

КОМПАКТНЫЙ ПРОТОННЫЙ ИНЖЕКТОР НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА

© 2019 г. С. Г. Константинов

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11
e-mail: S.G.KONSTANTINOV@inp.nsk.su*

Поступила в редакцию 16.04.2018 г.

После доработки 20.06.2018 г.

Принята к публикации 20.06.2018 г.

Описан протонный инжектор на основе электронно-циклотронного резонанса, способный работать длительное время без необходимости размещения питающего его оборудования под высоким потенциалом и без подачи охлаждающей жидкости. При подводимой с.в.ч.-мощности ~ 150 Вт извлекаемый ионный ток в непрерывном режиме при энергии 45 кэВ составил 17 мА с содержанием протонов 68%. Расходимость протонного пучка составила 0.4° , нормализованный среднеквадратичный эмиттанс $\epsilon = 0.13\pi$ мм·мрад.

DOI: 10.1134/S0032816218060241

ВВЕДЕНИЕ

Ионные источники на основе электронно-циклотронного резонанса в настоящее время заняли лидирующие позиции среди источников различных типов [1]. В основном их преимущество заключается в способности непрерывно работать в течение длительного времени без проведения регламентных работ. Вытягиваемый ионный ток содержит мало примесей, поскольку, в отличие от дугового или тлеющего разрядов, безэлектродный разряд не приводит к эрозии поверхности газоразрядной камеры.

Источники на основе электронно-циклотронного резонанса имеют много достоинств: они компактны, имеют высокую надежность, способны работать в непрерывном или импульсном режиме, возможно повторение их конструкции.

Ионные инжекторы, входящие в состав низкоэнергетического тракта для ускорителей любого типа, требуют подачи мощного электропитания при размещении питающего оборудования под высоким потенциалом, что сопряжено с определенными трудностями. Сюда входит подводимая мощность для генерации плазмы, электропитание ионно-оптической системы, формирующей пучок, и питание системы подачи газа в газоразрядную камеру. Дополнительно требуется система управления источником с оптической развязкой.

Чаще всего это оборудование находится под потенциалом ионного источника, а питание подается через сетевой разделительный трансфор-

матор с габаритной мощностью в несколько киловатт.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель работы — создание экономичного ионного источника с большим ресурсом, имеющего элементы питания, находящиеся под потенциалом “земли”.

Весьма привлекательна возможность избавиться от необходимости размещения под высоким потенциалом громоздкого газового хозяйства и сложности регулирования газового потока. Для подачи газа в ионный источник потребовалась разработка высоковольтной развязки.

Охлаждение газоразрядной камеры требует подачи жидкостей: дистиллированной воды, минерального масла или других теплоносителей с низкой электропроводностью — в условиях нахождения оборудования под высоким потенциалом. Это существенно усложняет конструкцию. Однако при небольшой мощности в разряде появляется возможность охлаждения воздушным потоком, причем вентилятор может находиться под потенциалом “земли”.

Конструкция инжектора разрабатывалась с целью его применения в составе имплантера [2] или ускорителя прямого действия.

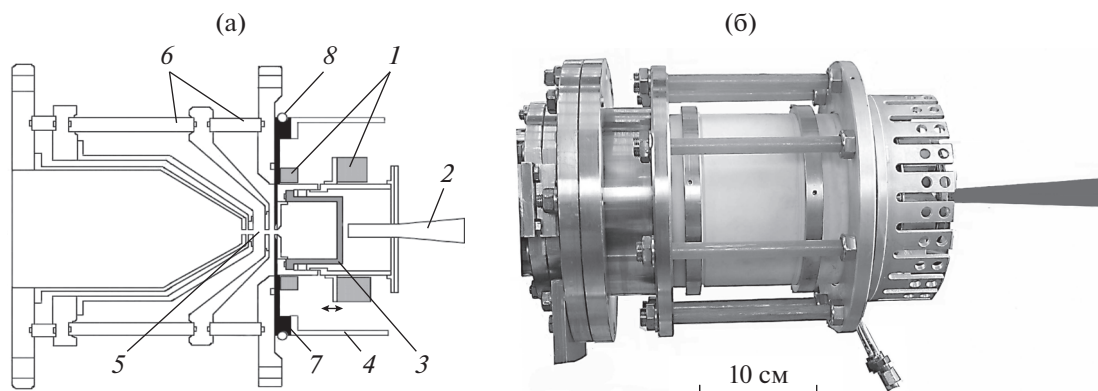


Рис. 1. Схема конструкции (слева) и внешний вид (справа) протонного инжектора на основе электронно-циклотронного резонанса. 1 – магнитная система; 2 – волновод; 3 – керамическая газоразрядная камера; 4 – радиатор; 5 – ионно-оптическая система; 6 – изоляторы; 7 – фланец из магнитомягкой стали; 8 – водяная трубка.

КОНСТРУКЦИЯ ИНЖЕКТОРА

На рис. 1 представлена схема ионного инжектора. Основными элементами конструкции являются газоразрядная камера, магнитная система, обеспечивающая работу в режиме электронно-циклотронного резонанса, тракт для подачи с.в.ч.-мощности на частоте 2.45 ГГц в газоразрядную камеру и ионно-оптическая система.

Настройка инжектора проводилась на специальном стенде (рис. 2).

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Магнитная система создает на оси газоразрядной камеры резонансное для электронов магнитное поле ~ 0.0875 Тл, распределение которого показано на рис. 3.

Применение постоянных магнитов вместо соленоидов позволяет создать магнитную систему без источников питания и жидкостного охлаждения, но в этом случае отсутствует возможность настройки магнитного поля изменением тока в катушках. Настройка системы с кольцами из постоянных магнитов осуществляется изменением их положения на оси и подбором их количества.

Магнитная система образована двумя кольцами из материала Nd–Fe–В и фланцем из стали с низкой коэрцитивной силой. Каждое кольцо состоит из семи стопок магнитных плиток. Оптимальная настройка достигается перемещением подвижного кольца по резьбе корпуса газоразрядной камеры.

Как показал опыт, такая конструкция позволяет обойтись без дополнительной катушки точной подстройки магнитной системы.

Фланец из магнитомягкой стали резко ослабляет магнитное поле в ускоряющем зазоре, что исключает возможность возникновения в нем паразитного газомagnetронного разряда в скрещен-

ных полях, и участвует в формировании требуемого распределения магнитного поля. Магнитные поля колец имеют одностороннюю радиальную направленность.

ГАЗОРАЗРЯДНАЯ КАМЕРА

Газоразрядная камера представляет собой чашу диаметром 60 мм и высотой 35 мм, выполнен-

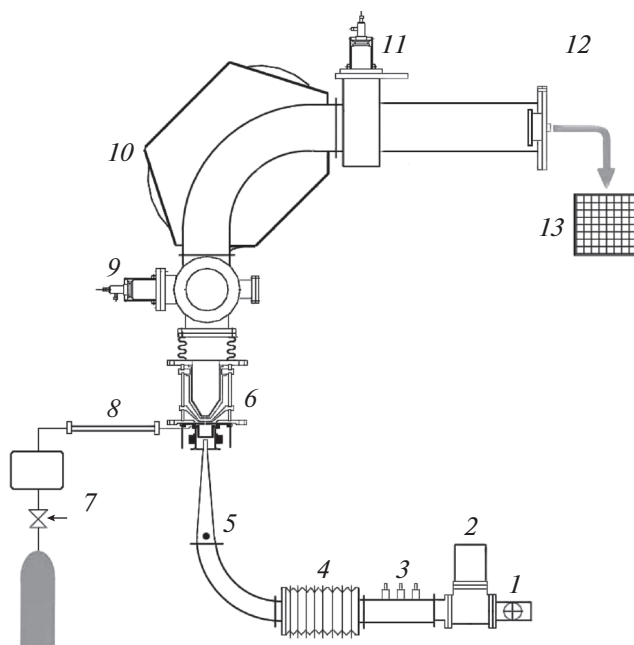


Рис. 2. Схема испытательного стенда. 1 – магнетрон; 2 – циркулятор; 3 – тюнер; 4 – высоковольтная развязка; 5 – волноводный трансформатор; 6 – ионный инжектор; 7 – газовое хозяйство и электронный расходомер; 8 – высоковольтная газовая развязка; 9 – первый пробник; 10 – секторный магнит; 11 – второй пробник; 12 – матричный профилометр; 13 – светодиодная матрица.

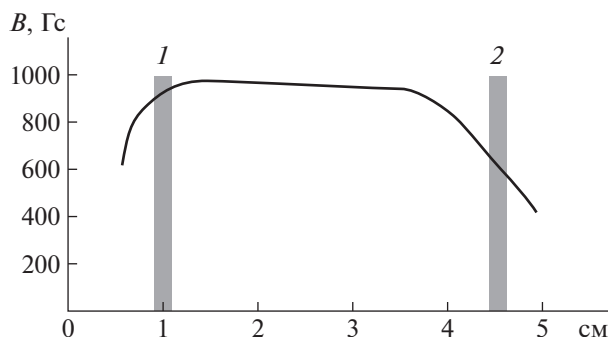


Рис. 3. Распределение магнитного поля на оси газоразрядной камеры. 1 — зона эмиссионного отверстия, 2 — дно чашки (зона ввода с.в.ч.-мощности в газоразрядную камеру).



Рис. 4. Высоковольтная с.в.ч.-развязка.

ную из нитрида алюминия (AlN), который благодаря высокой теплопроводности достаточно устойчив к обратному потоку электронов [3]. Дно чаши служит диэлектрическим окном для ввода с.в.ч.-мощности в разряд, что снимает проблемы крепления, уплотнения и равномерного охлаждения с.в.ч.-окна. Применение керамики из нитрида алюминия позволило существенно повысить надежность и срок службы газоразрядной камеры.

Газоразрядная камера расположена внутри корпуса из нержавеющей стали, который имеет резьбу для уплотнения керамической чаши камеры и резьбу для перемещения магнитного кольца. Чаша уплотняется через прокладку из витона и охлаждается потоком воздуха через волновод.

Благодаря высокому коэффициенту вторичной электронной эмиссии с керамической поверхности возрастает диссоциативная ионизация водорода, что приводит к повышению электронной плотности и соответственно процентного содержания протонов в извлекаемом ионном пучке.

Остальная часть внутренней поверхности камеры, в которой расположено эмиссионное отверстие, изготовлена из высокоглиноземистой керамики 22ХС.

Водород подается в газоразрядную камеру через капилляр, а количество газа регулируется с помощью электронного расходомера, который находится под потенциалом “земли”. Между инжектором и расходомером расположена высоковольтная газовая развязка, представляющая собой керамическую трубку с внутренним диаметром 10 мм и длиной 37 см, заполненную стекловатой.

С.В.Ч.-ТРАКТ

Мощность с.в.ч. ~1 кВт генерируется промышленным магнетроном на частоте 2.45 ГГц. Линия передачи состоит из циркулятора, трехштыревого тюнера, высоковольтной развязки и

волноводного трансформатора. Контролируется эффективность поглощения мощности в разряде. Применен блок питания магнетрона Magdrive 1000 (<http://dipolar.se/products/>) с дополнительным устройством фильтрации пульсаций сетевого напряжения.

Корпус высоковольтной развязки состоит из стопки металлических пластин, разделенных между собой полиимидной (каптоновой) пленкой толщиной 0.1 мм. В каждой пластине имеется окно, совпадающее по размеру с окном волноводного трансформатора (рис. 4). Напряжение на пластинах задается с помощью резистивного делителя.

При разработке ионного инжектора возникает проблема размещения его элементов на высоковольтной части ускорителя, которая обычно имеет ограниченные размеры и требует тщательной проработки компоновки. В частности, возникает проблема с размещением с.в.ч.-циркулятора, имеющего существенные размеры на частоте 2.45 ГГц.

Был построен вариант с.в.ч.-тракта без циркулятора, защита магнетрона от разрушения отраженной волной в этом случае осуществлялась по контролю температуры анода магнетрона. Питание магнетрона снижалось до безопасного уровня при большом коэффициенте отражения с.в.ч.-мощности, когда температура анода магнетрона повышалась до 200°C, а также в случае недостаточной или слишком большой подачи газа по блокировочному вакуумметру ВМБ-1/8-001.

ИОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

В инжекторе применена четырехэлектродная ионно-оптическая система, которая позволяет управлять параметрами пучка при различном первеансе и энергии [4].

За основу была взята ионно-оптическая система, аналогичная описанной в [5] (рис. 5).

Устойчивая работа ионно-оптической системы обеспечивается тем, что шайбы с отверстиями, образующими ионную оптику, изготовлены из молибдена и впаяны с твердым припоем мето-

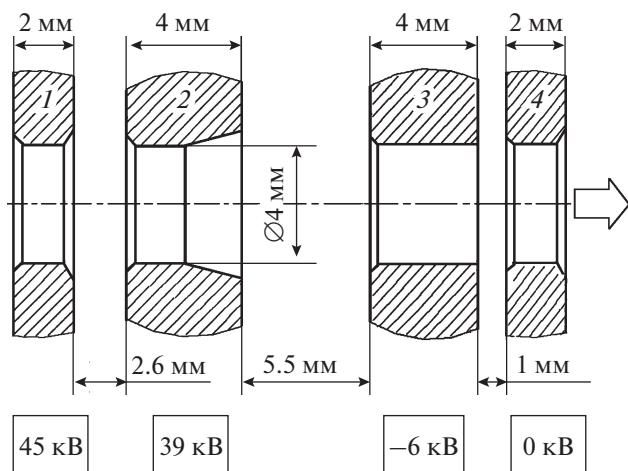


Рис. 5. Тетродная ионно-оптическая система. 1 – эмиссионный электрод; 2 – 1-й ускоряющий электрод; 3 – 2-й ускоряющий электрод; 4 – заземленный электрод.

дом вакуумной пайки. Таким же способом впаян капилляр для подачи водорода в газоразрядную камеру.

ЭМИТТАНС

Измерение эмиттанса проводилось методом “perreg pot” [6]. Использовалось устройство (рис. 6), состоящее из блока маска-экран для измерения эмиттанса, цилиндра Фарадея с супрессорной сеткой и окна для пропуска пучка в тракт. Устройство имеет 3 положения относительно пучка, позиция устройства определяется магнитным манипулятором 1.

Маска 4 изготовлена из танталовой пластины толщиной 0.5 мм с отверстиями $\varnothing 0.2$ мм. Расстояние между отверстиями 3 мм. Ионные струйки, образуемые маской, оставляют профильный отпечаток для измерений на каптоновой пленке, установленной на расстоянии 5 см от маски. Время экспозиции ~ 10 с.

Для случая, когда пучок является осесимметричным и распределение плотности четырехмерного фазового пространства ограничено гиперэллипсоидом, в работе [7] показано, что эмиттанс можно вычислить по образу “perreg-pot” по следующей простой практической формуле:

$$\varepsilon = (RD/(2z))(D_z/D - S_z/S)[1 - (S/R)^2]^{-1/2},$$

где D – диаметр отверстий в маске; z – расстояние между маской и плоскостью каптоновой пленки; D_z – диаметр пятна на пленке; S и S_z – расстояния от оси пучка до центров отверстия в маске и на пленке соответственно. Для струйки на оси пучка параметры в центре составят: $S = 0$ и $S_z = 0$. В этом случае отношение S_z/S берется как 1.

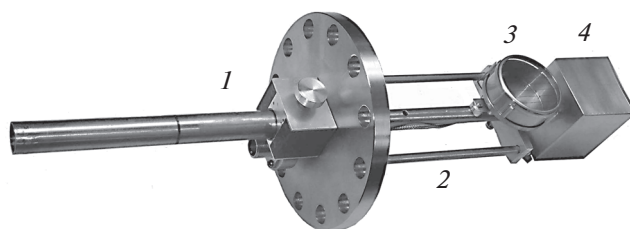


Рис. 6. Подвижный измеритель эмиттанса и пробник. 1 – магнитный манипулятор; 2 – окно для пропуска пучка; 3 – пробник с супрессорной сеткой; 4 – измеритель эмиттанса.

Допустимость применения формулы Ванга определялась по характеристикам профиля пучка с помощью профилометра.

По результатам измерения полученных отпечатков ионных струек на каптоновой пленке по формуле Ванга вычислялся эмиттанс. Измеренный таким методом нормализованный среднеквадратичный эмиттанс составил $\varepsilon = 0.13\pi$ мм · мрад.

ПРОФИЛОМЕТР

Профилометр состоит из жаропрочной металлокерамической матрицы 8×8 , состоящей из танталовых ламелей размером 4×4 мм. Профиль пучка наблюдается на светодиодной матрице, состоящей из 8×8 элементов, каждый светодиод матрицы подключен к соответствующей ламели. Расстояние от источника до матрицы ~ 3 м. Динамический диапазон яркости светодиода имеет приемлемую линейность в пределах от 100 мкА до 20 мА.

Прибор позволяет оценить фокусировку, осесимметричность, распределение плотности ионов в пучке, а также величину его тока.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При настройке инжектора были определены его оптимальные параметры, позволяющие получить максимальный ток протонов при минимальной входящей мощности с.в.ч. Поток газа в газоразрядную камеру оптимизировался по максимальному току протонов. При подводимой с.в.ч.-мощности 150 Вт и ускоряющем напряжении 45 кВ вытягиваемый ток ионов составил 17 мА с содержанием протонов 68%. Оптимальный расход водорода ~ 1.6 стандартных кубических сантиметров в минуту (scsm).

Было установлено, что при равенстве диаметров эмиссионного отверстия и керамического диска на нем ($\varnothing 4$ мм) вытягиваемый пучок имеет большую расходимость, однако с увеличением отверстия в этом диске до 5 мм расходимость протонного пучка составила всего 0.4° .

В течение экспериментов проблем с зажиганием разряда не возникало. После длительной работы загрязнений внутри газоразрядной камеры не обнаружено.

Инжектор был также испытан при охлаждении стального фланца дистиллированной водой и вводимой в разряд мощности с.в.ч. 350 Вт. Получен ионный ток с содержанием протонов ~90%.

Автор выражает благодарность за помощь в работе Г.Н. Хлестовой, В.Е. Фетисову и Е.И. Шкляеву.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Geller R.* Electron Cyclotron Resonance Ion Sources and ECR Plasmas. Bristol: CRC Press, 1996.
2. *Astrelin V.T., Burdakov A.V., Bykov P.V., Ivanov I.A., Ivanov A.A., Jongen Y., Konstantinov S.G., Kudryavtsev A.M., Kuklin K.N., Mekler K.I., Polosatkin S.V., Postupaev V.V., Rovenskikh A.F., Sinitский S.L., Zubairov E.R.* // Journal of Nuclear Materials. 2009. V. 396. P. 43. doi 10.1016/j.jnucmat.2009.10.051
3. *Baumgarten C., Barchetti A., Einkenel H., Goetz D., Schmelzbach P.A.* // Rev. Sci. Instrum. 2011. V. 82. P. 053304. doi 10.1063/1.3590777
4. *Семашко Н.Н., Владимиров А.Н., Кузнецов В.В., Кулыгин В.М., Панасенков А.А.* // Инжекторы быстрых атомов водорода. М.: Энергоиздат, 1981.
5. *Davydenko V.I., Ivanov A.A., Rogozin A.I., Uhlemann R.* // Rev. Sci. Instrum. 1997. V. 68. P. 1418.
6. *Huashun Zhan.* Ion Sources. Berlin, Heidelberg: Springer, 1999. P. 440–441.
7. *Wang J.G., Wang D.X., Reiser M.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Research. 1991. V. A307. P. 190.