию свинца. Для определения качества фокусировки пучка ионов  $\text{Pb}^{212}$  на приемнике сепаратора укрепляли тонкую алюминиевую фольгу, после окончания сепарации ее разрезали на полоски шириной  $2,5$  мм и измеряли  $\alpha$ -активность каждой полоски.

Результаты этих экспериментов представлены на рис. 2 и 3. На рис. 2 приведена осциллографическая кривая распределения ионного тока изотопов ксенона. Полуширина пиков составляет  $0,25$  а. е. м., что соответствует разрешающей способности 500 на уровне  $0,5$  от максимума. На рис. 3 дано относительное распределение  $\text{Pb}^{212}$  вдоль плоскости приемника сепаратора, образующей угол  $45^\circ$  с главным лучом. Показаны статистические ошибки счета  $\alpha$ -частиц. За начало отсчета расстояния взято положение оси фокального пятна ионного пучка  $^{213}\text{TaO}_2$  ( $M = 213$ ). На рисунке дана также шкала разрешающей способности на различном уровне от максимума, построенная по данным полученного распределения.

Результаты этих опытов показывают, что при настройке режима источника и сепаратора



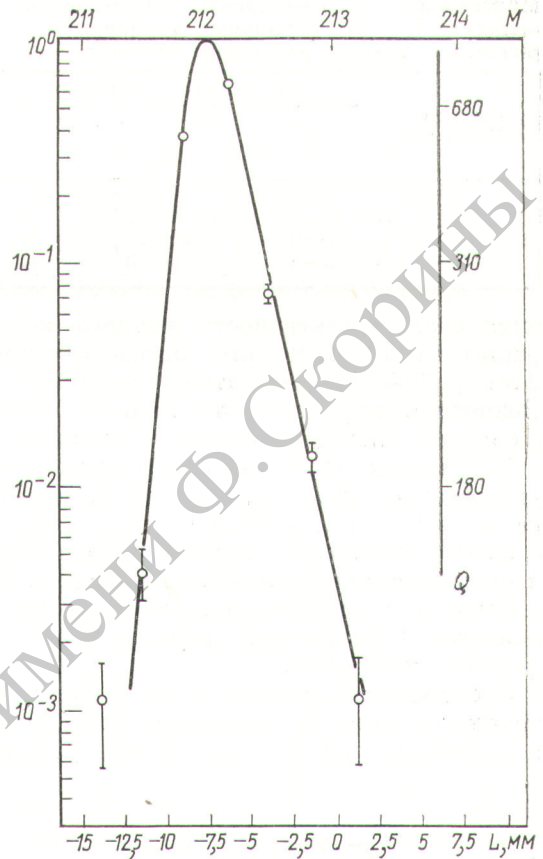


Р и с. 2. Распределение тока ионов изотопов ксенона ( $+Xe^{128}$ ,  $+Xe^{129}$ ,  $+Xe^{130}$ ,  $+Xe^{131}$ ,  $+Xe^{132}$ ,  $+Xe^{134}$ ,  $+Xe^{136}$ ) на приемной плоскости электромагнитного сепаратора.

в целом на хорошую фокусировку пучка ионов ксенона, добавленного в количестве  $\sim 1\%$  в питающий газ — аргон, одновременно обеспечивается фокусировка приблизительно того же качества и пучка ионов свинца ничтожно малой интенсивности.

Отмеченные выше особенности работы ионного источника предъявляют новые требования к его конструкции. В частности, тот факт, что продукты ядерных реакций поступают в ионный источник в виде разрозненных атомов, а не в виде специальных легколетучих химических соединений, как это практикуется при обычной электромагнитной сепарации, вызывает необходимость нагрева разрядной камеры источника до высокой температуры, чтобы предотвратить адсорбцию. Задача повышения температуры источника упрощается, если источник имеет малые размеры. К тому же большие размеры источника при работе на пучке ускорителя не нужны в отличие, например, от электромагнитной сепарации граммовых количеств вещества. Поэтому в настоящей работе была предпринята попытка изучить влияние размеров разрядной камеры и катода на режим работы магнетронного ионного источника, для того чтобы получить представление о возможностях изменения этих размеров.

Измеряли эффективность ионного источника в зависимости от диаметра катода и внутреннего диаметра разрядной камеры. Исследовали различные возможные комбинации трубчатых катодов с диаметрами 6; 4 и 2 мм и разрядных камер с внутренними диаметрами 20; 15 и 10 мм. Катод располагался в разрядной камере так, что ось катода в любом случае находилась на расстоянии 5 мм от стенки



Р и с. 3. Распределение ионов  $+Rb^{212}$  на приемной плоскости электромагнитного сепаратора ( $Q$  — шкала разрешающей способности).

разрядной камеры в месте расположения эмиссионной щели.

Эффективность ионного источника определяли по току ионов примеси ксенона ( $\sim 1\%$ ), измеряемого на приемнике электромагнитного сепаратора. В таблице приведены максимальные значения коэффициента использования вещества, полученные для различных комбинаций катода и разрядной камеры (анода) при вариации всех четырех параметров разряда.

Как видно из таблицы, каждому размеру катода соответствует определенный размер разрядной камеры, при котором обеспечивается наибольшая максимальная эффективность ионизации. Для катода с диаметром 2 мм — разрядная камера с диаметром 10 мм, для катода с диаметром 4 или 6 мм — разрядная камера с диаметром 15 мм. С увеличением диаметра катода, т. е. с увеличением тока эмиссии, а следовательно, и тока разряда, мак-



**Максимальные коэффициенты использования вещества (%) для различных комбинаций размеров катода и разрядной камеры**

Диаметр камеры, мм	Диаметр катода, мм		
	2	4	6
10	10—14	8—12	5—8
15	7—9	11—15	30—35
20	2—4	9—13	12—16

Максимальная эффективность ионного источника растет от 10—14% для катода с диаметром 2 мм до 30—35% для катода с диаметром 6 мм. Возможно, эффективность ионного источника с большей площадью катода будет выше.

Результаты этих опытов показывают, что уменьшение размеров разрядной камеры ионного источника магнетронного типа и связанное с этим уменьшение размеров катода приводят к снижению эффективности ионизации. С этим нельзя не считаться при выборе конкретных размеров конструкции высокотемпературного ионного источника.

Эксперименты с ионным источником магнетронного типа в условиях, приближенных к условиям работы на пучке ускорителя,

позволили получить ответы на некоторые специфические для такого режима работы вопросы. Это облегчило выбор конструкции быстродействующего ионного источника для электромагнитного сепаратора на циклотроне тяжелых ионов и методики работы с ним.

Авторы выражают благодарность Е. Д. Воробьеву за обсуждение полученных результатов, а также Н. С. Иванову и Б. Г. Зорину за помощь в проведении экспериментов.

Поступила в Редакцию 18/VII 1968 г.  
В окончательной редакции 17/X 1968 г.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. G. Anderson. Ark. för Fys., 36, 61 (1967).
2. Г. Н. Флеров, Н. И. Тарантин. Abhandlungen der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin (Mathem., Phys., Techn.), 1, 49 (1967).
3. А. В. Демьянов и др. Препринт ОИЯИ Р13-3953, Дубна, 1968.
4. J. Freeman. Nucl. Instrum. and Methods, 22, 306 (1963).
5. L. Chavet, R. Bernas. Nucl. Instrum. and Methods, 51, 77 (1967).
6. Н. И. Тарантин et al. Там же, 38, 103 (1965).
7. Н. И. Тарантин, А. В. Демьянов. «Приборы и техника эксперимента», 1, 41, (1966).
8. А. В. Демьянов и др. Там же, 2, 28 (1966).

**Порядок депонирования статей**

Депонирование статей осуществляется или по просьбе авторов, или по решению редакционной коллегии журнала.

В журнале печатаются подробные аннотации статей, а полные тексты хранятся в редакции в течение 5 лет и высылаются читателям по их требованию наложенным платежом. Объем аннотации не должен превышать 2 стр. машинописного текста, а объем депонируемого текста — 12 стр. В отдельных случаях в аннотацию можно включить рисунок, таблицу, основные формулы и т. п.

Сроки опубликования аннотаций значительно короче сроков публикации статей и писем.

Депонированные статьи являются научными публикациями и учитываются при защите диссертаций.

Статьи, представленные для депонирования, должны быть окончательно обработаны авторами и годны для фотографического воспроизведения: текст следует печатать на машинке с жирной черной лентой, формулы вписывать тушью или черными чернилами, рисунки выполнять на ватманской бумаге или кальке и снабжать подписями.

Цена одного экземпляра депонируемого текста 40 коп. При оформлении заказа на тексты депонированных статей необходимо указывать регистрационный номер статьи, который помещен в конце аннотации.

Заказы направлять в редакцию журнала по адресу: Москва, Центр, ул. Кирова, 18. Тел. 223-72-73.