

ВАКУУМНО-ДУГОВЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭРОЗИОННОЙ ПЛАЗМЫ С МАГНИТНЫМИ ФИЛЬТРАМИ: ОБЗОР

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

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

Кратко рассмотрено современное состояние проблемы генерирования потоков эрозионной вакуумно-дуговой плазмы, очищенной от макрочастиц катодного материала. Приведены реферативные описания 27 вакуумно-дуговых источников плазмы с магнитными фильтрами, предназначенных для использования в технологических процессах осаждения плёнок микро- и нанометрового диапазонов толщин. Использованы материалы патентов и журнальных статей, опубликованных в период с середины 1970-х годов по настоящее время.

1. ВВЕДЕНИЕ

Плазменный источник с фильтром для удаления макрочастиц (МЧ) – ключевой инструмент, от степени совершенства которого зависят перспективы практического применения такой уникальной технологии, как вакуумно-дуговое осаждение покрытий, формирование поверхностных микро- и наноструктур, синтез плёнок нанометрового диапазона толщин. Успехами в разработке этих систем определяются темпы освоения новой технологии в микроэлектронике, оптике, точной механике, которые во многом определяют ход технического прогресса в целом. Причем на данном этапе решения обсуждаемой проблемы узловой её частью является совершенствование фильтрующей составляющей источника. Сказанное в полной мере и, пожалуй, в первую очередь относится к проблеме формирования потоков чистой углеродной плазмы в технике осаждения высококачественных алмазоподобных углеродных плёнок (покрытий).

Накопившиеся к настоящему времени сведения о физике генерирования МЧ вакуумно-дуговым разрядом, о способах подавления эмиссии этих частиц, об источниках плазмы, в которых реализованы такие способы, рассеяны во множестве публикаций. Систематизация этих сведений представляется актуальной задачей. Материалы на эту тему собраны в ряде обзорных работ [1–5]. Однако в связи с быстрым развитием техники в этом направлении упомянутые публикации уже не отражают современное состояние проблемы.

В настоящей работе кратко рассмотрено современное состояние проблемы генерирования потоков эрозионной вакуумно-дуговой плазмы, очищенной от макрочастиц катодного материала. Приведены краткие реферативные описания 27 вакуумно-дуговых источников с магнитными фильтрами.

2. ВАКУУМНО-ДУГОВЫЕ ИСТОЧНИКИ «ЧИСТОЙ» ЭРОЗИОННОЙ ПЛАЗМЫ

Принцип очистки плазмы от МЧ с помощью магнитного фильтра заключается в следующем. Между катодом и подложкой размещается некая преграда, исключаяющая прямую видимость между этой

подложкой и активной поверхностью катода, являющейся источником эрозионной плазмы с МЧ. Такой преградой может служить экран или стенки изогнутой трубы – плазмоведа (рис. 1) [6].

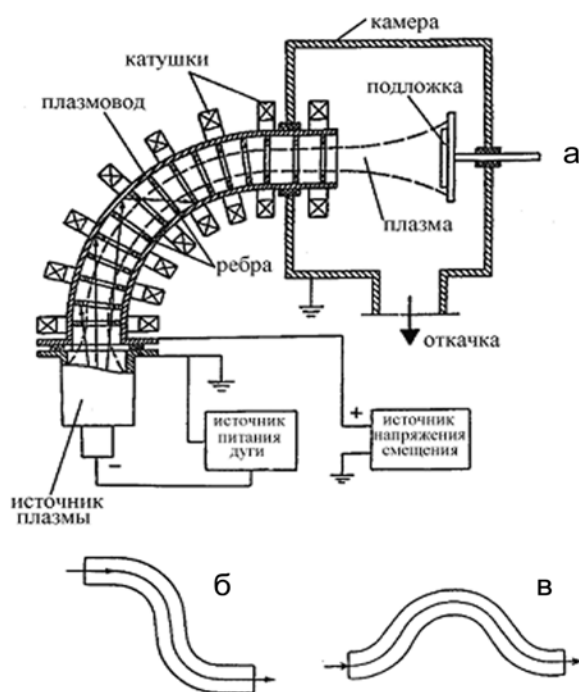


Рис. 1. Плазменный источник с криволинейным фильтром [6]: фильтр с плазмоводом в виде четверти тора (а); Собразный плазмовод (б); Ωобразный плазмовод (в); 1 – источник плазмы; 2 – плазмовод; 3 – рёбра; 4 – катушки; 5 – камера; 6 – подложка; 7 – плазма; 8 – источник питания дуги; 9 – источник напряжения смещения

Макрочастицы, двигаясь прямолинейно, наталкиваются на эту преграду и не попадают на подложку, в то время как ионная компонента плазменного потока с помощью магнитного поля направляется на подложку в обход преграды. Вследствие того, что не все МЧ полностью теряют кинетическую энергию, даже при нескольких последовательных столкнове-

ниях со стенками плазмоведущего канала, заметная их часть проходит до выхода из плазмовода и, следовательно, до подложки. Очевидно, что эффективность очистки плазмы в таком случае тем выше, чем длиннее плазмовод, чем он уже и чем больше угол его суммарного изгиба. Но при этом непременно возрастают потери полезной (ионной) компоненты транспортируемого потока, производительность системы падает, а сложность её изготовления и стоимость возрастают.

Попытки повысить эффективность систем и упростить их конструкцию минимизацией длины и угла изгиба плазмоведущего канала при относительно широком его поперечном сечении или путём использования простейшей магнитной системы в виде двух последовательных прямолинейных соленоидов с малым углом между осями до сих пор к желаемому результату не приводили: значительные конструктивные упрощения системы не сопровождались адекватным повышением её эффективности. Упрощение магнитной системы в рассматриваемых случаях ухудшает её транспортирующие качества. Но самым серьёзным негативным последствием таких «упрощений» является снижение фильтрующих качеств систем, так как перечисленные пути «упрощения» вступают в противоречие с требованиями, выполнение которых необходимо для эффективной очистки плазмы.

Следует также отметить, что все известные и наиболее распространенные криволинейные фильтры характеризуются крайне неоднородным поперечным распределением плотности выходного плазменного потока. Эффективная площадь поперечного сечения потока для большинства таких фильтров составляет всего несколько см², в лучшем случае – несколько десятков см². Это, в свою очередь, обуславливает соответствующие неудобства при использовании рассматриваемых устройств на практике. Обработка изделий с размерами, превышающими сечение плазменного потока, нанесение покрытий с равномерным распределением свойств (в первую очередь, толщины) невозможны без дополнительного усложнения систем введением узлов развёртки плазменного потока [7].

3. ОЧИСТКА ПЛАЗМЫ ОТ МАКРОЧАСТИЦ В КРИВОЛИНЕЙНОМ ПЛАЗМОВОДЕ

Существующие методы определения степени очистки плазмы от МЧ основаны на подсчёте плотности дефектов, оставляемых частицами в конденсате (с прилипанием и без прилипания). Процедура подсчёта крайне громоздкая и трудоёмкая [8]. Грубая оценка качества очистки плазмы может быть осуществлена измерением шероховатости (R_a) поверхности конденсата, полученного на полированной подложке. Что же касается прогнозирования степени очистки, которую должен обеспечить проектируемый фильтр, то в распоряжении разработчика имеется, пожалуй, только один принцип: проектируемая система должна обеспечивать «от-

сутствие прямой видимости подложки со стороны катода». В такой ситуации сильно усложняется проблема оптимизации фильтра, особенно в тех случаях, когда проектируемую систему предполагается использовать для очистки плазмы вакуумной дуги с графитовым катодом, генерирующим твёрдые, рикошетирующие МЧ.

Задача упрощается при использовании компьютерного расчёта движения МЧ. Нами эта задача решалась в двумерном приближении для осесимметричных и плоскосимметричных систем [9]. Предполагалось, что макрочастицы твёрдые и имеют сферическую форму, внутренние поверхности плазмовода и перехватывающие рёбра гладкие, отражение МЧ от стенок частично упругое, МЧ эмитируются катодным пятном с равной вероятностью в любом направлении в пространство над активной поверхностью катода, т.е. функция углового распределения плотности потока МЧ имеет вид $N(\alpha) = const$. Здесь α - угол между нормалью к поверхности и направлением вылета МЧ.

Конечно, расчёты с перечисленными допущениями не позволяют осуществить количественную оценку истинного соотношения между концентрациями МЧ в плазме на выходе из системы и на её входе ($N_{вых}/N_{вх}$). Но поскольку ошибки, вносимые этими допущениями, имеют регулярный статистический характер, то метод весьма полезен при сравнительной оценке фильтрующих качеств систем с различной геометрией плазмоведущего тракта.

4. ПРОХОЖДЕНИЕ ПЛАЗМЫ ЧЕРЕЗ МАГНИТНЫЙ ФИЛЬТР

Другой важной характеристикой системы формирования чистой эрозионной плазмы (помимо степени очистки) является пропускная способность фильтра, которая зависит от уровня потерь плазмы при её транспортировке вдоль фильтрующего канала. Показателем транспортирующих качеств (пропускной способности) фильтра является отношение количества ионов на его выходе к количеству ионов, вошедших в него. Однако в подавляющем большинстве случаев входной поток ионов определить затруднительно.

Более удобно пользоваться величиной выходного ионного тока I_v , отнесенной к величине разрядного тока дуги I_a . Поэтому чаще употребляется так называемый «системный коэффициент» $K_s = I_v/I_a$, который характеризует не только фильтр, но и степень согласования плазменного источника с фильтром, т.е. является показателем качества системы источник-фильтр в целом.

В случае криволинейного плазмовода (с радиусом кривизны R) кроме диффузии частиц на стенки поперёк магнитного поля следует также учитывать их уход, обусловленный смещением (дрейфом) потока в криволинейном поле в направлении векторов \mathbf{R} и $[\mathbf{H} \times \mathbf{R}]$, а также потери, обусловленные отражением частиц от сужений потока силовых линий транспортирующего поля \mathbf{H} . Такие сужения могут

возникать в местах, где «сшиваются» поля отдельных частей плазмоведущего тракта: между выходом генератора плазмы и входом тороидального плазмовода [10], между отдельными катушками плазмовода.

Анализ движения плазмы вдоль тороидального магнитного поля показывает, что для свободного перемещения плазмы его напряжённость в плазмоведущем канале должна удовлетворять соотношению:

$$j > \frac{M_i V_0 c}{Zea}, \quad (1)$$

где a – внутренний радиус плазмовода; M_i , V_0 , Z – масса иона, его поступательная скорость и кратность заряда соответственно; e – электронный заряд; c – скорость света [11].

При транспортировке потоков плазмы металлов с энергией даже в несколько десятков электронвольт для выполнения неравенства (1) потребовались бы поля свыше 1 Тл. Но при таких полях практически невозможно обеспечить стабильное горение дуги постоянного тока. Кроме того, определённые трудности возникли бы при инъекции плазмы в такое поле. Таким образом, представлялось целесообразным исследовать транспортировку потоков плазмы тяжелых элементов в криволинейной системе со скрещенными электрическим и магнитным полями, руководствуясь принципами плазмооптики [12], реализованными ранее в фильтрующей системе [13–16]. В этом случае необходимое магнитное поле определяется выполнением требования

$$\rho_e \ll a < \rho_i \quad (2)$$

(ρ_e , ρ_i – электронный и ионный ларморовские радиусы соответственно) и является существенно слабее тех полей, которые отвечают неравенству (1). При этом замагниченными являются только электроны, а ионы остаются незамагниченными. Электроны частично замагниченной плазмы движутся по спирали вдоль линий магнитного поля. В связи с высокой продольной проводимостью плазмы магнитные силовые линии в рассматриваемой системе являются эквипотенциалами. Линии имеют потенциал того электрода, с которым они пересекаются. Таким образом, пучок магнитных линий (magnetic flux-tube – магнитная силовая трубка), пересекающий активную поверхность катода, находится под потенциалом этого электрода (за вычетом катодного падения). Электроны, возникающие на катоде, движутся вдоль такой трубки, а вместе с ними движутся и ионы, которые электростатически удерживаются электронами, так что квазинейтральность плазмы сохраняется. Если плазмовод электрически изолирован от анода, то он может быть заряжен положительно вследствие попадания на него наиболее высокоэнергетичных ионов, которые не могут быть удержаны отрицательным пространственным зарядом транспортируемых электронов. В этом случае плазмовод приобретает положительный плавающий

потенциал. Возникающее при этом радиальное электрическое поле между транспортирующей магнитной трубкой и положительно заряженным плазмоводом способствует транспортировке ионной компоненты плазмы. Для повышения эффективности транспортировки на криволинейный плазмовод должен быть подан «принудительный» положительный потенциал (около 20 В) от специального источника.

Такая теоретическая модель была использована в работе [16] для описания движения ионов в тороидальных фильтрах и впоследствии стала известна как «flux-tube» модель. Более тщательно она была исследована Боркером с сотрудниками [17].

В дальнейшем было предложено несколько более совершенных моделей, преимущества которых продемонстрированы в ряде теоретических и экспериментальных исследований [18–25]. Вместе с тем, как отмечалось выше, в соответствии с наиболее простой и предельно доступной для понимания концепцией транспортировки ионов плазмы в криволинейном плазмоведущем канале в условиях замагниченности электронов происходит вдоль магнитных силовых линий, пересекающих активную поверхность катода [16, 26]. Причём эти линии нигде не должны пересекать стенки плазмовода, чтобы ведомая этими линиями плазма также не уходила на стенки плазмовода или других элементов плазмоведущего канала. Эффективность транспортировки зависит от уровня диффузионных и дрейфовых потерь плазмы при её прохождении через фильтрующий канал. Следовательно, условия прохождения плазмы через фильтр организовать тем проще, чем больше радиус плазмовода a по отношению к радиусу катода r_k , чем короче путь L между входом и выходом системы, чем сильнее магнитное поле (до определённого предела [10]), чем меньше угол изгиба плазмовода и, следовательно, кривизна транспортирующего H -поля и чем меньше вариации толщины транспортирующего пучка силовых линий. Очевидно, что те из перечисленных требований, которые относятся к геометрическим параметрам, вступают в противоречие с требованиями, выполнение которых обеспечивает наилучшее фильтрующее качество системы (см. предыдущий раздел). В этой связи выбор геометрических параметров R , r_k , L и θ (суммарный угол изгиба плазмовода) определяется допустимым компромиссом между «конфликтующими» требованиями. Что же касается потерь ионной компоненты, то при заданной геометрии проектируемой системы, обеспечивающей требуемую степень фильтрации, минимизировать эти потери возможно подбором оптимальных напряжённости и топографии транспортирующего магнитного поля.

5. КОНСТРУКЦИИ МАГНИТНЫХ ФИЛЬТРОВ

Классический фильтр с плазмоводом в виде части тора схематически изображён на рис. 1. С момента опубликования первых данных по фильтрам этого типа [13, 15] и до настоящего времени они

остаются наиболее распространёнными как в лабораторной, так и в производственной практике. Подробным исследованиям и усовершенствованию «тороидальных» фильтров посвящены работы многих авторов. Разработаны устройства с очень небольшими размерами (длина плазмоведа около 10 см), которые в сочетании с миниатюрным импульсным источником плазмы очень удобны для лабораторных исследований [27]. Исследования Боркера и др. [17] показали, что эффективность транспортировки плазмы вдоль фильтра экспоненциально снижается с увеличением длины плазмоведа.

Андерсом и Брауном установлены оптимальные соотношения магнитных полей на стыке между плазменным источником и плазмоведающим каналом, подтверждена важная роль положительного потенциала, подаваемого на плазмовод, в повышении эффективности фильтра [10].

Установлено также (Билек с сотрудниками [28,29]), что к аналогичному повышению эффективности транспортировки плазмы вдоль фильтра приводит подача положительного потенциала на узкую ленту, размещённую внутри плазмоведа вдоль его наружной (относительно центра кривизны) стенки. В оптимизированной системе, работающей в импульсном режиме в условиях сравнительно сильного магнитного поля (около 100 мТл), системный коэффициент фильтра с поворотом плазменного потока на 90° составляет 2,5%.

Додоновым с сотрудниками разработан тороидальный фильтр с поворотом плазменного потока на 120° (рис. 2) [30].

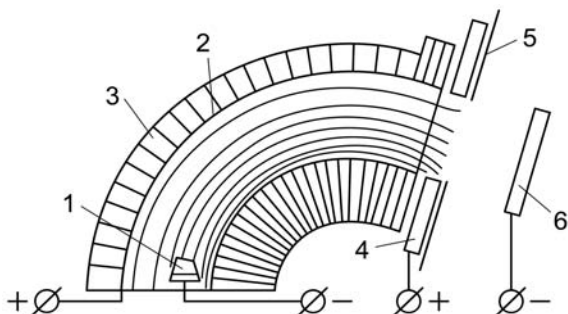


Рис. 2. Источник фильтрованной плазмы с поворотом потока на 120° [30]: 1 – катод; 2 – плазмовод; 3 – катушки; 4 – анод; 5 – камера; 6 – подложка

При постоянном токе дуги 200 А системный коэффициент плазменного источника с таким фильтром составляет около 3,7%. Сильноточный импульсный источник, оснащённый фильтром с углом изгиба тороидального плазмоведа 120°, описан в работе [31]. Источник используется в оборудовании для осаждения сверхтонких углеродных покрытий на жёсткие диски памяти и магнитные головки записи и считывания. С целью улучшения условий прохождения плазмы через фильтр Мартина и др. предложили вариант устройства с плазмоводом, изогнутым всего на 45° (рис. 3).

Такая мера позволила в режиме постоянного тока поднять значение системного коэффициента до 2,5% [32].

Аналогичное устройство с поворотом плазменного потока на 45° предложено Йонг-кук Кимом [33]. Отличие этого устройства от предыдущего состоит в том, что для коррекции магнитного поля на изгибе плазмоведа размещён дополнительный электромагнит (рис. 4).

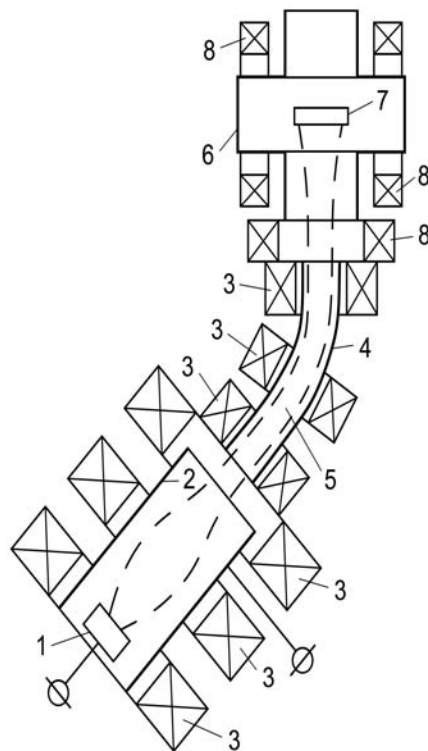


Рис. 3. Источник плазмы с фильтром Мартина и др. [32]: 1 – катод; 2 – анод; 3 – магнитные катушки; 4 – плазмовод; 5 – плазменный поток; 6 – рабочая камера; 7 – подложка; 8 – катушки системы фокусировки и развёртки плазменного потока

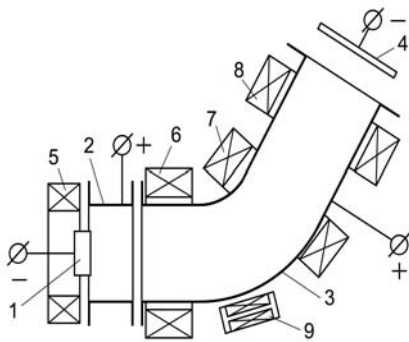


Рис. 4. Плазменный источник Йонг-кук Кима [33]: 1 – катод; 2 – анод; 3 – плазмовод; 4 – подложка; 5 – стабилизирующая катушка; 6 – 8 – катушки транспортирующего поля; 9 – корректирующая катушка

Фильтр «коленного» типа (рис. 5) предложен Фалабеллой и Сандерсом [34]. Плазмовод фильтра состоит из двух прямых труб, состыкованных друг с другом под углом 45° . Диаметр и длина плазмоведущего канала выбраны так, что даже при таком малом угле изгиба прямая видимость между катодом и подложкой отсутствует. Системный коэффициент эффективности составляет 3%. По сведениям, приведенным в [26], плазменный источник с таким фильтром используется в коммерческих целях.

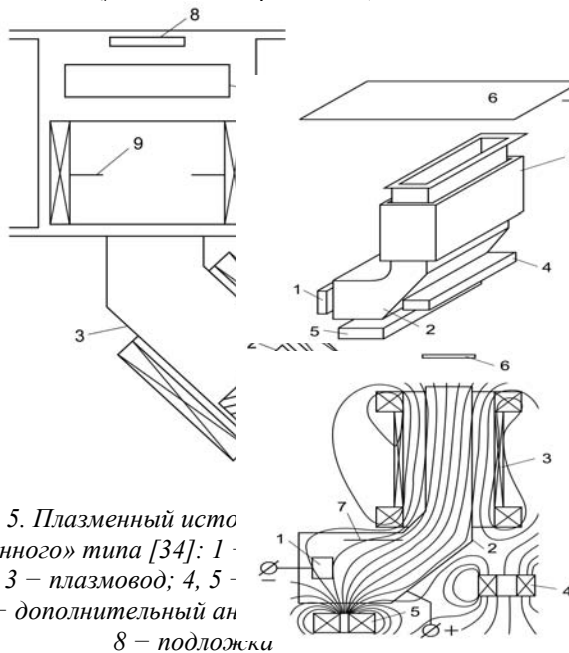


Рис. 5. Плазменный источник «коленного» типа [34]: 1 – катод; 2 – анод; 3 – плазмовод; 4, 5 – подложка; 6 – дополнительный анод; 8 – подложка

Фильтр «сегментного» типа для сильноимпульсного источника плазмы разработан и исследован в Национальной лаборатории Беркли Калифорнийского университета совместно с группой специалистов Фраунгоферовского института лучевых технологий (г. Дрезден) [35]. Каждый сегмент фильтра представляет собой изогнутый на 30° трубчатый плазмовод с магнитной катушкой. Последовательно соединяя различное количество сегментов, можно осуществлять поворот плазменно-

го потока на $30, 60, 90^\circ$ и т.д. Сильноточный источник плазмы работает при токах до 5 кА в импульсе с частотой следования импульсов до 300 Гц. Величина системного коэффициента очень высока и достигает 7%. Сведений о коммерческом применении системы не имеется.

Рис. 6. Плазменный источник с фильтром Велти [36]: схематический чертёж (а); магнитные силовые линии (б). 1 – катод; 2 – плазмовод; 3 – соленоид; 4 и 5 – отклоняющие электромагниты; 6 – подложка; 7 – анод

«Прямоугольный» фильтр с плазмоводом, изогнутым на 90° (рис. 6) [36], а также система для формирования двух плоских потоков фильтрованной плазмы, направленных в противоположные стороны (рис. 7) [37], предложил Велти. В обоих его изобретениях используется плазменный источник с плоским протяженным катодом. Обе системы предназначены для осаждения покрытий на движущиеся поперёк плазменных потоков плоские объекты большой площади. Системный коэффициент эффективности источника, генерирующего два потока, составляет $\sim 1,7\%$. Сведений о практическом использовании изобретений не имеется.

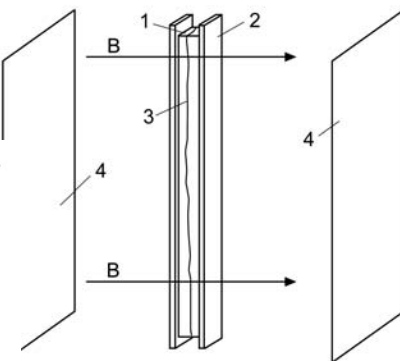


Рис. 7. Источник Велти с двумя выходными потоками плазмы [37]: 1 – катод; 2 – анод; 3 – актория движения КП; 4 – подложки

с. 8 приведена схема источника с плазмоводом изогнутого сечения, предложенного Горо [38].

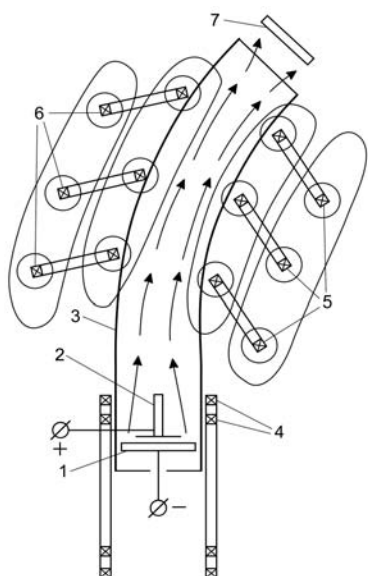


Рис. 8. Источник фильтрованной плазмы с регулируемым распределением магнитных полей в плазмоводе [38]: 1 – катод; 2 – анод; 3 – плазмовод прямоугольного сечения (длинная сторона сечения – перпендикулярна плоскости рисунка); 4 – катодные катушки; 5, 6 – система катушек для формирования транспортирующего магнитного поля; 7 – подложка

Рисунок изображает сечение устройства плоскостью, перпендикулярной длинной стороне поперечного сечения плазмовода. Ведущее магнитное поле внутри плазмовода является суммой полей двух независимых наборов катушек 5 и 6. Независимое питание катушек позволяет в широких пределах регулировать распределение магнитных полей в плазмоводе, воздействуя тем самым на форму плазменного потока, на эффективность его прохождения через фильтр. Недостаток такой системы – её громоздкость.

Гороховским запатентован также источник с L-образным фильтром [39], схематически изображённый на рис. 9.

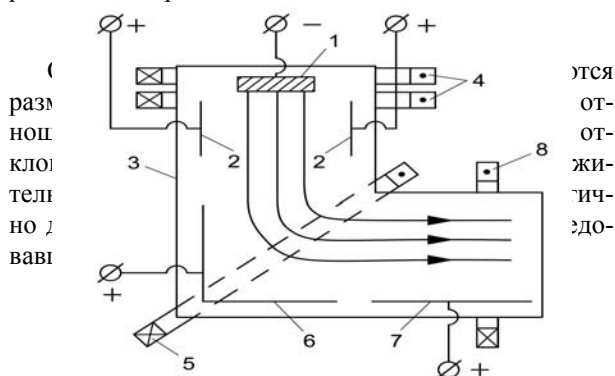


Рис. 9. Источник фильтрованной плазмы с L-образным плазмоводом прямоугольного сечения [39]: 1 – катод; 2 – анод; 3 – плазмовод; 4 – стабилизирующая и фокусирующая катушки; 5 – отклоняющая катушка; 6, 7 – отклоняющие электроды; 8 – выходная фокусирующая катушка

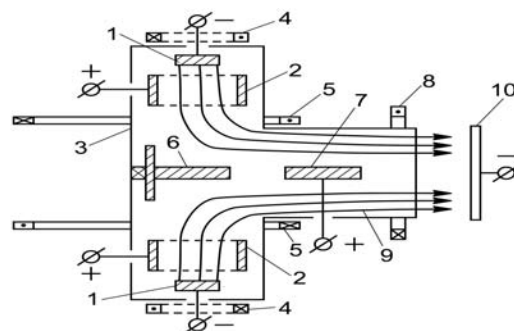


Рис. 10. Двухкатодный источник фильтрованной плазмы с T-образным плазмоводом прямоугольного сечения [39]: 1 – катод; 2 – анод; 3 – плазмовод; 4 – катодная катушка; 5 – отклоняющие катушки; 6, 7 – отклоняющие электроды; 8 – выходная фокусирующая катушка; 9 – выходная секция плазмовода

В патенте [39] описан также двухкатодный источник плазмы с двумя L-образными фильтрами с одним общим выходным плазмоводом (рис. 10). Потoki плазмы от двух катодов после изгиба на 90° проходят через общий выходной плазмовод на подложку не смешиваясь. Источник может быть использован для осаждения покрытий на плоские объекты большой площади. Системный коэффициент эффективности фильтра – около 2,5%.

S-образные фильтры. В поисках путей улучшения качества очистки плазмы от МЧ некоторые исследователи увеличивали угол изгиба плазмовода до 120° , 180° и больше [25, 30]. Одним из таких устройств является так называемый S-образный фильтр, плазмовод которого представляет по сути два соединенные последовательно плазмовода в виде четверти тора, изогнутые в противоположные стороны (рис. 11) [40].

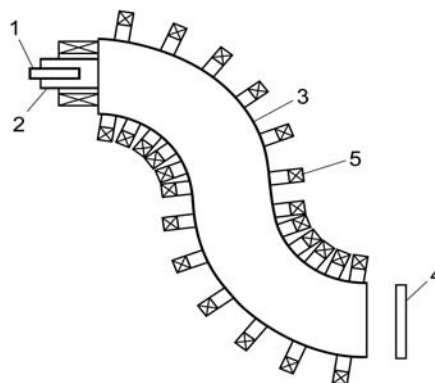


Рис. 11. S-образный фильтр с миниатюрным импульсным источником [40]: 1 – катод; 2 – анод; 3 – плазмовод; 4 – подложка; 5 – магнитные катушки

Такое решение действительно заметно улучшает качество фильтрации плазмы, но уровень потерь в более длинном канале (по сравнению с обычным 90° плазмоводом) столь велик, что системный коэффициент даже для лучшего импульсного исполнения устройства не превышает 0,6%. В этой связи источ-

ники с S-образным фильтром представляется целесообразным использовать только в физических исследованиях, а также в практике синтеза тонких и сверхтонких пленок, когда при повышенных требованиях к чистоте плазмы нет особой необходимости обеспечивать высокие скорости осаждения конденсата.

Та же цель – повышение чистоты эрозионной плазмы – преследовалась при создании криволинейных фильтров так называемой «открытой архитектуры». В них отсутствует плазмодод в обычном представлении (изогнутая труба). Его роль выполняют витки однослойного соленоида и изогнутого на требуемый угол, например на 90° [41], или дважды по 90° в противоположные стороны (эквивалент S-образного фильтра, рассмотренного выше) [42]. Соленоид изготавливают из медной трубки, охлаждаемой водой. Питание соленоида целесообразно осуществлять путем подключения его последовательно с дуговым разрядным промежутком источника плазмы. Значительная часть МЧ в таком фильтре уходит из системы через зазоры между витками соленоида, а вероятность их рикошетирования существенно снижена. Фильтр не получил широкого распространения в связи с тем, что необходимость размещения его внутри вакуумной камеры технологической установки сильно сокращает её (камеры) рабочий объем. По этой же причине значительно усложнены подвод электропитания и водяного охлаждения к соленоиду. Непростой является также задача обеспечения его механической жёсткости.

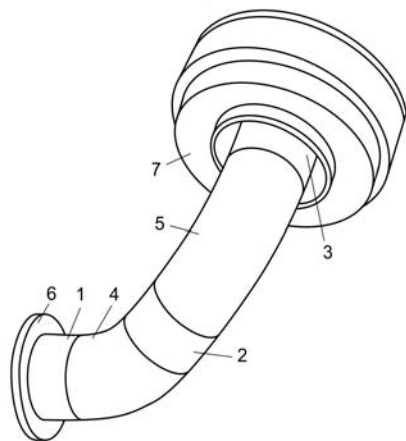


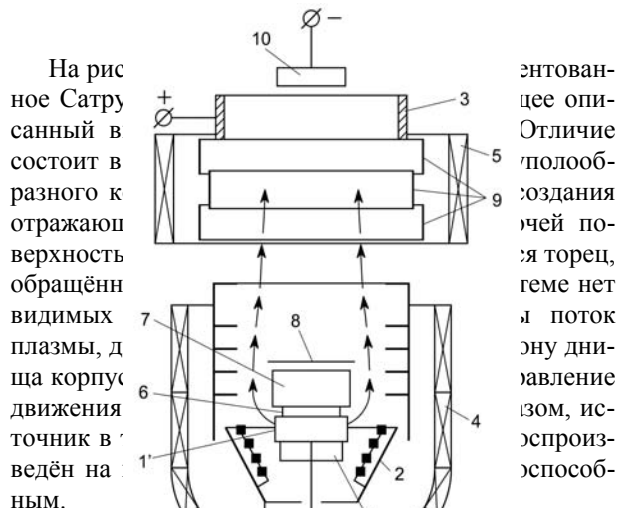
Рис. 12. Спиральный фильтр [43,44]:
1, 2, 3 – прямолинейные секции плазмодода;
4, 5 – изогнутые секции плазмодода; 6 – входной фланец; 7 – система электромагнитной развёртки выходного потока плазмы

В последние годы широкую известность приобрёл «спиральный фильтр (twist filter)» (рис. 12), который можно рассматривать как разновидность S-образного фильтра, и отличающийся от последнего тем, что составляющие его криволинейные участки изогнуты в разных плоскостях [43, 44]. По мнению разработчиков (Ксу Ши и др.), эта особенность фильтра способствует более эффективному

подавлению макрочастиц в потоке фильтруемой плазмы. Коммерческая установка со спиральным фильтром демонстрировалась в 2002 г. на выставке Международной конференции ICMCTF-2002 в Сан-Диего (США).

Источник с фильтром куполообразного типа (рис. 13) предложен Фалабеллой и Сандерсом [45,46].

Идея заключается в следующем. Внутри куполообразной камеры со стороны её свода и соосно с ней размещён цилиндрический катод с боковой рабочей поверхностью. С противоположной стороны камеры напротив торца катода размещена подложка. Магнитные катушки создают в камере аксиально-симметричное поле с «пробкой» у её свода. Плазменный поток, первоначально движущийся в радиальном направлении, разворачивается магнитным полем на 90° и движется вдоль поля на подложку. Возможность движения макрочастиц в ту же сторону блокируется экранами. Системный коэффициент устройства достаточно высок и составляет 3,5%. Сведений о практическом использовании источника нет.



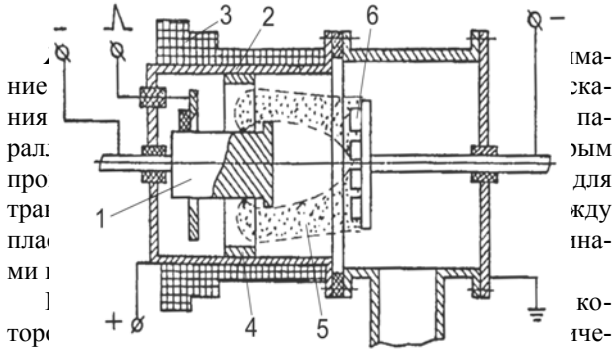
На рисунке показано устройство источника с куполообразным корпусом. В центре расположен катод (1) с рабочей поверхностью (1'). Напротив торца катода находится подложка (10). Магнитные катушки (4, 7) создают поле, которое отклоняет плазменный поток (показано стрелками) от радиального к осевому направлению. Экраны (2, 8, 9) и защитный кожух (5) обеспечивают защиту и контроль потока.

этован-
Отличие
лообраз-
оздания
чей по-
я торец,
еме нет
л поток
ону дни-
авление
изом, ис-
спроиз-
способ-
ным.

Рис. 13. Источник фильтрованной плазмы куполообразного типа [45, 46]: 1 – катод; 2 – экран; 3 – анод; 4-7 – магнитные катушки; 8-9 – экраны; 10 – подложка

Рис. 14. Плазменный источник Сатрума [47]:
1 – катод; 2 – анод; 3, 4 – магнитные катушки;
5 – защитный кожух; 6 – куполообразный корпус источника. Стрелками показано предполагаемое движение плазмы

Прототипом куполообразного источника [45, 46] является устройство, предложенное ранее Аксёновым и Бренём (рис. 15) [48].



Системный коэффициент в некоторых вариантах исполнения фильтра, по заявлениям разработчиков, весьма высок (около 1%). Однако в «куполообразном» варианте (рис. 15) [48] с фильтром (3) не предусмотрены меры борьбы с рикошетирующими МЧ, и пока что затруднительно представить себе, каковы должны быть эти меры, чтобы не свести на нет преимущества простоты конструкции и высокой пропускной способности по отношению к ионной (полезной) компоненте плазмы.

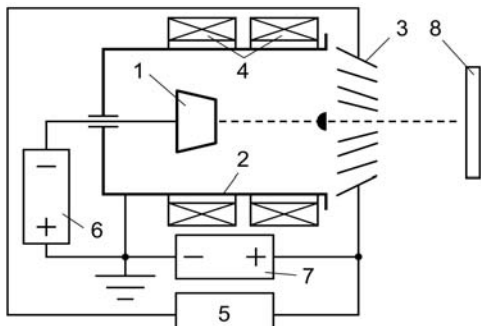


Рис. 16. Источник плазмы с фильтром жалюзийного типа [49]: 1 – катод; 2 – анод; 3 – фильтр; 4 – стабилизирующая и фокусирующая катушки; 5 – источник тока в кольцах фильтра; 6 – источник питания дуги; 7 – источник напряжения смещения

Прямолинейные фильтры. Первый вариант фильтра с плазмодом в виде четверти тора (см. рис. 1), предложенный три десятилетия назад [6], до настоящего времени остаётся наиболее распространённым как в лабораторной практике, так и в промышленном производстве. Вместе с тем сложность и сравнительно низкая производительность тормозили дальнейшее продвижение этого устройства в производственную практику.

Как альтернатива криволинейному плазменному фильтру в ХФТИ был разработан так называемый «прямолинейный» фильтр с «магнитным островом» [50]. Его устройство и принцип действия иллюстрирует рис. 17.



Рис. 17. Схема источника плазмы с фильтром типа «магнитный остров» [50]: 1 – катод; 2 – анод; 3 – плазмод; 4 – магнитные катушки; 5 – подложка; 6 – линии магнитного поля. Стрелками показано направление движения ионов и электронов, штрихпунктиром обозначены траектории МЧ

Фильтр, однако, оказался не намного проще своего «тороидального» прототипа, по эффективности практически его не превосходил и поэтому был модифицирован в вариант с «пассивным островом» [51]. Выполнение основного конструктивного требования – отсутствие прямой видимости между катодом плазменного источника и подложкой – здесь достигается тем, что в прямолинейном цилиндрическом плазмодовде (анод) на его оси размещается плоский экран (пассивный «остров»), перекрывающий эту видимость (рис. 18,а).

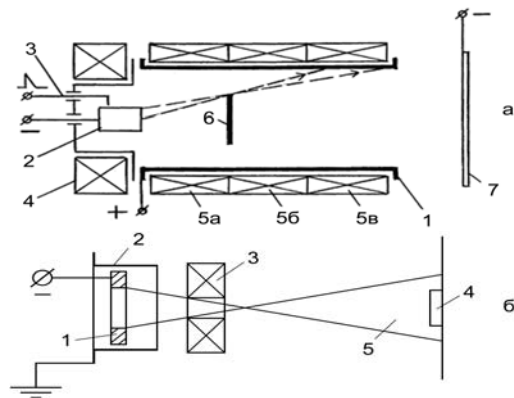


Рис. 18. Фильтр с «пассивной» заслонкой [51] а: 1 – анод; 2 – катод; 3 – поджигающий электрод; 4 – стабилизирующая катушка; 5 – транспортирующая катушка; 6 – заслонка; 7 – диафрагмы; 8 – подложка. Стрелками показаны треки МЧ. Схема источника плазмы Треглио [52] б: 1 – катод; 2 – анод; 3 – подложка; 4 – зона, свободная от МЧ

Транспортировка ионно-электронной компоненты плазмы осуществляется вдоль линий осесимметричного магнитного поля, пересекающих активную поверхность катода и огибающих экран.

На рис. 18,б приведена схема источника плазмы, предложенного Треглио [52]. Здесь отсутствие прямой видимости между катодом и подложкой (а следовательно, и фильтрующие свойства системы) определяется кольцевой формой катода и соотношениями между его диаметром, диаметром центрального отверстия катушки и расстояниями катод-катушка и катушка-подложка.

Системы формирования радиальных потоков (СФРП) фильтрованной плазмы. Наиболее исследо-

ванная система такого типа – система с преобразованием двух встречных потоков плазмы в радиальный поток показана на рис. 19 [53].

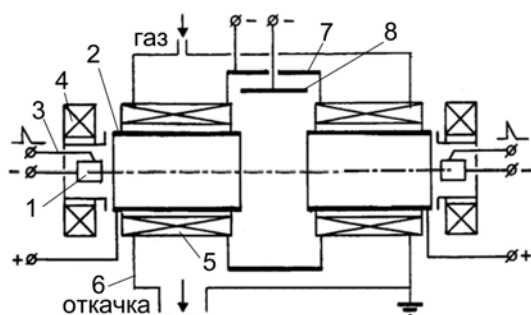
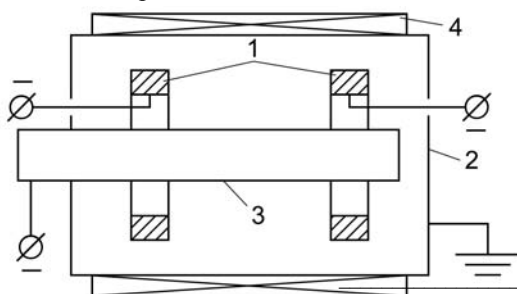


Рис. 19. Система формирования радиальных потоков (СФРП) фильтрованной плазмы [53]: 1 – катод; 2 – анод; 3 – поджигающий электрод; 4 – стабилизирующая катушка; 5 – транспортирующая катушка; 6 – камера; 7 – экран; 8 – подложка

Система содержит два одинаковых вакуумно-дуговых источника плазмы с магнитной фокусировкой. Источники размещены соосно и направлены навстречу один другому. Плазма двух встречных осевых потоков смешивается в центральной части системы и выходит наружу в виде радиального потока через кольцевой проем между анодами источников. Усредненный по времени поток имеет однородное по азимуту распределение плотности. Пройдя через проём между анодами, поток попадает на кольцевой экран, охватывающий этот проём. Подложки размещаются вокруг проёма либо на изолированных от экрана подложкодержателях, либо непосредственно на экране. По отношению к анодам экран находится под отрицательным потенциалом (плавающим или «принудительным»). Роль экрана могут играть стенки заземлённой камеры. Аноды в этом случае должны быть изолированы от камеры.

Сумма аксиальных ионных потоков, генерируемых обоими источниками, трансформируется в радиальный поток с достаточно малыми потерями: коэффициент трансформации достигает величины 0,9. В случае титановой плазмы при $B \approx 8$ Тл системный коэффициент I/I_a составляет 8,4%. Это примерно в 3-7 раз выше соответствующих показателей для других наиболее известных источников фильтрованной плазмы, работающих в режиме постоянного тока.

В системе, разработанной группой Саблева [54] (рис. 20), плазменные потоки, генерируемые катодными пятнами на наружной поверхности двух кольцевых катодов, направлены к стенкам цилиндрической камеры-анода.



198 Рис. 20. Система с радиальными потоками фильтрованной плазмы [54]: 1 – катоды; 2 – камера-анод; 3 – подложка; 4 – соленоид

Под действием электрического поля, возникающего в электронно-замагниченной плазме, часть ионов меняет первоначальное направление движения на обратное и осаждается на отрицательно заряженной подложке. В системе не предусмотрены меры против рикошетирования МЧ от стенок камеры.

Тот же принцип, что и в патенте [54], использован в системе Сторера [55], предназначенной для осаждения покрытий на проволоку, оптические волокна и т.п. (рис. 21).

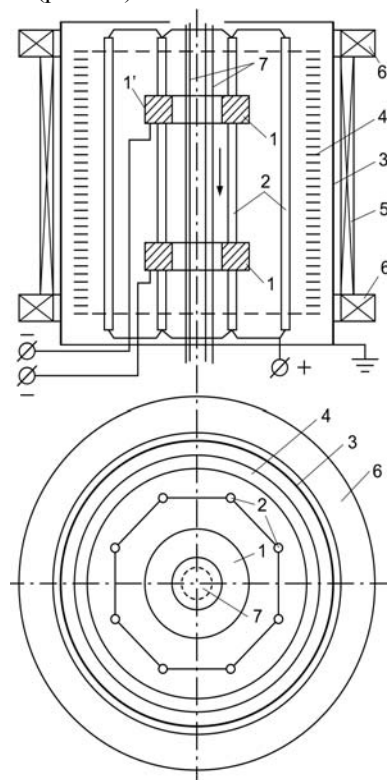


Рис. 21. Система с радиальными потоками фильтрованной плазмы [55]: 1 – катоды; 2 – анодные стержни; 3 – камера; 4 – ловушка для МЧ; 5 – соленоид; 6 – корректирующие магнитные катушки; 7 – движущийся (по стрелке) пучок проволок, волокон и т.п.

Здесь анодом служат анодные стержни, размещённых наподобие «белчьего колеса» между катодами и стенкой цилиндрической камеры. МЧ, движущиеся к стенкам и отражённые от неё, поглощаются ловушкой, размещённой между анодом и камерой и имеющей вид пакета плоских колец.

Широкоапертурные L-образные фильтры.

Анализ данных по эффективности транспортировки плазмы вдоль криволинейных магнитных полей показывает, что наиболее высокие результаты достигаются в случае системы с преобразованием аксиальных потоков в радиальный (см. выше).

Однако в ряде случаев применение такой системы представляет определённые неудобства. Поэтому достижение высокой эффективности традиционных систем, генерирующих аксиальный поток плазмы, продолжает оставаться актуальной проблемой. В связи с тем, что система, генерирующая радиальный поток плазмы, отличается от систем для формирования аксиальных потоков главным образом шириной плазмоведущего канала и аспектовым отношением R/a , представлялось целесообразным исследовать «аксиальную» систему с величиной R/a мало отличающейся от того значения, которое характерно для «радиальных» систем. Основные результаты экспериментальных исследований такой системы с L-образным плазмоводом [56] могут быть сформулированы следующим образом.

Увеличение линейных размеров поперечного сечения плазмовода (в исследуемом варианте – приблизительно до 200...300 мм) при малом аспектовом отношении ($R/a \approx 1,3$), близком к минимально возможному ($R/a = 1$), способствует значительному повышению пропускной способности системы.

Установлено, что дрейфовые потери могут быть заметно снижены локальной корректировкой магнитного поля, а также подачей отрицательного потенциала на часть стенки криволинейного плазмовода вблизи его выходного проёма со стороны, противоположной направлению $[H \times R]$ или в направлении R , при положительном потенциале смещения на плазмоводе в целом.

Уровень потерь независимо от их происхождения снижается, а ионный ток на выходе криволинейной части плазмоведущего канала соответственно увеличивается с повышением положительного потенциала смещения на плазмоводе. В исследуемом варианте системы её максимальная пропускная способность отмечалась при смещении ~ 25 В. В режиме «частично отрицательного» плазмовода достигнуты максимальные значения пропускной способности системы. При этом в отличие от традиционных условий ионный ток на выходе увеличивался, не достигая максимума, с ростом положительного смещения до 50 В.

Изложенные результаты использованы при разработке источника с T-образным плазмоводом [56], схематический чертёж которого приведен на рис. 22.

Системный коэффициент эффективности источника достигает $\sim 5,5\%$.

Ксу Ши и др. предложили двухкатодный источник фильтрованной плазмы (рис. 23) [57]. В его состав входят два генератора плазмы с магнитной стабилизацией дуги и плазмовод с двумя входными и одной общей выходной секцией. Через выходную секцию смешанный поток плазмы от двух генераторов попадает на подложку. В каждой входной секции размещён фильтр в виде диафрагмы, охваченной фокусирующей катушкой. С помощью диафрагмы отсекается периферийная, наиболее интенсивная часть потока МЧ, а ионная компонента плазмы, сфо-

кусируемая магнитным полем катушки, проходит через отверстие диафрагмы.

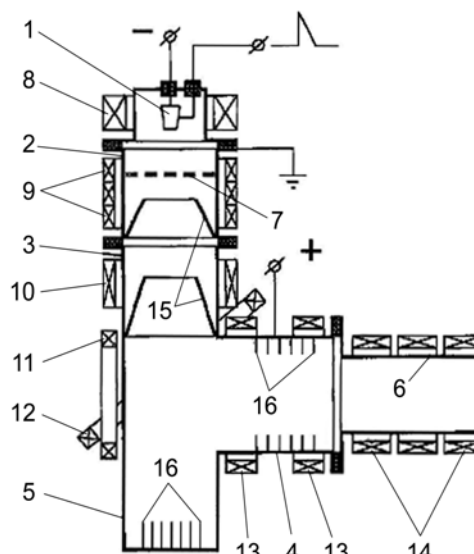


Рис. 22. Вакуумно-дуговой источник фильтрованной плазмы с T-образным плазмоводом [56]: 1 – катод; 2 – анод; 3, 4 – входная и выходная секции плазмовода; 5 – ловушка МЧ; 6 – дополнительная секция плазмовода; 7 – анодная вставка; 8-14 – магнитные катушки; 15 – экраны; 16 – рёбра

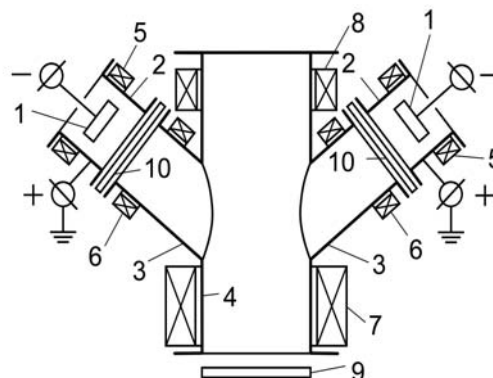


Рис. 23. Двухканальный источник фильтрованной плазмы [57]: 1 – катоды; 2 – аноды; 3 и 4 – входные и выходные секции плазмовода соответственно; 5-8 – катушки; 9 – подложка; 10 – фильтр-диафрагма

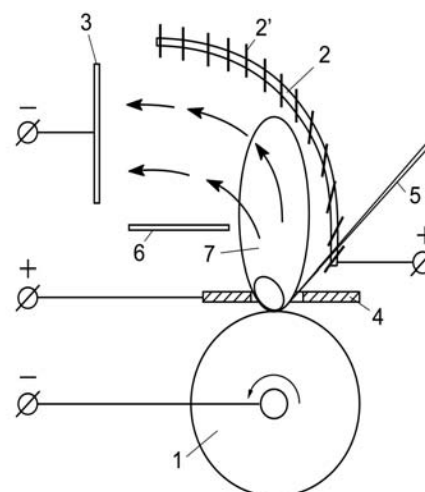


Рис. 24. Плазменный источник с электростатическим отклонением ионной компоненты [59]: 1 – катод; 2 – отклоняющий электрод; 2' – пластины-ловушки МЧ; 3 – подложка; 4 – анод; 5 – лазерный

Нетрадиционные способы фильтрации. В отличие от всех предыдущих вариантов плазменных фильтров, в которых управление плазменным потоком осуществляется скрещенными электрическим и магнитным полями, в системе, предложенной Мейером и Шайбе, отклонения ионной компоненты плазменного потока, генерируемого импульсным источником с лазерным поджигом [58], осуществляется полем положительно заряженного отклоняющего электрода (рис. 24) [59].

Однако в отсутствие магнитного поля потенциал отклоняющего электрода, необходимый для заметного воздействия на ионы плазменного потока, достигается при очень больших токах на этот электрод, превышающих ток дуги между катодом и анодом. В окончательном варианте запатентованного устройства анодом служит отклоняющий электрод.

В работе Бендера и др. [60] исследован процесс экстрагирования ионов из плазмы дугового разряда с помощью холловского слоя, формируемого в условиях поперечного магнитного поля (рис. 25).

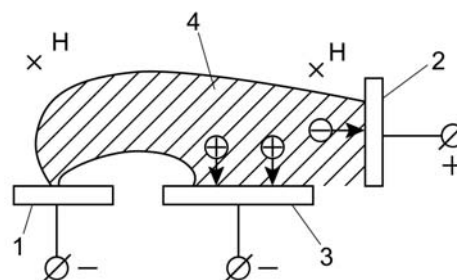


Рис. 25. Система с холловским слоем [60]: 1 – катод; 2 – анод; 3 – подложка; 4 – плазма

Ионный поток, генерируемый КП дуги в магнитном поле, испытывает разворот на 180° , отделяясь от капельной фракции, разлетающейся в пространство над катодом. Таким образом, МЧ не попадают на подложку, лежащую в одной плоскости с рабочей поверхностью катода. Эффективность прохождения ионной компоненты от катода к подложке в оптимальном режиме достигает 70%, что соответствует $K_S \approx 7\%$.

В устройстве, предложенном Крауссом (рис. 26) [61], ионный поток плазмы, генерируемой катодным пятном дуги, отклоняется на 90° вследствие дрейфа частиц в поперечном магнитном поле. Для компенсации пространственного заряда ионов служит термоэмиссионный электронный нейтрализатор, размещенный вблизи подложки.

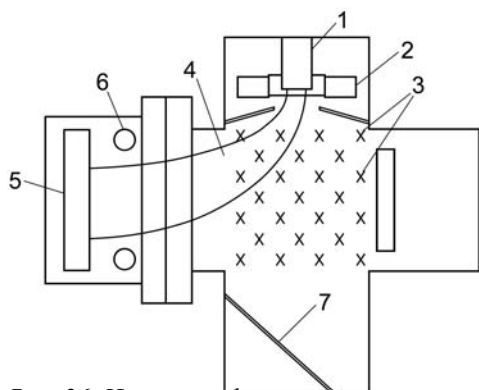


Рис. 26. Источник фильтрованной плазмы Краусса [61]: 1 – катод; 2 – анод; 3 – поперечное магнитное поле; 4 – ионный поток; 5 – подложка; 6 – термоэмиссионный нейтрализатор

Все три нетрадиционных плазменных фильтра пока находятся в стадии лабораторных исследований.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из приведенных данных следует, что за последние полтора-два десятилетия в области создания новых конструкций и новых концепций плазменных фильтров достигнут значительный прогресс. Разработки имеют различную степень готовности к практическому применению. Исследования механизмов транспортировки плазмы в $E \perp H$ -полях и поведения МЧ в плазмоводах с экранами и другими элементами для улавливания МЧ, разработка методов оптимизации геометрии фильтров с применением компьютерных расчётов магнитных полей и траекторий МЧ привели к созданию фильтров с пропускной способностью до ~90%, обеспечивающих снижение содержания МЧ в плазме до уровней, не превышающих разрешение регистрирующей аппаратуры. Особый интерес как объекты дальнейших исследований и разработок представляют, на наш взгляд, новые концепции высокоэффективных фильтрующих систем: устройства с аксиально-радиальным преобразованием плазменных потоков, фильтры с широкоапертурными L - и T -образными плазмоводами, сильноточные импульсные источники фильтрованной плазмы.

ЛИТЕРАТУРА

1. R.L. Boxman, D.M. Sanders, Ph.J. Martin (Eds.). *Handbook of Vacuum Arc Science and Technology*. Noyes Publications, Park Ridge, NJ, USA, 1995, 742 p.
2. Andre Anders (Ed.). *Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition*. John Wiley & Sons, Inc., NY / Chichester / Weinheim / Brisbane / Singapore / Toronto, USA, 2000, 736 p.
3. И.И. Аксёнов. *Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы*. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2002, 212 с. И.И. Аксёнов. *Вакуумно-дуговые источни-*

ки фильтрованной плазмы: история, теория, практика, перспективы // *Вакуумные технологии и оборудование*. Харьков: ННЦ ХФТИ, "Константа", 2003, с. 238 – 258.

4. R.L. Boxman and S. Goldsmith. Macroparticle contamination in cathodic arc coatings: generation, transport and control // *Surf. Coats Technol.* 1992, v. 52, p. 39 – 50.
5. А.с. СССР №605425 /И.И. Аксенов, В.А. Белоус, В.Г. Падалка. 1978.
6. И.И. Аксенов, С.И. Вакула, В.Г. Падалка, В.Е. Стрельницкий, В.М. Хороших // *ЖТФ*. 1980, т. 50, № 9, с. 2000.
7. R.L. Boxman // *Proc. of the XIXth Int. Symp. on Disch. and Electrical Insulation in Vacuum (IS-DEIV)*. Xi'an, China, Sept. 2000, p. 1.
8. I.I. Aksenov, D.Yu. Zaleskij, V.E. Strel'nitskij // *Ist Int. Congr. on Radiation Physics, High Current Electronics and Modification of Materials*. Sept. 2000, Tomsk, Russia, Proc. v. 3, p. 130.
9. S. Anders, A. Anders, I. Brown // *J. Appl. Phys.* 1994, v. 75, p. 4895.
10. N.A. Khizhnyak // *Sov. Phys. Tech. Phys.* 1965, v. 35, p. 847.
11. А.И. Морозов // *ДАН СССР*. 1965, т. 163, с. 1363.
12. И.И. Аксёнов, В.А. Белоус, В.Г. Падалка, В.М. Хороших // *Физика плазмы*. 1978, т. 4, № 4, с. 758 – 763.
13. И.И. Аксёнов, В.Г. Падалка, Н.С. Репалов, В.М. Хороших // *Физика плазмы*. 1980, т. 6, № 2, с. 312 – 318.
14. И.И. Аксенов, В.А. Белоус, В.Г. Падалка, В.М. Хороших // *ПТЭ*. 1978, №5, с. 236.
15. I.I. Aksenov, A.N. Belokhvostikov, V.G. Padalka, N.S. Repalov, V.M. Khoroshikh. Plasma flux motion in a toroidal plasma guide // *Plasma Phys. Control Fus.* 1986, v. 28, p. 761.
16. D.B. Borker, D.M. Sanders, J. Storer, S. Falabella // *J. Appl. Phys.* 1991, v. 69, p. 115.
17. B. Alterkop, E. Gidalevich, S. Goldsmith, R.L. Boxman // *J. Appl. Phys.* 1996, v. 79, p. 6791.
18. D.B. Batchelor and C.R. Davidson // *J. Plasma Phys.* 1975, v. 14, p. 77.
19. C.R. Davidson // *Phys. Fluids*. 1976, v. 19, p. 1189.
20. V.S. Veerasamy, G.A.J. Amaratunga, W.I. Milne // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1993, v. 21, p. 322.
21. Xu Shi, Yu Qiang Tu, Hong Siang Tan, Beng Kang Tay // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1966, v. 24, N 6.
22. Xu Shi, B.K. Tay, D.I. Flynn, Q. Ye, Z. Sun // *Surf. Coat. Technol.* 1997, v. 94 – 95, p. 195.
23. A. Anders, S. Anders, I. Brown // *J. Appl. Phys.* 1994. v. 75, p. 4900.
24. A. Anders, S. Anders, I. Brown // *Plasma Sours. Sci. Technol.* 1995, v. 4, p. 1.
25. A. Anders // *Surf. Coat. Technol.* 1999, v. 120–121, p. 319.

26. A. Anders // *Surf. Coat. Technol.* 1998, v. 93, p. 158.
27. M.M.M. Bilek, Y. Yin, D.R. McKenzie // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1996, v. 24, p. 1165.
28. M.M. Bilek, D.R. McKenzie, Y. Yin, M.U. Chhowalla, W.I. Milne // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1996, v. 24, p. 1291.
29. A.I. Dodnov and V.M. Diamant // *1st Int. Congr. on Radiation Phys., High Current Electronics and Modification of Materials.* Tomsk, 2000, Proc., v. 3, p. 429.
30. B. Petereit, P. Siemroth, H.-H. Schneider, H. Hilgers // *Surf. Coat. Technol.* 2003, v. 174-175, p. 648-650.
31. US Patent N5.433.836 /P.J. Martin, R.P. Netterfield, T.J. Kinder. Jul.18, 1995.
32. US Patent N6.026.763 /Jong-kuk Kim. 2000, Feb.22,
33. US Patent N 5,279,723 /S. Falabella, D.M. Sanders. 1994.
34. T. Schülke, A. Anders, P. Siemroth // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1997, v. 26, p. 660.
35. US Patent N 5840163 /R.P. Welty. Nov. 24, 1998.
36. US Patent N 5997705 /R.P. Welty. Dec. 7, 1999.
37. Int. Pat. N 00/62327 /V. Gorokhovskiy. Oct. 19, 2000.
38. US Patent N 6.663.755B2 /V. Gorokhovskiy. Dec.16, 2003.
39. S. Anders, A. Anders, M.R. Dickinson, R.A. MacGill, I.G. Brown // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1997, v. 26, p. 670.
40. M. Kühn, P. Meja and F. Richter // *Diamond and Related Materials.* 1993, v. 2, p. 1350.
41. M.M. Bilek, I.G. Brown // *Rev. Sci. Instrum.* 1998, v. 69, p. 3353.
42. X. Shi, D.Y. Flynn, B.K. Tay, H.S. Tan. *Int. Application under PCT* N WO 96/26531; *Int. Application under NPCT/GB* 96/00389.
43. US Pat. Appl Publ. NUS 2003/0085123 A1. /X.I. Shi, B.K. Tay, D.Y. Flynn, H.S. Tan, M. Fulton. May 8, 2003.
44. US Patent N 5282944 /D.M. Sanders, S. Falabella. Feb. 1, 1994.
45. D.B. Boercker, S. Falabella, D.M. Sanders // *Surf. Coat. Technol.* 1992, v. 53, p. 239.
46. US Patent N2003/0193031 A1 /Paul E. Sathrum. Oct.16, 2003.
47. А.с. СССР №913744 /И.И. Аксёнов, В.Г. Брень. 6 окт. 1979 г.
48. I.B. Stepanov, I.A. Ryabchikov, P.A. Shaposhnicov, D.M. Kurdyukov // *5th Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows.* Tomsk, 2000, Proc., p. 198 – 203.
49. Canadian Patent N 1176599 /I.I. Aksenov, V.G. Padalka, V.M. Khoroshikh. 1982. March 31.
50. А.с. СССР №1708133 /И.И. Аксёнов, В. Потапенко, А. Тимошенко, В.М. Хороших. 27 марта, 1989.
51. US Patent N 5.317.235 /J.R. Treglio. 1994. May 31.
52. I.I. Aksenov // *Proc. of the 4th Int. Symp. "Vac. Techn. and Equip".* Kharkov, Ukraine, 2001, p.139.
53. US Patent N4492845 /G.V. Kljuchko, V.G. Padalka, L.P. Sablev, R.I. Stupak. 1985. Jan. 8.
54. US Patent N5.518.597 /J.G. Storer. 1996 May.21.
55. I.I. Aksenov, V.V. Vasilyev, A.A. Luchaninov, A.O. Omarov, V.E. Strel'nitslij, D.Yu. Zaleskij. // *XXIst ISDEIV.* 2004, Yalta, Proc., v. 2, p. 491-497.
56. X. Shi, H.S. Tan, B.K. Tay. *Int. Publication N WO99/22396.* May 6, 1999.
57. H.-J. Scheibe, D. Dreschner // *Thin Films Proc. of the joint 4th Int. Symp. TATF'94 and the 11th Conf. HVITF'94.* Dresden, march 7-11, 1994, p. 139-142.
58. DE Patent N19850218C1 /C.-F. Meyer, H.-J. Scheibe. 30.3.2000.
59. E.D. Bender, G.I. Dimov, A.S. Krivenko, V.V. Razorenov // *Rev. Sci. Instr.* V.77, 2006, p. 013303 (1-8).
60. US Patent N5.902.462 /A.R. Krauss. May 11, 1999.

ВАКУУМНО-ДУГОВІ ДЖЕРЕЛА ЕРОЗІЙНОЇ ПЛАЗМИ З МАГНІТНИМИ ФІЛЬТРАМИ: ОГЛЯД

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

Коротко розглянуто сучасний стан проблеми генерування потоків ерозійної вакуумно-дугової плазми, очищеної від макрочасток катодного матеріалу. Наведено реферативні описи 27 вакуумно-дугових джерел плазми з магнітними фільтрами, призначених для використання в технологічних процесах осадження плівок мікро- та манометрового діапазонів товщин. Використано матеріали патентів та журнальних статей, опублікованих в період з середини 1970-х років до теперішнього часу.

FILTERED VACUUM ARC EROSION PLASMA SOURCES: A REVIEW

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

The present state of the problem to rid cathodic vacuum arc erosive plasma flows of macro- and nanoparticles is briefly considered. In this paper there are presented abstracts of 27 vacuum arc plasma sources equipped with magnetic filter, which are designed for use in technological processes of deposition of films of micro- and nanometer range of thickness. The data of patents and journal papers issued since the middle of the 1970th till present are used in this review.