

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера СО РАН

Н.В. Ступишин, П.П. Дейчули
А.А. Иванов, В.В. Мишагин

КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЙ
ДУГОВОЙ ГЕНЕРАТОР ПЛАЗМЫ
ДЛЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ИНЖЕКТОРА
БЫСТРЫХ АТОМОВ

ИЯФ 2004-3

Новосибирск
2004

Квазистационарный дуговой генератор плазмы для диагностического инжектора быстрых атомов

*Н.В. Ступишин, П.П. Дейчули,
А.А. Иванов, В.В. Мишагин*

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
630090, Новосибирск, Россия

Аннотация

В работе описан квазистационарный плазменный генератор на основе дугового разряда с эквивалентным потоком протонов несколько ампер. Генератор предназначен для создания плазменного эмиттера в инжекторе быстрых атомов для диагностики высокотемпературной плазмы.

Параметры генерируемой плазмы исследовались при токе дугового разряда от 150 до 350 А. Максимальная плотность ионного тока в плоскости эмиттера на расстоянии 125 мм от анода источника составляла 250 мА/см². Неоднородность потока плазмы в круге диаметром 60 мм, что соответствовало размеру плазменной сетки ионно-оптической системы, равнялась $\pm 6\%$. Длительность рабочего импульса генератора до 1 секунды.

*N.V. Stupishin, P.P. Deichuli,
A.A. Ivanov, V.V. Mishagin*

Quasistationary arc plasma generator for diagnostic neutral beam injector

Abstract

Plasma generator based on arc discharge in hydrogen flow is described. The plasma flow is few equivalent amperes. The generator is meant for plasma emitter creation in diagnostic neutral beam injector. The generator was used at the arc discharge current in range 150 – 350 A. The ion current density at a plane of the first grid of the injector is 250 mA/cm². The plasma flow inhomogeneity is $\pm 6\%$ inside the usable emitter area of 60 mm diameter, which corresponds to the ion optical system aperture. The pulse duration is up to the 1 sec.

© Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

Введение

В настоящее время в ИЯФ СО РАН накоплен большой опыт по созданию импульсных дуговых плазменных генераторов [1]. Плазма в них генерируется разрядом в рабочем газе, который горит между холодным катодом и анодом в канале, образованном изолированными металлическими диафрагмами. Вследствие высокой плотности дугового тока, выходящая из анодного отверстия плазменная струя содержит до 95% протонов, а газовая эффективность в квазистационарном режиме стремится к 100%. Такие генераторы плазмы используются для создания плазменного эмиттера в ионных источниках инжекторов быстрых атомов. Одной из областей применения инжекторов является диагностика плазмы в установках с магнитным удержанием. Длительность рабочего импульса на большинстве современных термоядерных установках составляет несколько секунд и более. Соответственно, для диагностики плазмы требуются инжекторы со сравнимой длительностью рабочего импульса. Максимальная длительность импульса дугового генератора плазмы, разработанного ранее в ИЯФ СО РАН, составляла 0.1 с [2]. Целью данной работы являлась модификация конструкции такого генератора для удлинения импульса до 1 секунды и получения приемлемого ресурса работы (~5000 импульсов) без замены узлов. Основными проблемами, которые предстояло решить, были следующие. Необходимо, во-первых, обеспечить достаточно надежную работу наиболее напряженных элементов конструкции генератора в течение рабочего импульса. Затем, поскольку в течение импульса происходит их значительный нагрев, необходимо организовать эффективный теплоотвод от них в промежутках между импульсами за время около 1 мин. Для снижения эрозийной нагрузки ток разряда в исследованном генераторе был несколько снижен по сравнению с прототипом, вместо медного катода использовался более стойкий молибденовый. Был также введен ряд других конструктивных изменений. В отличие от прототипа генератора плазмы, помимо охлаждения катода и анода, было также применено охлаждение диафрагм дугового канала. Одним из узлов, который ограничивал длительность работы генератора плазмы, описанного в [2], была тороидальная обмотка, использовавшаяся для создания магнитного поля на периферии объема расширения плазменной струи перед сеточной системой. Часть ионов плазмы, проникая внутрь обмотки между витками, отражалась обратно и

попадала в плоскость плазменной сетки. При этом однородность плазменного эмиттера улучшалась и увеличивалась плотность тока ионов за счет отраженных частиц. Такой подход предполагает высокую прозрачность обмотки, возбуждающей периферийное магнитное поле, что приводит к необходимости использования тонких проводников с большим (~ 1 кА) током. В результате, длительность рабочего импульса ограничивается нагревом обмотки и износом электроизоляции под действием больших ponderomotorных сил. В рассматриваемом генераторе плазмы для создания периферийного поля использовался набор постоянных магнитов, что позволяло решить указанные проблемы. Заметим, что в этом случае магнитное поле имеет высокую степень мультиполярности, что приводит к более сложному закону отражения ионов, по сравнению с практически азимутальным полем тороидального соленоида. Это вызывает появление значительных азимутальных неоднородностей плотности тока ионов в плоскости вытягивания, так что доля потока ионов плазменной струи, которую можно использовать для формирования пучка несколько снижается.

Описание дугового генератора плазмы

Конструкция разработанного источника плазмы для диагностического инжектора быстрых атомов водорода (гелия) показана на рис.1. Дуговой разряд горит в канале, образованном кольцевыми проводящими диафрагмами (2), изолированными друг от друга керамическими шайбами. Анод (3) и диафрагмы дугового канала, за исключением ближайшей к катоду, изготовлены из меди для эффективного теплоотвода. Прикатодная диафрагма изготовлена из молибдена. Катод источника (1) имеет полусферическую полость радиусом 1 см и изготовлен из меди. Его поверхность для уменьшения распыления закрыта молибденовой вставкой. Катод охлаждается водой, протекающей в полости у его задней стенки. Охлаждение анода осуществляется потоком воды в опоясывающем кольцевом канале. Диафрагмы охлаждаются водой, циркулирующей в кольцевых полостях между ними. Герметичность канала охлаждения диафрагм обеспечивается двойным набором кольцевых витонových уплотнителей. Каналы в теле шайб соединяются с помощью прямоугольных пазов. Для равномерного охлаждения диафрагмы расположены так, что пазы на соседних диафрагмах повернуты друг относительно друга на угол 180° . При работе источника плазмы каналы охлаждения анода, катода и диафрагм соединились последовательно.

Как и в конструкции генераторов плазмы с меньшей длительностью импульса [1,2], для существенного (в 2-3 раза) увеличения выхода плазмы из источника в области анода с помощью специальной катушки (4) создавалось продольное магнитное поле. Максимальная величина этого поля достигалась

в области анода. Для эффективного использования магнитного потока и экранирования области расширения плазменной струи от магнитного поля катушка была помещена в стальной магнитный экран (5). В стандартном режиме работы напряженность магнитного поля вблизи анода была 0.1 Т, что соответствует величине тока в катушке около 9 А.

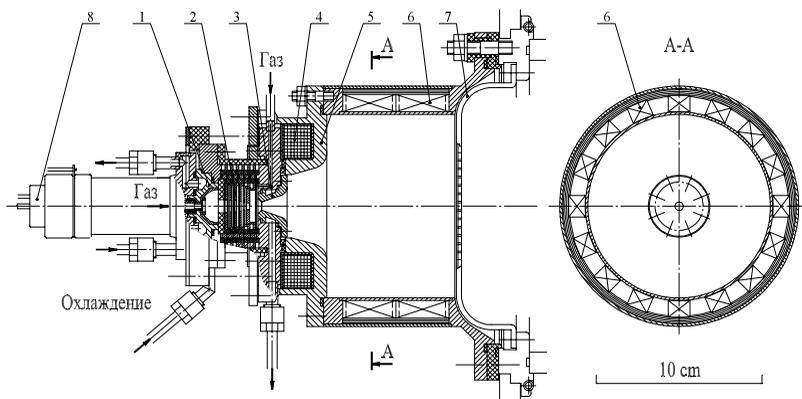


Рис. 1. Квазистационарный источник плазмы: 1 - катод, 2 - диафрагмы дугового канала, 3 - анод, 4 - катушка для создания продольного магнитного поля, 5 - магнитопровод, 6 - постоянные магниты, 7 - электрод ионно-оптической системы инжектора, 8 - газовый клапан.

Подпитка газом дугового разряда в течение рабочего импульса осуществлялась с помощью электромагнитного газового клапана [3]. Газ напускался в зазор между анодом и ближайшей к нему диафрагмой через диэлектрическую трубку длиной 150 мм и внутренним диаметром 1.2 мм. Диэлектрическая трубка служила для изоляции корпуса клапана от схемы питания при номинальном напряжении 50 кВ. Чтобы обеспечить достаточно высокое давление в ней во избежание высоковольтного пробоя, на выходе трубки была установлена диафрагма с отверстием диаметром 0.12 мм. При давлениях в трубке 1 – 3 атм стационарный поток газа на выходе устанавливался за 0.1 – 0.2 с.

Второй электромагнитный клапан (8) использовался при поджиге дугового разряда. Газ из него подавался через керамическую трубку, вставленную в отверстие в центре катода. Поджиг разряда осуществлялся при подаче между корпусом электромагнитного клапана, напускающего газ, и катодом импульса напряжения амплитудой 3 – 7 кВ и длительностью около 5 мкс. Для улучшения условий пробоя в корпус клапана вставлена молибденовая игла, потенциал которой при пробое был отрицательным по отношению к катоду. Подобная конструкция использовалась и ранее в импульсных дуговых источниках. Однако в квазистационарном источнике

ресурс работы системы поджига оказался недостаточным вследствие эрозии поджигового электрода и попадания в канал подачи газа продуктов эрозии катода. В связи с этим были исследованы альтернативные схемы инициации разряда.

В одной из них для зажигания разряда после заполнения дугового канала газом между катодом и анодом подавалось импульсное напряжение 1.5 – 4 кВ. Для этого после разгона тока в цепи параллельной дуговому промежутку, запускалась тиристорная схема, разрывающая ток в цепи разгона. Поскольку схема питания дугового тока содержит катушки индуктивности, при быстром разрыве тока происходило кратковременное увеличение напряжения на разрядном промежутке. Это приводит к пробоем в разрядном канале и зажиганию дугового разряда. Эксперименты показали, что данная схема не обеспечивает требуемой стабильности зажигания разряда.

Исследовалась также модификация описанной выше схемы поджига, когда импульсное перенапряжение прикладывается между катодом и ближайшей к нему диафрагмой, что заметно облегчало пробой. Однако, в этом случае иногда имели место пробои по поверхности изоляторов между электродами, используемыми для поджига. Поджиг разряда был также нестабилен из-за распыления материала катода на ближайшие керамическую и молибденовую диафрагмы.

Были также испытаны схемы, в которых электроды поджига располагались за анодом в области расширения потока плазмы. Для инициации разряда в одном случае использовался пробой по поверхности керамического изолятора, в другом была испытана схема аналогичная описанной выше, которая широко используется в импульсных дуговых генераторах с пробоем в газовой струе. Эксперименты показали, что в этих схемах невозможно обеспечить поступление достаточного для пробоя количество плазмы в разрядный промежуток. По-видимому, это связано с удаленностью системы поджига от разрядного канала. Таким образом, исследованные альтернативные схемы поджига разряда не обеспечили стабильной работы источника и далее применялась стандартная схема, описанная выше. Для существенного увеличения ресурса работы этой схемы рабочая поверхность катода была закрыта от разряда молибденом.

Для получения требуемой однородности потока плазмы в плоскости эмиттера ионов (круг диаметром 60 мм) в области расширения потока плазмы создавалось мультипольное периферийное магнитное поле. Периферийное поле создавалось набором из 16 постоянных магнитов (6) из $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{77}\text{B}_8$ длиной 80 мм и сечением 9×12 мм, расположенных на внешней стенке расширительного объема. Вектор намагниченности магнитов был направлен вдоль радиуса и менял направление на противоположное на соседних магнитах. Снаружи магнитной стенки был установлен

магнитопровод (5) из электротехнической стали, что усиливает магнитное поле внутри вакуумной камеры на 10 – 15%. Магнитопровод также помогает избавиться от сильного магнитного поля вне источника плазмы, которое создает значительные неудобства при его сборке и эксплуатации. Напряженность магнитного поля у внутренней поверхности камеры равнялась около 0.25 Т и падала до 10^{-2} Т при удалении от магнитов на 2 см по радиусу.

Периферийные магнитные поля часто используются в разрядных камерах источников плазмы для увеличения времени жизни электронов [4, 5]. В данном случае оно служит для транспортировки потока плазмы к сеточной системе ионного источника.

Таким образом, принципиальными отличиями данного генератора от ближайшего прототипа - источника плазмы для инжектора [2] является водяное охлаждение диафрагм дугового канала, применение магнитной стенки на основе постоянных магнитов и использование катода с молибденовой рабочей поверхностью.

Схема питания

Схема питания дугового квазистационарного генератора плазмы принципиально отличается от использовавшихся ранее импульсных аналогов, в которых применялась формирующая LC-линия с высоковольтным разделительным трансформатором на выходе. В данном случае использовалась схема питания на базе инвертора, работающего на частоте 2.5 кГц, показанная на рис.2. Мощность от инвертора передается через понижающий разделительный трансформатор, обеспечивающий изоляцию на ускоряющее напряжение ионно-оптической системы инжектора (50 кВ) с последующим выпрямлением и фильтрацией.

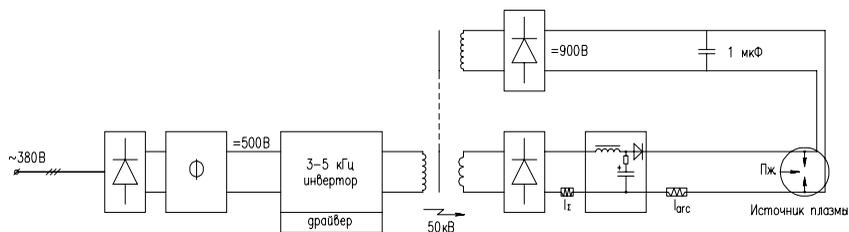


Рис. 2. Схема питания дугового генератора.

В подобных схемах существует проблема поджига дугового разряда, связанная с тем, что для зажигания дуги стартовый ток должен быть $\geq 100 - 150$ А, а до этого дуговой промежуток представляет собой разрыв цепи. Для решения этой проблемы обычно используется предварительный

разгон тока через дополнительную низкоомную цепь, параллельную дуговому генератору, с последующим ее разрывом и перебросом тока в дугу [6]. В схеме, показанной на рис.2 дуговой ток разгоняется в параллельной цепи, состоящей из ограничивающего низкоомного резистора и конденсатора емкостью 10 мФ. Если разряд не поджигается, то ток в цепи разгона затухает за несколько десятков миллисекунд, что обеспечивает пассивную защиту разрядного промежутка. Кроме того, параллельно разрядному промежутку был подключен конденсатор емкостью 1 мкФ. Перед началом поджигающего импульса этот конденсатор заряжался до напряжения 900 В, что улучшало условия зажигания разряда. Конденсатор был отделен от разгонной емкости диодами, которые открываются только после того, как происходит пробой, и напряжения на разряде падает до нескольких десятков вольт.

Экспериментальные результаты

Плотность ионного тока в плазменной струе измерялась сеточным зондом, который перемещался в плоскости перпендикулярной к оси источника в вертикальном и горизонтальном направлениях. Для измерения азимутальных профилей потока плазмы набор постоянных магнитов магнитной стенки вращался относительно оси генератора плазмы. Это позволило при неизменном положении зонда снимать зависимости плотности потока плазмы также и от азимутального угла.

На рис.3 приведен профиль плотности потока ионов, измеренный в плоскости перед плазменной сеткой на расстоянии 105 мм от анода генерато-

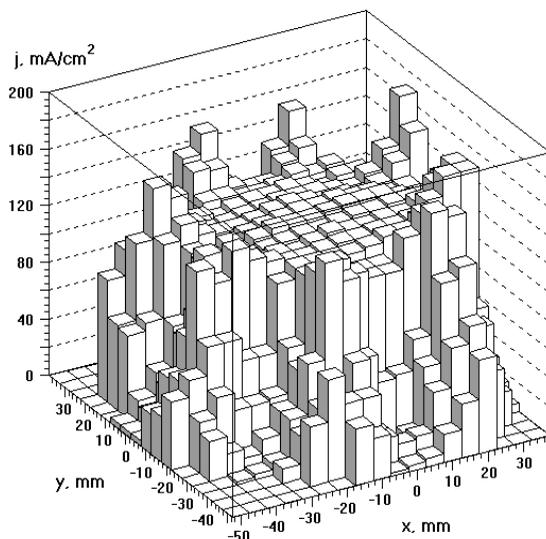


Рис. 3. Профиль плотности потока ионов в плоскости эмиттера.

ра плазмы. Как видно, профиль имеет периодическую по азимуту структуру с хорошо выраженными 8 пиками и провалами на периферии. Эти неоднородности, как уже указывалось, связаны с азимутальной неоднородностью магнитного поля. Период неоднородностей соответствует периоду следования магнитов, обращенных к плазме одноименными полюсами. При удалении зонда от плазменного генератора неоднородности потока плазмы уменьшаются главным образом за счет снижения амплитуды максимумов.

На рис.4 представлены радиальные зависимости плотности потока ионов, измеренные на расстоянии 125 мм от анода источника в плоскости плазменной сетки. Для сравнения приведен профиль плотности потока плазмы, измеренный без магнитной стенки. Как видно, использование магнитной стенки при заданном радиусе эмиттера приводит к существенному увеличению полного потока ионов и улучшению его однородности.

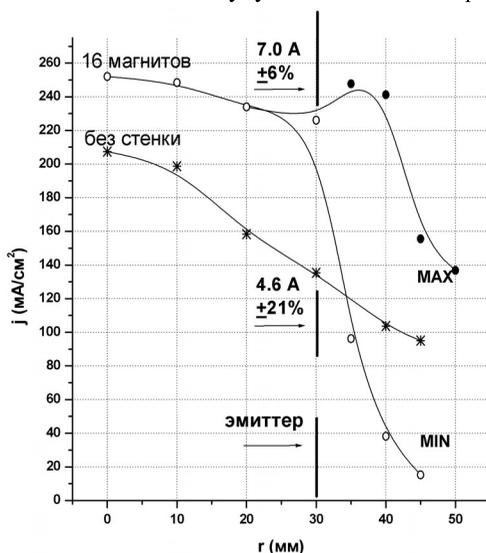


Рис.4. Плотность потока плазмы с магнитной стенкой и без нее.

На рис.4 светлыми кружками обозначен радиальный профиль, измеренный в сечении, где на периферии наблюдается минимум плотности, заполненные кружки соответствуют азимуту, при котором наблюдается максимум. Таким образом, установка магнитов привела к увеличению потока плазмы на эмиттер диаметром 60 мм (отмечен на рис.4) в 1.5 раза. Кроме того, при установке набора из 16 магнитов неоднородность плотности потока в этом диаметре с $\pm 21\%$ уменьшилась до $\pm 6\%$. Полный поток ионов плазмы в исследуемом режиме составил 23 А. Из них на выходе из расширительного объема с магнитами на периферии проводится 13 А, из которых около 7 А

сосредоточено в области диаметром 60мм с неоднородностью $\pm 6\%$. Для сравнения заметим, что тороидальные соленоиды, которые использовались в [2,7], отражают около 70% потока ионов. Из них в однородной части содержится $\sim 50\%$ [7] (см. также Табл.1).

Таблица 1

	Без магнитов	С 16 магнитами	Тороидальный соленоид [2]
Полный поток ионов из источника	23 А 100%	23 А 100%	100%
Поток на выходе из «магнитной стенки»		13 А 57%	70%
Поток в однородной части	4.6 А 20%	7 А 30%	свыше 50%
Неоднородность	$\pm 21\%$	$\pm 6\%$	$\pm 10\%$

Меньшая эффективность системы мультиполюсных магнитов связана как с потерями частиц на стенку вблизи поверхности магнитов, так и с азимутальными неоднородностями магнитного поля и связанными с ними неоднородностями потока плазмы. Однако к ее достоинствам следует отнести неограниченный ресурс работы, отсутствие системы питания и возможность работы в стационарном режиме.

Величина потока плазмы из источника зависит от плотности газа в ионно-оптической системе (ИОС) инжектора, которая при заданном потоке газа определяется ее проводимостью. Поэтому, вообще говоря, необходимо проводить измерения плотности потока плазмы с реальной сеточной системой. Однако на практике удобнее имитировать газовую проводимость ИОС относительно более простой геометрией, позволяющей расположить сеточный зонд в плоскости плазменной сетки. Для этого была использована первая плазменная сетка ИОС инжектора [11] с прорезью для установки и перемещения по радиусу сеточного зонда. Заметим, что газовая проводимость такой системы прямо пропорциональна количеству отверстий. Для того, чтобы сделать газовую проводимость плазменной сетки равной проводимости всей ИОС, нужно, очевидно, закрыть часть отверстий. Отношение газовой проводимости первой сетки к газовой проводимости всей ИОС вычислялось с помощью программы, описанной в [9].

Упрощенная модель источника плазмы представляла собой камеру с инжекционной площадкой, помещенной в анодном отверстии. Каждая сетка со 151 круглым отверстием $\varnothing 4$ мм (прозрачность 57%) была смоделирована решеткой с квадратными отверстиями размером 4×4 мм, расположенными в шахматном порядке (прозрачность 50%). Полная площадь отверстий в модели с точностью несколько процентов соответствовала полной площади отверстий в реальных сетках. Толщины сеток и величины зазоров

соответствовали реальным. В результате численного моделирования было установлено, что газовая проводимость ИОС в 3,7 раза меньше проводимости первой сетки. Таким образом, для правильной имитации газовых условий в инжекторе необходимо закрыть в ней около 70% отверстий. На рис.5 приведена экспериментальная зависимость плотности потока плазмы на оси источника в плоскости эмиттера от прозрачности плазменной сетки (отношению площади отверстий к площади сечения вакуумной камеры магнитной стенки). Первая точка ($j/j_0 = 1$) соответствует полностью открытой апертуре. Следующая точка снята при установке плазменной сетки. Последняя точка получена, когда в первой сетке закрыто 70% отверстий, и она имитирует по газовой проводимости всю ИОС. При этом происходило уменьшение плотности потока плазмы на оси примерно на 30% по сравнению со случаем, когда диафрагмы отсутствуют. Эксперименты показали, что установка сетки не приводит к заметному изменению относительного профиля плотности потока плазмы.

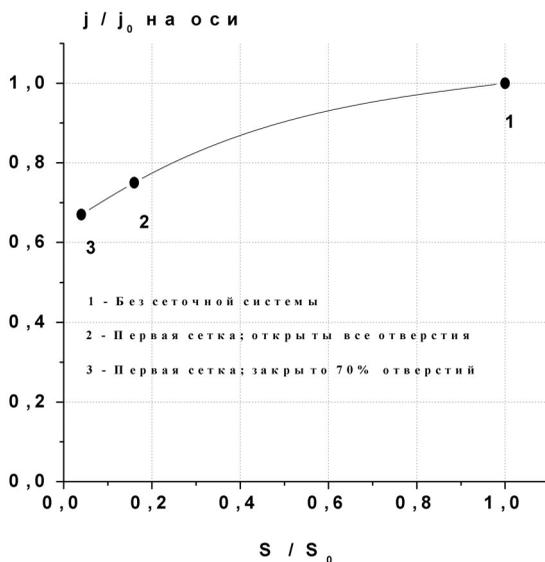


Рис. 5. Зависимость плотности потока плазмы на оси от прозрачности 2 мм диафрагмы в плоскости эмиттера.

На рис.6 представлены зависимости плотности потока ионов в плоскости эмиттера от тока дугового разряда при различных значениях магнитного поля в анодной области.

При токе дуги около 100 А и ниже наблюдалось самопроизвольное погасание разряда, вследствие чего для обеспечения стабильности работы источника требуется ток разряда более 120 – 150 А.

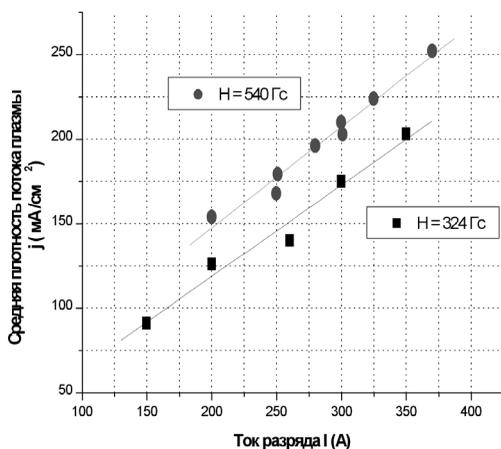


Рис. 6. Зависимость плотности потока ионов от тока дугового разряда и магнитного поля в области анода.

При фиксированном токе разряда, начиная с некоторого значения магнитного поля в анодной области, наблюдалась неустойчивость, которая проявлялась в модуляции до 50% по амплитуде потока плазмы из источника с характерными временами около 0.5 мс. Неустойчивость возникала также при недостаточном потоке газа в анодную область. Аналогичная неустойчивость в импульсных аналогах исследуемого генератора плазмы наблюдалась ранее в [7, 10].

При токах дуги 150 – 350 А и магнитном поле в анодной области до 650 Гс плотность ионного тока в плоскости эмиттера менялась от 50 до 250 mA/cm^2 . Падение напряжение на разряде в различных режимах работы составляло от 50 до 75 В.

Измерения массового состава ионного пучка, извлекаемого из квазистационарного дугового генератора, проводились с помощью магнитного масс-анализатора, который был установлен на расстоянии 4 м от ионного источника. Измерения показали, что относительное содержание ионов в пучке по току составляет $\text{H}^+ - 87\%$, $\text{H}_2^+ - 5\%$, $\text{H}_3^+ - 8\%$. Данные значения получены при токе разряда 270 А и токе ионного пучка 1.85 А. Более подробные данные о составе пучка приведены в работе [8].

Ресурсные испытания

Как уже отмечалось, одной из главных проблем при разработке дугового генератора плазмы является достижение приемлемого ресурса работы. Если считать, что диагностический инжектор в течение месяца делает около 1000 импульсов, то ресурс, соответствующий использованию

источника на протяжении года без переборки, должен как минимум составлять несколько тысяч импульсов. Такой ресурс работы был принят в качестве необходимого для рассматриваемого генератора плазмы.

Для источника плазмы инжектора [2] ресурс составлял 3000 – 5000 с в импульсах длительностью 0.1 с [10]. В конкретных случаях ресурс часто определялся тем, что при длительной работе отверстие в катоде для напуска газа запылялось медью до полной потери газовой проводимости. Кроме того, отмечалось, что часто происходило запыление внутренней поверхности керамической трубки поджигового электрода, что приводило к пропускам поджига разряда.

Первая серия ресурсных испытаний исследуемого источника состояла из 1000 импульсов длительностью 0.2 с (всего около 200 с работы) с периодом следования 30 с. После разборки не было обнаружено сколько-нибудь заметного уменьшения катодного отверстия и следов запыления медью керамической трубки газового канала. Однако пространство между прикатодной керамической диафрагмой и следующей молибденовой диафрагмой со стороны канала полностью запылялось медью. Это не привело к существенным отклонениям в работе генератора плазмы.

Дальнейшие испытания показали, что в режиме с импульсами длительностью 0.2 – 2 с отверстие в катоде забивается медью при интегральном времени работы более 1000 с. Именно этот фактор в первую очередь ограничивал ресурс работы источника.

Радикально улучшить ситуацию позволило использование катода с молибденовой вставкой, которая в значительно меньшей мере подвержена эрозии в разряде. После установки вставки, покрывающей рабочую поверхность, была проведена повторная серия из 1000 импульсов длительностью 0.25 с, которая не выявила сколько-нибудь заметных следов распыления материала катода. Таким образом, ресурс работы дугового генератора с молибденовой поверхностью катода при длительности импульса 0.25 с. может быть оценен, по меньшей мере, в несколько тысяч импульсов.

На следующем этапе ресурсных испытаний источник работал в режиме 0.5 – 1 секундных импульсов с периодом следования не менее 35 секунд. В этом режиме было сделано около тысячи импульсов. Интегральное время работы дугового генератора к концу испытаний в этом режиме составило более 500 секунд, из которых около 400 секунд было получено в 0.5 секундных импульсах и около 100 секунд – в импульсах длительностью 1 секунда.

Для контроля стабильности характеристик источника через каждые 50 с интегрального времени работы проводились измерения плотности потока плазмы в плоскости предполагаемого расположения эмиттера ионов на расстоянии 130 мм от анода на оси дугового генератора.

После этой серии испытаний разборка дугового генератора показала,

что состояние анодного узла и диафрагм дугового канала существенно не изменилось. Наибольшему воздействию подверглась прикатодная керамическая диафрагма – края отверстия в ней подверглись значительной эрозии, со стороны катода напылился молибден. На рис.7 приведена фотография прикатодной керамической диафрагмы после 500 с работы источника при длительности импульсов 0.5 и 1 секунда, рядом показана новая диафрагма. Незначительные следы напыления молибдена были замечены также на кромке отверстия в катоде для напуска газа. Масса керамической диафрагмы, за счет распыления молибдена с катода, увеличилась на 0.8 г. Таким образом, испытания показали, что наиболее уязвимым местом с точки зрения ресурса работы является прикатодная керамическая диафрагма.

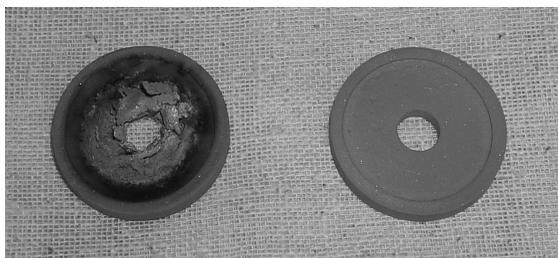


Рис. 7. Изменение состояния прикатодной керамической диафрагмы через 500 с работы источника в импульсах длительностью 0.5 – 1 с.

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- * Для получения приемлемых ресурсов работы в дуговом генераторе (около десяти тысяч импульсов) при токах разряда около 250 А и длительности импульса более 0.1 с поверхность катода должна быть выполнена из молибдена.
- * Анод и охлаждаемый дуговой канал генератора при длительностях рабочего импульса 0.1 – 1с имеют ресурс работы заведомо более 10000 импульсов.
- * При длительности 0.25 с ресурс работы источника с молибденовым катодом, составляет не менее 5000 импульсов.
- * При работе с импульсами длительностью 1 секунда проявляется значительная эрозия прикатодной керамической диафрагмы.

Один из путей увеличения ресурса работы в режиме 0.5 – 1 секундных импульсов состоит в увеличении диаметра отверстия в керамической диафрагме. Это приведет к уменьшению тепловой нагрузке на нее. Вторая возможность состоит в замене керамической диафрагмы на молибденовую. При этом необходимо принять меры по предотвращению закорачивания диафрагмы на катод.

Заключение

Разработан плазменный источник дугового типа для диагностического инжектора атомов с длительностью импульса до 1 секунды. К достоинствам источника следует отнести относительную простоту конструкции, надежность, а также высокое, 80 – 90%, содержание протонов в сформированном пучке. Достигнута плотность тока на эмиссионной поверхности до 250 mA/cm^2 при однородности по сечению эмиттера $\pm 6\%$. При длительности импульсов 0.25 с ресурс работы генератора плазмы составляет не менее 5000 импульсов. Выявлены причины ограничения ресурса при длительности рабочих импульсов 0.5 – 1с.

Авторы выражают благодарность В.И. Давыденко за интерес к работе и полезные обсуждения и В.В. Колмогорову за разработку схемы питания генератора плазмы. Работа выполнена при частичной поддержке WТZ через исследовательский проект RUS 1-580.

Литература

- [1] Yu.I. Belchenko, V.I. Davidenko, G.I. Dimov, et. at., Ion sources at Novosibirsk Institute of Nuclear Physics (invited) – Rev. Sci. Instrum. 61 (1990) 378.
- [2] Давыденко В.И., Морозов И.И., Росляков Г.В., Савкин В.Я. Протонный источник инжектора атомов установки АМБАЛ – ПТЭ, 1986, №6, с.39-42.
- [3] Деревянкин Г.Е., Дудников В.Г., Журавлев П.А. Электромагнитный затвор для импульсного напуска газа. – ПТЭ, 1975, №5, с. 168-169.
- [4] Панасенков А.А., Равичев С.А., Рогов А.В., Источник ионов водорода с периферийным магнитным полем. В сб.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 1984, вып.2 (15), с.56-62.
- [5] Stirling W.L., Tsai C.C., Ryan P.M. – Ibid., 1977, v.48, p.533.
- [6] Савкин В.Я. Генератор импульсов тока 400 А, 0.1 с для питания дугового разряда. – ПТЭ 1986, №5, с. 138-141.
- [7] Давыденко В.И., Димов Г.И., Морозов И.И., Росляков Г.В. Многоамперный импульсный источник протонов. – ЖТФ, 1983, т.53, с.258-263.
- [8] A.A.Ivanov, P.P.Deichuli, A.Kreter, V.V.Maximov, A.A.Podmingin, B.Schweer, I.V.Shikhovtsev, N.V.Stupishin, R.Uhlemann, D.V.Usoltsev, Characterization of Ion Species Mix of the Textor Diagnostic Hydrogen Beam Injector with an RF and Arc-discharge Plasma Box. Preprint Budker INP 2002-41, Novosibirsk, 2002.
- [9] А.С.Кривенко, В.И.Давыденко, А.А.Иванов, А.Н.Драничников Моделирование нестационарного профиля нейтрального газа в инжекторе атомов водорода методом стохастической динамики. Препринт ИЯФ СО РАН 2000-70, Новосибирск, 2000 г.
- [10] Г.В.Росляков Ионные и атомарные пучки для нагрева и диагностики плазмы диссертация на соискание степени д.ф.-м.н., Новосибирск, 1987 г.
- [11] V.I.Davydenko, P.P.Deichuli, A.A.Ivanov, A.Kreter, V.V.Mishagin, A.A.Podminogin, I.V.Shikhovtsev, B.Schweer, R.Uhlemann, Radio frequency ion source for plasma diagnostics in fusion experiments, Rev. Sci. Instrum. v.71, No.10, p.3728-3735 (2000).

*Н.В. Ступишин, П.П. Дейчули,
А.А. Иванов, В.В. Мишагин,*

**Квазистационарный дуговой генератор плазмы
для диагностического инжектора быстрых атомов**

*N.V. Stupishin, P.P. Deichuli,
A.A. Ivanov, V.V. Mishagin*

**Quasistationary arc plasma generator
for diagnostic neutral beam injector**

ИЯФ 2004-3

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев
Работа поступила 16.01.2004

Сдано в набор 17.01.2004

Подписано в печать 18.01.2004

Формат 60x90 1/16 Объем 0.9 печ.л., 0.7 уч.-изд.л.

Тираж 95 экз. Бесплатно. Заказ № 3

Обработано на IBM PC и отпечатано
на ротапринтере ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11