

04;10;12

## Источник ионов водорода с холодным магнетронным катодом и магнитным сжатием плазмы

© Л.П. Вересов, О.Л. Вересов, А.Ф. Чачаков

Сухумский физико-технический институт,  
384914 Сухуми, Абхазия  
e-mail: ol\_veres@mail.ru

(Поступило в Редакцию 17 февраля 2005 г.)

Представлен источник ионов водорода, предназначенный для инжектора линейного ускорителя протонов на 16 MeV со средним током пучка  $\sim 100 \mu\text{A}$ . Показаны некоторые конструктивные решения, позволившие улучшить эксплуатационные характеристики ионного источника. Представлены результаты исследования макета источника на экспериментальном стенде в импульсном режиме работы: частота следования от 1 до 10 Hz и длительность импульса от 100 до 600  $\mu\text{s}$ .

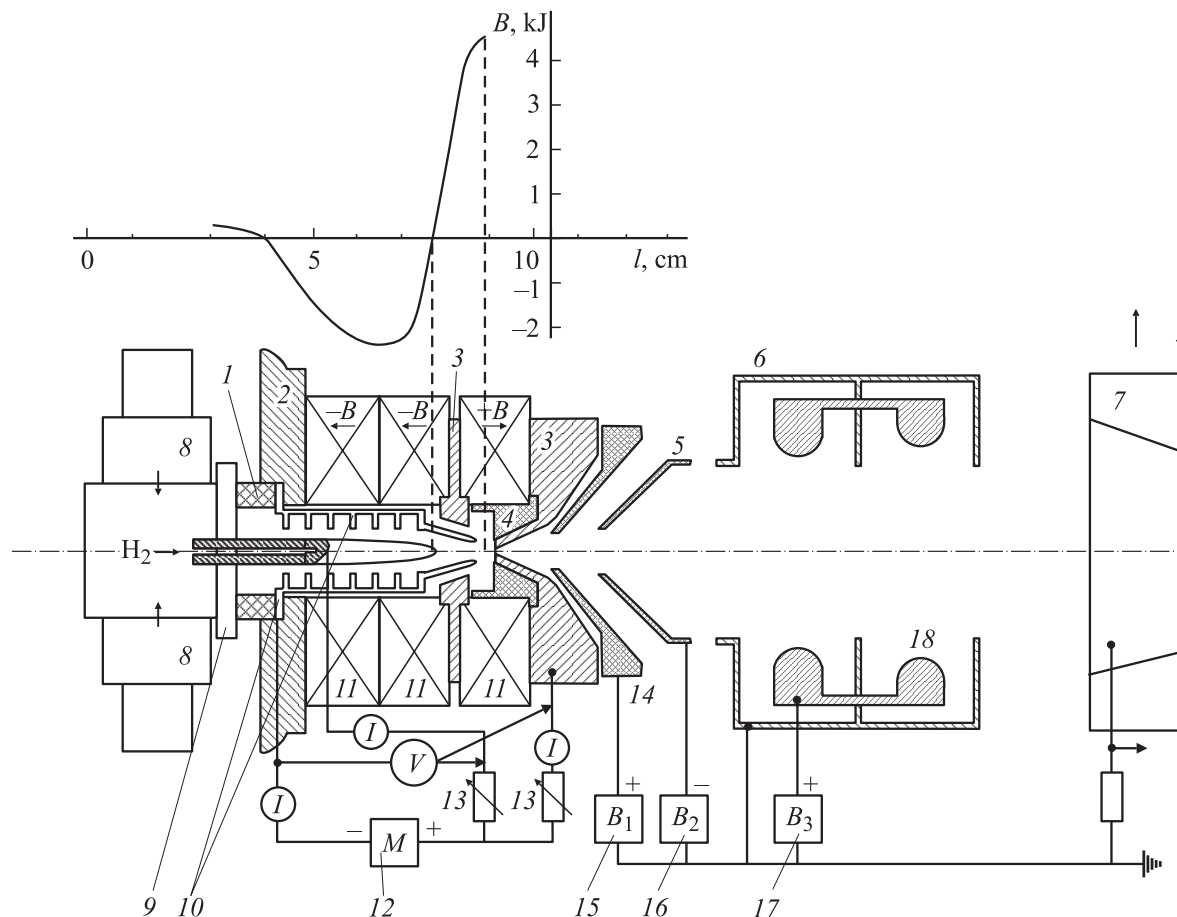
PACS: 39.10.+j

### Введение

В Сухумском физико-техническом институте проводят работы по модернизации линейного ускорителя протонов на энергию 16 MeV и средний ток пучка  $\sim 100 \mu\text{A}$  для создания комплекса по наработке медицинских радионуклидов [1]. Кардинальной переделке подвергся источник ионов водорода с целью значительного повышения ресурса работы. Применяемый первоначально дуоплазматрон с термоэмиссионным катодом обладал совершенно неудовлетворительным сроком службы. С целью повышения ресурса работы накаливаемый катод был заменен холодным. После исследования различных типов холодных вторично-эмиссионных катодов выбор был остановлен на цилиндрическом обращенном многокамерном магнетронном катоде, с помощью которого удалось сохранить газовую экономичность близкой к дуоплазматрону с горячим катодом, уменьшить размеры источника, значительно увеличить ресурс прибора и увеличить его эмиссионную способность, при этом значительно упростить электропитание источника [2]. Дальнейшая работа над дуоплазматроном с холодным катодом привела к созданию нового источника с холодным магнетронным катодом и магнитным сжатием плазмы у эмиссионного отверстия (развитие дуоплазматрона с холодным катодом) [3]. Электростатическая система фокусировки пучка, представляющая собой две спаренные одиночные линзы с разными фокусными расстояниями, позволяет фокусировать пучки ионов водорода с величиной тока более 100 mA. Эта электростатическая система фокусировки повторяет идею системы фокусировки инжектора, строящегося в НИИ-ЭФА им. Д.В. Ефремова компактного линейного ускорителя [4]. Исследования источника протонов вместе с системой извлечения и транспортировки пучка проводились в Сухумском физико-техническом институте на установке У-100.

### Конструкция источника и его характерные особенности

Источник ионов водорода состоит из двух частей генератора плазмы (ГП) и системы отбора, первичного формирования и фокусировки пучка (ионно-оптической системы (ИОС)). Генератор плазмы можно условно разделить на три части: магнетронную (область холодного катода), основного разряда (область магнитного сжатия) и экспандер (область расширения плазмы). Характерными особенностями ГП являются использование цилиндрического обращенного многокамерного магнетронного катода, исключение промежуточного электрода и применение конусной вставки в экспандере (см. рисунок). Его отличие от ГП, представленного в работе [3], — наличие кольца из магнитного материала между кольцевыми постоянными FeBa магнитами с противоположной полярностью. С помощью этого кольца удалось перераспределить силовые линии магнитного поля, что позволило повысить его величину на оси источника как в магнетронной области с 1100 до 2200 Js, так и в области магнитного сжатия с 2100 до 4800 Js. Диаметр отверстия в эмиссионном электроде, через которое плазма проникает в полость конусного экспандера, равен 1 mm, диаметр отверстия конусной вставки в экспандере — 8 mm, диаметр отверстия извлекающего электрода — 9 mm. Ускоряющий зазор варьировался от 8 до 11 mm. В этом источнике ионов водорода были применены трехэлектродная ИОС ускорения — замедления и электростатическая фокусировка пучка, представляющая собой две спаренные одиночные линзы с разными фокусными расстояниями. С помощью первой линзы пучок собирался в параллельный, а второй фокусировался. При правильном подборе фокусных расстояний одиночных электростатических линз появляется возможность фокусировать пучок при помощи одного источника питания.



Конструкция, схема подключения и график распределения величины магнитного поля по оси источника: 1 — керамическое кольцо; 2 — несущий фланец конструкции источника; 3 — полюса магнитной системы; 4 — анод источника (эмиссионный электрод); 5 — извлекающий электрод (экстрактор); 6 — три заземленных электрода линзы; 7 — коллектор (цилиндр Фарадея или другие приборы диагностики пучка, установленные на двигающуюся поперек и вдоль пучка платформу); 8 — клапаны импульсного напуска плазмообразующего газа; 9 — анодный блок магнетрона; 10 — катодный блок магнетрона; 11 — кольцевые FeBa магниты; 12 — модулятор разряда; 13 — балластные сопротивления в цепи разряда; 14 — конусная вставка экспандера; 15 — выпрямитель 110 kV (ускорение); 16 — выпрямитель 50 kV (замедление); 17 — выпрямитель 50 kV (фокусировка); 18 — два спаренных центральных фокусирующих электрода линз.

Физические явления, происходящие в источнике с холодным магнетронным катодом и магнитным сжатием плазмы у эмиссионного отверстия, были обсуждены в работе [3]. Здесь же отметим его принцип действия и характерные особенности. Внутрикамерное расположение упрощает конструкцию ионного источника. Катодная область, представляющая собой цилиндрический обращенный многокамерный магнетрон, является вторично-эмиссионной плазменной системой, в которой возбуждается тлеющий разряд. При оптимальной подаче плазмообразующего газа ( $5-7 \text{ Torr} \cdot \text{cm}^3 / \text{импульс}$ ) разряд в катодной области горит при 300 V и зажигается при 600–800 V. Разряд, возбуждаемый в магнетронной области, является поджигающим для разряда, возбуждаемого в области магнитного сжатия, параметры которого определяют величину и длительность тока ионного пучка. Поэтому разряд в катодной области авторы назвали вспомогательным, а в области магнитного сжа-

тия — основным. С помощью регулируемых балластных сопротивлений, стоящих в цепи питания модулятора разряда (см. рисунок), можно управлять параметрами как вспомогательного, так и основного разрядов и тем самым изменять режимы работы ионного источника.

Исследования дуоплазматрона с холодным катодом показали, что двойного слоя в виде плазменного „пузыря“ у промежуточного электрода не образуется, как в классическом дуоплазматроне с термоэмиссионным катодом. Двойной слой в источниках с холодными катодами образуется у отрицательного электрода катодной области. Сужение в виде усеченного конуса на торце магнетронного катода преобразует плазменный поток из кольцевой формы в цилиндрическую. Это дает возможность решить две задачи: еще более повысить его газовую экономичность и выровнять и увеличить плотность истекающей плазмы из области холодного катода в область основного разряда. В конусном оконча-

Таблица 1.

Напряжение отбора $U_0$ , kV	Ток основного разряда $I_1$ , А	Ток пучка ионов в ЦФ $I_2$ , mA	Диаметр сечения пучка $d_2$ , mm	Полный угол расходимости пучка $\varphi_0$ , rad
45	18	120	20	$5.7 \cdot 10^{-3}$
45	22	150	22	$5.9 \cdot 10^{-3}$
45	40	200	31	$11.4 \cdot 10^{-3}$

нии магнетронного катода (см. рисунок) не образуется плазменного „пузыря“, а горит разряд магнетронного типа, что видно по следам обработки внутренней поверхности конусного окончания катодной области. Поэтому промежуточный электрод был исключен из конструкции, а неоднородное сжимающее магнитное поле у эмиссионного отверстия организовано с помощью постоянных кольцевых феррит-бариевых магнитов с противоположной полярностью (см. рисунок).

Еще одна особенность этого источника ионов водорода — применение конусного экспандера с плавно изменяемым углом, в который вставлена конусная вставка. Она позволила стабилизировать и сформировать вместе с ускоряющим электрическим полем вогнутую плазменную границу, обрезать „плазменную шубу“, уменьшить площадь плазменного эмиттера ионов и тем самым улучшить эмиттанс пучка (при токе пучка 150 mA нормализованный эмиттанс составляет  $3 \cdot 10^{-5}$  cm · rad). С периферии конусной вставки сбрасывался в радиальном направлении избыточный газ из экспандера, что привело к резкому сокращению пробоев в высоковольтном промежутке, и удалось поднять напряжение отбора с 50 до 105 kV.

Трехэлектродная ИОС (экспандер—извлекающий электрод—замедляющий электрод) создает в ионно-оптическом тракте потенциальный барьер для электронов пучковой плазмы, дрейфующих в направлении источника. Этот барьер образует область виртуального катода электронов, которые компенсируют положительный пространственный заряд ионного пучка, благодаря чему удается сформировать более интенсивные ионные пучки. Надо заметить, что при использовании двухэлектродной ИОС обратный поток электронов из пучковой плазмы, ускоренный в высоковольтном зазоре, расплавлял медную коллимирующую диафрагму экспандера.

## Экспериментальные результаты

Источник ионов водорода с холодным магнетронным катодом и магнитным сжатием плазмы у эмиссионного отверстия функционирует в импульсном режиме с частотой следования от 1 до 10 Hz и длительностью импульса от 100 до 600  $\mu$ s.

Ток вспомогательного разряда в магнетронной области при напряжении  $\sim 300$  V достигал 100 А, но обычно в номинальном режиме находился в интервале 5–30 А. Ток основного разряда, контрагируемого магнитным полем, достигал 200 А. При этом напряжение на разряде

изменялось от 300 до 70 V в зависимости от интенсивности разряда и количества плазмообразующего газа. Режим горения основного разряда легко перестраивался изменением либо величины балластных сопротивлений в цепи питания ГП, либо количеством рабочего газа ( $H_2$ ), подающегося в объем газоразрядной камеры порциями с помощью электромагнитного клапана [5], либо вносимой в разряд мощности.

Иногда в токе пучка наблюдались релаксационные колебания с частотой в несколько десятков килогерц с глубиной модуляции, доходящей до 10%. Устраняются они перестройкой режима горения разряда.

Начальные испытания ионного источника проводились при использовании двухэлектродной ИОС и напряжении отбора 45 kV. При этом расширение пучка при токе 200–250 mA было существенным. На расстоянии 15 cm от конусной вставки экспандера диаметр пучка достигал  $\sim 180$  mm. Ток в центральной части пучка измерялся цилиндром Фарадея с входным диаметром 60 mm. Ниже приведена табл. 1 основных параметров для трех режимов работы ионного источника.

Основные параметры источника ионов водорода с холодным магнетронным катодом и магнитным сжатием плазмы у эмиссионного отверстия приведены в работе [3], в которой описана диагностическая аппаратура и методика измерений динамических характеристик пучка.

Позднее двухэлектродная ИОС была заменена трехэлектродной ИОС ускорения—замедления. Система фокусировки пучка представляет собой две спаренные одиночные линзы с разными фокусными расстояниями. Вытягивающее напряжение в ускоряющем зазоре было увеличено до 105 kV.

Получение параллельного пучка ионов позволило точнее измерять массовый состав пучка масс-анализатором Демпстера. Протонная составляющая в пучке увеличивается с нарастанием тока основного разряда в источнике (табл. 2).

Таблица 2.

Ток основного разряда, А	Содержание протонов в пучке, %
10	61
20	69
30	81
40	86

## Заключение

В ходе модернизации дуоплазматрона с термоэмиссионным катодом для использования его в инжекторе линейного ускорителя протонов, являющегося одним из основных элементов комплекса, для наработки медицинских радионуклидов был создан новый источник ионов водорода с холодным магнетронным катодом и магнитным сжатием плазмы у эмиссионного отверстия. По сравнению с предшественником у него значительно улучшены эксплуатационные характеристики. Ресурс его непрерывной работы увеличен на несколько порядков и составляет десятки тысяч часов. Газовая экономичность осталась почти такой же, как у источника с накаливаемым катодом. В то же время новому ионному источнику требуется меньшее количество источников питания. Ему не нужны источник питания накала катода и источник питания электромагнита, создающего неоднородное магнитное поле у эмиссионного отверстия благодаря использованию холодного катода и постоянных кольцевых FeBa магнитов. Его размер значительно меньше предшественника и он значительно легче. Эмиссионная способность нового источника несколько выше, чем у дуоплазматрона с горячим катодом. Формируемый им пучок по своим динамическим характеристикам превосходит пучок, формируемый предшественником. Параметры нового ионного источника позволяют использовать его в инжекторе линейного ускорителя. В то же время источник ионов водорода с холодным магнетронным катодом и магнитным сжатием плазмы у эмиссионного отверстия значительно экономичнее предшественника как в изготовлении, так и в эксплуатации, что очень важно для ускорителей прикладного назначения.

## Список литературы

- [1] Аринин Л.В., Кузнецов Г.В., Марколия А.И. и др. // Тез. докл. Девятого Всероссийского совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. СПб., 1998. С. 122.
- [2] Вересов Л.П., Вересов О.Л., Дзюзя М.И. и др. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 10. С. 50–53.
- [3] Вересов Л.П., Вересов О.Л. // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 10. С. 122–129.
- [4] Афанасьев Ю.В., Голубев В.П., Зуев Ю.В., Строкач А.П. // Десятое Международное совещание по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. СПб., 2001. С. 315–318.
- [5] Вересов Л.П., Литвинов П.А., Неустроев Ю.П., Николаев Э.С. А.с. № 4364894. С приоритетом от 8.05.1989.