

УДК 621.384.6

ИСТОЧНИК ПСЕВДОЛЕНТОЧНЫХ ПУЧКОВ ИОНОВ МЕТАЛЛОВ

А.И. Рябчиков, И.Б. Степанов, Д.О. Сивин

Томский политехнический университет
E-mail: stepanovib@tpu.ru

Рассмотрена конструкция протяженного источника ионов проводящих материалов на основе непрерывного вакуумно-дугового разряда «Радуга-6». Показана возможность формирования псевдоленточных пучков ионов металлов протяженностью до 0,6 м с током до 2 А и энергией до 160 кэВ с применением протяженного вакуумно-дугового испарителя с замкнутой траекторией движения катодного пятна. Приведены результаты исследования закономерностей изменения ионно-эмиссионных свойств вакуумно-дугового испарителя для различных систем формирования магнитного поля. Рассмотрены условия формирования ионного пучка в зависимости от режимов генерации ускоряющего напряжения.

Ключевые слова:

Ионный источник, вакуумно-дуговой разряд, металлическая плазма.

Key words:

Ion source, vacuum-arc discharge, metal plasma.

Введение

Большинство известных источников ионов металлов имеют площадь поперечного сечения пучка порядка 300 см² [1, 2]. К сожалению, технологические характеристики подобного оборудования ограничивают его использование для модификации свойств поверхности крупногабаритных изделий. В работе рассматривается вариант создания технологического источника ускоренных ионов проводящих материалов для обработки протяженных изделий с линейными размерами до 1 м. Предложенные подходы к созданию оборудования являются развитием работ по созданию высокопроизводительных источников ионов на основе непрерывного вакуумно-дугового разряда с очисткой плазмы прямоточными, электромагнитными плазменными фильтрами жалюзийного типа [3]. Особое внимание в статье уделено вопросам стабильного инициирования и горения вакуумно-дугового разряда на протяженном катоде с замкнутой траекторией движения катодного пятна, создания устройства очистки плазмы от микрокапельной фракции и формирования псевдоленточного пучка ионов в диоде прямого действия, а также повышения ресурса непрерывной работы ускорителя.

Экспериментальная установка

Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1. Режим непрерывной генерации плазмы реализуется в разрядном промежутке, образованном полым анодом – 1 и катодом – 2 протяженного вакуумно-дугового испарителя. Стабилизация разряда и удержание катодных пятен на торцевой поверхности охлаждаемого катода осуществляется путем формирования двухарочного магнитного поля с индукцией 25...200 Гс. Магнитное поле формировалось как с применением электромагнитной катушки, так и с помощью постоянных магнитов. Для очистки плазменного потока от микрокапельной фракции разработана модификация протяженного плазменного фильтра (ПФ) жалюзийного ти-

па. Режим генерации ионного пучка осуществляется в результате формирования постоянной разности потенциалов в диоде, образованном, потенциальным сеточным электродом – 5 и двойным потенциальным сеточным электродом – 6.

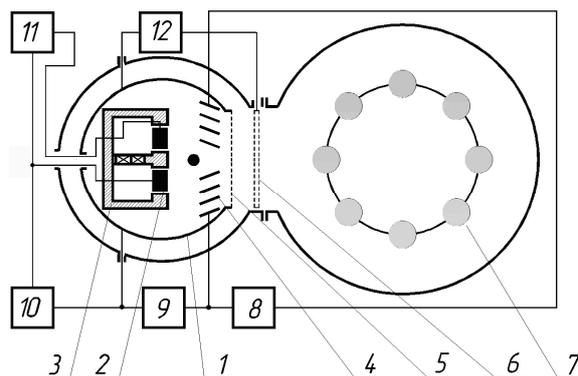


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1) анод; 2) водоохлаждаемый катод; 3) магнитопровод; 4) ПФ; 5; 6) сеточный электрод; 7) обрабатываемые изделия; 8; 9) источники питания ПФ; 10; 11) источники питания вакуумного дугового испарителя; 12) источник питания ускоряющего напряжения

Вакуумно-дуговой генератор металлической плазмы

Катод протяженного вакуумно-дугового испарителя выполнен в виде пластины толщиной 1 см, шириной 10 см и длиной 60 см. В источнике предусмотрено непосредственное охлаждение тыльной стороны катода дистиллированной водой. Ресурс непрерывной работы катода оценивается более чем в 200 ч, что в 5 раз превышает время работы традиционных аксиально-симметричных вакуумно-дуговых генераторов плазмы. Двухарочное магнитное поле для управления траекторией движения катодного пятна создается Ш-образным магнитопроводом с электромагнитной катушкой на центральном сердечнике или постоянными магнитами, установленными по периметру магнито-

провода, рис. 1. Поджигающий электрод размещается на торцевой поверхности катода, вблизи траектории движения катодного пятна. На расстоянии 60 мм от поверхности катода, по его периметру, размещается водоохлаждаемый анод.

Исследования процессов инициирования и развития разряда в протяженной разрядной системе показали, что скорость перемещения катодного пятна для различных материалов катода существенно изменяется в зависимости от напряженности магнитного поля. Экспериментальные данные, представленные на рис. 2, показывают, что для каждого материала катода характерна определенная скорость перемещения катодного пятна. Например, при индукции магнитного поля 100 Гс скорость перемещения катодного пятна составила для титана – 16,2 м/с; дюралюминия – 8,2 м/с; стали 12Х18Н9Т – 5 м/с; меди – 1,5 м/с.

Характеристики источника ускоренных ионов определяются эффективностью использования плазменного потока. В этой связи были исследованы закономерности изменения ионно-эмиссионных свойств протяженного вакуумно-дугового генератора металлической плазмы для различных материалов, в зависимости от индукции магнитного поля вблизи рабочей поверхности катода. Для измерения ионного тока насыщения из плазмы использовался коллектор размером 0,6×0,2 м. Коллектор располагался параллельно поверхности катода на расстоянии 0,23 м. Для отсечки плазменных электронов на коллектор подавался потенциал –100 В. На рис. 3 представлены данные изменения ионного тока насыщения из плазмы для различных материалов катода в зависимости от напряженности магнитного поля при токе разряда 145 А.

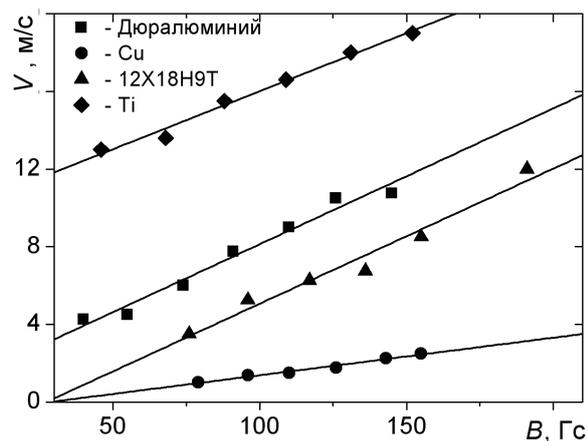


Рис. 2. Скорость перемещения катодного пятна в зависимости от магнитного поля на поверхности катода

Из представленных данных следует, что увеличение индукции магнитного поля приводит к снижению ионного тока насыщения из плазмы. Стабильное горение разряда наблюдается при индукции магнитного поля 40...70 Гс. При этом значении магнитного поля ионный ток насыщения из плазмы составляет около 4 % от тока разряда. Получен-

ные результаты позволяют сделать прогноз о перспективности применения предложенной конструкции протяженного вакуумно-дугового испарителя не только в источниках ускоренных ионов, но и в генераторах металлической плазмы для использования в технологиях ионно-плазменного осаждения покрытий на крупногабаритные изделия.

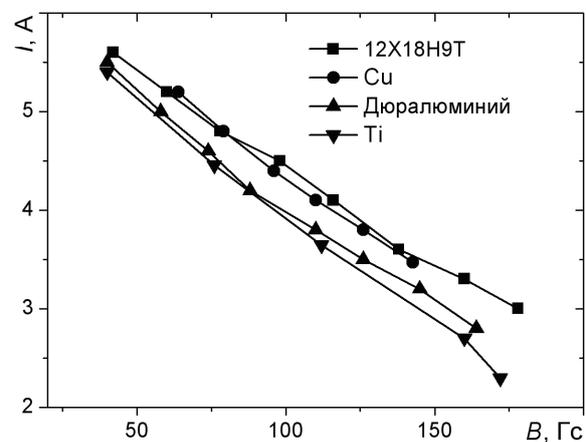


Рис. 3. Ионный ток насыщения из плазмы в зависимости от магнитного поля

С целью обеспечения максимального ресурса работы протяженного катода вакуумно-дугового испарителя было разработано несколько модификаций магнитных систем. В частности, использована магнитная система с двухрочным магнитопроводом, по типу магнетронных распылительных систем. В данной конструкции выработка катода происходит в локальной области, занимающей 10...15 % от площади поверхности катода. По мере выработки катода происходит увеличение индукции магнитного поля вблизи его поверхности, что согласно данным, рис. 3, обуславливает снижение ионно-эмиссионных свойств вакуумно-дугового испарителя.

Для предотвращения подобного эффекта была применена система поступательного перемещения охлаждаемого катода в продольном направлении и возвратно-поступательного – в поперечном. Применение системы перемещения позволило получить наилучшую выработку катода при сохранении эмиссионных свойств вакуумно-дугового испарителя.

Другой вариант магнитной системы основан на формировании поперечного к плоскости перемещения катодного пятна магнитного поля с минимальным градиентом на рабочей поверхности катода, рис. 1. Концентраторы магнитного поля вблизи боковых торцов катода обеспечивают однородное магнитное поле вблизи рабочей поверхности, вне зависимости от его выработки. Подобная конструкция представляется оптимальной, поскольку обеспечивает высокий ресурс работы источника без применения дополнительных систем перемещения катодного узла.

Плазменный фильтр

ПФ в источнике ионов проводящих материалов на основе непрерывного вакуумно-дугового разряда является принципиально важным элементом. Применение металлической плазмы без очистки от микрокапельной фракции значительно снижает электрическую прочность диодной системы, а также затрудняет реализацию большинства технологических режимов ионной имплантации.

Для протяженного вакуумно-дугового испарителя ионного источника была предложена и разработана конструкция прямооточного, электромагнитного ПФ жалюзийного типа. Разработка является продолжением работ авторов статьи по созданию серии устройств очистки плазмы от микрокапельной фракции на основе оптически непрозрачных жалюзийных систем, с формированием вблизи стенок ПФ отражающего плазменные ионы потенциала, в условиях замагниченности электронного компонента плазмы [3, 4].

Конструкция ПФ представляет собой оптически непрозрачную систему прямолинейных электродов, наклоненных под углом к направлению распространения плазменного потока, рис. 1. На электродах фильтра формируется положительный по отношению к плазме потенциал смещения. Электронная компонента плазменного потока замагничивается магнитным полем, формируемым при пропускании по электродам фильтра постоянного тока.

Зависимости изменения ионного тока насыщения на коллектор, расположенный на выходе ПФ, при индукции магнитного поля на поверхности катода 58 и 112 Гс приведены на рис. 4. Основным фактором, влияющим на эмиссионные свойства вакуумно-дугового генератора плазмы, является суперпозиция полей вакуумно-дугового испарителя и ПФ.

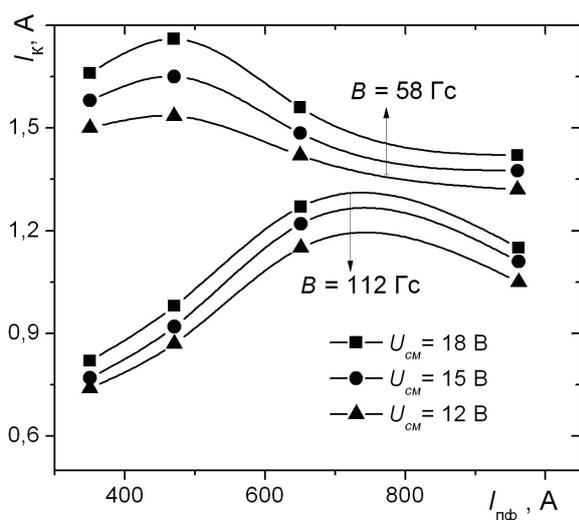


Рис. 4. Зависимости изменения ионного тока насыщения на коллектор I_k от тока по электродам ПФ $I_{пф}$ и напряжения смещения на электродах

При оптимизации топографии магнитного поля ионный ток насыщения из плазмы может достигать 1,8 А, что удовлетворяет условиям разработки ионного источника. В соответствии с экспериментальными результатами, рис. 4, был разработан источник питания ПФ, формирующий потенциал смещения до -18 В и ток по электродам фильтра, изменяющийся от 400 до 700 А.

Формирование ионного пучка

Принципиально важное условие эффективной работы протяженного источника с псевдоленточным ионным пучком «Радуга-6» связано с обеспечением высокой однородности распределения плотности ионного тока по длине пучка. Условие может быть легко реализовано при использовании постоянного ускоряющего напряжения. Ионный пучок будет формироваться в области генерации плазмы катодным пятном. С учетом продолжительности технологических режимов ионной имплантации, например, в металлы, достигающей нескольких часов, неоднородность интегральной плотности ионного тока по длине источника не превысит нескольких процентов.

Мощность ионного пучка при токе, например, 2 А и ускоряющем напряжении 40 кВ будет составлять около 80 кВт. Для понижения мощности ионного пучка был использован пассивный вариант включения ПФ. В этом варианте работы ионного источника при ускоряющем напряжении 40 кВ был сформирован псевдоленточный пучок ионов титана с током до 200 мА и энергией до 160 кэВ (с учетом зарядового состояния ионов титановой плазмы).

Другой вариант управления мощностью ионного пучка основан на импульсно-периодическом формировании ускоряющего напряжения при непрерывной генерации плазмы катодным пятном [5]. При данном подходе в источнике «Радуга-6», для получения однородной плотности ионного тока по длине псевдоленточного ионного пучка, необходимо соблюдение условия десинхронизации циклической частоты перемещения катодного пятна по замкнутой траектории протяженного вакуумно-дугового испарителя и частоты следования импульсов ускоряющего напряжения.

Выводы

1. Разработана конструкция ускорителя «Радуга-6», формирующего псевдоленточный пучок ионов проводящих материалов, протяженностью до 0,6 м, с током до 2 А и энергией до 160 кэВ при ускоряющем напряжении 40 кВ. Псевдоленточный ионный пучок формируется с использованием очищенной от микрокапельной фракции плазмы непрерывного вакуумно-дугового разряда с замкнутой траекторией движения катодного пятна.
2. Разработана конструкция протяженного электромагнитного плазменного фильтра жалюзий-

- ного типа. Показано, что с учетом суперпозиции магнитных полей вакуумно-дугового испарителя и плазменного фильтра, максимальная эффективность его работы достигается при пропускании по жалюзийным электродам постоянного тока 450 А.
- Для различных материалов установлены зависимости изменения скорости перемещения катодного пятна и ионно-эмиссионных свойств вакуумно-дугового разряда от магнитной индукции вблизи рабочей поверхности катода. Показано, что стабилизация разряда на поверхности катода достигается в диапазоне изменения индукции магнитного поля 40...70 Гс.
 - Рассмотрены варианты магнитных систем, обеспечивающих повышение ресурса работы ускорителя. Установлено, что максимальная выработка катода вакуумно-дугового испарителя достигается с использованием возвратно-поступательного перемещения катодного пятна и магнитопровода, формирующего продольное к поверхности катода магнитное поле.
- Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 09-08-12061-офи_м.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Brown I.G., Anders A., Dickinson M.R., MacGill R.A., Monteiro O.R. Recent advances in surface processing with metal plasma and ion beams // *Rev. Sci. Instrum.* – 1999. – V. 112. – № 3. – P. 271–277.
- Ryabchikov A.I., Dektjarev S.V., Stepanov I.B. The metal vapor vacuum arc ion sources Raduga // *Rev. Sci. Instrum.* – 1994. – V. 65. – № 7. – P. 3126–31230.
- Ryabchikov A.I., Stepanov I.B. Investigations of forming metal-plasma flows filtered from microparticle fraction in vacuum-arc evaporators // *Rev. Sci. Instrum.* – 1998. – V. 69. – № 5. – P. 893–896.
- Степанов И.Б. Оптически непрозрачные системы жалюзийного типа для очистки плазмы вакуумно-дугового разряда от микрокапельной фракции // *Известия вузов. Физика.* – 2007. – Т. 44. – № 10/3. – С. 16–24.
- Ryabchikov A.I., Stepanov I.B., Dektjarev S.V., Sergeev O.V. Vacuum arc ion and plasma source Raduga-5 for materials treatment // *Rev. Sci. Instrum.* – 1998. – V. 69. – № 5. – P. 810–814.

Поступила 06.04.2010 г.

УДК 629.78.01

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОРРЕКТИРУЮЩЕЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

С.Ю. Боязитов, В.Ф. Вострыков, В.Е. Деев, Н.М. Катасонов, М.В. Михайлов, И.А. Подоплелов

ОАО «Научно-производственный центр «Полюс», г. Томск
E-mail: polus@online.tomsk.net

Рассмотрены особенности проектирования систем электропитания электроракетных плазменных двигательных установок, используемых для коррекции орбиты малых космических аппаратов. Показана возможность увеличения удельной мощности этих систем с помощью совмещения функций нескольких преобразователей электрической энергии, работающих последовательно, в одном. Приведены функциональная схема устройства, построенного на базе совмещенного преобразователя, его основные параметры, показан внешний вид.

Ключевые слова:

Система электропитания, электрореактивная двигательная установка, преобразователь электрической энергии.

Key words:

Power supply system, electrojet propulsion device, power transformer.

В настоящее время широкое распространение получают малые космические аппараты (КА) [1]. Это связано с тем, что их вывод на орбиту обходится значительно дешевле, так как не требуются мощные, дорогостоящие ракетносители. Поскольку масса подобных КА не должна превышать 500 кг, то приоритетным становится снижение массы всех бортовых систем при сохранении высокого уровня надежности. Из-за ограниченной энергооборуженности и малых габаритов таких аппаратов необходимо не только обеспечить высокую удельную мощность, но и минимизировать потери в элемен-

тах схемы. Достичь этого можно совместными усилиями разработчиков всех систем, входящих в электрореактивную плазменную двигательную установку (ЭРПДУ) (двигатель, система газораспределения и система электропитания). Их задача – найти рациональную структуру каждой системы, т. е. определить минимальное количество узлов, достаточное для выполнения целевой функции при заданном уровне надежности, и оптимальное схемотехническое решение каждого узла. Кроме того, необходимо в заданных габаритах прибора разместить все конструктивные элементы узлов и обеспечить стой-