

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ОЧИЩЕННЫХ ОТ МИКРОКАПЕЛЬНОЙ ФРАКЦИИ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ И ПУЧКОВ ИОНОВ МЕТАЛЛА В ИСТОЧНИКАХ НА ОСНОВЕ НЕПРЕРЫВНОГО ВАКУУМНО-ДУГОВОГО РАЗРЯДА

А.И.Рябчиков, И.Б.Степанов, П.Я.Исаков

Научно-исследовательский институт ядерной физики при Томском политехническом университете, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина 2а, тел. 7-3822-423963, факс 7-3822-423934, e-mail alex@npi.tpu.ru

В работе представлены результаты исследований распределения плотности ионного тока по сечению потока плазмы и ионного пучка, сформированных в источнике на основе непрерывного вакуумно-дугового разряда, оснащенного аксиально-симметричным плазменным фильтром жалюзной конструкции. Показана возможность за счет изменения конфигурации электродов плазменного фильтра направленно изменять распределение плотности тока по сечению пучка от сфокусированного до дефокусированного со степенью неоднородности в распределении ионного тока не более 30 %.

I. Введение

Темпы внедрения технологий ионно-лучевой и ионно-плазменной модификации материалов в промышленности во многом будут определяться наличием простого, надежного в эксплуатации и высокопроизводительного оборудования. С этой точки зрения для генерации плазмы и формирования ионных пучков перспективным представляется использование непрерывного вакуумно-дугового разряда (ВДР), который характеризуется высокими ионно-эмиссионными свойствами, стабильностью функционирования и большим ресурсом непрерывной работы. В тоже время применение непрерывного ВДР в технологических генераторах плазмы и ионных источниках требует решения ряда специфических проблем, из которых в качестве наиболее важной можно выделить наличие в потоке дуговой плазмы значительной доли микрокапельной фракции.

В настоящей работе представлены результаты исследования особенностей формирования потоков плазмы и ионных пучков с большой площадью поперечного сечения в источнике на основе непрерывного ВДР, оснащенного аксиально-симметричным плазменным фильтром (ПФ) жалюзной конструкции [1].

II. Экспериментальная установка

Исследования выполнены с использованием источника ускоренных ионов и плазмы "Радуга 5" [2]. Структурная схема источника представлена на рис.1. Плазма, формируемая в непрерывном режиме, распространяется из электродугового испарителя (ЭДИ) в направлении аксиально-симметричного ПФ.

ПФ представляет собой систему вложенных, усеченных конусов, расположенных таким образом, что в направлении от катода ЭДИ в сторону рабочей камеры обеспечивается оптическая непрозрачность системы. Благодаря этому микрокапельная фракция, распространяющаяся в потоке дуговой плазмы, осаждается на электродах ПФ и в значительной степени исключается из плазменного потока. Условия транспортировки заряженного компонента плазмы обеспечиваются при создании в меж-

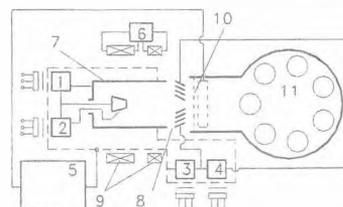


Рис.1. Схема источника "Радуга 5": 1-6 – источники питания; 7-ЭДИ; 8-ПФ; 9- катушки с током; 10-сеточный блок; 11-вакуумная камера.

электродных промежутках ПФ магнитного поля, в результате пропускания по электродам постоянного тока, и формировании на них положительного по отношению к плазме потенциала [3].

Формирование ионных пучков в источнике "Радуга 5" осуществляется в результате периодической подачи ускоряющего напряжения на диод источника, образованный электродами ПФ и "заземленным" сеточным электродом.

При проведении экспериментальных исследований характеристики плазменного потока изучались с помощью зондовой диагностики. В качестве датчика был использован двойной зонд Ленгмюра. Регистрация тока в ионном пучке осуществлялась цилиндром Фарадея с магнитной отсечкой плазменных электронов. При исследовании распределения плотности ионного тока использовалась система перемещения датчиков поперек направления распространения потока плазмы и ионного пучка.

III. Формирование плазменных потоков

В отсутствие импульсов ускоряющего напряжения источник "Радуга 5" формирует в непрерывном режиме потоки металлической плазмы. С целью изучения влияния ПФ на закономерности распространения формируемых в источнике потоков плазмы, для измерения распределения плотности ионного тока насыщения в плазме по сечению потока, результаты которого представлены на рис.2. Сравнение кривых 1

плазмы в отсутствии и при наличии ПФ соответственно, позволяет сделать заключение о значительной фокусировке плазменного потока на выходе источника.

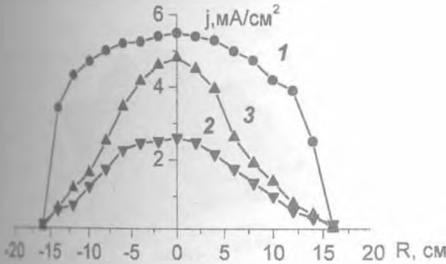


Рис.2 Распределение плотности ионного тока в плазменном потоке.

Наблюдаемый эффект связан с применением сходящейся в направлении распространения плазменного потока конфигурации электродов ПФ. Наряду с геометрией электродов на характер распределения плотности ионного тока насыщения в плазме оказывает влияние направление магнитного поля, создаваемого катушками с током ЭДИ. Это наглядно видно при сравнении кривых 2 и 3 полученных при последовательном и встречном направлении магнитных полей в катушках ЭДИ.

Из анализа значения тока на выходе источника в отсутствии (I_n) и при наличии ПФ ($I_{пф}$), рассчитанного при интегрировании зависимостей представленных на рис.2 следует, что эффективность транспортировки заряженного компонента плазменного потока, определяемая, как $\eta = I_{пф} / I_n$ достигает в условиях данного эксперимента ~ 35%. В работе [2] было показано, что эффективность прохождения заряженного компонента плазмы непрерывного ВДР в плазмододах жазлоного типа определяется геометрическими параметрами электродов, их расположением относительно направления распространения плазменного потока, величиной положительного потенциала плазмодода ($U_{см}$), а также топографией и величиной создаваемого в области ПФ магнитного поля (B).

С учетом наличия у ионов в потоке дуговой плазмы наряду с направленной скоростью и значительных тепловых скоростей, наблюдаемая фокусировка плазменного потока может быть полезной с точки зрения уменьшения потерь плазмы при её транспортировке до поверхности обрабатываемых изделий. Фокусировка плазменного потока полезна и при необходимости локального повышения плотности тока вблизи оси источника. Как показали измерения плотности ионного тока вдоль распространения потока плазмы, на расстоянии 3 см от источника с ПФ, вблизи его оси, плотность ионного тока достигает 70% от плотности тока, измеренной в отсутствие

IV. Формирование ионных пучков

Результаты измерения распределения плотности извлекаемого ионного тока на расстоянии 3 см от источника при различных значениях ускоряющего напряжения приведены на рис.3. На этом же рисунке показана схема расположения электродов ускоряющей системы. Из представленных данных видно, что для режима формирования

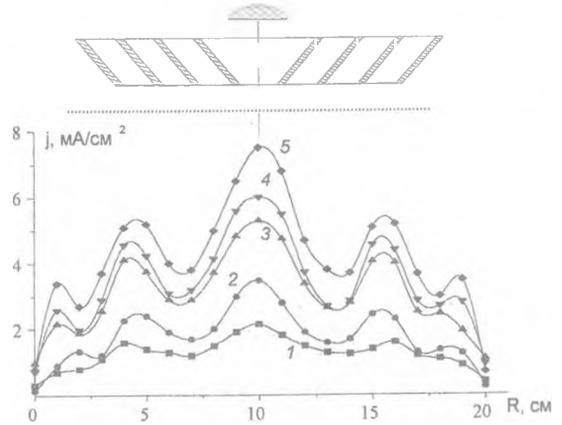


Рис.3. Распределение плотности тока по сечению ионного пучка на расстоянии 3 см от источника при различных значениях ускоряющего напряжения: 1-5 кВ, 2-10 кВ, 3-20 кВ, 4-30 кВ, 5-40 кВ.

ионного пучка, характерна многопиковая форма распределения. Причем число пиков соответствует числу межэлектродных промежутков в ПФ. Из этого следует, что вблизи источника формируемое распределение плотности ионного тока по сечению пучка существенно зависит от структуры и конструкции ПФ. Примечательно, что с увеличением ускоряющего напряжения происходит возрастание плотности тока, а многопиковая структура пучка становится более выраженной. Данный характер изменения значения тока и распределения плотности тока на выходе источника определяется возрастающей вольтамперной характеристикой источника, обусловленной постепенным проникновением ускоряющего поля в межэлектродные промежутки ПФ.

Для качественного анализа условий формирования ионного пучка в источнике "Радуга 5", было проведено моделирование электрических полей и траекторий движения ионов в области ускоряющего промежутка с использованием пакета прикладных программ ЭРА [4].

Расчеты электрического поля и траекторий движения заряженных частиц, при заданных начальных условиях, проведены для ускоряющего напряжения $U_{ук} = 20$ кВ. Конфигурация электродов диодного промежутка соответствовала использованной в рассмотренных экспериментах. Результаты расчетов "Распределение плотности тока в восстановленном состоянии"

тальных данных позволяет применять использованную математическую модель для исследования процессов формирования пучков ускоренных ионов при наличии в диодной системе аксиально-симметричных жалюзийных электродов.

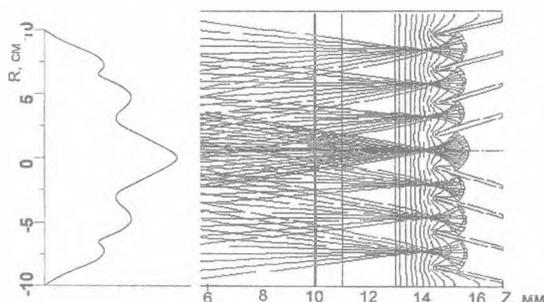


Рис.4. а) Распределение эквипотенциальных линий электрического поля и форма траекторий движения заряженных частиц в области формирования ионного пучка; б) Распределение плотности ионного тока по сечению пучка на расстоянии 3 см от источника.

По виду эквипотенциалей электрического поля, распределенных в пространстве между электродами с шагом 2 кВ (рис.4), можно сделать заключение, что ускоряющее поле проникает в межэлектродные промежутки ПФ на значительную глубину. Форма линии электрического поля с "нулевым" потенциалом характеризует положение эмиссионной плазменной поверхности. Вогнутая форма эквипотенциальной линии свидетельствует о формировании эмиссионной границы плазмы с фокусирующими свойствами. Вид траекторий распространения ускоренных ионов, также подтверждает экспериментально наблюдаемую фокусировку ионного пучка и дискретное увеличение плотности ионного тока, соответствующее расположению межэлектродных промежутков ПФ.

В режиме ускорения ионов было отмечено, что ионный ток на выходе источника превышает соответствующую характеристику плазменного потока на 5÷10% при $U_{\text{уск}}=40$ кВ. Часть ионов, которые благодаря высоким начальным энергиям преодолевали формируемый вблизи электродов ПФ положительный потенциальный барьер, теперь, благодаря проникновению электрического поля в межэлектродные промежутки, будет вовлекаться в процесс ускорения до их взаимодействия с электродами.

На рис.5 представлено экспериментально полученное распределение плотности ионного тока по сечению пучка на различных расстояниях от источника, из которого видно, что вместо 5 ярко выраженных пиков вблизи источника, на расстоянии 50 см наблюдается постепенное сглаживание структуры распределения. Подобное изменение обусловлено расширением пучка под действием его объемного заряда в диоде ускорителя. С учетом того, что в источнике "Радуга 5" используется катод с площадью рабочей поверхности (70 см^2), вид полученного распределения может свидетельствовать о перспек-

тивности использования в источниках на основе непрерывного ВДР катодов больших линейных размеров для формирования аксиально-симметричных ионных пучков широкого поперечного сечения. С целью изучения возможности формирования ионного пучка с более однород-

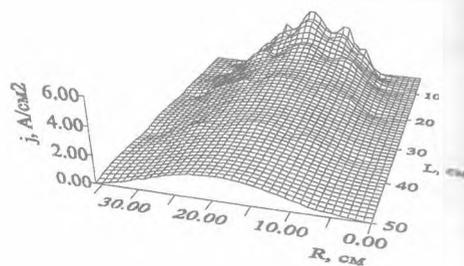


Рис.5. Распределение плотности тока (j) по сечению пучка (R) на различном расстоянии от источника (L).

ным распределением плотности тока по его сечению, было проведено моделирование траекторий распространения ионов в случае использования ПФ с расходящейся в направлении распространения ионного пучка конфигурацией электродов [1]. Результаты моделирования приведены на

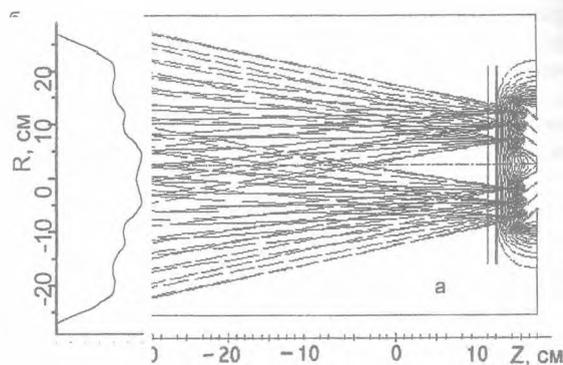


Рис. 6. а) Распределение эквипотенциальных линий электрического поля и форма траекторий движения заряженных частиц в области формирования ионного пучка; б) Распределение плотности ионного тока по сечению пучка на расстоянии 40 см от источника.

рис.6. В соответствии с представленными данными на выходе источника формируется ионный пучок трубчатой конфигурации. В результате расширения пучка под действием объемного заряда на расстоянии 13 см формируется распределение, характерное для цилиндрических пучков. При этом неоднородность в распределении плотности тока на расстоянии 40 см не превышает 30% при диаметре пучка 42 см.

V. Заключение

Рассмотрены особенности формирования потоков металлической плазмы и ионных пучков в источнике на основе непрерывного ВДР для случая применения

симметричного ПФ. На основании проведенных экспериментальных исследований и численного моделирования показана возможность управления распределением плотности ионного тока по сечению пучка в результате изменения конфигурации электродов ПФ. При этом возможно формирование пучков широкого поперечного сечения (до 42 см), в которых неоднородность тока не превышает 30%. Установлено, что в режиме генерации источником ускоренных ионов характер распределения плотности ионного тока по сечению пучка будет определяться условиями проникновения

ускоряющего поля в межэлектродные промежутки плазменного фильтра.

Список литературы

1. Рябчиков А.И., Степанов И.Б. Патент России RU 2107968 С1, 1998.
2. Рябчиков А.И., Дегтярев С.В., Степанов И.Б. // Известия ВУЗов. Физика. - 1998 - № 4. - с.193-207.
3. Ryabchikov A.I., Stepanov I.B. // Rev. Sci. Instrum.- 1998. - v. 69. - p. 893.
4. Н.М.Горбенко, В.П.Ильин, Г.С.Попова, В.М.Свешников // Численные методы решения задач электронной оптики. - Новосибирск: изд. ВЦ СО АН СССР, 1979. - с.34-60.

PECULIARITIES OF MICROPARTICLE FREE PLASMA AND ION BEAMS GENERATION IN SOURCES BASED ON THE CONTINUOUS VACUUM-ARC DISCHARGE

A.I.Ryabchikov, I.B.Stepanov, P.Ya.Isakov

*Nuclear Physics Institute at Tomsk Polytechnic University, Russia, 634050 Tomsk, Lenina str., 2a,
e-mail: alex@npi.tpu.ru*

One of the most prospective methods of plasma and ion beams generation for ion-beam and ion-plasma technologies of material surface processing is based on application of continuous vacuum-arc discharge (VAD). However, this type of discharge is characterized with presence of significant portion of microparticle fraction in a plasma flow that negatively affects properties of coatings formed and quality of materials processing. In this work, the results of the investigations are presented for peculiarities of large cross-section area plasma and ion beams formation in the source of accelerated ions and plasma based on continuous VAD "Raduga-5" provided with the axisymmetric plasma filtering system (PFS) of shutter design.

On the basis of experimental data, the ion current density distribution at the source output has been analysed for the regimes of plasma and accelerated ions generation. It has been shown that using the configuration of the PFS electrodes converging in the direction of plasma propagation leads to plasma flow focusing at the source output. Additionally, the current density distribution across the plasma flow is affected by the magnitude and direction of the magnetic fields of the vacuum arc evaporator.

For the source operation regime of accelerated ions generation, it has been found that by changing the configuration of the plasma filter electrodes, one can purposefully vary the current density distribution across the beam cross-section from focused to defocused with no more than 30% non-uniformity in the ion current distribution at 42 cm beam diameter. Using experimental methods and mathematic simulation, the process of the ion beam formation in the accelerator diode which electrodes are the plasma filter electrodes and the grounded grid electrode has been investigated. It has been shown that penetration of the accelerating field into the plasma filter inter-electrode gaps significantly influences on the magnitude of extracted current and the structure of the ion current density distribution across the beam.

