

ИЗУЧЕНИЕ ТРАНСПОРТИРУЮЩИХ СВОЙСТВ Т-ОБРАЗНОГО ФИЛЬТРА ПРИ ПОМОЩИ МНОГОКАНАЛЬНОГО ЗОНДА

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

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

При помощи программно-аппаратного комплекса на основе многоканального зонда показан процесс перемешивания двух плазменных потоков в один на выходе двухканального вакуумно-дугового источника плазмы с Т-образным фильтром. Перемешивание достигалось при помощи создания ослабленного магнитного поля в области выхода фильтра, оно продемонстрировано в виде набора трехмерных распределений плотности выходного тока. Также аналогичным способом продемонстрирован асимметричный режим работы двухканального Т-фильтра, что необходимо для регулировки состава многокомпонентных покрытий, осаждаемых из смешанного потока плазмы. Изучена корреляция между величиной плотности выходного тока, измеряемой комплексом, и толщиной покрытия.

ВВЕДЕНИЕ

Получение функциональных покрытий методом вакуумно-дугового осаждения широко распространено благодаря своим возможностям. Поток ионов, являясь следствием взаимодействия электрического тока с катодом, попадая на какой-либо объект, конденсируется на его поверхности в виде покрытия. Толщина покрытия определяется плотностью ионного потока и временем осаждения. Определить скорость осаждения можно либо экспериментальным путем, измеряя толщину сформированного покрытия и время воздействия плазмы на подложку, либо спрогнозировать на основании измерений плотности попадающего на подложку ионного тока [1, 2].

Измерения плотности выходного ионного тока производят с помощью зондов, которые обычно представляют собой диск с поданным на него отрицательным потенциалом [2–5]. На практике помимо скорости осаждения покрытия также необходимо знать профиль распределения ионного тока по поверхности подложки (зонда). В таком случае применяют маленькие зонды, способные перемещаться в плоскости предполагаемого осаждения [6], или многоканальные зонды [4, 7–9]. Такие зонды (многоканальные) состоят из набора отдельных ячеек (маленьких зондов), расположенных в одной плоскости. Несмотря на очевидное усложнение конструкции, последний вариант является более предпочтительным, поскольку значительно ускоряет процесс получения результатов.

Особое внимание в последнее время получили многокомпонентные покрытия, что объясняется их уникальными свойствами, которые невозможно (или крайне проблематично) получить в однокомпонентных покрытиях. Поскольку свойства многокомпонентных покрытий помимо прочего определяются их составом – компонентами, входящими в него, и их соотношением, немаловажным фактором становится однородность состава и толщины таких покрытий.

Добиться однородного распределения компонентов покрытия по поверхности

обрабатываемого изделия можно, как это было показано [10], путем перемешивания нескольких плазменных потоков. Также немаловажно иметь возможность регулировать состав получаемых таким способом покрытий, что можно сделать за счет создания асимметрии плеч многоканальной системы осаждения [11].

Ранее был рассмотрен программно-аппаратный комплекс [12], позволяющий в режиме реального времени контролировать пространственное распределение плотности выходного тока. Вполне вероятно, что с помощью такого комплекса можно также определять степень асимметрии плеч многоканальных фильтров, что даст возможность подбирать режимы осаждения, обеспечивающие разные составы многокомпонентных покрытий.

Целью работы являются изучение процесса перемешивания плазменных потоков в ослабленном выходном магнитном поле Т-образного фильтра и влияние асимметрии разрядных токов и магнитных полей в каналах фильтра на распределение плотности выходного ионного тока, используемой для регулировки состава многокомпонентных покрытий, осаждаемых методом смешивания.

ОБОРУДОВАНИЕ

Эксперименты по вакуумно-дуговому осаждению покрытий и измерению распределений плотности выходного ионного тока выполнялись на установке «Булат-6». Установка оборудована Т-образным магнитоэлектрическим фильтром и схематически показана на рис. 1. Фильтр состоит из Т-образного плазмоведа 3, к входным секциям Р1 и Р2 которого пристыкованы генераторы плазмы 1 и 2. К рабочей камере 5 фильтр стыкуется своей выходной секцией Р3. Генераторы плазмы включают в себя аноды А1 и А2, катоды С1 (титан) и С2 (титан), стабилизирующие катушки S1 и S2, и анодные катушки А11, А12, А21, А22. На входные секции Т-образного плазмоведа намотаны поворотные катушки F1 и F2, на выходную секцию соответственно выходные катушки F3 и F4. Зонд (подложка) 4 для измерений плотности выходного тока устанавливался на расстоянии z от выходного сечения фильтра.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Для осаждения однородных многокомпонентных покрытий при использовании нескольких катодов необходимо, чтобы потоки плазмы перемешивались до осаждения, что не наблюдается при обычных условиях. Если на пути следования этих потоков создать условия для потери их замагниченности, то потоки плазмы частично смещаются в результате взаимной диффузии. Этот эффект был достигнут изменением напряженности магнитного поля в выходной части плазмовода [10].

На рис. 3 показаны зависимости, характеризующие влияние индукции магнитного поля, создаваемого выходной катушкой F4, на распределение плотности выходного ионного тока. Видно, что по мере ослабления магнитного поля (I_{F4} уменьшен с 3,7 А до 0) два максимума плотности значительно уменьшаются. Встречное включение катушки (отрицательные значения тока) позволяет полностью избавиться от неоднородности в виде двух максимумов – распределение плотности тока становится плоским. Дальнейшее усиление встречного поля приводит к вторичной фокусировке уже смешанных потоков плазмы, что проявляется в виде роста одного максимума на выходной оси системы.

Необходимо отметить, что полученные результаты измерения распределений выходного тока соответствуют измеренным распределениям толщины покрытий, осажденных при тех же условиях [10].

Для того чтобы иметь возможность осаждать многокомпонентные покрытия разных составов без замены катодов, а также возможность осаждения покрытий с переменным составом по толщине (например, градиентные или многослойные), необходимо контролировать плотность каждого из потоков плазмы независимо друг от друга.

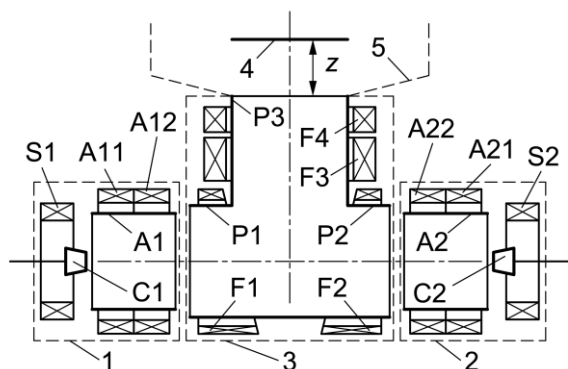


Рис. 1. Схематическое изображение установки: 1, 2 – генераторы плазмы; 3 – T-образный плазмовод; 4 – зонд; 5 – рабочая камера; C1, C2 – катоды; P1, P2 – входные секции плазмовода; P3 – выходная секция плазмовода; z – расстояние между выходным сечением фильтра и измерительной поверхностью зонда

Токи в магнитных катушках системы (пока 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.

Измерения распределений плотности выходного тока выполнялись при помощи программно-аппаратного комплекса [12], который состоит из многоканального зонда (рис. 2) и специализированного программного обеспечения, выполняющего измерения, обработку и визуализацию их результатов в режиме реального времени.

Зонд содержит 32 измерительные ячейки 3, закрепленные на одном из двух несущих дисков 1 через изоляторы 4, несущие диски стянуты шпильками 2. Поверх всей конструкции надевается защитный кожух, предотвращающий запыление изоляторов. Все части зонда выполнены из немагнитных материалов.

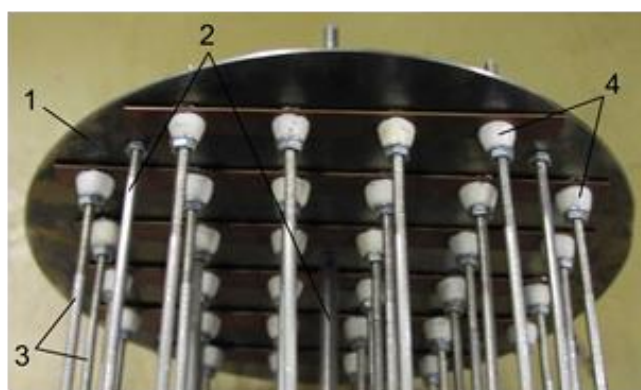


Рис. 2. Многоканальный зонд в разобранном виде

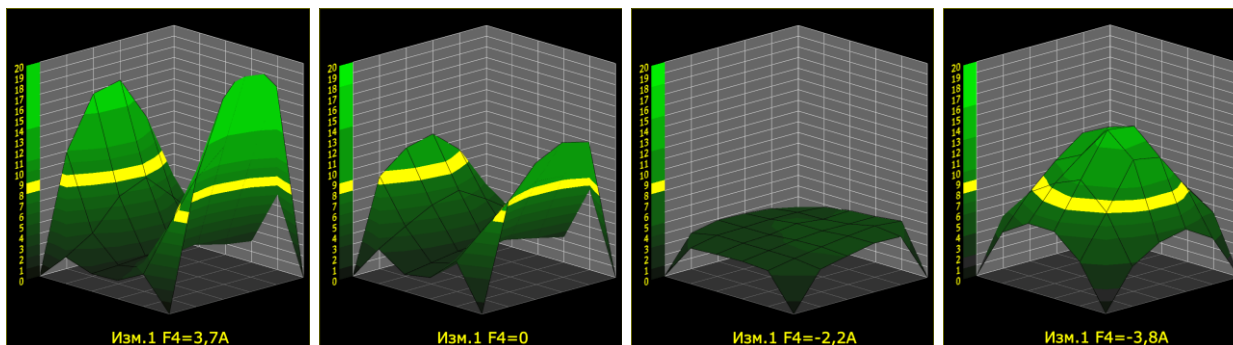


Рис. 3. Влияние магнитного поля выходной катушки $F4$ на распределение плотности ионного тока на выходе системы

Достичь изменения плотности этих потоков можно путем изменения силы тока дуги соответствующего катода или путем регулировки индукции магнитного поля во входных секциях Т-образного фильтра, обеспечив его асимметричный режим работы. Результаты исследования асимметрии, созданной изменением поля анодной катушки $A11$, показаны на рис. 4. Ток катушки $A21$ оставался при этом неизменным.

Как видно из рис. 4, при токе $0,5\text{ A}$ в катушке $A11$ на распределении наблюдается максимум плотности тока, смещенный в сторону плеча, в котором установлен катод $C1$. В данном случае потери в этом плече меньше, чем во втором в связи с улучшенной фокусировкой плазмы в этом плече. По мере уменьшения тока в катушке $A11$ максимум плотности постепенно уменьшается, и при достижении значения $I_{A11} = -0,5\text{ A}$ полностью исчезает, так как система становится сбалансированной. Дальнейшее усиление встречного поля катушки (до $I_{A11} = -1\text{ A}$) приводит к разбалансировке магнитной системы Т-образного фильтра в обратную сторону, что проявляется в появлении максимума плотности тока с противоположной стороны – возле плеча с катодом $C2$.

Необходимо упомянуть, что разбалансировки магнитных полей пар катушек $F1/F2$ и $A12/A22$, а также дуговых токов приводят к схожим изменениям распределений выходного тока, в силу чего результаты этих экспериментов на рисунках не приведены. Таким образом, путем разбалансировки симметрии дуговых токов можно изменять

соотношения плотностей плазменных потоков от разных катодов, что, в свою очередь, позволяет регулировать состав многокомпонентных покрытий «на лету», т. е. в процессе осаждения покрытия. А дополнительной разбалансировкой магнитной системы возможно добиться усиления этого эффекта, что позволяет расширить диапазон регулировки состава покрытий [11].

Программно-аппаратный комплекс создавался на основании установленного факта о наличии корреляции между показателями плотности выходного тока и скоростью осаждаемого покрытия при тех же условиях [2]. Однако также известно [1, 2], что изменение параметров процесса осаждения, например, напряжения на разрядном промежутке вследствие его экранирования усиленным магнитным полем, приводит к изменению кратности зарядов, генерируемых дугой ионов. Это вносит заметную погрешность в результаты измерений плотности тока и не позволяет делать на их основании окончательный вывод об изменении производительности системы осаждения или изменении распределения толщины покрытия, т. е. окончательной стадией оптимизации всегда является непосредственно осаждение покрытия и измерение распределения его толщины по поверхности подложки.

В более ранних работах [10] нами были приведены распределения толщины $TiAlN$ -покрытия, измеренные вдоль одной линии: несколько образцов располагались в один ряд поперек выходной оси Т-образного фильтра.

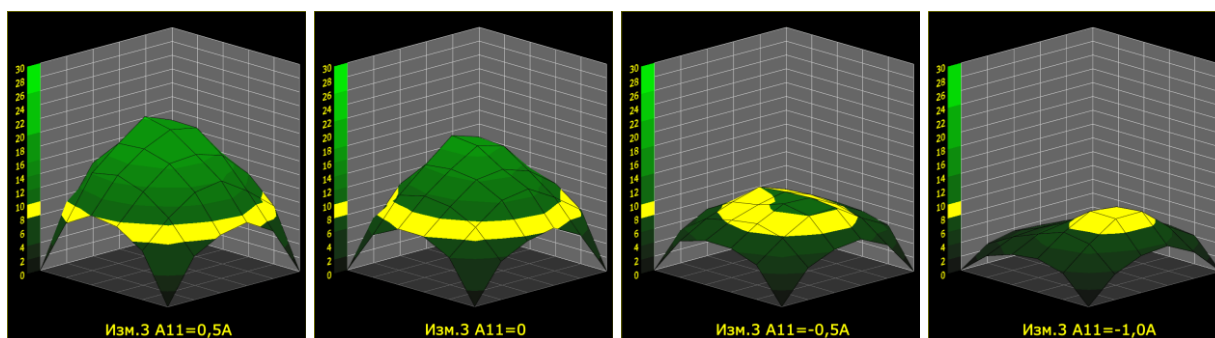


Рис. 4. Влияние асимметрии магнитного поля, создаваемого анодной катушкой $A11$ ($I_{A21} = \text{const}$), на распределение плотности ионного тока по поверхности зонда

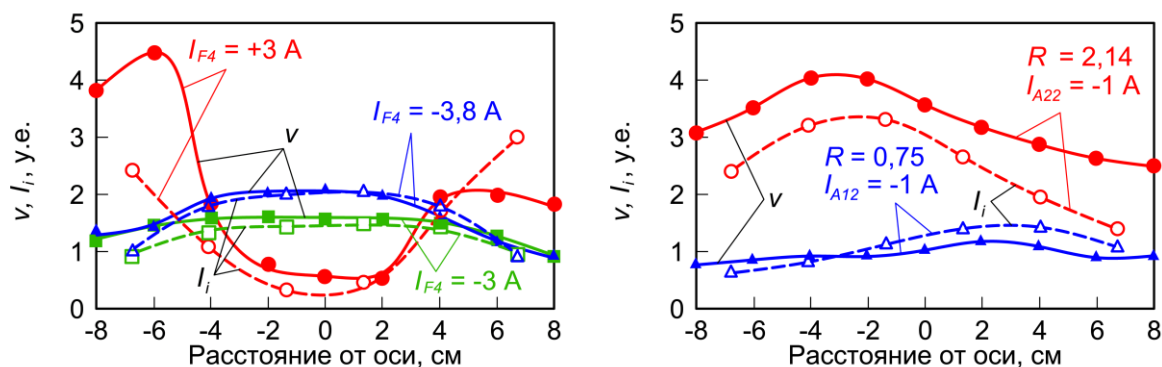


Рис. 5. Радиальные распределения скорости осаждения покрытия и ионного тока при разных значениях тока выходной катушки F4 (слева) и для различных режимов асимметрии магнитной системы и разрядных токов (справа), где R – соотношение разрядных токов

Для того чтобы утверждать, что достигнутая степень однородности будет наблюдаться по всей зоне осаждения, а не только вдоль этой линии, необходимо произвести сравнение результатов измерения профилей толщины этих покрытий с профилями плотности выходного тока вдоль этой же линии. Соответствующие кривые приведены на рис. 5. Измерения ионного тока производились при тех же условиях, что и осаждение покрытия.

На основании хода зависимостей, приведенных на рис. 5, можно сделать вывод о значительной корреляции между распределениями толщины покрытий и плотности выходного тока. Таким образом, можно утверждать, что достигнутая ранее степень однородности покрытий, полученных путем смешивания нескольких потоков плазмы от разных катодов в один, действительно для области, ограниченной площадью зонда. Полученный результат также позволяет утверждать, что созданный программно-аппаратный комплекс является незаменимым инструментом для исследования, оптимизации и наладки вакуумно-дугового оборудования, а также прогнозирования распределения конденсата по поверхности подложки.

ВЫВОДЫ

С помощью программно-аппаратного измерительного комплекса показан процесс смешивания нескольких потоков плазмы, следующих от двух катодов, в один за счет создания ослабленного магнитного поля на выходе Т-образного магнитоэлектрического фильтра. Показано, что асимметричный режим работы исследуемого фильтра может быть получен путем изменения соотношения разрядных токов его плеч, а также изменением соотношения индукции магнитных полей, создаваемых анодными и поворотными катушками. Асимметричный режим работы необходим для регулировки состава многокомпонентных покрытий, осаждаемых из смешанного потока плазмы в многоканальных фильтрах, дает возможность применять катоды более простого состава, а также осаждают покрытия с переменным по толщине составом, такие как градиентные и многослойные без замены катодов.

Исследования показали высокую степень корреляции распределений плотности выходного ионного тока и толщины осаждаемых покрытий. Это дало возможность утверждать, что достигнутые показатели однородности TiAlN-покрытий будут наблюдаться во всей зоне осаждения диаметром ~ 180 мм, а не только вдоль одной линии.

Продемонстрированные возможности программно-аппаратного комплекса, состоящего из многоканального матричного зонда и специализированной программы, обеспечивающей функционирование зонда и обработку результатов измерений, позволяют сделать заключение о его незаменимости для изучения и оптимизации транспортирующих свойств вакуумно-дуговых фильтров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. A. Anders. *Cathodic Arcs: From Fractal Spots to Energetic Condensation*. New York, Springer, 2008, 542 p.
2. И.И. Аксенов, А.А. Андреев, В.А. Белоус, В.Е. Стрельницкий, В.М. Хороших. *Вакуумная дуга: источники плазмы, осаждение покрытий, поверхностное модифицирование*. Киев: «Наукова думка», 2012, 728 с.
3. A. Anders, R.A. MacGill. Asymmetric Injection of Cathodic Arc Plasma into a Macroparticle Filter // *J. Appl. Phys.* 2004, v. 95, p. 7602-7606.
4. A. Kleiman, A. Márquez, R.L. Boxman. Performance of a magnetic island macroparticle filter in a titanium vacuum arc // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2008, v. 17, p. 015008 – 1-7.
5. V.N. Zhitomirsky, O. Zarchin, Sh.G. Wang, et al. Ion Current Produced by a Vacuum Arc Carbon Plasma Source // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2001, v. 29, N 5, p. 776-780.
6. O. Baranov, M. Romanov, K. Ostrikov. Effective control of ion fluxes over large areas by magnetic fields: From narrow beams to highly uniform fluxes // *Physics of Plasmas*. 2009, v. 16, p. 053505-1-5.
7. K. Yukimura, T. Muraho, X. Ma, T. Ikehata. Ion current distribution on a 200-mm diameter disk target by titanium cathodic arc plasma-based ion implantation and deposition // *Surf. Coat. Technol.* 2004, v. 186, p. 104-107.

8. Ю.А. Бизюков, В.В. Васильев, А.А. Лучанинов, В.Е. Стрельницкий. Автоматизированная система измерения пространственного распределения плотности ионного тока в потоке плазмы // *Сб. тр. Харьковской нанотехнологической ассамблеи. Тонкие пленки*, Харьков, 2007, с. 232-235.

9. Y.N. Zhitomirsky, U. Kinrot, B. Alterkop. Influence of gas pressure on the ion current and its distribution in a filtered vacuum arc deposition system // *Surf. Coat. Technol.* 1996, v. 86-87, p. 263-270.

10. D.S. Aksyonov, I. I. Aksenov, A.A. Luchaninov, et al. Plasma Streams Mixing in Two-Channel T-Shaped Magnetic Filter // *Problems of Atomic Science and*

Technology. Ser. "Vacuum, Pure Materials, Superconductors". 2011, N 6, p. 116-120.

11. D.S. Aksyonov, I.I. Aksenov, A.A. Luchaninov, et al. Composition Adjustment of Vacuum-arc Ti-Al-N Films, Deposited with Use of Two-Channel Filter. // *Problems of Atomic Science and Technology. Ser. "Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science"*. 2011, N 4, p.140-144.

12. Д.С. Аксенов, И.И. Аксенов, В.Е. Стрельницкий. Программно-аппаратный комплекс для оптимизации транспортирующих свойств вакуумно-дуговых фильтров // *(в печати)*.

Статья поступила в редакцию 18.01.2017 г.

ВИВЧЕННЯ ТРАНСПОРТУВАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ Т-ПОДІБНОГО ФІЛЬТРА ЗА ДОПОМОГОЮ БАГАТОКАНАЛЬНОГО ЗОНДА

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

За допомогою програмно-апаратного комплексу на основі багатоканального зонда показано процес перемішування двох плазмових потоків в один на виході двоканального вакуумно-дугового джерела плазми з Т-подібним фільтром. Перемішування досягалося за допомогою створення послабленого магнітного поля в області виходу фільтра та продемонстровано у вигляді набору тривимірних розподілів густини вихідного струму. Також аналогічним чином продемонстровано асиметричний режим роботи двоканального Т-фільтра, що є необхідним для регулювання складу багатоконпонентних покриттів, осаджуваних із змішаного потоку плазми. Вивчено кореляцію між величиною густини вихідного струму, що вимірюється за допомогою комплексу, та товщиною покриття.

STUDY OF T-SHAPED FILTER TRANSPORTING CAPABILITIES USING MULTI-CHANNEL PROBE

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

Software-hardware complex based on multi-channel probe was used to show the process of two plasma streams mixing into single one at the output of two-channel vacuum arc plasma source with T-shaped filter. The mixing was attained by generating a weakened magnetic field at the output region of the filter and was shown in a form of three-dimensional output current density distributions. Asymmetrical working mode of two-channel T-filter was shown similar way, which is needed for an adjustment of multi-component coatings composition from a mixed plasma stream. Correlation between complex-measured value of output current density and coating thickness was also investigated.