

04;12

Исследование холодных катодов плазменных источников, генерирующих пучки ионов водорода

© Л.П. Вересов, О.Л. Вересов, М.И. Дзкуя, Ю.Н. Жуков, Г.В. Кузнецов, И.А. Цеквава

Сухумский физико-технический институт АН Абхазии,
384914 Сухум, Абхазия

(Поступило в Редакцию 31 января 2001 г.)

Приводятся результаты исследования и сравнение работы холодных катодов двух типов (полого и магнетронного) в дуоплазматроне при отборе из него протонных пучков.

Введение

В Сухумском физико-техническом институте создается комплекс для производства короткоживущих "медицинских" радионуклидов на базе линейного ускорителя протонов [1]. В инжекторе ускорителя планируется использовать ионный источник типа дуоплазматрон с холодным катодом. Применение холодного катода взамен накапливаемого позволяет существенно увеличить ресурс непрерывной работы источника. Для выбора типа холодного катода было проведено описываемое исследование. Основными параметрами, по которым производилось сравнение, были срок службы катода, расход плазмообразующего газа, энергопотребление и эмиссионная способность источника.

Известны три основных типа холодных катодов, применяемых в ионных плазменных источниках: полый, магнетронный и ячейка Пеннинга. Источник с разрядом Пеннинга авторами был исключен из рассмотрения, поскольку в нашем случае ячейку Пеннинга конструктивно сложно вписать в дуоплазматрон в отличие от полого и магнетронного катодов. Поэтому исследовались полый и магнетронный катоды.

Конструкции выбранных катодов

Известно большое разнообразие конструкций полых катодов. При выборе конструкции полого катода авторы руководствовались его параметрами и эксплуатационными качествами. Применение полого катода в дуоплазматроне было описано в работе [2]. Он представлял собой цилиндрическую расширенную полость с сужениями на обоих концах, помещенную в продольное магнитное поле, для увеличения пробега эмиттируемых электронов. Применение дуоплазматрона с полым катодом в инжекторе линейного ускорителя было описано в работе [3]. В нем конструкция катода выполнена из трех последовательно включенных трубок разного сечения. В первую трубку подавался плазмообразующий газ, а из последней трубки вытекала плазменная струя. Магнитное контрагирование осуществлялось у последней трубки. Источник с таким катодом обладает, по нашему мнению, заметными недостатками: высокое напряжение поджига разряда до 2 kV и невысокая газовая эффективность. Лучшие

характеристики в сравнении различных вариантов конструкций показал полый катод с развитой эмиттирующей поверхностью [4]. Ее увеличение достигалось за счет введения дополнительных ребер.

Используя эту идею, авторы разработали полый "сотовый" катод. Конструктивно он представляет собой металлический цилиндр диаметром 17 mm и длиной 10 mm с высверленными в нем отверстиями в количестве тридцати семи штук диаметром 2 mm каждое. Этот цилиндр вставлялся в обойму катодного блока.

Обойма представляет собой цилиндрический стакан, выполненный из нержавеющей стали. Один из его торцов имеет диафрагму диаметром 10 mm. Плазмообразующий газ (H_2) подается в полость катода с противоположного торца. В эту обойму вставляются и элементы магнетронного катода. Один из вариантов магнетронного катода был удачно использован в источнике отрицательных ионов водорода [5]. Он представлял собой цилиндрический обращенный магнетрон, имевший увеличенную эмиттирующую поверхность по сравнению с прямым магнетроном.

Идея такого магнетронного катода была использована и развита авторами. Усовершенствование заключалось в изменении магнитной системы и уменьшении размеров магнетронного катода в сочетании с многокамерностью. Введение диафрагм в полость катода и разделение ее ими на несколько камер позволяет 1) при уменьшении размеров сохранить эмиттирующую поверхность, 2) увеличить газовую эффективность, 3) сохранить стабильную работу плазменного генератора. При работе однокамерного магнетронного катода срыв его в аномальный тлеющий или дуговой разряд приводил к срыву устойчивой работы всего плазменного генератора. В многокамерном магнетронном катоде этот эффект практически подавлен. Срыв разряда в одной из камер не влияет на оптимальную работу других камер магнетронного катода, поскольку уже в следующем импульсе восстанавливается нормальный режим горения разряда в ней. Это следует объяснять двумя явлениями: 1) процесс деионизации в малом объеме проходит быстрее, чем в большом; 2) пробую в одной камере большого размера развивается значительно проще, чем в нескольких камерах меньшего размера, включенных параллельно (рис. 1). Поэтому весь плазменный генератор работает стабильно, не срываясь в аномальный тлеющий или дуговой разряд.

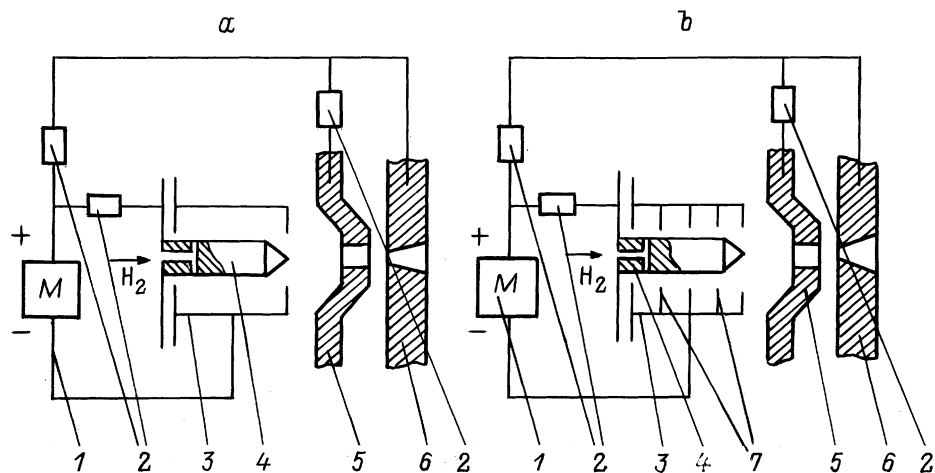


Рис. 1. Схема подключения плазменного генератора с однокамерным (а) и многокамерным (б) магнетронами: 1 — модулятор, 2 — балластные сопротивления, 3 — катод магнетрона, 4 — анод магнетрона, 5 — промежуточный электрод, 6 — эмиссионный электрод (анод), 7 — диафрагма катода.

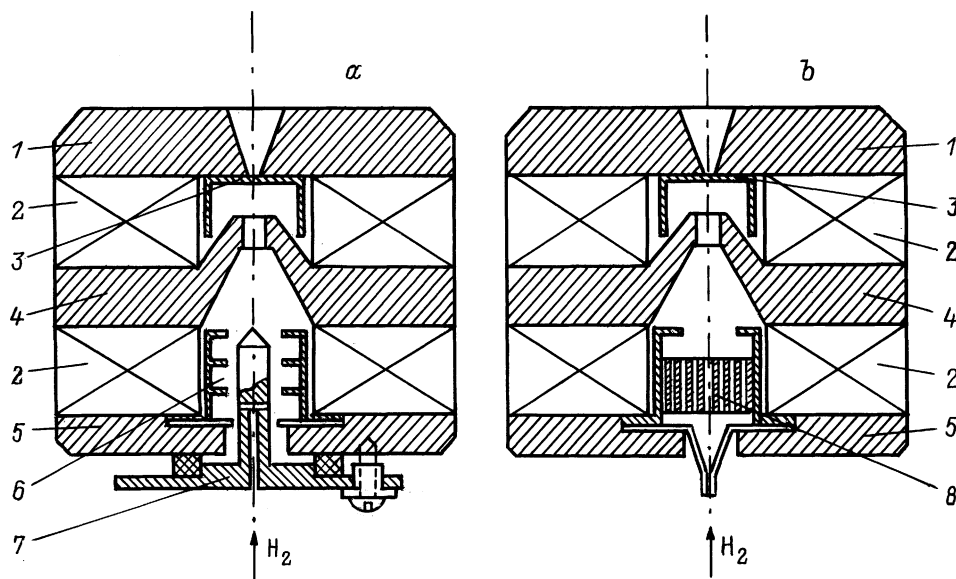


Рис. 2. Конструкция плазменного генератора с ОЦМ катодом (а) и с ПС катодом (б). 1 — анодный магнитный полюс, 2 — кольцевые постоянные магниты, 3 — диафрагма эмиссионного электрода, 4 — промежуточный электрод, 5 — катодный магнитный полюс, 6 — ОЦМ катод, 7 — анод магнетрона, 8 — ПС катод.

Описанные выше конструкции катодов полого "сотового" (ПС) и обращенного цилиндрического многокамерного магнетронного (ОЦМ) были исследованы в дуоплазматроне для сравнения их эксплуатационных характеристик. Измерялись и сравнивались такие параметры, как расход плазмообразующего газа, напряжение и ток разряда и эмиссионная способность источника.

Конструкция источника

Для исследования холодных катодов дуоплазматрон был существенно изменен. Источник состоит из двух последовательно соединенных камер — газоразрядных

ячеек (рис. 2). В первой ячейке располагается генератор плазмы с каким-либо холодным катодом, а во второй (дуоплазматронной ячейке) происходит сжатие (контрагирование) плазмы с помощью неоднородного магнитного поля и собственного давления плазмы и ее выталкивание в экспандер источника. Вторая ячейка повторяет геометрические размеры первоначального образца дуоплазматрона. В ней электромагнит был заменен кольцевым магнитом из FeBa (индукция на оси ~ 1100 Gs). В первой камере — ячейке располагается обойма катодного блока, в которой размещаются либо элементы конструкции ПС катода, либо элементы конструкции ОЦМ катода. Обойма вставляется в кольцевой FeBa магнит, идентичный FeBa магниту,

создающему неоднородное магнитное поле в дуоплазмотронной ячейке. Поэтому магнитное поле на оси обеих ячеек фактически одинаковое. При работе с ПС катодом кольцевой магнит заменялся дюралевым кольцом того же размера.

При модернизации объем газоразрядной камеры источника с холодным катодом был уменьшен в семь раз ($56 \text{ cm}^3/8 \text{ cm}^3$) по сравнению с вариантом с накапливаемым катодом.

Источник работал в импульсном режиме с длительностью импульса от $100 \mu\text{s}$ до 1 ms и частотой следования от 1 до 10 Hz. Импульсная подача плазмообразующего газа (H_2) в источник осуществлялась электромагнитным клапаном [6].

В сравнительных экспериментах для отбора, формирования и ускорения ионов водорода применялась наиболее простая двухэлектродная ионно-оптическая система (ИОС). С ней источник работает в более напряженном режиме (обратный электронный поток, слабая компенсация и фокусировка пучка), чем с другими типами ИОС.

Экспериментальные результаты

Расход плазмообразующего газа в источнике оценивался разностью давлений в эталонном объеме за определенное число импульсов его работы. Баллон объемом 1 л заполнялся водородом и подключался к источнику. Давление в нем измерялось манометром, подключенным к баллону постоянно. Дуоплазмотрон, работающий в оптимальном режиме, получал порции плазмообразующего газа с помощью электромагнитного клапана. В баллоне создавался рабочий диапазон давлений, при котором обычно работает источник от 1 до 1.2 atm. Число импульсов фиксировалось электронным счетчиком. После каждых десяти импульсов измерялась разность давлений в баллоне. Таким образом, проходил весь рабочий диапазон давлений несколько раз и бралась средняя выборка разности давлений.

Расход количества плазмообразующего газа за импульс определялся из выражения $\Delta pV/n$, где Δp — разность давлений, V — объем, n — число импульсов. Оценочное измерение расхода количества плазмообразующего газа за импульс, проведенное вышеописанным методом, показало, что для дуоплазмотрона с ПС катодом в зависимости от режима его работы требуется от 30 до $50 \text{ Torr}\cdot\text{cm}^3/\text{imp}$., а для дуоплазмотрона с ОЦММ катодом не более $10\text{--}12 \text{ Torr}\cdot\text{cm}^3/\text{imp}$. Параметры разряда в источнике с ПС катодом отличались от параметров разряда в нем с ОЦММ катодом. Ток разряда в источнике с ПС катодом достигал 175 А при напряжении разряда 120–130 В. В источнике с ОЦММ катодом ток разряда достигал 230 А при напряжении на разряде 400 В.

Стоит отметить, что в источнике с ПС катодом напряжение на разряде сильно зависит от расхода плазмообразующего газа. При нехватке газа оно возрастало до 400 В, а при избытке падало до 50 В. При этом из источника отбирался ионный пучок как в том, так и в

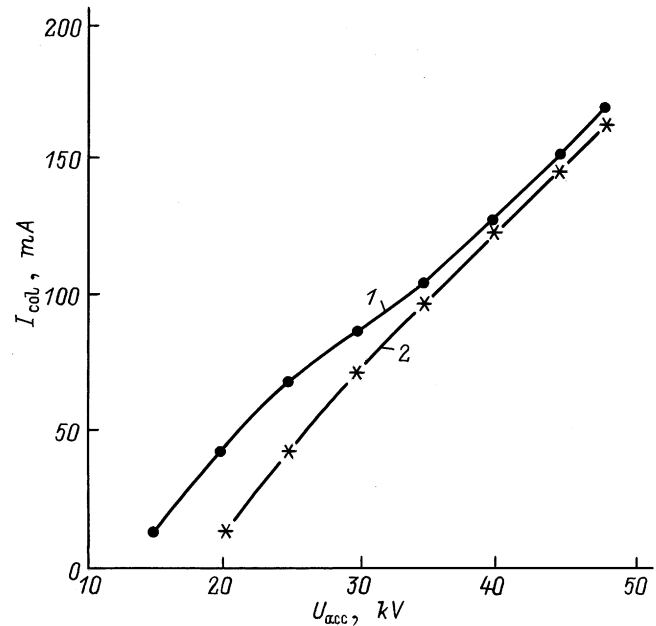


Рис. 3. Зависимость тока пучка от ускоряющего напряжения. $I_p = 60$ (1), 22 А (2); $U_p = 350$ (1), 500 В (2); pV — min.

другом случае. Поэтому в нем можно поддерживать как тлеющий, так и дуговой разряды.

Когда ПС катод помещали в продольное магнитное поле, изменений параметров источника не наблюдалось по отношению к его работе с ПС катодом, не помещенным в магнитное поле. Этот факт подтверждает, что электрической экранировки стенок такого типа полого катода вполне достаточно.

Напряжение разряда в источнике с ОЦММ катодом при изменении напуска плазмообразующего газа менялось от 300 до 500 В. Его нормальная работа, когда из него отбирался ионный пучок, происходила только тогда, когда в источнике горел тлеющий разряд, при срыве в дуговой разряд пучок не отбирался.

Напряжение поджига разряда как у ПС катода, так и ОЦММ катода примерно одинаковое и находилось в интервале 500–800 В.

В токе разряда источника низкочастотные колебания (единицы МГц) присутствовали в обоих вариантах катодов. Но в варианте с ПС катодом, помимо вышеуказанных колебаний, чаще и сильнее проявлялись резкие скачки и изломы в осциллограмме тока разряда, что резко ухудшало качество пуска и стабильность работы источника.

Отбор, формирование и ускорение ионного пучка обычно проводились при стационарном напряжении извлечения $\sim 40 \text{ kV}$. Токи в пучке ионов (H^+ , H_2^+ , H_3^+) достигали величины 100–180 мА при разных токах разряда в источнике. Причем ток пучка измерялся цилиндром Фарадея (ЦФ) с входным отверстием диаметром 60 мм [7], который только улавливал примерно 1/3 от общего тока пучка (поскольку был расходящимся, а дополнительная фокусировка не использовалась).

В варианте с ОЦММ катодом при токах разряда 50–60 А ток пучка достигал 100–150 мА. В варианте с ПС катодом те же токи пучка достигались при токах разряда 20–40 А.

Зависимость отбираемого тока пучка от ускоряющего напряжения для варианта с ОЦММ катодом показана на рис. 3. Для варианта с ПС катодом она идентична. Линейный ход зависимости указывает на неисчерпанную эмиссионную способность источника. Эмиссионное отверстие источника составляло $\varnothing 1.2$ мм. При этом эмиссионная плотность тока достигала более 35 А/см².

Измерение массового состава пучка показало, что в пучке, генерируемом источником с ПС катодом, протоны составляют 50–70%, в источнике же с ОЦММ катодом — 60–80%. Это объясняется тем, что в источнике с ОЦММ катодом — несколько большие токи разряда, чем в источнике с ПС катодом. Разрешающая способность масс-анализатора не позволила оценить процентное содержание тяжелых ионов в пучке, могущих появиться из-за распыления электронов источника.

Была проведена оценка эмиттанса пучка. При энергии частиц 40 keV нормализованный эмиттанс пучка составил $\sim 9.4 \cdot 10^{-5}$ рад·см.

Следует отметить, что ПС катод разрушается быстрее, чем ОЦММ катод. Даже когда дюралевый цилиндр ПС катода заменили танталовым, он, хотя и медленнее, заметно распылялся ионами, бомбардирующими катод из разряда. В этом смысле конструкция ОЦММ катода более предпочтительна, поскольку в ПС катоде ионы из разряда бомбардируют его лобовую часть, а в ОЦММ катоде такая бомбарбировка распределена по всей внутренней поверхности, площадь которой в несколько раз больше площади лобовой части ПС катода.

Заключение

Исследование обоих типов катодов ПС и ОЦММ показало, что они могут быть использованы в конструкциях плазменных источников. Эмиссионная способность дуоплазматрона при применении как одного, так и другого катода примерно одинаковая. Зато остальные параметры источника, такие как газовая эффективность, напряжение, ток разряда (энергопотребление) и т.п., сильно отличаются при использовании ПС и ОЦММ катодов. Так, дуоплазматрон с ОЦММ катодом имеет газовую эффективность в три раза более высокую, чем с ПС катодом. Его энергопотребление с ПС катодом заметно ниже, чем с ОЦММ катодом при генерации пучков ионов водорода с одинаковым током пучка. В то же время в источнике с ОЦММ катодом несколько выше протонная компонента пучка, так как ток разряда у него выше, чем у источника с ПС катодом.

В дуоплазматроне с ОЦММ катодом не наблюдалось сильных паразитных колебаний в разряде, таких как наблюдались в нем с ПС катодом, поэтому с ОЦММ катодом дуоплазматрон работает стабильнее и качество генерируемого им пучка выше, чем при работе с ПС катодом.

Срок службы дуоплазматрона с обоими типами катодов по сравнению с накапливаемым катодом существенно вырос и составил несколько тысяч часов. Причем эрозия у ПС катода происходит быстрее, чем у ОЦММ катода. В то же время конструкция ПС катода проще, чем конструкция ОЦММ катода.

В нашем случае выбор был сделан в пользу ОЦММ катода, поскольку источник ионов в инжекторе линейного протонного ускорителя должен обладать следующими свойствами: высокой газовой эффективностью, высокой эмиссионной способностью, высоким процентным содержанием протонов в пучке, высокой стабильностью пучка.

Список литературы

- [1] Аринин Л.В., Кузнецов Г.В., Марколия А.И. и др. // Тез докл. 9-го Всероссийского совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. Санкт-Петербург, 1998. С. 122.
- [2] Барченко В.Т., Заграничный С.Н., Соколовский А.Ю. // Изв. ЛЭТИ. Вып. 303. Л.: ЛЭТИ, 1982. С. 42–47.
- [3] Нижегородцев В.В. // Тр. 5-го Всесоюз. совещания по ускорителям заряженных частиц. Т. 1. Протвино, 1978. С. 368–370.
- [4] Барченко В.Т., Голубев В.П., Потсар А.А., Тарвид Г.В. А.С. № 866610. С приоритетом от 16.11.79.
- [5] Литвинов П.А. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-физические исследования. 1997. Вып. 4, 5 (31, 32). Т. 11. С. 48–50.
- [6] Вересов Л.П., Литвинов П.А., Неустроев Ю.П., Николаев Э.С. А.С. № 4364894. С приоритетом от 8.05.1989.
- [7] Вересов Л.П., Вересов О.Л., Скрипаль Л.П. // ЖТФ. 1997. Вып. 9. С. 135.