

УДК 621.039.624

СТАЦИОНАРНЫЙ ГАЗОВЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ С ДРЕЙФОМ ЭЛЕКТРОНОВ

С.В. Шарый, В.А. Сероштанов, В.Б. Юферов, О.С. Друй, В.В. Егоренков, Е.В. Рыбас

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины

61108, ул. Академическая, 1, Харьков, Украина

Поступила в редакцию 7 февраля 2008 г.

Приведена конструкция и результаты экспериментального исследования стационарного газового плазменного источника с замкнутым дрейфом электронов. Узел подачи газа в источнике выполнен в виде полого тела конической формы, что позволяет создать дополнительную зону ионообразования, вынесенную за пределы зоны ускорения. Расход рабочего газа (азот) изменялся в диапазоне от 3 до 20 см³/мин, давление в вакуумной камере изменялось в пределах $1 \cdot 10^{-4} - 8 \cdot 10^{-4}$ Торр. Измерены вольт-амперные характеристики и ионные токи источника в широком диапазоне режимов работы источника. Измерение ионных токов на осевой и радиальный коллекторы показали преимущественно радиальный ток, величиной до 1 А, в то время как ток на осевой коллектор находился на уровне 30 мА. Рассмотрена возможность использования источника для проведения экспериментов на демонстрационном имитационном сепараторе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: плазменный сепаратор, холловский плазменный источник, дрейф электронов, ионный ток, высокочастотные пульсации.

Для проведения демонстрационно-имитационных экспериментов на сепараторе нового поколения [1] проводится выбор ионно-плазменных источников (ИПИ) со стационарным режимом работы [2,3]. Основные требования к ИПИ следующие:

- стационарный режим, возможность получения плазмы плотностью $10^{10} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$ в объеме сепаратора с площадью входного сечения около 10^3 см^2 ;
- энергия ионов около 10 эВ с максимально высокой газовой эффективностью ИПИ;
- желательна достаточно высокая однородность плазмы во входном сечении сепаратора;
- многокомпонентный состав ионов – Хе, Кр, Аг, СО₂, С, О₂, О;
- отсутствие значительных величин ВЧ составляющих в ионно-плазменных потоках, которые наблюдаются в условиях, подобных нашим.

Выполнение всех этих требований требует проведения достаточно длительных работ, особенно по требованию получения достаточно однородной плазмы с диапазоном плотностей $10^{10} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$, для чего нужны эмиссионные токи около 1 – 10^3 А соответственно. Поэтому на первом этапе экспериментов взяты эмиссионные токи на уровне 1 А и один газ, что не требовало соблюдения всех требований сразу. Известно, что подобными параметрами обладают несколько типов ИПИ. Однако все они обладают существенным недостатком – они работают на область без магнитного поля либо со спадающим магнитным полем небольшой величины, около 100 Э. В нашем же случае в сепараторе величина магнитного поля находится на уровне 1 – 1,5 кЭ. Поэтому, для работы выбранных источников совместно с сепараторным продольным полем была выбрана магнитная топография с областью нулевого магнитного поля, что должно было дать возможность работы ИПИ в штатных режимах. Существенным недостатком являлась радиальная неоднородность плотности ионных токов. Устранение этого недостатка возможно при совместной работе ИПИ с продольным магнитным полем сепаратора и, по-видимому, при организации еще одной зоны разряда, где внешний ИПИ является, как бы, поджигающим устройством.

В предыдущих работах была рассмотрена возможность использования импульсного коаксиального источника плазмы, высокочастотного источника, двухступенчатого вакуумно-дугового источника. Все они обладают рядом достоинств и недостатков, которые вносят определенные особенности в проведение эксперимента по сепарации:

- при всех достоинствах высокочастотный источник требует высоких энергозатрат и вызывает сложности в диагностировании при проведении плазменных измерений;
- для импульсного коаксиального источника сложность вызывает требование, предъявляемое к длительности импульса, который должен значительно превосходить пролетное время системы ионами;
- стационарный вакуумно-дуговой источник исследуется в данное время.

Целью работы является создание и исследование источника с дрейфом электронов для использования его в демонстрационно-имитационном эксперименте на сепараторе при работе во внешнем магнитном поле.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данной работе рассматривается стационарный газовый плазменный источник с замкнутым дрейфом электронов, предложенный Кауфманом с сотрудниками [4], схематический вид которого представлен на рис. 1.

Корпус источника 1 цилиндрической формы изготовлен из магнитомягкой стали Ст3 и имеет крышку 2 из того же материала с выходным отверстием диаметром 7 см. С внешней стороны отверстия расположен накаливаемый катод 3 из вольфрамовой проволоки диаметром 0,8 мм. Анод 4 выполнен из графита и расположен внутри корпуса, имеет коническое отверстие, основанием обращенное к катоду. С другой стороны анод опирается на газораспределительную вставку 5, также изготовленную из графита с коническим отверстием, имеющим общую образующую с отверстием анода. Перед газораспределительной вставкой расположена магнитная катушка 6 с сердечником 7 из Ст3, создающая магнитное поле. Корпус, катушка с сердечником и крышка с выходным отверстием образуют единую магнитную систему.

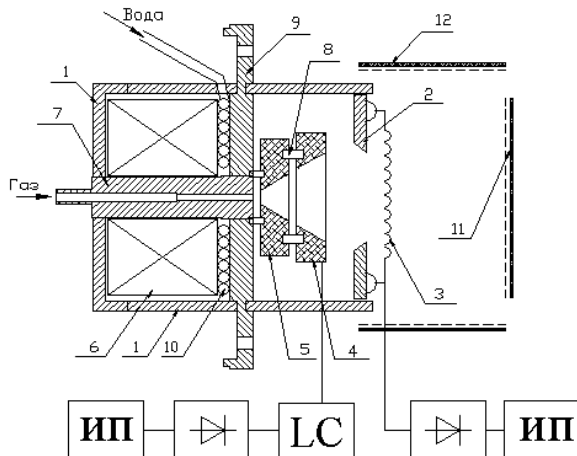


Рис.1. Схематический вид плазменного источника

1 – корпус, 2 – крышка с выходным отверстием, 3 – катод, 4 – анод, 5 – газораспределительная вставка, 6 – магнитная катушка, 7 – сердечник, 8 – алуидные кольца, 9 – фланец из нержавеющей стали, 10 – система водяного охлаждения, 11, 12 – коллекторы

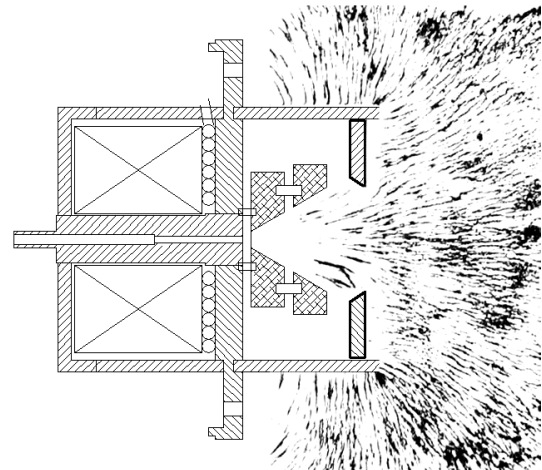


Рис.2. Топография магнитного поля

По оси внутри сердечника к газораспределительной вставке проходит канал подачи газа. Расход рабочего газа (азот) изменялся в диапазоне от 3 до 20 см³/мин, давление в вакуумной камере изменялось в пределах $1 \cdot 10^{-4}$ – $8 \cdot 10^{-4}$ Торр. Напряжение между анодом и катодом 100 – 600 В, ток накала катода 32 А.

В отличие от упомянутых выше работ [1, 2, 3], в которых источники работали на область без магнитного поля, нас интересовала магнитная топография (рис. 2) и величины продольных и поперечных составляющих, которые могут влиять на радиальные распределения плотностей ионного тока, особенно при малой величине энергий ионов.

На рис. 3 представлены продольные и радиальные составляющие магнитного поля источника в области разряда. На рис.3а нуль соответствует сечению выходного отверстия источника.

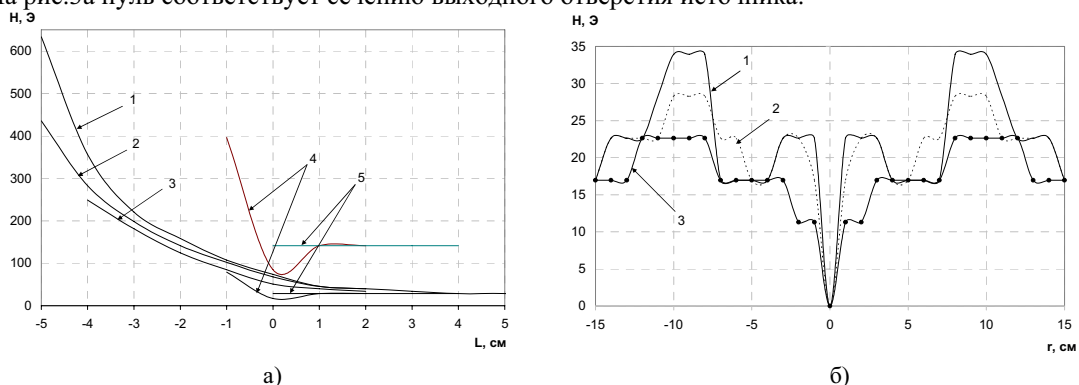


Рис.3. Напряженности магнитного поля плазменного источника

а) продольная составляющая на различных радиусах от оси 1 – r = 0 см; 2 – r = 1 см; 3 – r = 2 см; 4 – r = 3 см; 5 – r = 5 см; (верхние кривые 4, 5 продублированы в пятикратном масштабе);

б) радиальная составляющая для различных расстояний по оси от среза выходного отверстия (1 – l = 1 см; 2 – l = 2 см; 3 – l = 4 см) в зависимости от радиуса, нуль соответствует центральной оси источника

Газ подается в полость вставки через осевое отверстие. Между анодом и катодом, электрически соединенным с корпусом, прикладывается напряжение 100 – 600 В, катод разогревается до температуры, достаточной для эмиссии электронов. Замагниченные электроны, эмитируемые катодом, ускоряются в области

катодного падения потенциала и инжектируются внутрь анода, накручиваясь на силовые линии магнитного поля, создаваемого катушкой между торцом сердечника и крышкой корпуса. В результате столкновений с атомами рабочего газа они генерируют плазму. Уходу ионизирующих электронов из разрядного объема на анод препятствует магнитное поле, параллельное поверхности анода, на вставку – электрическое поле катодного падения потенциала. Для стабилизации в цепь анода дополнительно включен сглаживающий LC фильтр. Емкость накопителя составляет 1400 мкФ, индуктивность дросселя – 18 мкГн. Катушка 6 создавала магнитное поле до 600 Э.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристики источника представлены на рис. 4 для различных токов накала катода, величин магнитного поля и давления рабочего газа.

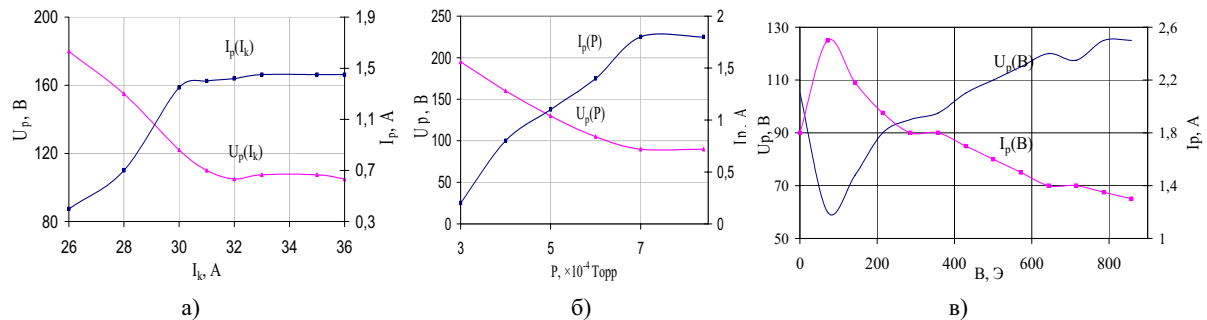


Рис.4. Характеристики плазменного источника

а – зависимость тока разряда от накала катода; б – зависимость тока разряда от напуска газа; в – зависимость тока разряда от величины собственного магнитного поля источника

Как видно из рис.4а, напряжение и ток плазменного разряда с увеличением тока накала катода до 30 – 32 А приходит в насыщение. Аналогичная ситуация наблюдается при увеличении давления до значения $7 \cdot 10^{-4}$ Torr (рис.4б). На рис.4в наблюдается характерный максимум тока и минимум напряжения при величине магнитного поля источника около 160 Э. При дальнейшем увеличении величины магнитного поля наблюдается снижение тока разряда.

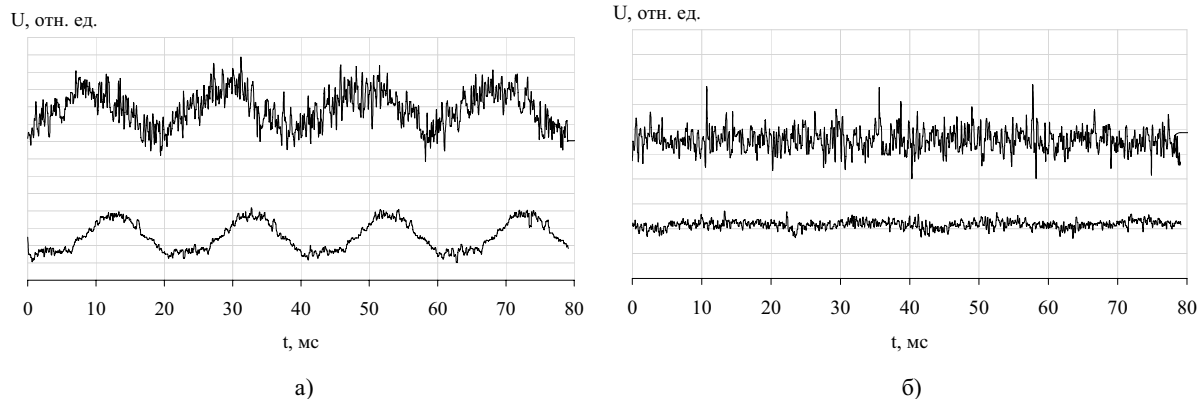


Рис.5. Формы напряжений

а – разрядное напряжение источника; б – сигнал с радиального коллектора

На рис.5 представлены осциллограммы разрядного напряжения и сигнал с радиального коллектора ионов. Верхние кривые на обоих рисунках получены без продольного магнитного поля сепаратора, а нижние – при включенном поле. Как видно, помимо обычной, 50 Гц, пульсации от источника наблюдается еще и высокочастотная составляющая, по-видимому, определяющаяся плазменными процессами, в частности, появлением на стенках вакуумной камеры униполярных дуг, создающих временные изменения профиля плотности плазмы. Эти изменения особенно катастрофичны в области вне плазменного источника, где отсутствует дрейф электронов, определяющий создание однородной плотности. Высокочастотные пульсации были также описаны в работе [5]. По мнению авторов, величина пульсаций зависит от расстояния катод-анод: «уменьшение промежутка "торец катода – торец анод" приводит к возбуждению интенсивных шумов в разряде, а удаление анода от катода затрудняет выход в пучок ионов из области интенсивного горения разряда». В нашем случае наблюдалось уменьшение высокочастотной составляющей при включении продольного магнитного поля в системе сепаратора (нижние кривые рис.5а, б) – плазма сжимается в область оси магнитной системы, наблюдавшиеся визуально катодные пятна униполярных дуг на стенках исчезают, то есть разряд на стенки вакуумной камеры не зажигается.

Как видно из сравнения осциллограмм ионного тока, приложенное внешнее магнитное поле стабилизирует разряд и уменьшает амплитуду высокочастотных колебаний в несколько раз.

Полученные характеристики (рис.4) являются достаточно традиционными. Существенным моментом оказывается то, что измерение ионных токов на осевой 11 и радиальный 12 коллекторы (см. рис.1), с отрицательным потенциалом на сетках до 200 В, показали преимущественно радиальный ток, величиной до 1 А, в то время как ток на осевой коллектор находился на уровне 30 мА. Данное положение отличается от приведенного в работе [6], где максимум плотности ионного тока находился на оси источника. В нашем случае это может указывать на то, что в функции распределения по энергиям продольных скоростей максимум находится в области малых энергий, что удовлетворяет предъявленным требованиям к источнику.

ВЫВОДЫ

Исследования показали, что данный источник с ионным током около 1 А удовлетворяет требованиям, предъявляемым к проведению демонстрационно-имитационного эксперимента с плотностью плазмы на уровне 10^{10} см⁻³. Однако потребуются дополнительные меры для получения однородной плазмы во входном сечении сепаратора 10^3 см².

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Довбня А.Н., Друй О.С. и др. Резонансный плазменный сепаратор для разделения изотопов. Выбор параметров // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Электроэнергетика и преобразовательная техника. – 2004. – №35. – С.169-179.
2. Юферов В.Б., Винников Д.В. и др. Плазменный источник для сепаратора // Вестник НТУ «ХПИ». – 2006. – №35. – С.125-131.
3. Юферов В.Б., Шарый С.В. и др. Стационарный плазменный источник тяжелых ионов с замкнутым дрейфом электронов и его криогенная система откачки для сепаратора элементов ДИС-1 // Труды конференции «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов в машиностроении», Харьков 2007. – С. 273-275.
4. Kaufman H.R., Robinson R.S., Seddon R. End-Hall ion source // J. Vac. Sci. Technol. – 1987. – Vol. A5, № 4. – P. 2081–2084.
5. Свиринов В.Т., Стогний А.И. Источник ионов с открытым торцом и анодом малой площади // Приборы и техника эксперимента. – 2005. – №4. – С. 85-88.
6. Свиринов В.Т., Стогний А.И. Формирование пучка равномерной плотности в холловском ионном источнике с открытым торцом // Приборы и техника эксперимента. – 1996. – №5. – С. 103-106.

STATIONAR GAS PLASMA SOURCE OF HEAVY IONS WITH CLOSED ELECTRON DRIFT

S.V. Shariy, V.A. Seroshtanov, V.B. Yuferov, O.S. Druy, V.V. Yegorenkov, E.V. Rybas

National Science Center "Kharkov Institute of Physics & Technology"

61108, Akademicheskaya str, 1, Kharkov, Ukraine

The construction and experimental research output of stationary gas plasma source of heavy ions with closed electron drift have been produced. The gas block in the source is made as hollow body of conical form. This allows to make a supplement area of ion formation carried out from borders of acceleration area. The workgas expense have been vary within 3 to 20 sm³/min, and vacuum camera pressure have been vary within $1 \cdot 10^{-4}$ to $8 \cdot 10^{-4}$ Torr. The current-voltage characteristics of source, ion current and plasma discharge current were measured. The measurement of ion currents on axial and radial collectors shown in preference the radial current 1 A, however the axial current make up 30 mA. The amenity of plasma source for demonstration-imitating separator experiments has been considered.

KEY WORDS: plasma separator, holl plasma source, electron's drift, ion current, highfrequency pulsing.