

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАНСПОРТИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ВАКУУМНО-ДУГОВЫХ ФИЛЬТРОВ

Д. С. Аксёнов, И. И. Аксёнов, В. Е. Стрельницкий

*Национальный Научный Центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

Поступила в редакцию 20.12.2016

В работе описана модернизация многоканального зонда, который совместно с написанным для его работы программным обеспечением представляет собой современный инструмент для настройки и изучения транспортирующих свойств вакуумно-дуговых источников плазмы. Изучено влияние магнитного поля катушек Т-образного фильтра на величину и пространственное распределение выходного ионного тока. Установлены оптимальные величины токов катушек, позволяющие существенно повысить производительность изучаемого устройства.

Ключевые слова: вакуумная дуга, фильтр, зонд, ионный ток, транспортировка плазмы.

ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТУВАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВАКУУМНО-ДУГОВИХ ФІЛЬТРІВ

Д. С. Аксьонов, І. І. Аксьонов, В. Є. Стрельницький

В роботі описано модернізацію багатоканального зонда, який сумісно з написаним для його роботи програмним забезпеченням представляє собою сучасний інструмент для налаштування та вивчення транспортувальних властивостей вакуумно-дугових джерел плазми. Вивчено вплив магнітного поля котушок Т-подібного фільтра на величину та просторовий розподіл вихідного іонного струму. Встановлено оптимальні величини струмів котушок, які дозволяють суттєво підвищити продуктивність пристрою, що вивчається.

Ключові слова: вакуумна дуга, фільтр, зонд, іонний струм, транспортування плазми.

SOFTWARE-HARDWARE COMPLEX FOR OPTIMIZATION OF TRANSPORTING ABILITIES OF VACUUM ARC FILTERS

D. S. Aksyonov, I. I. Aksenov, V. E. Strel'nitskij

This work describes optimization of multichannel probe, which in couple with the written for its work software presents a modern tool for adjustment and study of transporting abilities of vacuum arc plasma sources. Influence of magnetic field created by coils of T-shaped filter on spatial distribution of output ion current was investigated. Optimal values of coils currents, which allow one to increase productivity of studied device, were determined.

Keywords: vacuum arc, filter, probe, ion current, plasma transport.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее распространённых методов получения функциональных покрытий является осаждение из плазмы дугового разряда в атмосфере активного газа или в вакууме. Метод осаждения широко распространён в машиностроении, приборостроении, электронике, производстве инструментов, декоративных изделий и т. д. [1] благодаря своим уникальным возможностям. Ток дугового разряда протекает через катодные пятна малых размеров (микрометры), что приводит к испарению катодного материала в виде

плазмы, степень ионизации которой может достигать 100 % [1]. Поток ионов, который можно извлекать из плазмы без нарушения условий существования разряда, достигает 19 % от величины тока разряда [2]. Покрытие формируется за счёт конденсации этого потока на подложке, а толщина этого покрытия пропорциональна плотности ионного потока и времени осаждения. Таким образом, существует возможность прогнозирования производительности вакуумно-дуговых устройств осаждения путём измерения плотности выходного ионного тока, что существенно

ускоряет процесс наладки таких устройств и поиск оптимальных параметров процесса осаждения [3].

Величину плотности ионного тока на выходе фильтра измеряют при помощи зондов, которые устанавливают в области выходного сечения фильтра. На зонд, который обычно представляет собой плоский диск, подают отрицательный потенциал [3, 5–7] для «отсечения» электронного компонента плазмы. Величину этого потенциала подбирают такой, чтобы его дальнейший рост не приводил к увеличению выходного тока. В большинстве случаев величина отрицательного потенциала на зонде составляет (40–120) В. Для поиска оптимального режима осаждения, обычно он соответствует максимуму выходного тока, изучают влияние параметров процесса осаждения (напряжённость магнитных полей внутри плазмоведа, давление газовой среды и т. п.) на величину ионного тока.

На практике зачастую необходимо добиться не только максимальной производительности системы осаждения, а ещё и равномерного распределения толщины покрытия по поверхности подложки. Поэтому одной только величины выходного тока становится недостаточно: необходимо также знать распределение плотности тока по поверхности предполагаемой подложки, то есть зонда, а также зависимость этого распределения от параметров процесса осаждения. Очевидно, что типичный дисковый зонд не способен предоставить такие данные.

Для решения этой задачи применяют либо зонды малых размеров, либо многоканальные зонды. В первом случае зонд перемещают в плоскости осаждения, получая в итоге картину распределения тока в этой плоскости [8]. Недостатками такого подхода однозначно являются сложность перемещения этого зонда и обеспечение точности его позиционирования. Во втором случае зонд представляет собой массив из малогабаритных зондов (ячеек) [6, 9–11], данные с которых измеряют одновременно, что, безусловно, ускоряет процесс оптимизации фильтра. К недостаткам второго метода измерения можно отнести сложность конструкции зонда и необходимость в дополнительном

оборудовании, которое обеспечивает возможность снятия показаний с него.

Измеряемая величина плотности выходного тока зависит как от плотности попадающего на зонд потока ионов, так и от кратности заряда этих ионов, зависящей от параметров процесса осаждения. Таким образом, наблюдаемый прирост величины измеряемого тока может являться ростом кратности заряда попадающих на зонд ионов. Вышесказанное означает, что оценка скорости осаждения покрытий и их однородности по показаниям выходного тока является достаточно грубой и поэтому конечной стадией определения эффективности системы осаждения всегда является непосредственно осаждение покрытия.

Целью данной работы является создание средств для изучения и оптимизации транспортирующих свойств источников вакуумно-дуговой плазмы.

ОБОРУДОВАНИЕ

Измерения распределений плотности выходного ионного тока выполнялись на установке вакуумно-дугового осаждения «Булат-6» с установленным на неё Т-образным фильтром, который схематически показан на рис. 1. Фильтр состоит из Т-образного плазмоведа 3, к входным секциям P1 и P2 которого присоединены, соответственно, вакуумно-дуговые испарители 1 и 2. К рабочей камере 5 фильтр стыкуется своей выходной секцией P3. Генераторы плазмы включают в себя аноды A1 и A2,

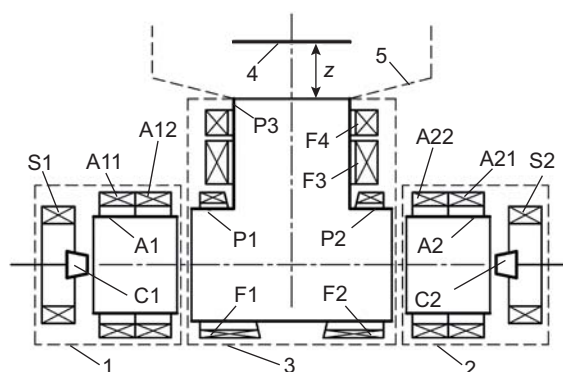


Рис. 1. Схематическое изображение установки: 1, 2 — генераторы плазмы, 3 — Т-образный плазмовод, 4 — зонд, 5 — рабочая камера, C1, C2 — катоды, P1, P2 — входные секции плазмоведа, P3 — выходная секция плазмоведа, z — расстояние между выходным сечением фильтра и измерительной поверхностью зонда

катоды С1 и С2, стабилизирующие катушки S1 и S2 и анодные катушки A11, A12, A21, A22. На входные секции Т-образного плазмоведа намотаны отклоняющие катушки F1 и F2, на выходную секцию, соответственно, выходные катушки F3 и F4. Зонд 4 для измерений плотности выходного тока устанавливался на расстоянии z от выходного сечения фильтра.

Токи в магнитных катушках системы (если не сказано иное) были установлены следующими: $I_{S1} = I_{S2} = 1,5$ А, $I_{A11} = I_{A21} = -0,4$ А, $I_{A12} = I_{A22} = 0,5$ А, $I_{F1} = I_{F2} = 2$ А, $I_{F3} = 4$ А, $I_{F4} = -3$ А.

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ЗОНД

Для измерений плотности выходного тока использовался модернизированный вариант многоканального (матричного) зонда [10]. Модернизация заключалась в усовершенствовании его конструкции: перенесены изоляторы ячеек зонда, улучшена точность их позиционирования, уменьшены габариты, убраны элементы несущей конструкции, подвергавшиеся чрезмерному нагреву и, следовательно, деформации и короткому замыканию. Усовершенствование зонда позволило добиться его многочасовой непрерывной работы без необходимости обслуживания и чистки.

Фотографии используемого зонда в разобранном виде приведены на рис. 2. Зонд содержит 32 измерительных ячейки 3, которые состоят из шпильки с закреплённым на ней диском, диаметр которого равен 23 мм. Эти ячейки закреплены на одном из двух (дальнем от зоны измерения) несущих дисков 1 через изоляторы 4. Несущие диски имеют диаметр 180 мм и стянуты несколькими шпильками 2. Измерительные ячейки зонда расположены в 6 рядов с шагом 27 мм: верхний и нижний ряды содержат по 4 ячейки, остальные — по 6. Поверх всей конструкции надевается защитный кожух (на рисунке не показан), предотвращающий запыление изоляторов, длина зонда без чехла составляет 95 мм. Все части зонда (кроме изоляторов) выполнены из немагнитной нержавеющей стали.

Каждая ячейка зонда подключена к отдельному каналу многоканального АЦП,

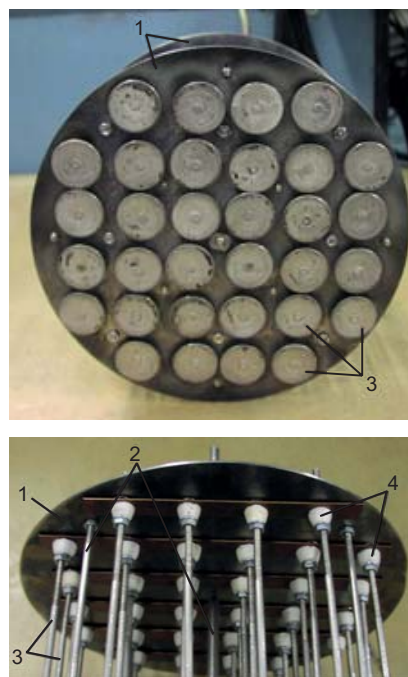


Рис. 2. Модернизированный многоканальный зонд в разобранном виде

что даёт возможность измерять плотность ионного тока в 32-х точках поверхности зонда одновременно. Результат таких измерений позволяет вычислить распределение плотности этого тока по поверхности зонда. Суммарный ионный ток вычислялся как сумма сигналов всех ячеек зонда. Потенциал, подаваемый на ячейки зонда, составляет -120 В. Коэффициент полезного (учитывается только площадь ячеек) перекрытия зондом выходного сечения фильтра составляет 27 %. Общая площадь измерительных ячеек относительно площади лицевой стороны зонда (несущего диска) составляет 53 %. Это свидетельствует о необходимости дальнейшего усовершенствования конструкции зонда, однако за счёт значительных изменений конструкции.

ИЗМЕРЕНИЕ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТА

Для работы одноканальных зондов требуется источник питания необходимой мощности для подачи на зонд отрицательного напряжения и амперметр. Однако в случае использования многоканальных зондов, помимо необходимости подачи потенциала отдельно на каждую из ячеек, также необходимо измерять электрический ток каждой из этих ячеек. Причём производить такие измерения желательно с большой частотой.

Очевидно, что без «автоматики» выполнить такую задачу крайне сложно. Поэтому ячейки используемого многоканального зонда были подключены к АЦП, который установлен в персональный компьютер. Для управления АЦП (режимами измерений зонда), а также для обработки и визуализации данных измерений, написано соответствующее программное обеспечение.

Данная программа написана таким образом, чтобы иметь возможность производить измерения, обрабатывать их и выводить результат в режиме реального времени на маломощном оборудовании. Результаты выводятся как в численном виде — данные каждого из измерений по всем каналам и усреднённые по времени величины сигнала, так и в графическом — в виде плоских и/или трёхмерных диаграмм. При этом обработка результата в реальном времени не вносит каких-либо заметных задержек в процесс измерения, что позволяет пользователю производить настройку режима работы вакуумно-дугового устройства «на лету» без необходимости документирования всех промежуточных результатов.

Для удобства работы и увеличения информативности отображаемых результатов программа оснащена возможностью тонкой настройки вида диаграмм — изменять цвета, масштабы осей, толщины линий и т. п., а также вращать диаграммы вокруг трёх осей. Чтобы упростить процесс сравнения данных на нескольких диаграммах, включая ту, что находится в процессе рисования (измерения), добавлена возможность цветового выделения диапазона данных. Пример такого выделения и внешний вид диаграмм, отображаемых программой, приведен на рис. 3.

Результаты измерений в численном виде отображаются в отдельной плоскости программы. Для последующей их обработки предусмотрена функция экспорта данных в текстовый файл с возможностью настройки синтаксиса вывода, что необходимо для правильной интерпретации этих файлов другими программами, например, MS Excel.

Одной из немаловажных функций программы с точки зрения простоты работы и обслуживания зонда является так называемый «ремаппинг». Он позволяет подключать ячейки зонда к измерительным

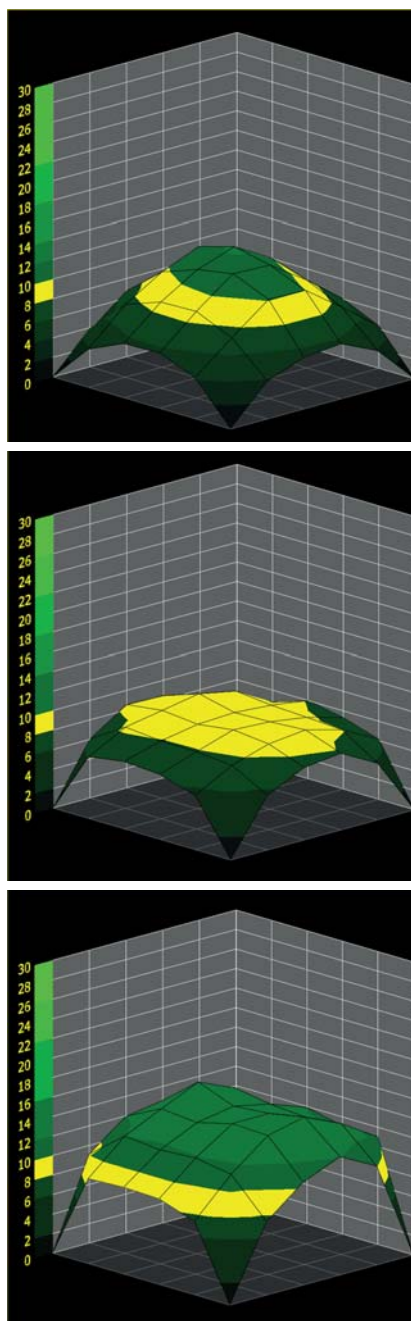


Рис. 3. Внешний вид трёхмерных диаграмм, отображаемый программой для управления зондом

каналам АЦП в произвольном порядке. Впоследствии, при запуске программы, можно в интерактивном режиме указать какая ячейка зонда относится к конкретному каналу. Эти настройки хранятся в программе и используются при построении диаграмм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Постоянное перемещение катодных пятен по поверхности катода приводит к тому, что генерируемые ими плазменные струи проходят по различным траекториям внутри плазмоведа. В результате будет наблюдаться

перемещение максимумов ионного тока по поверхности зонда, что продемонстрировано на рис. 4. Однако процесс осаждения покрытий (за исключением сверхтонких) длится более продолжительный промежуток времени,

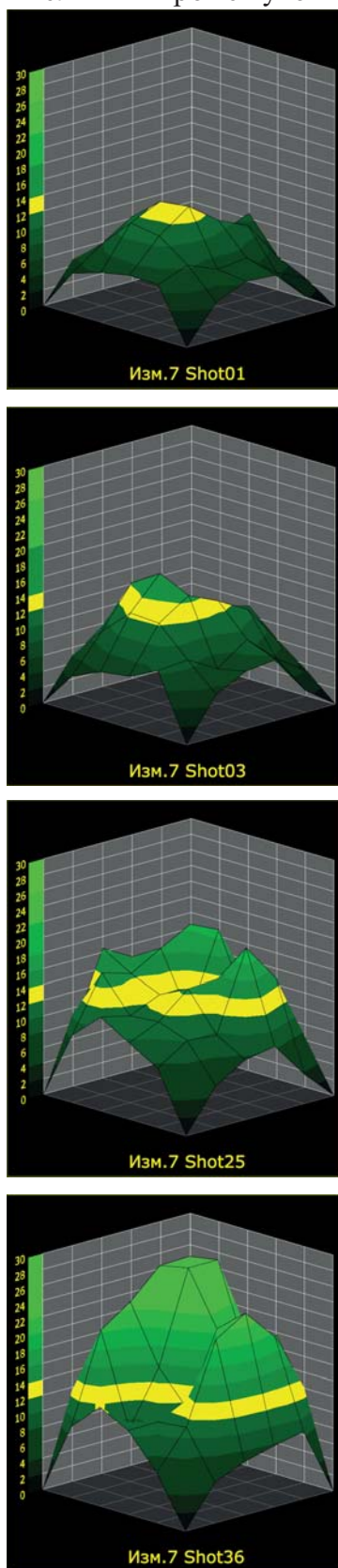


Рис. 4. «Мгновенные» значения выходного тока

достаточный для того, чтобы плазменные потоки конденсировались на более значительной части подложки. Профиль толщины сформированного покрытия будет в значительной мере отличаться от «мгновенного» значения выходного тока, приведенного на рис. 4. Чтобы иметь возможность сопоставить распределения толщины покрытия и плотности выходного тока необходимо производить замеры последнего в течение некоторого времени с последующим усреднением.

Для того чтобы установить необходимое время интегрирования сигнала зонда произведены «высокоскоростные» измерения величины и распределения плотности выходного ионного тока на выходе Т-образного фильтра. Остановка процесса измерения (и усреднения) производилась по количеству прошедшего времени, а не по количеству единичных замеров. Измерения проводились при таких условиях: давление газа в рабочей камере $P = 3$ мТорр, расстояние между измерительной плоскостью зонда и выходным сечением фильтра $z = 25$ мм, дуговые токи обоих испарителей $I_{a1} = I_{a2} = 100$ А, используемый материал катодов — титан. Установлено, что для стабилизации сигнала достаточно промежутка времени, равного $t = 0,5$ с. Более детально результаты приведены на рис. 5.

Влияние времени интегрирования на распределение выходного тока приведено на рис. 6. Приведенные на рисунке результаты подтверждают правильность сделанных выводов: начиная с времени $t = 0,6$ с распределение плотности ионного тока на выходе фильтра одинаково. Необходимо отметить, что данные, приведенные на рисунках 5 и 6, являются результатом разных измерений. Поэтому максимум на рис. 5 для $t = 0,1$ с

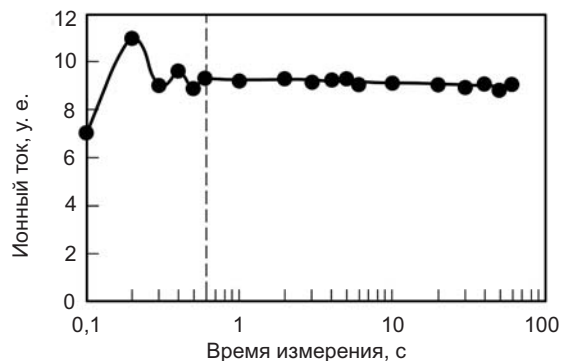


Рис. 5. Зависимость среднего значения выходного тока от времени интегрирования сигнала

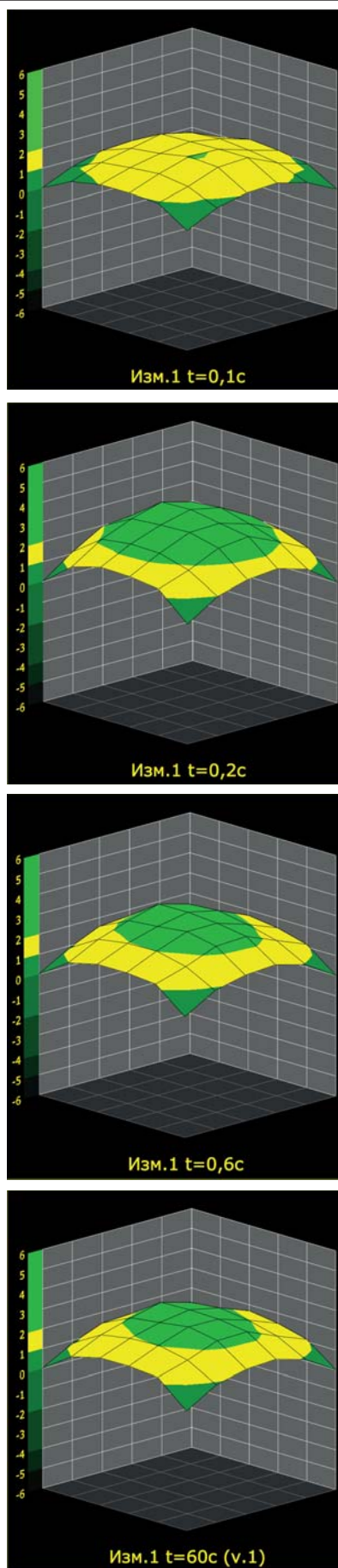


Рис. 6. Зависимость сигнала зонда от времени интегрирования

соответствует минимуму на рис. 6 для того же значения времени.

Ранее была продемонстрирована и изучена методика смешивания нескольких потоков плазмы в один [12]. Целью такого смешивания плазменных потоков является получение однородных по составу и толщине многокомпонентных покрытий (например, TiAlN) или однородных по составу однокомпонентных покрытий (таких, как TiN). Ввиду замагниченности потоки плазмы от разных катодов двигаются параллельно друг другу (в выходной секции плазмоведа) практически не смешиваясь. Однако создание ослабленного магнитного поля на выходе двухканального Т-образного фильтра, изучаемого в данной работе, позволяет нарушить одно из условий замагниченности и, тем самым, добиться смешивания плазменных потоков. Схематически процесс перемешивания показан на рис. 7.

Явление возможно дополнительно изучить с помощью программно-аппаратного комплекса, описанного в данной работе. Для достижения этой цели поставлено два эксперимента в условиях, при котором наблюдалось смешивание [12]. В первом эксперименте зонд перемещался вдоль оси z (см. рис. 1) в диапазоне от -50 мм до 250 мм с шагом 5 мм. В каждой точке производилось измерение распределения плотности выходного тока при $t = 10$ с ($\sim 10^3$ измерений по каждому из каналов). Наиболее информативные результаты измерений плотности тока приведены на рис. 8.

Видно, что при расстоянии z , равном -50 мм, что соответствует расположению

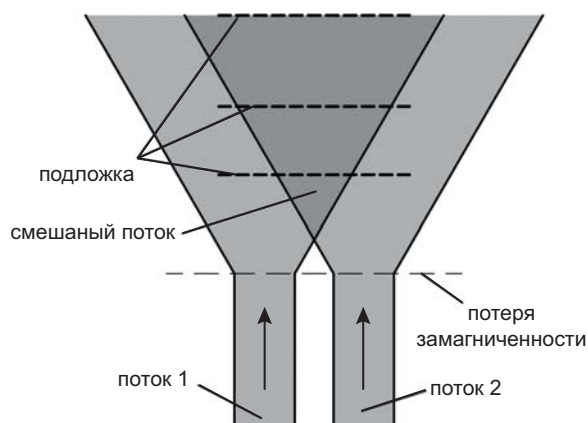


Рис. 7. Схематическое изображение процесса формирования зоны перемешивания плазменных потоков

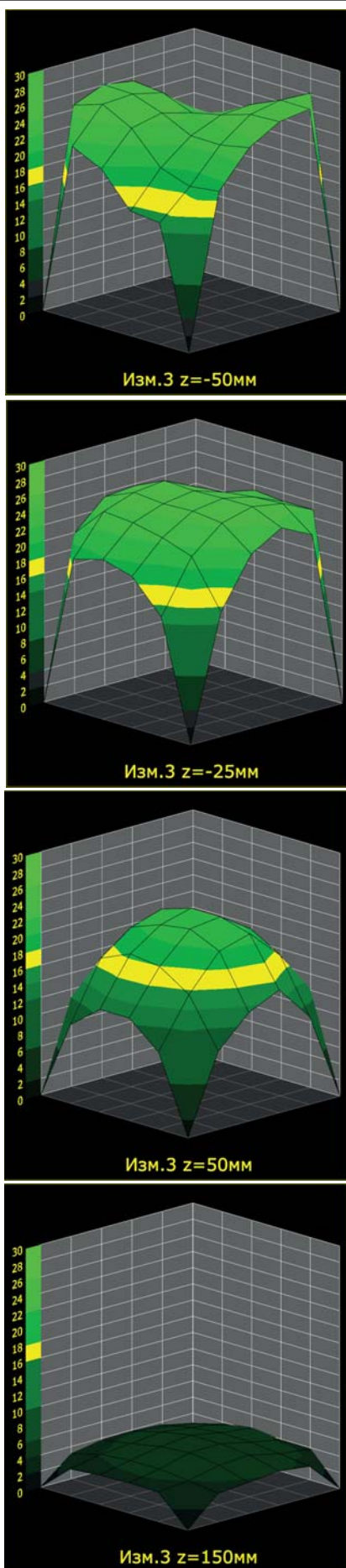


Рис. 8. Влияние расстояния выход-зонд (z) на распределение плотности ионного тока

зонда внутри плазмоведа, распределение плотности тока имеет два явно выраженных максимума. Каждый из этих максимумов смещён в сторону «своего» плеча плазмоведа. Наличие максимумов свидетельствует о том, что два плазменных потока находятся в несмешанном (или частично смешанном) состоянии. При увеличении расстояния z между измерительной плоскостью зонда и выходным сечением фильтра максимумы плотности тока пропадают и распределение становится плоским. Перемещение зонда внутрь камеры ($z > 0$) приводит к снижению плотности выходного тока в результате потерь плазмы при её контакте с газовой мишенью. Ситуация наглядно продемонстрирована поведением кривых на рис. 9.

С целью улучшения условий транспортировки плазменных потоков и, следовательно, увеличения производительности вакуумно-дугового источника многокомпонентной плазмы изучено влияние на величину и распределение плотности выходного ионного тока величины магнитного поля, создаваемого каждой из катушек, а также величины разрядных токов. Результаты этих исследований приведены на рис. 10–13.

Как видно из рис. 10, усиление индукции поля поворотных катушек F1 и F2 приводит к существенному росту величины выходного тока, что связано с уменьшением потерь плазмы при прохождении изгиба плазмоведа. При отключении этих катушек в выходную часть Т-фильтра плазма попадает только в виде «потерь» в остроугольном магнитном поле, создаваемом катушками плеч фильтра.

Усиление магнитного поля внутри анодов Т-образного фильтра должно снизить потери

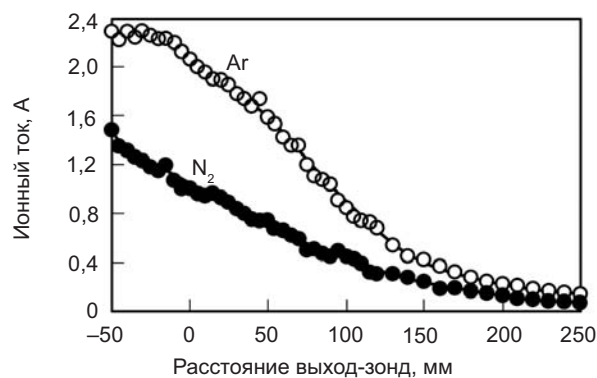


Рис. 9. Зависимость величины выходного тока от расстояния z между зондом и выходом фильтра

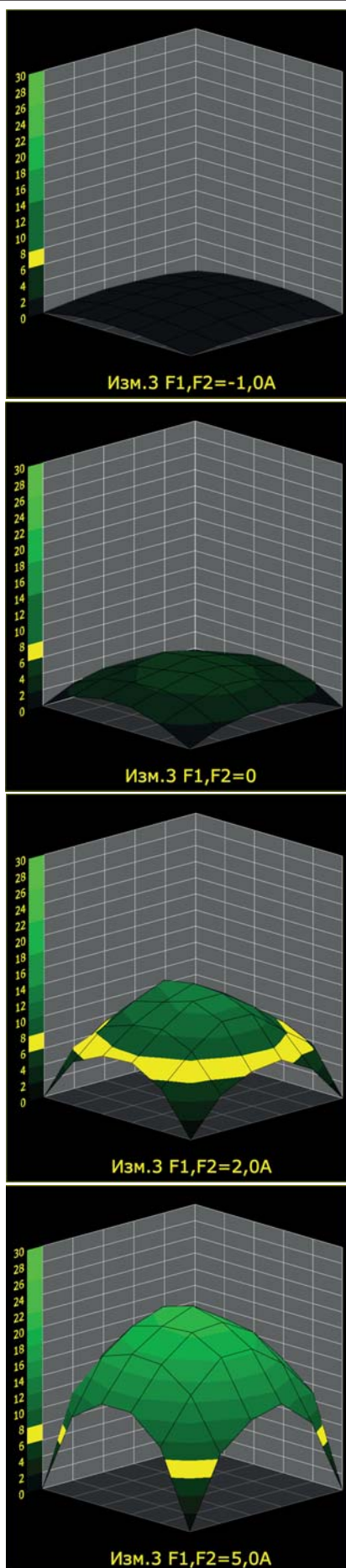


Рис. 10. Влияние тока магнитных катушек F_1 и F_2 на распределение плотности ионного тока

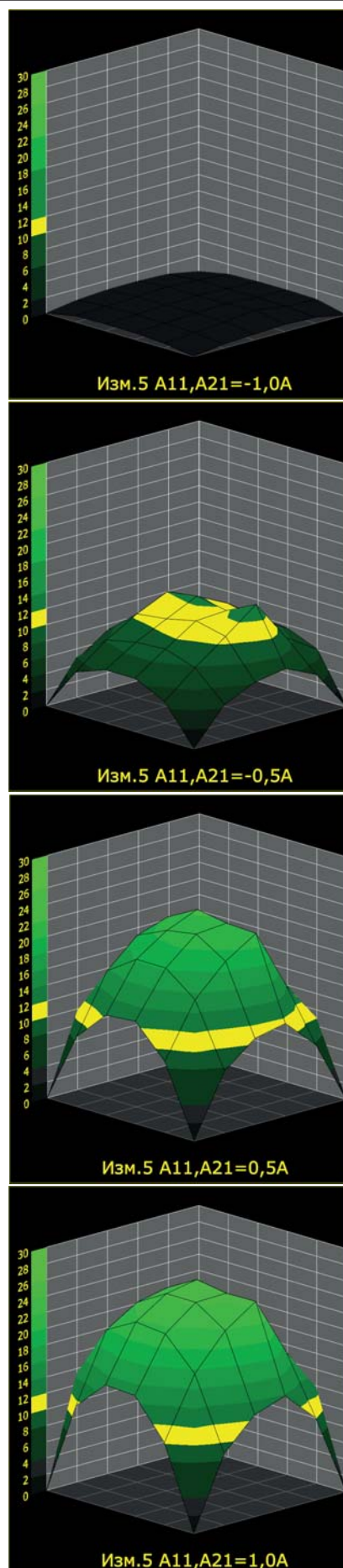


Рис. 11. Влияние тока магнитных катушек A_{11} и A_{21} на распределение плотности ионного тока

плазмы внутри них за счёт улучшения условий транспортировки. Плазменный поток в таком случае становится более плотным — большая его часть проходит по входной оси фильтра (ось анода), т. е. фокусируется. Когда поток плазмы от одного из катодов достигает области поворота фильтра, то он находится на большем удалении от угла, образованного стыком выходной и входной секций. В результате меньшая часть этого потока плазмы будет потеряна при касании с этим углом. Влияние магнитного поля анодных катушек A11 и A21 на величину и распределение выходного тока фильтра показано на рис. 11.

Результаты измерений, приведенные на рисунке, подтверждают правильность вышеизложенных рассуждений: с ростом тока анодных катушек A11 и A21 растёт и выходной ионный ток. Встречное включение этих катушек ($I_{A11} = I_{A21} = -1$ А) приводит к практически полному отсутствию тока на выходе, так как вся плазма конденсируется на внутренней поверхности анодов.

Подобная картина наблюдается и при изменении токов вторых анодных катушек (A12 и A22), а также разрядных токов. С ростом тока катушек A12 и A22 величина и распределение плотности выходного тока изменяются практически так же, как показано на рис. 11 для катушек A11 и A21, и объясняется улучшением условий транспортировки плазмы. С ростом тока дуги линейно увеличивается выходной ионный ток фильтра (рис. 12), что согласуется с результатами работы [1, 3].

Несколько иной характер имеет зависимость выходного тока (и его распределения по поверхности зонда) от индукции поля, создаваемого выходной катушкой F3 (рис. 13). При увеличении тока катушки в диапазоне от

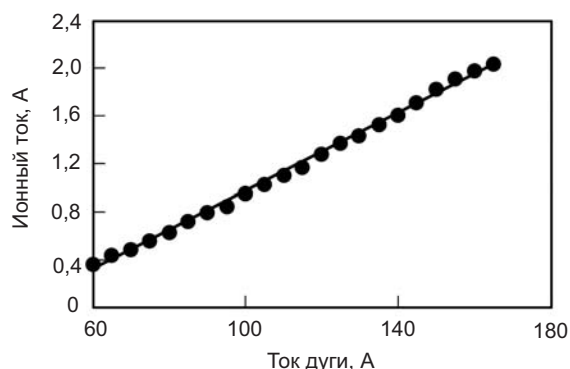


Рис. 12. Зависимость величины выходного тока от силы дуговых токов

$I_{F3} = 0$ до $I_{F3} = 2$ А выходной ток также увеличивается. Распределение ионного тока по поверхности зонда при этом приобретает более плоский характер: максимум на выходной оси системы становится менее выраженным. Однако это является не следствием снижения самого максимума на оси, а результатом роста плотности тока на периферии, что отчётливо видно на рис. 13 для значений I_{F3} равных 0 и 3 А. Дальнейшее увеличение силы тока катушки (до $I_{F3} = 5,2$ А) вызывает монотонное снижение плотности плазмы, попадающей на зонд без каких-либо значимых изменений в его распределении. Последнее, наиболее вероятно, связано с ухудшением условий инжекции плазмы в область магнитного поля с увеличивающейся индукцией [13].

Не менее интересными являются результаты измерений выходного тока, полученные при встречном включении катушки F3 ($I_{F3} < 0$). По мере усиления встречного поля этой катушки, помимо снижения плотности выходного тока, также наблюдается изменение его распределения по поверхности зонда. Профиль этого распределения, как видно из рис. 13, приобретает горбообразный вид. Это говорит о неравномерности потерь плазмы относительно изгиба плазмоведа: в верхней и нижней частях плазмоведа потери максимальны, в боковых — минимальны.

Приведенные выше результаты показали, что путём настройки магнитной системы исследуемой вакуумно-дуговой системы с Т-образным фильтром возможно повысить её транспортирующие свойства. Такая оптимизация может повысить её производительность, т.е. в значительной мере увеличить скорость осаждения покрытий. Для этого необходимо выставить такие токи магнитных катушек, при которых наблюдался максимальный ионный ток на выходе. Результат такой оптимизации показан на рис. 14.

Оптимизация производительности исследуемого источника плазмы позволила добиться увеличения выходного ионного тока на выходе почти в 3 раза (с 664 мА до 1,9 А). Необходимо отметить, что данный результат получен при изменении токов катушек

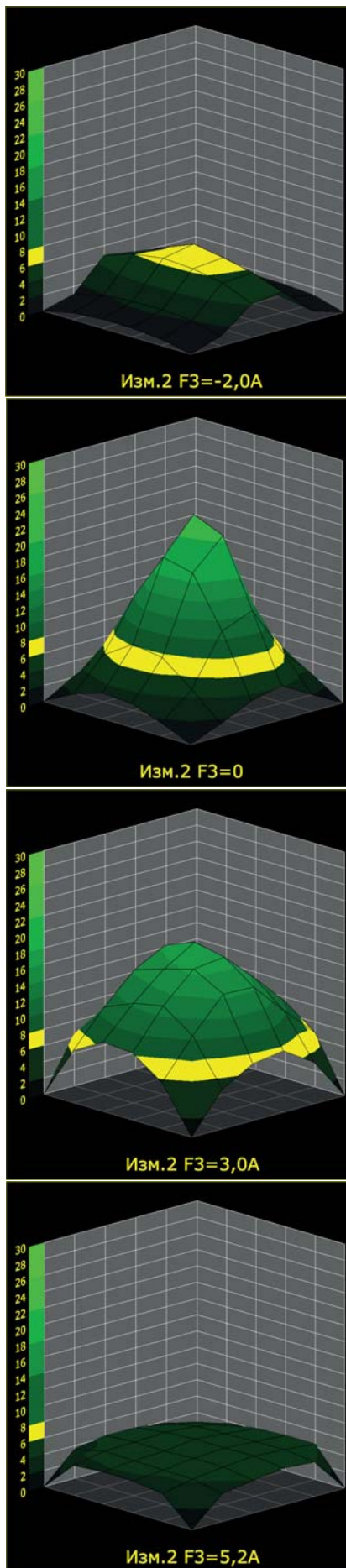


Рис. 13. Влияние тока магнитной катушки F3 на распределение плотности ионного тока

F3, F1 и F2. Ток анодных катушек (A11, A12, A21, A22) остался прежним, поскольку его рост вызывал нестабильность работы вакуумно-дуговой системы в целом. При усилении поля внутри анодов происходило их магнитное экранирование с последующим ростом напряжения на разрядном промежутке до ~ 90 В. Мощности используемых источников питания дуги для работы в таком режиме оказалось недостаточно. В дополнение к этому наблюдался существенный перегрев рабочей камеры (водоохлаждаемой), что, по всей видимости, также связано с магнитным экранированием анодов. Значительная часть разрядного тока протекала вдоль силовых линий магнитного поля (через плазму) на стенки камеры вместо анодов.

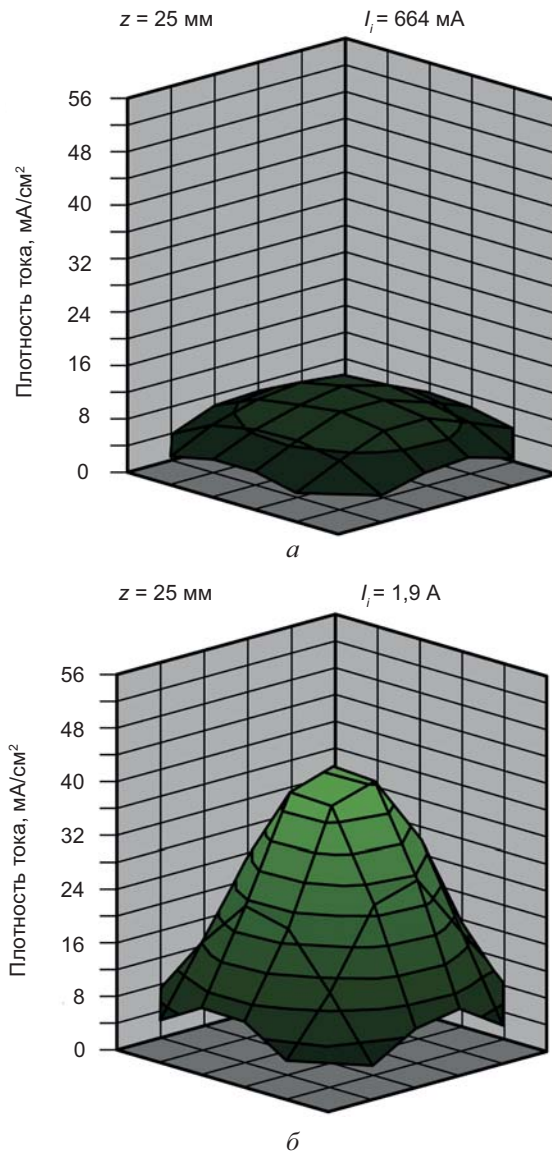


Рис. 14. Распределения плотности потока плазмы — начальное (а) и оптимизированное (б)

ВЫВОДЫ

Создан и исследован программно-аппаратный комплекс, включающий в себя модернизированный вариант многоканального матричного зонда и специализированное программное обеспечение, позволяющее производить наладку транспортирующих свойств вакуумно-дуговых источников плазмы, а также исследовать поведение плазменных потоков в них под действием различных внешних факторов.

При помощи данного комплекса продемонстрирован процесс смешивания нескольких потоков плазмы от различных катодов в один при их прохождении внутри выходной секции Т-образного плазмоведа.

Установлены величины токов магнитных катушек Т-образного фильтра, обеспечивающие его максимальную пропускную способность, что позволило увеличить производительность вакуумно-дугового источника плазмы с Т-образным фильтром примерно в 3 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Anders A. Cathodic Arcs: From Fractal Spots to Energetic Condensation. — New York: Springer, 2008. — 542 p.
2. Anders A., Oks E. M., Yushkov G. Y. et al. Measurements of the total ion flux from vacuum arc cathode spots // IEEE Trans. Plasma Sci. — 2005. — Vol. 33. — P. 1532–1536.
3. Аксёнов И. И., Андреев А. А., Белоус В. А., Стрельницкий В. Е., Хороших В. М. Вакуумная дуга: источники плазмы, осаждение покрытий, поверхностное модифицирование. — Киев: Наукова думка, 2012. — 728 с.
4. Anders A., MacGill R. A. Asymmetric Injection of Cathodic Arc Plasma into a Macroparticle Filter // J. Appl. Phys. — 2004. — Vol. 95. — P. 7602–7606.
5. Kleiman A., Márquez A., Boxman R. L. Performance of a magnetic island macroparticle filter in a titanium vacuum arc // Plasma Sources Sci. Technol. — 2008. — Vol. 17. — P. 015008-1–7.
6. Zhitomirsky V. N., Zarchin O., Wang Sh. G. et al. Ion Current Produced by a Vacuum Arc Carbon Plasma Source // IEEE Trans. Plasma Sci. — 2001. — Vol. 29, No. 5. — P. 776–780.
7. Baranov O., Romanov M., Ostrikov K. Effective control of ion fluxes over large areas by

magnetic fields: From narrow beams to highly uniform fluxes // Physics of Plasmas. — 2009. — Vol. 16. — P. 053505-1–5.

8. Yukimura K., Muraho T., Ma X., Ikehata T. Ion current distribution on a 200-mm-diameter disk target by titanium cathodic arc plasma-based ion implantation and deposition // Surf. Coat. Technol. — 2004. — Vol. 186. — P. 104–107.
9. Бизюков Ю. А., Васильев В. В., Лучанинов А. А., Стрельницкий В. Е. Автоматизированная система измерения пространственного распределения плотности ионного тока в потоке плазмы // Сб. тр. Харьковской нанотехнологической ассамблеи. — Харьков: Тонкие плёнки, 2007. — С. 232–235.
10. Zhitomirsky Y. N., Kinrot U., Alterkop B. Influence of gas pressure on the ion current and its distribution in a filtered vacuum arc deposition system // Surf. Coat. Technol. — 1996. — Vol. 86–87. — P. 263–270.
11. Aksyonov D. S., Aksenov I. I., Luchaninov A. A. et al. Plasma Streams Mixing in Two-Channel T-Shaped Magnetic Filter // Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Vacuum, Pure Materials, Superconductors. — 2011. — No. 6. — P. 116–120.
12. Aksenov I. I. A vacuum arc in erosion plasma sources. — Kharkiv: NSC KIPT, 2005. — 212 p.

REFERENCES

1. Anders A. Cathodic Arcs: From Fractal Spots to Energetic Condensation. — New York: Springer, 2008. — 542 p.
2. Anders A., Oks E. M., Yushkov G. Y. et al. Measurements of the total ion flux from vacuum arc cathode spots // IEEE Trans. Plasma Sci. — 2005. — Vol. 33. — P. 1532–1536.
3. Aksenov I. I., Andreev A. A., Belous V. A., Strel'nickij V. E., Horoshih V. M. Vakuumnaya duga: istochniki plazmy, osazhdenie pokrytij, poverhnostnoe modifitsirovanie. — Kiev: Naukova dumka, 2012. — 728 p.
4. Anders A., MacGill R. A. Asymmetric Injection of Cathodic Arc Plasma into a Macroparticle Filter // J. Appl. Phys. — 2004. — Vol. 95. — P. 7602–7606.
5. Kleiman A., Márquez A., Boxman R. L. Performance of a magnetic island macroparticle filter in a titanium vacuum arc // Plasma Sources Sci. Technol. — 2008. — Vol. 17. — P. 015008-1–7.

6. Zhitomirsky V. N., Zarchin O., Wang Sh. G. et al. Ion Current Produced by a Vacuum Arc Carbon Plasma Source // *IEEE Trans. Plasma Sci.* — 2001. — Vol. 29, No. 5. — P. 776–780.
7. Baranov O., Romanov M., Ostrikov K. Effective control of ion fluxes over large areas by magnetic fields: From narrow beams to highly uniform fluxes // *Physics of Plasmas.* — 2009. — Vol. 16. — P. 053505-1–5.
8. Yukimura K., Muraho T., Ma X., Ikehata T. Ion current distribution on a 200-mm-diameter disk target by titanium cathodic arc plasma-based ion implantation and deposition // *Surf. Coat. Technol.* — 2004. — Vol. 186. — P. 104–107.
9. Bizyukov Yu. A., Vasil'ev V. V., Luchaninov A. A., Strel'nickij V. E. Avtomatizirovannaya sistema izmereniya prostranstvennogo raspredeleniya plotnosti ionnogo toka v potoke plazmy // *Sb. tr. Kharkovskoj nanotehnologicheskoy assamblei.* — Kharkov: Tonkie plenki, 2007. — P. 232–235.
10. Zhitomirsky Y. N., Kinrot U., Alterkop B. Influence of gas pressure on the ion current and its distribution in a filtered vacuum arc deposition system // *Surf. Coat. Technol.* — 1996. — Vol. 86–87. — P. 263–270.
11. Aksyonov D. S., Aksenov I. I., Luchaninov A. A. et al. Plasma Streams Mixing in Two-Channel T-Shaped Magnetic Filter // *Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Vacuum, Pure Materials, Superconductors.* — 2011. — No. 6. — P. 116–120.
12. Aksenov I. I. A vacuum arc in erosion plasma sources. — Kharkiv: NSC KIPT, 2005. — 212 p.