

ИСТОЧНИКИ ИОНОВ ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ ДЛЯ “KINRIS” МАСС-СЕПАРАТОРА

А.И. Колосов, А.Е. Вальков, А.В. Демьянов, А.В. Долинский, Т.П. Руденко
Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина
E-mail: interdep@kinr.kiev.ua; факс: 044-525-44-63

Разработаны, изготовлены и испытаны на стенде два источника ионов для масс-сепаратора “KINRIS” (изотопный сепаратор Киевского института ядерных исследований): дуговой источник и источник типа Фримана, которые устанавливаются на унифицированной базовой конструкции. Для дугового источника твердых веществ разработан метод получения паров этих веществ с помощью специального тигля-печи, расположенного под антикатодом с отверстием. Этот метод позволяет регулировать скорость подачи твердого вещества независимо от режима разряда и без перемещения расплывающегося электрода за счет экстракции из плазмы ионов или электронов, потоки которых направлены на рабочее вещество. Для ионных источников разработана оригинальная конструкция разрядной камеры, объединяющая камеру с тиглем и нагревательным элементом.

Проблема высококачественного разделения изотопов электромагнитным методом требует создания и использования на масс-сепараторах универсальных сильноточных источников, способных эффективно производить широкий спектр ионов разных элементов, находящихся в твердом состоянии. С этой целью разными авторами были разработаны источники ионов, в которых применяется несколько способов подачи паров твердых веществ в разрядную камеру: 1 – источник ионов с расплывающимся антикатодом; 2 – источник ионов с подогреваемым тиглем; 3 – источник с композитным катодом из испеченного порошкового вольфрама с добавками рабочих веществ; 4 – источник ионов с перемещаемым расплываемым электродом; 5 – источник ионов с подогреваемым тиглем, расположенным под антикатодом с паропроводом [1-10].

Все эти источники имеют определенные недостатки, которые снижают их ценность. Так в источниках типа 1 режим расплывания антикатада неразрывно связан с режимом разряда, что не позволяет достичь оптимальных параметров при его работе. Источники типов 2 и 5 имеют относительно низкую температуру тигля, что ограничивает диапазон используемых веществ. Источник типа 3 не позволяет получать высокие интенсивности ионов рабочих веществ, так как увеличение процентного содержания рабочего вещества в составе катода ухудшает свойства катода. Источник типа 4 требует сложного механического перемещения расплываемого электрода с удержанием этого электрода точно на заданном расстоянии от дуги разряда, в противном случае поступление в разряд рабочего вещества по мере расплывания будет далеко от оптимального.

Эти недостатки отсутствуют в разработанном нами дуговом источнике ионов PIS100 (Рис.1) [11] с антикатодом, имеющем отверстие, и тиглем с расплываемым веществом, который расположен под отверстием антикатада. Антикатод и тигель электрически изолированы друг от друга и подача рабочего вещества регулируется изменением

напряжения антикатод-тигель (U_{AT}). Этот метод позволяет регулировать скорость подачи твердого вещества независимо от режима разряда и без перемещения расплываемого электрода за счет экстракции из плазмы ионов или электронов, потоки которых направлены на рабочее вещество в тигле.

В зависимости от знака напряжения U_{AT} из плазмы экстрагируется либо поток ионов, либо поток электронов, которые бомбардируют твердое рабочее вещество в тигле. Плотность тока ионов J , определяется выражением:

$$J = 4/9\epsilon_0(2e/M)^{1/2} \cdot U_{AT}^{3/2} / D^2, \quad (1)$$

и зависит только от величины U_{AT} , так как $D \approx const$. Где e – заряд электрона; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная; M – масса иона. D – дебаевский радиус экранирования в плазме разряда в источнике. Таким образом, напряжение между тиглем и антикатодом разрешает регулировать интенсивность расплываемого рабочего вещества, независимо от режима разряда источника и без механического перемещения расплываемого электрода.

Распыленное вещество через отверстие в антикатоде проникает в разрядную камеру и поступает в разряд. Для повышения десорбции рабочего вещества путем разогрева разрядная камера выполнена в виде теплоизолированного полого электрода, разогревающегося за счет мощности основного разряда.

Источники ионов твердых веществ можно подразделить на три группы в зависимости от температуры парообразования рабочего вещества в диапазоне плотности паров ($10^{-3} \dots 10^{-2}$) Торр. Первая группа – низкотемпературная с рабочей температурой $t \leq 600^\circ\text{C}$, вторая – среднетемпературная, $t = (600 \dots 1200)^\circ\text{C}$, и третья – высокотемпературная, $t \geq 1200^\circ\text{C}$.

Данная конструкция источника ионов может обеспечивать подачу рабочего вещества во всех трех температурных режимах парообразования. Ограничение обусловлено максимально возможной температурой стенок разрядной камеры, при которой происходит эффективная десорбция

рабочего вещества. Для увеличения верхней границы рабочей температуры и упрощения конструкции анод выполнен в виде электрически- и тепло-изолированного полуцилиндра, помещенного внутрь теплового экрана.

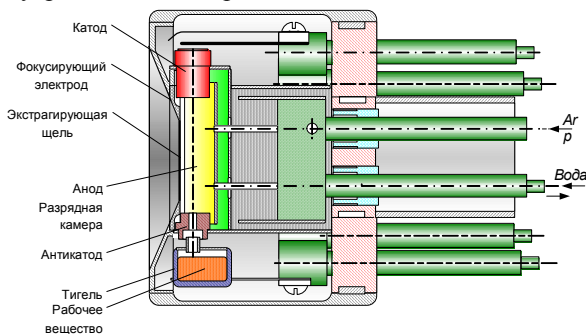


Рис. 1. Источник ионов PIS100 с изолированным анодом, полым антикатодом и тиглем

Источники ионов для масс-сепараторов должны удовлетворять следующим основным требованиям: обеспечивать эффективное образование однозарядных ионов; формировать пучки ионов с оптимальными для данной ионно-оптической схемы пространственно-угловыми характеристиками при минимальном разбросе энергии; обеспечивать минимальный выброс за пределы источника ионов рабочего вещества и минимальный расход балластного газа; сохранять первоначальную геометрию ионной оптики при разных температурных режимах; иметь простую и надежную конструкцию, которая обеспечивала бы длительный срок непрерывной работы.

Дуговой источник ионов PIS100 во многом удовлетворяет предъявляемым требованиям, однако для его работы необходимо внешнее магнитное поле напряженностью не менее 1,5 кГс, которое приводит к повороту экстрагируемого пучка на $5...7^\circ$ в зависимости от энергии ионов. Компенсация этого поворота приводит не только к усложнению конструкции, но и к ухудшению свойств тракта транспортировки и качества пучка. С целью устранения этого недостатка нами был разработан источник ионов этого типа Фримана FIS100 (Рис.2).

Наиболее существенным отличием источника FIS100 является объединение разрядной камеры, тигля и нагревателей в один компактный блок. Нагреватели осуществляют нагрев тигля паропровода и разрядной камеры, обеспечивая не только подачу рабочего вещества, но и его десорбцию в разрядной камере. Такое решение позволяет осуществлять работу источника ионов в среднетемпературном диапазоне.

Источник работает в магнитном поле напряженностью 150...200 Гс. Для зажигания источника в разрядную камеру подается плазмообразующий газ (аргон) с расходом $0.2 \text{ см}^3/\text{мин}$, что соответствует давлению порядка 10^{-3} Торр для данной конструкции источника, устанавливается напряжение на аноде 200 В и плавно поднимается ток накаливания катода до 200 А. После падения напряжения на аноде до 90В,

регулируемым током накаливания катода устанавливается ток анода (0,5...2) А.

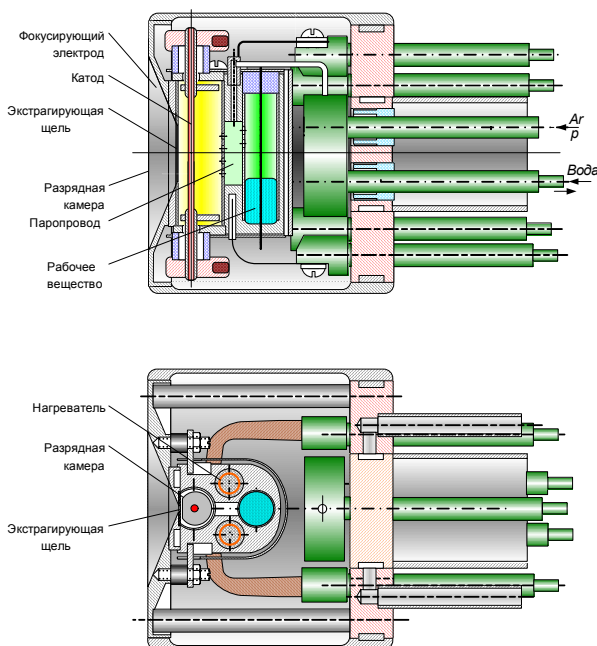


Рис.2. Источник ионов FIS100

Изменением тока подогрева осуществляем регулирование подачи пара твердого вещества. Температура разрядной камеры контролируется терморпарой. Понижением подачи плазмообразующего газа восстанавливается исходный режим напряжения и тока анода. Образованные ионы экстрагируются напряжением (35...50) кВ. Недостатком источника ионов является сравнительно малое время работы катода 20...24 часа.

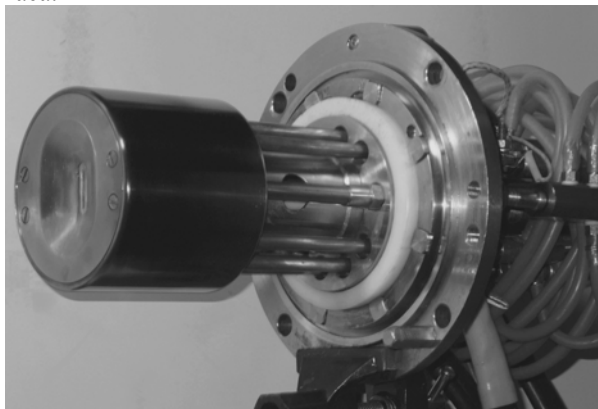


Рис.3. Базовая конструкция источников ионов

Источники ионов PIS100 и FIS100 выполнены на унифицированной базовой конструкции (Рис.3), герметичность которой обеспечивает снижение расхода плазмообразующего газа и ограничивает выбросы рабочего вещества за пределы источника, а также обеспечивает рабочие напряжения до 50 кВ. Формирование пучка обеспечивается трехэлектродным экстрактором, выполненным в соответствии с расчетами [12]. Первым электродом является анод источника ионов, вторым – экстрагирующий электрод, третьим – заземленный электрод. К экстрактору прикладывается

напряжение (1...2) кВ для запираания встречного потока электронов.

Экстрактор ионного источника – это важный элемент, определяющий ток ионного пучка и его пространственно-угловые характеристики. Для определения оптимальной геометрии электродов экстрактора и распределения потенциалов нами разработана программа PTRACK расчета траекторий в области экстракции. Кроме того, результаты расчетов помогут предсказать значения эмиттанса пучка ионов [12].

ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭКСТРАКЦИИ

Для ионно-оптических свойств трехэлектродного экстрактора источника ионов по программе PTRACK были сделаны систематические расчеты для горизонтального и вертикального движения. Для выбора оптимального расстояния d между плазовым и вытягивающим электродами проведены расчеты для нескольких геометрий экстрактора, при которых значения d выбирались в промежутках от 5 до 13 мм. Результаты расчетов для горизонтального и вертикального движений, практически совпадали – наименьшее угловое расхождение пучок имеет при $d=8.7$ мм. Для этого оптимального значения d на Рис.4 (горизонтальное движение) и на Рис.5 (вертикальное движение) показаны расчетные траектории для 5000 ионов при прохождении через экстрактор [12].

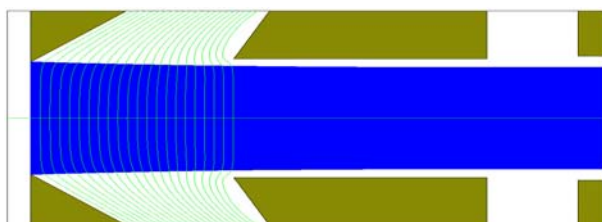


Рис.4. Ионный пучок, состоящий из 5000 траекторий, $d=8.7$ мм

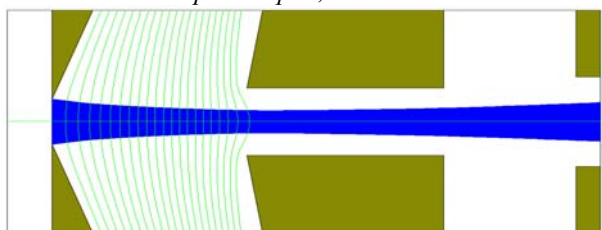


Рис.5. Траектории ионов без влияния пространственного заряда пучка

ЭКСПЕРИМЕНТ

Стендовые испытания источников PIS100 и FIS100 проводились с целью определения работоспособности конструкции источников и уточнения конструкции отдельных элементов. Для питания источника ионов PIS100 использовались системы питания, параметры которых приведены в Табл.1.

Источник ионов PIS100 был разработан и изготовлен на базе оборудования имплантационной установки “Везувий-15А” [9].

Таблица 1.

№	Наименование	Напряжение, В	Ток нагрузки, А	Мощность, Вт
1.	Накал	5	120	600
2.	Подогрев	1200	1.5	1800
3.	Анод	800	0.5	400
		300	2.5	750
4.	Тигель	300	2	600

Функциональная схема источника ионов с электропитанием приведена на Рис.6. Источник размещается в герметичном корпусе, который при зажигании разряда разрешает получить минимальную подачу балластного газа ≤ 0.2 см³/мин. Медь ($t_{пл} = 1083^\circ\text{C}$; $t_{кин} = 2300^\circ\text{C}$), естественного изотопного состава использовалась как распыляемое вещество.

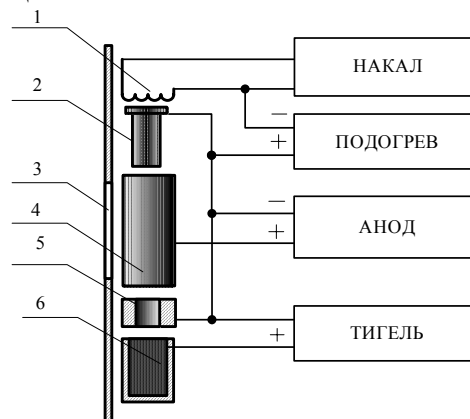


Рис.6. Функциональная схема электропитания источника ионов PIS100:

1 – подогреватель катода; 2 – катод; 3 – эмиссионная щель; 4 – анод; 5 – антикатод; 6 – тигель с распыляемым веществом

В качестве катода использовался вольфрамовый эмиттер диаметром 6 мм и длиной $h=14$ мм в молибденовом корпусе с экраном, понижающим тепловое излучение эмиттера. Такая сборка обеспечивала надежную эмиссию катода при электронном подогреве $U_n = 400$ В, $I_n \leq 1.5$ А. Мощность подогрева не превышала $W_n=600$ Вт.

При работе источника на парах меди разрядный ток изменялся в промежутке от 0,5 до 2 А, в зависимости от скорости поступления в разряд паров меди, которая определялась разницей потенциалов тигель – антикатод U_{AT} . Источник работал как с подачей, так и без подачи балластного газа. Однако, без подачи балластного газа работа источника была неустойчива. Суммарный ток пучка ионов составлял 10...15 мА при напряжении экстракции 25...40 кВ и площади щели экстракции (1×20) мм².

Функциональная схема источника ионов FIS100 с системами электропитания приведена на Рис.7. Источник работал при подаче балластного газа с расходом $\geq 0,2$ см³/мин. Рабочее вещество – индий естественного изотопного состава. Внешнее магнитное поле ≥ 100 Гс практически не отклоняло пучок ионов.

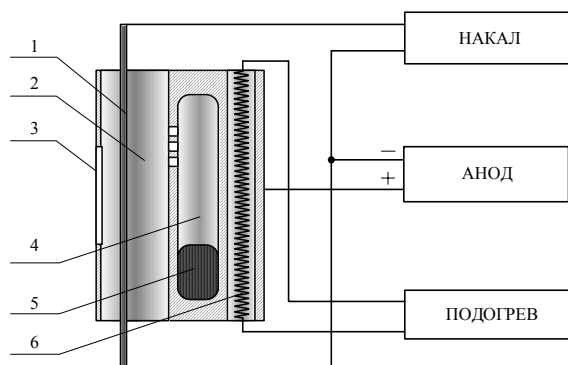


Рис. 7. Функциональная схема электропитания источника ионов FIS100:

1 – катод; 2 – анод, разрядная камера; 3 – эмиссионная щель; 4 – тигель; 5 – рабочее вещество; 6 – подогреватель

Питание источника ионов FIS100 осуществлялось системами питания, параметры которых приведены в Табл.2.

Таблица 2.

№	Наименование	Напряжение, В	Ток нагрузки, А	Мощность, Вт
1.	Накал	5	200	1000
2.	Анод	300	4	1200
3.	Подогрев	250	5	1250

При работе источника на парах индия разрядный ток изменялся в промежутке от 1 до 4 А, в зависимости от скорости поступления в разряд паров индия, которая определялась мощностью подогрева. Источник работал как с подачей, так и без подачи балластного газа. Однако без подачи балластного газа работа источника была непродолжительной – требовался высокий расход рабочего вещества. Суммарный ток пучка ионов составлял 4...6 мА при напряжении экстракции 25...35 кВ и площади щели экстракции (0,8×20) мм².

ВЫВОДЫ

Разработаны и изготовлены два ионных источника, которые предназначены для работы с

веществами с разной температурой паров: 600...1200°С – источник Фримана и более высокотемпературный – дуговой источник [11]. Оба источника рассчитаны на получение ионных токов до 25...35 мА (при расширении экстрагирующей щели до 2 мм). Проведены исследования рабочих характеристик этих источников на стенде.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.И. Владимиров и др. Препринт ОИЯИ. Р13-5559, Дубна, 1971.
2. А.С. Пасюк и др. Препринт ОИЯИ. Р7-6668, Дубна, 1972.
3. А.С. Пасюк и др. Препринт ОИЯИ. Р7-4488, Дубна, 1969.
4. А.В. Демьянов и др. // IX Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Депонирована в ОИЯИ №Б=1-9-86-36, Дубна, 1984.
5. В.Б. Кутнер и др. Препринт ОИЯИ. 9011281, Дубна, 1978.
6. М.Ю. Бредихин и др. Препринт УФТИ. Харьков-Москва 1986, с.86-21,
7. J.H. Freeman // NIM. 1963, p.306.
8. S.E. Sampayu Njndal // NIM. 1989, v.B37/38, p.90-92.
9. Электронная промышленность, в.7. 1989.
10. А.В. Демьянов и др. // Атомная энергия. 1969, т.27, в.4, с.308.
11. А.Е. Вальков, А.В. Демьянов, А.И. Колосов и др. Источник ионов газообразных и твердых веществ для масс-сепаратора. Препринт КИЯИ-05-3, Київ, 2005.
12. А.Е. Вальков, А.В. Долинский, Т.П. Руденко. Моделирование траекторий ионов в системе экстракции ионного источника // ЯФЕ ИЯД НАНУ. 2006, №2(18).
13. А.Е. Вальков, А.В. Демьянов, А.В. Долинский и др. Использование магнита монохроматора циклотрона У-240 для сепарации стабильных изотопов // Збірник наукових праць ІЯД НАНУ. 2005, №1(13).
14. А.Е. Вальков, А.В. Демьянов, Т.П. Руденко. Ионно-оптическая схема сепаратора стабильных изотопов на базе магната-монохроматора изохронного циклотрона У-240 // Збірник наукових праць ІПМЕ НАНУ. 2006, №30.
15. А.Е. Вальков, А.В. Долинский, А.В. Демьянов и др. Сепаратор стабильных изотопов на основе магната монохроматора циклотрона У-240. Препринт КИЯИ-05-2. Київ, 2005.

Статья поступила в редакцию 08.01.2008 г.

IONS SOURCES OF SOLIDS FOR THE MASS-SEPARATOR “KINRIS”

A.I. Kolosov, A.E. Valkov, A.V. Demyanov, A.V. Dolinskii, T.P. Rudenko

They are developed, prepared and tested on the stand two sources of the ions for “KINRIS” (isotopic separator of the Kiev institute of nuclear research) of masses-separator: arched source, and also a source of Freeman’s type, which are established on the standardized base construction. For the arched source of the solids is developed the method of obtaining the vapors of these substances with the aid of the special crucible-furnace, located under the anticathode with the opening. This method makes it possible to regulate the feed rate of the solid independent of the regime of discharge, also, without the displacement of the pulverized electrode due to the extraction from the plasma of ions or electrons, which are directed toward the work substance. For the ionic sources it is developed the original construction of the discharge chamber, connected with the crucible and the heating element.

ДЖЕРЕЛА ІОНІВ ТВЕРДИХ РЕЧОВИН ДЛЯ “KINRIS” МАС-СЕПАРАТОРА

О.І. Колосов, О.Є. Вальков, О.В. Дем'янов, О.В. Долінський, Т.П. Руденко

Розроблені, виготовлені та випробувані на стенді два джерела іонів для “KINRIS” (ізотопний сепаратор Київського інституту ядерних досліджень) мас-сепаратора: дугове джерело та джерело типу Фрімана, які встановлюються на уніфікованій базовій конструкції. Для дугового джерела твердих речовин розроблено метод отримання парів цих речовин за допомогою спеціального тигля-печі, що розташована під антикатодом з отвором. Цей метод дозволяє регулювати швидкість подавання твердої речовини незалежно від режиму розряду і без переміщення електроду, що розпоршується за рахунок екстракції із плазми іонів чи електронів, що направлені на робочу речовину. Для іонних джерел розроблено оригінальну конструкцію розрядної камери, що поєднана з тиглем та нагрівальним елементом.