

ДВУХКАТОДНЫЙ ИСТОЧНИК ФИЛЬТРОВАННОЙ ВАКУУМНО-ДУГОВОЙ ПЛАЗМЫ

*И.И. Аксёнов, Д.С. Аксёнов, В.В. Васильев, А.А. Лучанинов,
Е.Н. Решетняк, В.Е. Стрельницкий*

*Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт",
г. Харьков, Украина*

Описаны устройство и принцип действия нового двухкатодного источника фильтрованной вакуумно-дуговой плазмы. Приведены результаты зондовых измерений ионной компоненты выходного плазменного потока в зависимости от величины и геометрии распределения магнитных полей в плазмоведах каналах источника. Системный коэффициент эффективности устройства составляет $\sim 2,5\%$. Показана возможность управления диаграммой распределения плотности выходного ионного тока системы. Неравномерность распределения концентрации компонентов покрытия при использовании катодов из разных металлов (алюминия и титана) – около $\pm 6,5\%$.

ВВЕДЕНИЕ

Высокотвёрдые композиционные покрытия на основе нитридов и/или карбидов двух и более металлов отличаются более высокими (по сравнению с однокомпонентными покрытиями) механическими характеристиками и находят всё более широкое применение в качестве износостойких и антифрикционных поверхностных слоёв в инструментальном производстве и в машиностроении. Такие покрытия могут быть получены вакуумно-дуговым методом путём распыления мишени (катода), изготовленного из композиционного материала соответствующего состава. Недостаток метода заключается в сложности и высокой стоимости изготовления мишеней требуемого состава.

Житомирским и др. [1] исследован метод суперпозиции двух плазменных потоков, генерируемых источником с двумя катодами из разных металлов. Два плазменных потока от этих катодов направлялись на подложку через общий прямолинейный плазмовод с продольным магнитным полем, препятствующим их перемешиванию. В результате при конденсации потоков на подложке диаметром 40 мм формировалось покрытие с сильно неоднородным распределением концентрации компонентов (Ti-Zr или Ti-Nb). В исследуемой системе не были предусмотрены меры по удалению из конденсируемой плазмы макрочастиц катодного материала. Гороховским [2] и Ксу Ши и др. [3] предложены двухкатодные плазменные источники с Т-образным и Y-образным фильтрами соответственно. Однако опубликованных данных о характере распределения компонентов плазмы, генерируемой этими источниками, и получаемых покрытий не имеется.

В настоящей работе описано устройство предложенного нами ранее двухкатодного источника фильтрованной вакуумно-дуговой плазмы [4] с возможностью формирования потока двухкомпонентной плазмы с повышенной однородностью распределения концентрации составляющих. Приведены результаты предварительных исследований основных характеристик источника.

1. УСЛОВИЯ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследуемый плазменный источник схематически изображён на рис. 1. Источник содержит два генератора плазмы (1 и 2) [5], включающие соответственно катоды C1 и C2, аноды A1 и A2, стабилизирующие катушки S1 и S2, и анодные (фокусирующие) катушки F1 и F2. Катоды имеют форму усечённых конусов (диаметр рабочего торца 50 мм, высота 40 мм). Тыльная поверхность катодов охлаждается водой (не показано). Водоохлаждаемые аноды изготовлены из немагнитной нержавеющей стали. Внутренний диаметр анодов равен 180 мм, длина – 170 мм. (Система водоохлаждения не показана). Генераторы плазмы расположены соосно напротив друг друга и пристыкованы соответственно к симметричным входным секциям P1 и P2 Т-образного плазмоведа плазменного фильтра 3. Третья (выходная) секция P3 плазмоведа размещена между входными секциями перпендикулярно к ним. На входных секциях расположены отклоняющие катушки D1 и D2, на выходной секции – две выходные катушки L1 и L2. Стабилизирующие и фокусирующие катушки обоих генераторов плазмы имеют соответственно по 2300 и 3500 витков, отклоняющие катушки – по 650 витков, выходные катушки L1 и L2 – 1010 и 940 витков. Поджиг вакуумно-дуговых разрядов в системе осуществляется с помощью пусковых устройств, описанных ранее [6] (на рисунке не показаны). Плазменный фильтр источника выходным торцом пристыкован к вакуумной камере установки "Булат-6".

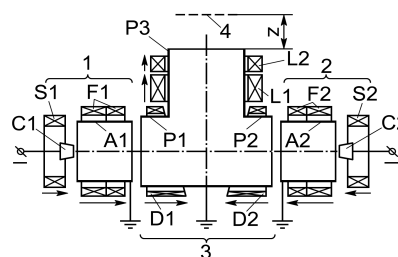


Рис. 1. Схема двухкатодного источника фильтрованной вакуумно-дуговой плазмы

Распределение плотности ионного тока J_i по сечению выходного потока снимали с помощью матричного зонда (коллектора), описанного ранее [7]. Суммарный ионный поток I_i определяли как сумму токов на все ячейки зонда и на его кожух. В процессе измерений на зонд подавали отрицательное смещение -80 В, что соответствовало режиму насыщения ионного тока зонда. В качестве катодного материала использовался титан. Измерения ионных токов на выходе фильтра от генераторов 1 и 2, работающих по отдельности ($I_{i(1)}$ и $I_{i(2)}$ соответственно) и одновременно ($I_{i(1+2)}$), а также распределения плотностей этих токов по сечению плазменного потока осуществлялись при фиксированных значениях токов в стабилизирующих и отклоняющих катушках: $I_{S1} = I_{S2} = 1,5$ А, $I_{D1} = I_{D2} = 3$ А. Ток I_{L1} катушки L1 был равен 2,6 А во всех экспериментах, кроме специально оговоренных случаев. Указанные значения токов при прочих равных условиях обеспечивали наиболее эффективную транспортировку плазмы от катодов до выходного торца фильтра.

Эксперименты по формированию двухкомпонентных покрытий на плоской неподвижной подложке проводили, используя в качестве катодных материалов алюминий (катод С1) и титан (катод С2). Покрытия наносили на образцы в виде полированных пластин из нержавеющей стали при одновременной работе обоих генераторов 1 и 2. Пластины размещались на подложкодержателе, устанавливаемом на расстоянии 350 мм от оси входных секций P1 и P2 плазмоведа. Концентрацию алюминия и титана в покрытиях определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) с помощью прибора "Спрут" производства АО Укррентген.

Измерения ионных токов и осаждение покрытий осуществлялись в присутствии аргона в рабочей камере установки. Давление газа регулировалось с помощью натекателя. Проток аргона при заданном давлении осуществлялся после предварительной откачки камеры до остаточного вакуума $2 \cdot 10^{-6}$ Торр.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 – 5 приведены результаты измерений ионных токов на выходе исследуемой системы в зависимости от давления аргона и от токов в фокусирующих катушках. Из приведенных графиков следует, что выходной ионный ток как от одного плазменного генератора, так и от обоих, работающих одновременно, сильно возрастает с усилением фокусирующих магнитных полей (см. рис. 2, 3) и с повышением давления аргона в системе (см. рис. 4, 5). Наблюдается заметная разница между ионным током $I_{i(1+2)}$ от включенных одновременно генераторов и суммой токов $I_{i(1)} + I_{i(2)}$ от генераторов, работающих по отдельности (см. рис. 3).

Типичные трёхмерные диаграммы распределения плотности ионного тока, полученные в различных условиях эксперимента (при различных токах в фокусирующих катушках и в выходных катушках, при разных давлениях рабочего газа – аргона) приведены на рис. 6 и 7. Наблюдается сильная неодно-

родность этих распределений при согласном включении катушек в каждом из плазмоведущих трактов системы: анод – входная секция плазмоведа – выходная секция плазмоведа (см. рис. 6 в,г).

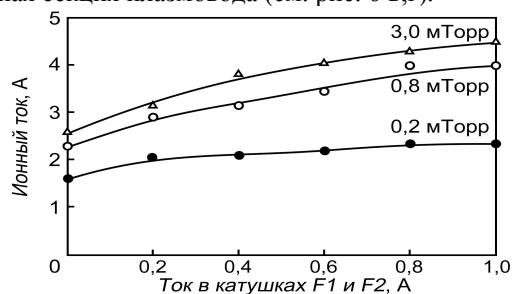


Рис. 2. Зависимость выходного ионного тока от тока в фокусирующих катушках F1 и F2 и от давления при одновременной работе генераторов плазмы

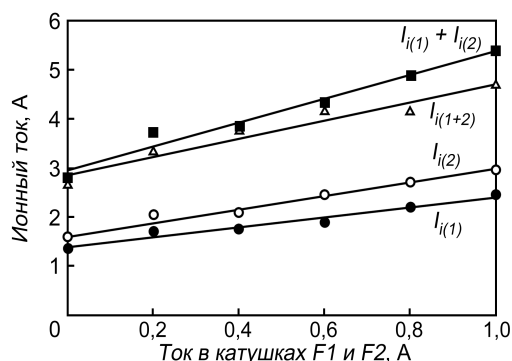


Рис. 3. Зависимость выходного ионного тока от тока в фокусирующих катушках F1 и F2 при одновременной работе генераторов плазмы ($I_{i(1+2)}$), при работе только генератора 1 ($I_{i(1)}$), при работе только генератора 2 ($I_{i(2)}$); $P_{Ar} = 2$ мТорр

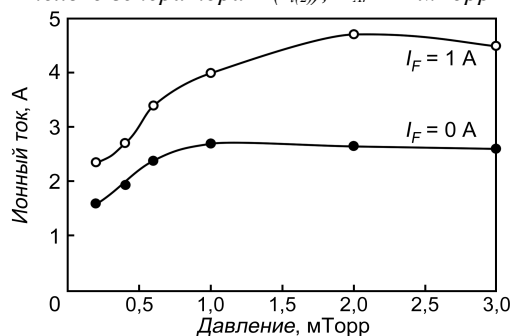


Рис. 4. Зависимость выходного ионного тока от давления при отключенных фокусирующих катушках ($I_{F1} = I_{F2} = I_F = 0$) и при включенных ($I_{F1} = I_{F2} = I_F = 1$ А)

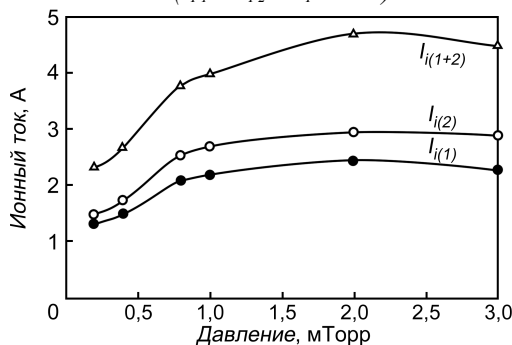


Рис. 5. Влияние давления аргона на выходной ионный ток при токе в фокусирующих катушках $I_F = 1$ А

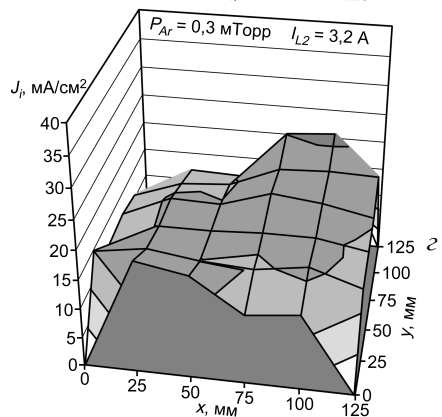
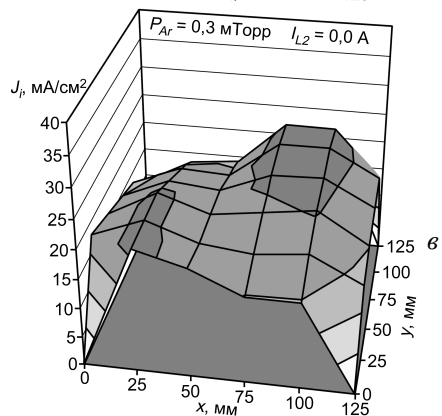
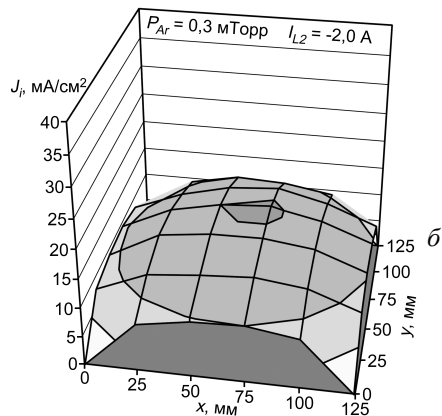
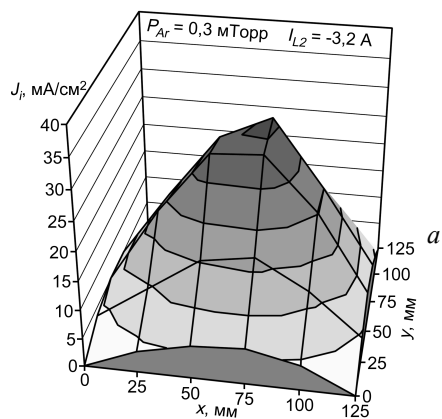


Рис. 6. Распределение плотности ионного тока по сечению выходного потока плазмы

При встречном включении выходной катушки L2 распределение плотности ионного тока становится осесимметричным. Ширина диаграммы распределения и, следовательно, степень неоднородности распределения плотности ионной компоненты выход-

ного плазменного потока могут быть регулируемы изменением соотношения токов в выходных катушках (см. рис. 6,а,б). Влияние фокусирующих магнитных полей и давления газа на характер распределения плотности выходного ионного тока иллюстрирует рис. 7.

Результаты анализа покрытия, полученного с помощью исследуемого источника с катодами из титана (катод С1) и алюминия (катод С2), приведены на рис. 8, из которого следует, что неоднородность распределения концентрации алюминия в покрытии сравнительно невелика и не превышает примерно $\pm 6,5\%$.

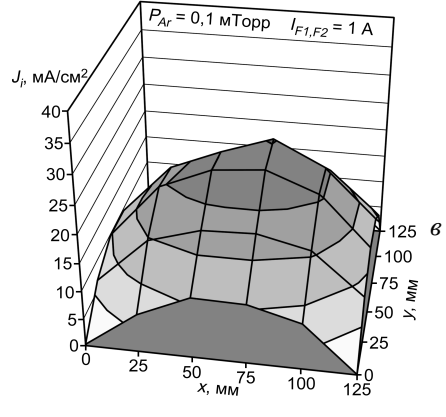
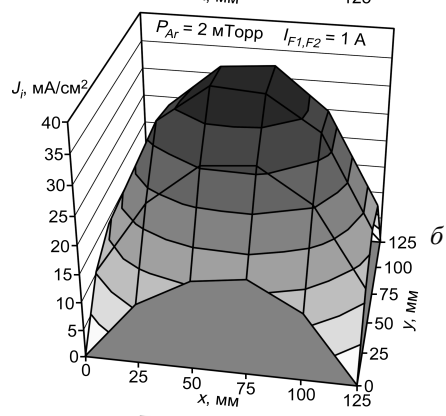
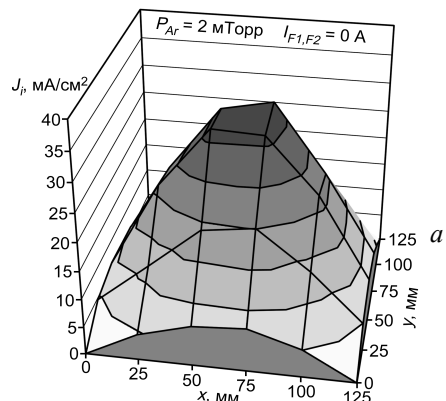


Рис. 7. Влияние тока фокусирующих катушек и давления аргона на распределение выходного ионного тока

Полученные результаты могут быть интерпретированы следующим образом.

Исследуемая система представляет собой вариант вакуумно-дугового плазменного источника с

криволинейным магнитоэлектрическим фильтром. Механизм транспортировки плазмы в таких фильтрах изучался многими авторами. Результаты их исследований обобщены в обзорных публикациях Боксмана и др. [8], Карпова [9], А. Андерса [10], Аксёнова [11]. Согласно наиболее распространённым представлениям плазменные струи, истекающие из катодных пятен вакуумной дуги на эмитирующей (рабочей) поверхности катода, транспортируются вдоль плазмоведающего канала к выходу фильтра пучком магнитных силовых линий, проходящих через эту поверхность. Потери плазмы минимальны, если этот "ведущий" пучок линий нигде не пересекается и не соприкасается со стенками плазмоведающего тракта (анода с плазмоводом).

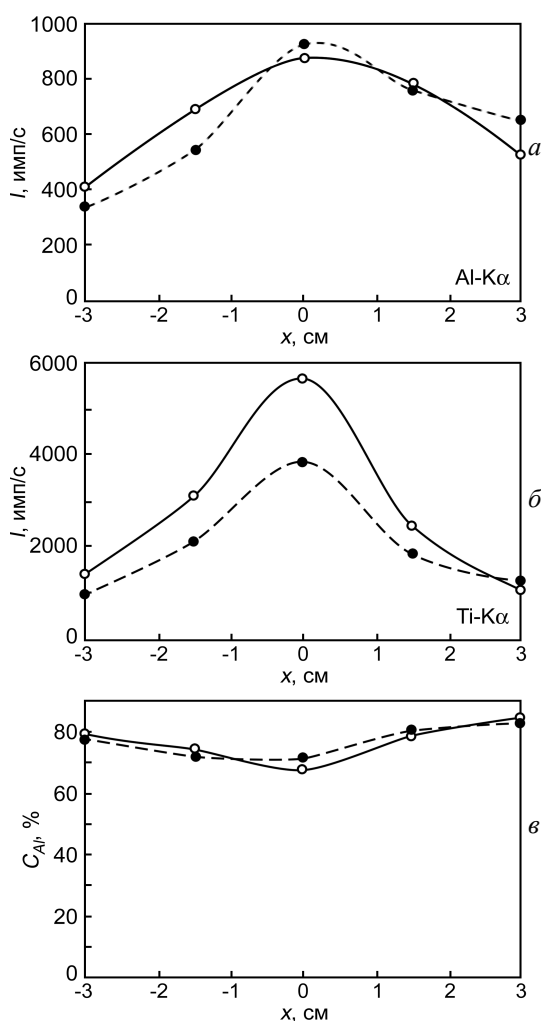


Рис. 8. Состав Ti-Al-плёнок. Распределения по длине образца Ti-Al-покрытия: а – интенсивности линии Al-Kα; б – интенсивности линии Ti-Kα; в – весовой концентрации алюминия C_{Al} . Сплошная и штриховая линии соответствуют двум образцам покрытия, полученным в одинаковых режимах осаждения

На рис. 9,а приведена картина распределения магнитных силовых линий в исследуемом источнике плазмы, рассчитанная для случая согласного включения всех его катушек, т.е. такого, при котором направления магнитных полей, создаваемых

ими, соответствуют стрелкам на рис. 1. (В дальнейшем токи, создающие такие поля, будем условно считать положительными). На рисунке область, занятая пучками магнитных линий, исходящих из обоих катодов, выделена серым цветом. Видно, что основная часть линий обоих пучков, а следовательно, и плазменных потоков, проходит к выходу фильтра без соприкосновения со стенками, за исключением меньшей части, направленной в противоположную от выхода сторону и уходящую на заднюю стенку плазмоведа. Это ответвление потоков определяет значительную часть потерь плазмы.

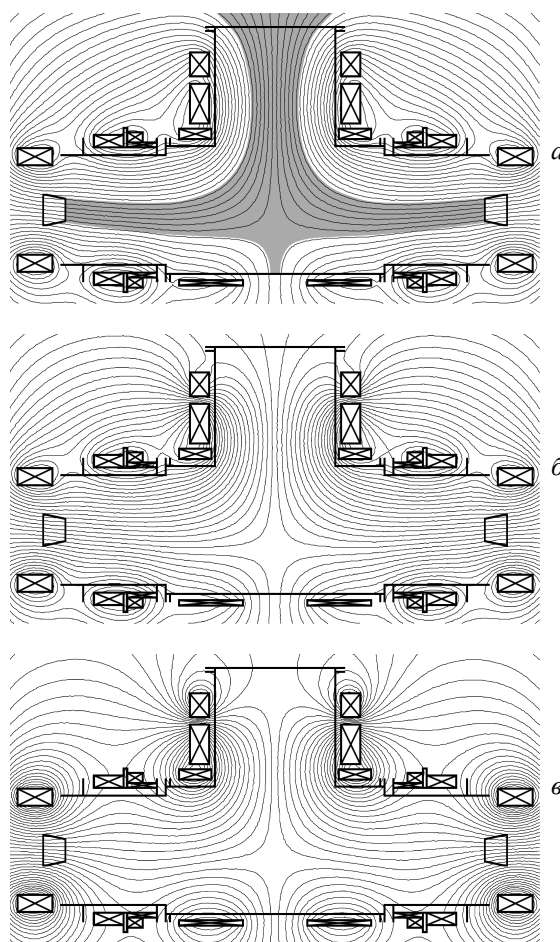


Рис. 9. Распределение магнитных полей при $I_F = 1$ A, $I_{L1} = 2,6$ A, $I_{L2} = 3$ A (а); $I_F = 1$ A, $I_{L1} = 4$ A, $I_{L2} = -2,5$ A (б); $I_F = 0$ A, $I_{L1} = 2,6$ A, $I_{L2} = -3$ A (в)

Зондовые измерения показали, что плазменные потоки работающих одновременно генераторов в полях, изображённых на рис. 9,а, проходят сквозь фильтр, почти не смешиваясь, и формируют на выходе (в плоскости матричного измерительного зонда) распределение плотности ионного потока с двумя максимумами (см. рис. 6,в,г). Максимумы ионных потоков смещены по вертикали в противоположные стороны, что соответствует направлениям центробежного дрейфа потоков при прохождении ими области поворота магнитного поля на 90° . В связи с тем, что скорость осаждения покрытия пропорциональна плотности ионного потока [7], следует ожидать, что и распределение толщины покры-

тия, осаждённого на плоскую неподвижную подложку в условиях "двугорбости" ионного потока, будет также "двугорбым" по форме и заведомо неоднородным по составу.

Иначе выглядит диаграмма распределения плотности выходного ионного тока при встречном включении выходной катушки L2. На выходе фильтра магнитные силовые линии в этом случае сильно расходятся (см. рис. 9,б). Поле здесь ослабляется настолько, что плазменный поток им не удерживается, в результате чего формируется более плоское распределение его плотности (см. рис. 6,б). При определённых соотношениях токов во встречно включённых катушках L1 и L2 формируется так называемая остроугольная структура магнитного поля с нулём напряжённости на оси и с кольцевой щелью между катушками (см. рис. 9,в). В этом случае, как и в предыдущем (см. рис. 9,б), происходит симметрирование диаграммы распределения плотности выходного ионного потока (см. рис. 6,а,б и рис. 7) вследствие перемешивания потоков от генераторов 1 и 2 в зонах слабого магнитного поля. Перемешивание потоков разных составов при прохождении через зону магнитного поля остроугольной геометрии способствует формированию композиционного покрытия с достаточно однородным распределением концентраций компонентов (см. рис. 8).

Уменьшение токов в фокусирующих катушках F1 и F2 вплоть до их отключения приводит к ослаблению магнитного поля в анодах (см. рис. 9,в). В свою очередь, это ведёт к увеличению потерь плазмы вследствие диффузии на стенки поперёк ослабленного магнитного поля и, следовательно, к уменьшению ионного тока на выходе, что и подтверждается результатами измерений, приведенными на рис. 2 – 4.

Рост ионного тока на выходе системы с повышением давления аргона (рис. 4 и 5) может быть вызван процессами ионизации газа, доиспарением микрокапельной фазы потоков плазмы с последующей ионизацией паров электронным ударом [12]. Такое предположение требует экспериментальной проверки.

Превышение суммы выходных ионных токов $I_{i(1)}$ и $I_{i(2)}$ от генераторов, работающих по отдельности, над величиной выходного ионного тока $I_{i(1+2)}$, соответствующего режиму одновременной работы генераторов (см. рис. 3), можно отнести на счёт дополнительного ухода частиц плазмы, генерируемой каждым катодом, в сторону противоположного плеча плазмоведа. Это, по-видимому, происходит вследствие повышения суммарной плотности плазмы, что и обуславливает более благоприятные условия диффузии плазмы поперёк изогнутых потоков магнитного поля в центральной части фильтра.

Следует отметить, что согласно приведенным данным с усилением магнитных полей в анодной части плазмоведущих каналов выходной ионный ток монотонно растёт, а в зависимостях этого тока от давления аргона наблюдается лишь слабая тенденция к насыщению. В этой связи представляется целесообразным продолжить детальные исследования

нового источника с целью более корректной оценки его потенциальных технологических возможностей.

ВЫВОДЫ

Результаты исследований описанного в статье нового двухкатодного источника фильтрованной вакуумно-дуговой плазмы позволяют сделать следующие выводы:

– исследуемый источник обеспечивает возможность формирования композиционных покрытий на основе двух металлов с достаточно однородным распределением концентрации компонент (около $\pm 6,5\%$);

– максимальное значение системного коэффициента эффективности (отношения величин выходного ионного тока и тока дуги) в условиях экспериментов составляет 2,5 %;

– регулировкой магнитных полей в плазмоведущих каналах источника можно в широких пределах управлять величиной ионной компоненты выходного плазменного потока и диаграммой распределения её плотности;

– характер полученных зависимостей выходного ионного тока от магнитных полей и давления рабочего газа свидетельствует о целесообразности дальнейших, более детальных исследований с целью выяснения предельных технологических возможностей нового источника плазмы.

Образцы для рентгенофлюоресцентного анализа изготовлены Ю.А. Бизюковым.

ЛИТЕРАТУРА

1. V.N. Zhitomirsky, R.L. Boxman, S. Goldsmith, I. Grimberg and B.Z. Weiss. Superposition of two plasma beams produced in a vacuum arc deposition apparatus // *Proc. of XVIIIth ISDEIV*. Eindhoven, 1998, p.609 – 612.
2. V.I. Gorokhovskiy, R. Bhattacharya, D.G. Bhat. Characterization of large area filtered arc deposition technology: part I plasma processing parameters // *Surf. Coat. Technol.* 2001, v.140, p.82 – 92.
3. X. Shi, S.H. Tan, B.K. Tay. Enhanced macroparticle filter and cathode arc source. *Int. Appl. No.PCT/IB98/01794 published under PCT No. WO 99/223396*. Priority: 24.10.97.
4. I.I. Aksenov, V.E. Strelnitskiy, V.V. Vasylyev, J.S. Zabinski, J.G. Jones, A.A. Voevodin. Filtered cathodic-arc plasma source. *Int. Appl. No. PCT/IB2004/003389 published under PCT No.WO 2005/038857 A2*. Priority: 21.10.2003
5. И.И. Аксёнов, В.Г. Падалка, В.Т. Толоч, В.М. Хороших. Исследование движения потоков плазмы вакуумной дуги в линейной протяжённой плазмооптической системе // *Физика плазмы*. 1980, т.6, в.4, с.918 – 924.
6. И.И. Аксёнов, В.А. Белоус. Зажигание вакуумной дуги в стационарных источниках металлической плазмы от автономного плазменного инжектора // *ПТЭ*. 1979, №3, с.160 – 162.
7. Ю.А. Бизюков, В.В. Васильев, А.А. Лучанинов, В.Е. Стрельницкий. Автоматизированная систе-

- ма измерения пространственного распределения плотности ионного тока в потоке плазмы // *Харьковская нанотехнологическая ассамблея 2007. Тонкие плёнки*. Харьков, 2007, с.232 – 235.
8. R.L. Vohman, V. Zhitomirsky, B. Alterkop, E. Gidalevich, I. Beilis, M. Keidar, S. Goldsmith. Recent progress in filtered vacuum arc deposition // *Surf. Coat. Technol.* 1996, v.86 – 87, p.242 – 253.
 9. D.A. Karpov. Cathodic arc sources and macroparticle filtering // *Surf. Coat. Technol.* 1997, v.96, p.22 – 33.
 10. A. Anders. Approaches to rid cathodic arc plasmas of macro- and nanoparticles: a review // *Surf. Coat. Technol.* 1999, v.120 – 121, p.319 – 330.
 11. И.И. Аксёнов. *Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы*. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005, 212 с.
 12. N.S. Lomino, V.D. Ovcharenko and A.A. Andreev. On the mechanism of vacuum-arc plasma activation in the pressure range 1 – 10 Pa // *IEEE Trans. on Plasma Sci.* 2005, v.33, №.5, p.1626 – 1630.

ДВОХКАТОДНЕ ДЖЕРЕЛО ФІЛЬТРОВАНОЇ ВАКУУМНО-ДУГОВОЇ ПЛАЗМИ

І.І. Аксёнов, Д.С. Аксёнов, В.В. Васильєв, О.О. Лучанінов, О.М. Решетняк, В.Є. Стрельницький

Описані будова та принцип дії нового двохкатодного джерела фільтрованої вакуумно-дугової плазми. Наведено результати зондових вимірювань іонної компоненти вихідного плазмового потоку в залежності від величини та геометрії розподілу магнітних полів плазмоведучих каналів. Системний коефіцієнт ефективності пристрою становить $\sim 2,5\%$. Нерівномірність розподілу концентрації компонентів композиційного покриття, одержуваного при використанні двох різних металів (титану та алюмінію), не перевищує $\pm 6,5\%$.

TWO-CATHODE FILTERED VACUUM ARC PLASMA SOURCE

I.I. Aksenov, D.S. Aksyonov, V.V. Vasilyev, A.A. Luchaninov, E.N. Reshetnyak, V.E. Strel'nitskij

The device and principle of operation of the new two-cathode filtered vacuum arc plasma source are discussed. Results of probe measurements of ion components of an output plasma stream depending on magnitude and distribution geometry of magnetic fields in plasma guiding channels of the source are presented. The system effectiveness ratio of the device makes $\sim 2,5\%$. The possibility of control of the ion current density distribution diagram is shown. Inhomogeneity of component concentration distribution of the coating at use of the cathodes from different metals (aluminium and titanium) is about $\pm 6,5\%$.