

РАЗДЕЛ ЧЕТВЁРТЫЙ

ФИЗИКА РАДИАЦИОННЫХ И ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.793

ПОДАВЛЕНИЕ ЭМИССИИ МАКРОЧАСТИЦ В ВАКУУМНО-ДУГОВЫХ ИСТОЧНИКАХ ПЛАЗМЫ

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

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

Приведен краткий аналитический обзор методов подавления эмиссии микро- и наночастиц, часто называемых “макрочастицами” или “каплями”, в вакуумно-дуговых источниках эрозионной плазмы без применения фильтрующих систем. Рассмотрены 12 вариантов стационарных и импульсных плазменных источников, включая классические – с применением магнитных полей различной конфигурации, с введением в разрядное пространство реакционных газов, а также нетрадиционные – с использованием дуги в режиме горячего анода, с шунтирующим дуговым разрядом.

1. ВВЕДЕНИЕ

Вакуумно-дуговой разряд катодного типа, генерирующий потоки высокоионизированной плазмы, является эффективным инструментом для осаждения покрытий различного назначения [1-5]. Покрытия формируются при конденсации потока плазмы материала эродирующего катода на относительно холодной поверхности подложки. Толщина конденсата определяется плотностью плазменного потока и временем экспозиции. В присутствии реакционного газа (азота, кислорода, углеродсодержащего газа) в процессе конденсации синтезируется слой металла на основе соединений осаждаемого металла с газом (нитридов, оксидов или карбидов). Поскольку в качестве катодного плазмообразующего материала могут служить практически любые металлы или сплавы, то вакуумно-дуговым методом могут быть получены покрытия самого разнообразного состава. С другой стороны, высокая степень ионизации вакуумно-дуговой плазмы, для некоторых материалов достигающая почти 100%, позволяет с помощью магнитных и электрических полей управлять плазменным потоком, регулировать в широких пределах его энергосодержание, форму и направление движения. Это, в свою очередь, позволяет активно влиять на структурные характеристики получаемых конденсатов, обеспечивает возможность синтезировать покрытия с заданными физико-механическими и служебными характеристиками, регулируемые в широких пределах. Необычайно широкие технологические возможности вакуумной дуги обусловили тот повышенный интерес к разряду этого типа, который отмечается в последние годы в связи с успехами в области наноструктурных материалов, наноплёночных технологий [3, 6]. Именно это обстоятельство побудило исследователей и разработчиков вновь обратиться к проблеме так называемых ма-

крочастиц, которые в виде капель или обломков катодного материала микронных и субмикронных размеров неизбежно присутствуют в потоках плазмы, генерируемых дугой, а следовательно, – и в покрытиях, формирующихся при конденсации этих потоков. Чтобы подчеркнуть массивность этих частиц по сравнению с ионами и нейтральными атомами плазмы, их принято называть макрочастицами (МЧ). Совокупность МЧ в общем плазменном потоке часто называют “капельной фракцией” или “капельной фазой” эрозии катода [4].

Прилипая к подложке, МЧ во многих случаях (но не всегда!) значительно ухудшают служебные характеристики формируемых покрытий, что в ряде областей применения недопустимо или крайне нежелательно (например, в оптике, микроэлектронике, технике плёнок нанометровых толщин). Наиболее радикальным средством подавления капельной фракции являются магнитоэлектрические фильтры [5, 7], позволяющие (по крайней мере, теоретически) добиться сколь угодно высокой степени очистки плазмы от МЧ. Но чем выше требуемая степень очистки, тем более высокой ценой она достигается: усложнением конструкции фильтра, снижением его пропускной способности по отношению к полезной (ионной) составляющей фильтруемого потока. В то же время в ряде практических случаев вовсе нет необходимости добиваться “суперочистки” плазмы, достаточно удалить из неё основную часть МЧ, характеризующихся размерами, превышающими некий допустимый предел, чтобы получаемые плёнки конденсата стали пригодными для использования в требуемых целях. Так, например, присутствие капельной фазы с частицами размером менее 1 мкм вполне допустимо в износостойких антифрикционных наноструктурных покрытиях на рабочих поверхностях деталей узлов трения и инструментах,

в декоративно-защитных покрытиях. В этой связи значительный практический интерес представляют бесфильтровые методы подавления МЧ, которые хотя и не обеспечивают полной очистки плазмы, но являются несоизмеримо более простыми и дешёвыми по сравнению с методами, требующими применения фильтров. В настоящей статье приведен краткий анализ современного состояния проблемы бесфильтровых методов снижения концентрации МЧ в потоках эрозионной плазмы, эмитируемых катодными пятнами дугового разряда в вакууме и в разреженной атмосфере реактивных газов, в технологических системах осаждения покрытий.

2. ЭМИССИЯ МАКРОЧАСТИЦ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ПЛАЗМОЙ

Исследованию механизмов эмиссии МЧ, их движению и взаимодействию с плазмой разряда и с поверхностью конденсации посвящено большое количество работ, результаты которых систематизированы в ряде обзорных статей и монографий [7-14]. В сущности, все исследования катодного пятна (КП) в той или иной мере затрагивают проблему МЧ, поскольку процессы в пятне связаны с их (МЧ) эмиссией. Не вдаваясь в анализ имеющихся экспериментальных и теоретических данных, отметим только наиболее обоснованные и наиболее распространённые представления о МЧ, которые могут, как мы полагаем, быть полезными при написании данной статьи.

С точностью до ошибки измерений можно считать экспериментально установленным, что:

- эмиссия потоков вещества эродирующего катода вакуумной дуги обусловлена процессами в КП; эти потоки состоят из двух основных компонент – ионов и нейтралов в виде МЧ (потоки нейтральных атомов пренебрежимо малы);

- в подавляющем большинстве случаев МЧ представляют собой капли расплавленного материала катода с размером от единиц нанометров (“наночастицы” [13]) до десятков микрометров;

- распределение МЧ по размерам представляет собой экспоненциально падающую функцию (количество МЧ уменьшается с увеличением их размеров);

- основную массу материала, покидающего катод в виде нейтральной фракции, составляют МЧ “среднего” размера (примерно от 1 до 20 мкм);

- для различных материалов капельная фракция эрозии тем больше, чем ниже температура плавления материала;

- основная часть МЧ разлетается из КП под острым углом по отношению к эродирующей поверхности катода. Максимум углового распределения плотности потока крупных частиц находится в области нескольких градусов, а с уменьшением размеров МЧ этот максимум смещается в сторону больших углов (примерно до 30...45°) [4];

- с повышением интегральной температуры катода капельная фракция его эрозии увеличивается;

- количество капель уменьшается с повышением скорости перемещения КП по поверхности катода;

- убыль массы катода за счёт капельной фазы эрозии уменьшается при наличии в разрядном пространстве реактивного газа, способного образовывать на поверхности катода плёнки соединений с эродирующим металлом.

По сложившимся представлениям [11, 15, 16] эмиссия капель происходит при формировании на поверхности катода эрозионных кратеров. Известные модели КП (стационарная и квазистационарная [4, 8, 10, 11], взрывная [14]) предполагают образование в центре пятна участка расплавленного металла. Малые размеры пятна, в котором сосредоточен весь разрядный ток, обуславливают разбрызгивание жидкого металла под воздействием высокоплотного потока ионов, поступающих на поверхность расплава из области катодного падения потенциала дуги. По оценкам Боксмана и Голдсмита [8] давление, которое оказывает ионный поток на расплав, составляет $1,7 \cdot (10^6 \dots 10^8)$ Па. Такое представление о процессе эмиссии МЧ вполне согласуется с приведенными выше особенностями капельной эрозии.

Следует отметить, однако, что в случае катодов из тугоплавких металлов и графита, эмиссия МЧ может происходить в соответствии с другой моделью, которую предложили Раховский и Ягудаев [17]. В экспериментах с вольфрамом они установили, что значительная часть МЧ покидает катод не в виде капель, а в виде твёрдых фрагментов. На поверхности частиц нет следов оплавления, но отчётливо видны кристаллические сколы. По мнению авторов, в условиях их экспериментов разрушение катода с эмиссией твёрдых МЧ может происходить вследствие термоупругих напряжений, возникающих в области КП, которые в десятки раз превышают предел прочности материала электрода.

В межэлектродном пространстве нормальная составляющая скорости МЧ за счёт момента, передаваемого им ионами, движущимися по направлению к аноду, может заметно увеличиться. Этим, в частности, можно объяснить то, что с уменьшением размеров частиц угол наклона их вектора скорости к поверхности катода увеличивается [4]. При взаимодействии МЧ с плазмой происходит их подогрев вследствие ионной бомбардировки. В результате происходит рост интенсивности их испарения. По оценкам авторов работы [8], капли в случае медного катода теряют до 30% своей массы. А. Андерс [18], анализируя энергетический баланс МЧ с учётом нагрева бомбардировкой ионами и электронами, а также охлаждения в результате теплового излучения и испарения, приходит к выводу о невозможности полного испарения МЧ в обычных технологических условиях без постороннего источника нагрева (например лазерным инфракрасным излучением, что в современных условиях пока нецелесообразно в экономическом отношении).

Макрочастица, как и всякое другое изолированное тело, погружённое в плазму, вследствие более высокой подвижности электронов по сравнению с ионами приобретает отрицательный плавающий потенциал. Для частиц с радиусом порядка 10 мкм этот потенци-

ал составляет около – 12 В [4, 19], что позволяет заметно снизить количество МЧ, поступающих на подложку, путём подачи на неё отрицательного напряжения смещения, достаточного для погашения направленной скорости значительной части МЧ (особенно мелких), движущихся в сторону подложки. При заданном потенциале подложки вероятность отражения МЧ от неё определяется размерами (массой), скоростью и углом падения частицы по отношению к поверхности подложки [20, 21].

С учётом приведенных здесь особенностей эмиссии МЧ и их взаимодействий с плазмой в межэлектродном пространстве к настоящему времени разработан ряд способов и устройств, позволяющих заметно снизить интенсивность потоков МЧ в эрозионной плазме дугового разряда низкого давления в технологических бесфильтровых системах осаждения покрытий. Ряд таких способов и устройств рассмотрен в следующих разделах. Причём в качестве бесфильтровых систем здесь имеются в виду такие системы, в которых объект плазменного воздействия (подложка) находится в зоне прямой видимости с рабочей поверхности катода, эмитирующей МЧ. Иначе говоря, между подложкой и катодом отсутствуют какие-либо элементы системы, которые могли бы служить механическим препятствием для МЧ, движущихся в сторону подложки.

3. ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ОСЛАБЛЕНИЕ ЭМИССИИ МЧ

3.1. СНИЖЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ КАТОДА

Количество расплава в катодном пятне и, следовательно, интенсивность каплеобразования определяются теплоотводом из активной зоны пятна в окружающий массив катодного материала и температурой этого массива. Экспериментально установлено [4, 8], что унос массы катодного материала в капельной фазе увеличивается в несколько раз при повышении температуры от ~ 370 К примерно до 770...920 К. В этой связи при необходимости иметь потоки эрозионной плазмы с пониженным содержанием МЧ в конструкции плазменного источника должно быть предусмотрено эффективное принудительное охлаждение катода (как правило, проточной водой). Прежде всего, это касается источников, работающих в режиме дуги постоянного тока. Оптимальные условия охлаждения катода достигаются при прямом контакте хладагента (воды) с телом катода. Любые прокладки между охлаждающей водой и катодом ведут к заметному ухудшению теплоотвода, повышению интегральной температуры и, следовательно, к повышению интенсивности эмиссии МЧ [4].

3.2. СНИЖЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТОКА

Током дуги определяется мощность, рассеиваемая в зоне, примыкающей к КП, и, следовательно, температура в этой зоне и интенсивность эмиссии МЧ. Снижая ток, можно таким образом уменьшить поступление МЧ в плазменный поток, генерируе-

мый КП. Но, с другой стороны, от тока зависит производительность процесса осаждения покрытия. Поэтому снижать температурный эффект разрядного тока с целью ослабления процесса генерации МЧ целесообразнее не в результате его (тока) уменьшения, а путём равномерного распределения его воздействия на всю рабочую поверхность катода. При этом фактором, влияющим на эмиссию МЧ, становится не величина разрядного тока, а его плотность, распределённая по всей рабочей поверхности катода и усреднённая по времени.

3.3. ПРИСУТСТВИЕ ГАЗА В РАЗРЯДНОМ ПРОМЕЖУТКЕ

Содержание МЧ в плазме и, соответственно, в конденсате уменьшается в присутствии активного газа в системе. Это явление исследовалось авторами работ [4, 20]. В частности, установлено, что при повышении давления азота от 10^{-3} до 1 Па в системе с титановым катодом концентрация капель в конденсате снижалась от 29,6 до 14,5%. Авторы объясняют это тем, что в присутствии азота на поверхности катода образуется плёнка нитрида титана. А поскольку температура плавления этого соединения (3223 К) существенно выше температуры плавления титана (1933 К), то эрозия катода в капельной фазе при наличии на нём слоя нитрида существенно уменьшается. Аналогичное явление наблюдается и при напуске в систему ацетилена, а также смесей аргона с азотом или углеродосодержащим газом.

3.4. УПРАВЛЯЕМОЕ ДВИЖЕНИЕ КП

При достаточно быстром перемещении КП лишь кратковременно находится в данной точке своей траектории на поверхности катода. В результате локальная температура в пятне не успевает достичь уровня, характерного для стационарного режима. Поэтому количество расплава в активной зоне КП при его движении уменьшается и, следовательно, снижается количество материала, выбрасываемого пятном в виде капель (МЧ).

В отсутствие магнитного поля КП совершает хаотические перемещения, которые являются результатом чередующихся спонтанных погасаний и зажигания по соседству с зоной предшествующего горения. В присутствии магнитного поля, параллельного поверхности катода, КП перемещается в направлении $-[I \times B]$. Такое перемещение области существования КП (в дальнейшем – “перемещение КП” или “движение КП”) принято называть обратным или ретроградным, подчёркивая тем самым, что его направление противоположно тому, которое предписывается правилом Ампера для проводника с током в магнитном поле (см., например, обзор [22]).

Скорость ретроградного движения КП увеличивается с ростом IB и при некотором значении этого произведения достигает предельной величины, различной для разных материалов: от нескольких мм/с для графита до нескольких десятков м/с для некоторых металлов [1, 2, 8, 9].

Если магнитное поле направлено наклонно к поверхности катода, то траектория КП, совершающего ретроградное перемещение под действием тангенциальной компоненты поля, отклоняется в сторону острого угла, под которым вектор магнитного поля пересекает поверхность катода в соответствии с так называемым “правилом острого угла”.

Следует, однако, отметить, что правило это не универсально: на поведении КП сказывается также кривизна магнитного поля и геометрия разрядного промежутка, действие которых может приводить к результату, противоположному тому, который предусматривается правилом. Так, в неоднородном магнитном поле КП смещается преимущественно в сторону увеличения тангенциальной составляющей поля [23] даже в тех случаях, когда это не совпадает с направлением “острого угла”.

3.5. «БЕСКАПЕЛЬНЫЕ» РЕЖИМЫ ДУГИ

В обзоре [8] Боксман и Голдсмит ссылаются на ряд работ по исследованию возможности осуществления таких режимов дуги, при которых генерируются бескапельные атомарно-ионные потоки. Один из способов получения таких потоков основан на распылении мишени из рабочего металла высокоэнергетичными ионами того же металла, генерируемых дугой с катодным пятном. Подложка при этом размещается в потоке распыляемых частиц материала мишени и “отгораживается” от катода, эмитирующего плазму с МЧ.

Другой способ состоит в том, что один из электродов дуги термически изолируют. В этом случае температура этого электрода может достигать уровня, при котором происходит интенсивное его испарение со сравнительно большой поверхности без образования капель. Если теплоизолированным является анод, то подложку размещают на пути прямых потоков с анода, но так, чтобы она, как и в первом случае, была отгорожена от катода. Следует отметить, что как первый, так и второй способы можно отнести к бесфильтровым лишь с определённой долей условности, так как в обоих случаях подложка находится вне зоны видимости со стороны катода, хотя между источником конденсируемых потоков частиц и подложкой никаких преград нет.

Если теплоизолированным электродом является катод, то для некоторых катодных материалов (особенно сублимирующих) возможен переход дуги с катодным пятном к дуге с распределённой зоной привязки разряда к катоду без образования микропятен, эмитирующих МЧ.

Во всех трёх случаях генерируемые пароплазменные потоки отличаются низкой степенью ионизации при низкой энергии частиц. Это при формировании покрытий на подложках с низким уровнем допустимых тепловых нагрузок может рассматриваться как преимущество. Следует, однако, отметить, что ни один из рассмотренных методов пока не вышел за рамки лабораторных исследований.

4. ПОДАВЛЕНИЕ ЭМИССИИ МЧ В ИСТОЧНИКАХ ПЛАЗМЫ

4.1. ИСТОЧНИКИ ПЛАЗМЫ С ДУГОЙ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Простейший способ снижения относительного содержания МЧ в плазменном потоке на подложку заключается в выборе её оптимального положения относительно катода. Оптимальным является общепринятое размещение подложки в ограниченном телесном угле в направлении, перпендикулярном рабочей (эмитирующей плазму) поверхности катода. Это положение соответствует максимуму углового распределения плотности потока ионов и минимуму распределения МЧ (рис. 1,а). Соотношение плотностей этих частиц n_i/n_{mp} в данном направлении улучшается при фокусировке ионной компоненты (см. рис. 1,б). На практике такое “естественное” размещение подложки применяется и действует одновременно с другими факторами снижения n_{mp} , рассмотренными в предыдущем разделе.

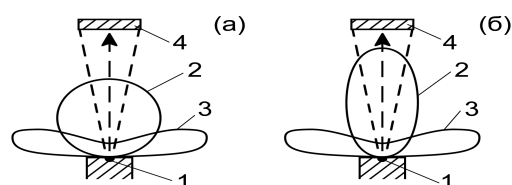


Рис. 1. Диаграммы распределения концентрации ионов и МЧ в потоках эрозионной плазмы в отсутствие магнитного поля (а) и в фокусирующем магнитном поле (б): 1 катодное пятно; 2 поток ионов; 3 поток МЧ; 4 подложка

Способ увеличения соотношения n_i/n_{mp} путём снижения диаграммы направленности полезной (ионной) компоненты плазменного потока (см. рис. 1,б) реализуется в устройстве с магнитной фокусировкой [24, 25], изображённом схематически на рис. 2.

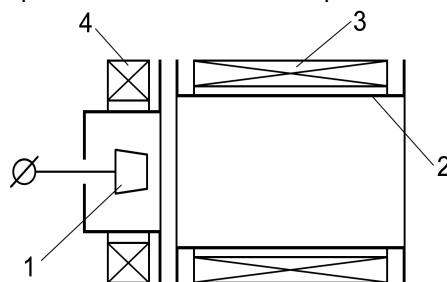


Рис. 2. Плазменный источник с магнитной фокусировкой: 1 - катод; 2 - анод; 3 - фокусирующий соленоид; 4 - стабилизирующая катушка

В качестве факторов снижения n_{mp} , помимо коллимации плазменного потока, в этом источнике осуществляются (1) повышенная скорость направленного кругового движения КП на торце катода в расходящемся магнитном поле стабилизирующей катушки и (2) интенсивное водяное охлаждение катода.

Тот же принцип снижения n_{mp} вследствие фокусировки плазменного потока заложен в основу устройства, предложенного Тамагаки [26] (рис. 3).

Питание магнитных катушек в рассматриваемых устройствах может осуществляться как от отдельного устройства, так и от источника питания дуги при последовательном включении катушки в цепь питания дуги. Последний вариант выгоден экономически, так как позволяет избавиться от отдельного источника питания фокусирующей катушки. Однако при этом ток в катушке и, следовательно, её фокусирующее действие находятся в зависимости от токового режима дуги. Применение фокусировки позволяет снизить содержание МЧ в плазме примерно на порядок.

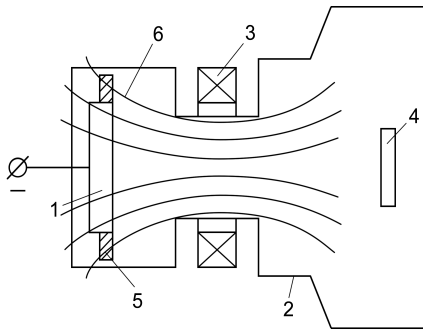


Рис. 3. Плазменный источник Тамагаки [26]: 1 - катод; 2 - камера-анод; 3 - фокусирующая катушка; 4 - подложка; 5 - ограничительное кольцо; 6 - линия магнитного поля

По данным Тамагаки [26] плотность МЧ размером 0,5 мкм и более в плёнке TiN толщиной 2,5 мкм, осаждённой в режиме фокусировки плазменного потока, не превышала 900 мм⁻², в то время как в отсутствие фокусировки она составляла 8500 мм⁻² при прочих равных условиях. Чтобы предотвратить прохождение МЧ на подложку вследствие многократного рикошетирувания от стенок анода, последнее рекомендуется выполнять **ребристыми** [7]. Степень очистки плазмы от МЧ повышается также с увеличением длины анода.

Идея снижения содержания МЧ в плазменном потоке за счёт его фокусировки используется так же Кодем и др. в источнике плазмы, описанном в работах [27-29] (рис. 4). Здесь для фокусировки плазменного потока используется сильное магнитное поле (до 150 мТл) короткой магнитной линзы, формируемой у катода в кольцевом зазоре между магнитными полюсами ферромагнитного магнитопровода, охватывающего катушку. В сильном магнитном поле устройства помимо сильной фокусировки плазменного потока наблюдается значительное изменение характеристик плазмы. В пространстве между катодом и сходящимся полем магнитной линзы энергия осевого движения сильно замагниченных электронов трансформируется в энергию радиально-колебательного движения. Температура электронов повышается на порядок (до 25 против 2,5 эВ, характерных для обычных условий). Такой энергии достаточно для ударной “доионизации” нейтральных паров металла. В присутствии азота происходит диссоциация молекул и ионизация атомов газа. В результате выходной поток газометаллической плазмы

становится полностью ионизированным. В таких условиях, по оценкам авторов, возможно полное испарение МЧ диаметром до 5 мкм. Частицы, имеющие размеры до 10 мкм, теряют до 50% своей массы. Таким образом, испарение частиц на пути к подложке в рассматриваемом устройстве является существенным фактором снижения их концентрации в общем потоке плазмы. Высокое энергосодержание плазмы обуславливает эффективное образование TiN на поверхности катода, что, в свою очередь, способствует снижению эмиссии МЧ. Авторы утверждают, что в их источнике плазмы магнитные поля повышенной напряжённости интенсифицируют и другие факторы подавления этой эмиссии. Происходит расщепление катодных пятен на ряд более мелких фрагментов, в которых процесс выхода МЧ ослабляется вследствие уменьшения давления обратных потоков ионов, приходящихся на один фрагмент КП. До предельных значений повышается скорость направленного движения КП (до ~ 25 м/с в случае Ti).

Мерой (коэффициентом) эффективности источников плазмы с магнитной фокусировкой принято считать отношение выходного ионного тока насыщения I_i к току дуги I_{arc} (коэффициент эффективности $m = I_i/I_{arc}$). Для источников с фокусирующими полями B_f порядка 5...8 мТл, достаточными для частичной замагниченности плазмы [5], максимальная величина m составляет ~ 8...10%. Для источника с повышенной напряжённостью поля (см. рис. 4) коэффициент m растёт с усилением поля, при $B_f \approx 90$ мТл достигает максимума (около 6%), с дальнейшим ростом B_f – падает и при 150 мТл составляет уже только 3,7%. Уменьшение m при сильных магнитных полях обусловлено отражением периферийной части потока от магнитного “зеркала” на входе в фокусирующую линзу.

Рис. 4. Источник плазмы с сильным фокусирующим магнитным полем

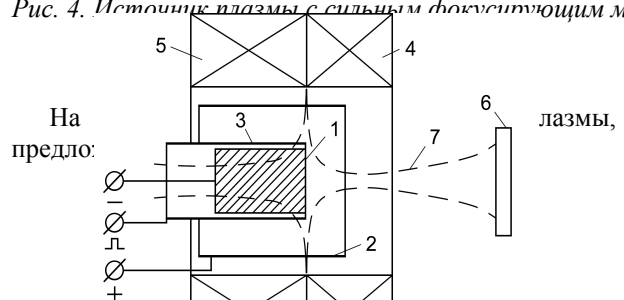


Рис. 5. Источник Семенюка-Осипова [30]: 1 катод; 2 анод; 3 экран; 4, 5 катушки; 6 подложка; 7 магнитное поле

Фокусирующая система источника состоит из двух катушек, включённых встречно друг к другу и размещённых так, что кольцевая магнитная щель между ними находится примерно в одной плоскости с рабочим торцом катода. Ослабление эмиссии МЧ здесь происходит в результате повышения скорости ретроградного движения КП под действием сильной радиальной компоненты магнитного поля у рабочего торца катода.

Ещё одним фактором, способствующим снижению относительной концентрации МЧ в генерируемом потоке плазмы, является фокусировка потока в магнитном сопле между катодом и подложкой. Аналогичный плазменный источник (рис. 6) запатентован в США Хоминичем [31].

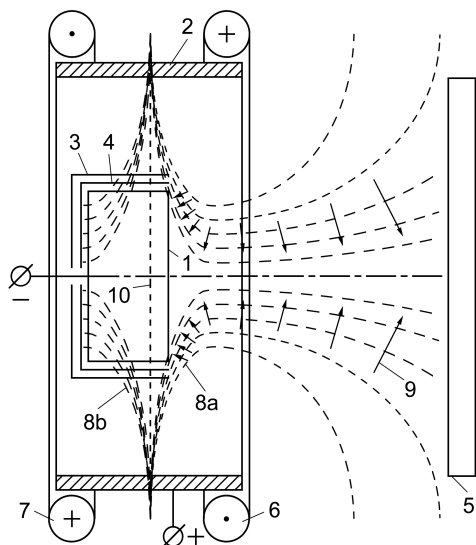


Рис. 6. Источник Хоминича [31]: 1 катод; 2 анод; 3,4 экраны; 5 подложка; 6,7 катушки; 8a,8b силовые линии магнитного поля; 9 электрическое поле

4.2. ИМПУЛЬСНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПЛАЗМЫ

Ослабление эмиссии МЧ вследствие сокращения времени нахождения КП на одном месте достигается также в импульсном режиме горения дуги. Перечень работ, посвящённых технике импульсного генерирования плазмы, можно найти в обзорах [5, 32]. Здесь отметим только три наиболее разработанные типа импульсных источников.

Схема высокопоточного импульсного источника плазмы, предложенного Симротом и др. [33], показана на рис. 7.

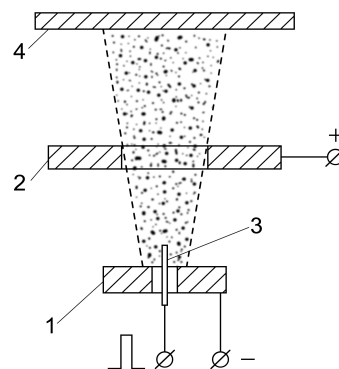


Рис. 7. Сильноточный импульсный источник [33]: 1 катод; 2 анод; 3 поджигающий электрод; 4 подложка

Поджиг дуги здесь осуществляется искровым разрядом по поверхности диэлектрического стержня, размещённого в центре катода, выполненного в виде диска. Источник предназначен для работы при токах в импульсе до 5000 А, длительности импульсов до 1000 мкс и частоте следования импульсов до 300 Гц; разработан как составная часть системы с криволинейным магнитным фильтром [34].

В практике промышленного производства нашёл применение импульсный источник углеродной плазмы Маслова [35] (рис. 8), в котором поджиг осуществляется по бесконтактной схеме, описанной в работе [36].

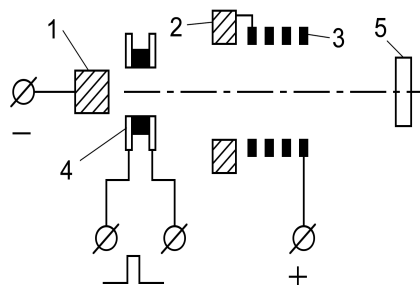


Рис. 8. Импульсный источник Маслова и др. [35]: 1 катод; 2 анод; 3 фокусирующий соленоид; 4 узел поджига; 5 подложка

Формирование покрытий с применением импульсного дугового разряда в вакууме помимо основного преимущества, которое связано с понижением содержания МЧ в генерируемой плазме, имеет ряд других достоинств. В импульсных источниках при соответствующей амплитуде импульсов разрядного тока и их скважности не требуется принудительного охлаждения электродов. Практически нет проблемы удержания КП на рабочей поверхности катода. Подбором амплитуды импульсов и скважности регулируется величина среднего тока разряда, которым, в свою очередь, определяется средний ионный ток на подложку, от которого зависят скорость осаждения конденсата и тепловая нагрузка на подложку. При этом снимается принципиальное ограничение снизу на величину этой нагрузки (в отличие от дуги постоянного тока, которая не

может существовать при токах ниже определённого уровня). Величиной тока дуги в импульсе можно в достаточно широких пределах управлять энергией ионов в генерируемых потоках плазмы; при осаждении диэлектрических покрытий (алмазоподобных) это позволяет обойтись без достаточно сложной системы подачи отрицательного смещения на подложку.

Вместе с тем, в условиях промышленного производства требование высокой производительности источника является ключевым, и поэтому основной интерес здесь представляют мощные источники плазмы. А для них проблема охлаждения остаётся настолько же актуальной, как и для источников с дугой постоянного тока. Системы питания импульсных источников плазмы гораздо дороже и сложнее выпрямителей для питания дуги постоянного тока. Особо следует отметить недостатки импульсных источников, связанные с работой поджигающих устройств, действие которых основано на формировании искровых разрядов вблизи рабочей поверхности катода. Ресурс таких поджигающих узлов сравнительно невелик. Особенно быстро выходят из строя узлы поджига в сильноточных источниках плазмы, подвергаясь интенсивной эрозии и быстрому запылению материалом эродирующего катода. В отношении гибкости управления и высокой степени воспроизводимости параметров плазмы от импульса к импульсу большой интерес представляют источники с лазерным поджигом [37] (рис. 9).

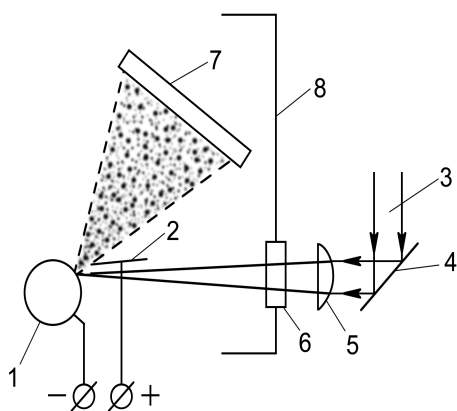


Рис. 9. Импульсный источник с лазерным поджигом Шайбе и др. [37]: 1 катод; 2 анод; 3 лазерный луч; 4 зеркало развёртки; 5 линза; 6 окно; 7 подложка; 8 камера

Излучение от импульсного лазера Nd-YAG в них фокусируется на поверхности катода в пятно размером 150 мкм у края плоского анода, размещённого в 3...5 мм от катода. При этом на катоде возникает униполярная дуга, которая потом переходит в основной разряд между катодом и анодом. Область эрозии катода расположена симметрично относительно места поджига. Для равномерной эрозии ("выгорания") катода предусматривается сканирование его поверхности лазерным лучом. В устройстве, изображённом на рис. 9, с этой целью катод выполнен в виде цилиндра с возможностью вращения во-

круг оси и одновременного сканирования его лазерным лучом вдоль образующей. Выбор авторами высокой частоты следования импульсов разряда (до 500 Гц) при малой их длительности позволил существенно уменьшить содержание МЧ в плазме и их размеры, которые не превышали 1 мкм.

Серьёзным недостатком метода лазерного поджига является запыление окна ввода луча в камеру. Примерно через 2 с работы источника с графитовым катодом из-за осаждения углеродной плёнки прозрачность окна уменьшается на 60%. Для защиты окна от запыления перед ним устанавливается лента из прозрачного полимерного материала. Во время работы источника лента движется перед окном, непрерывно обновляя его прозрачность. Лазерный поджиг представляется весьма перспективным, хотя к настоящему времени из-за сложности и высокой стоимости лазерной системы этот метод пока что и не вышел за рамки лабораторных применений.

Авторами работы [38] предложен, исследован и описан вакуумно-дуговой источник, схема которого приведена на рис. 10.

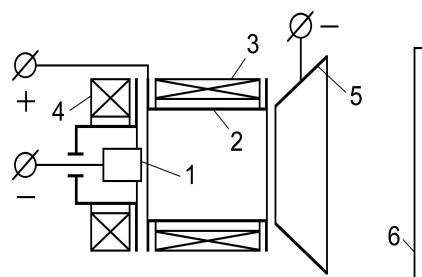


Рис. 10. Вакуумно-дуговой источник плазмы с распыляемой мишенью [38]: 1 катод; 2 анод; 3 фокусирующий соленоид; 4 стабилизирующая катушка; 5 мишень; 6 подложка

Действие источника основано на смешении потоков частиц. Один из них генерируется катодным пятном вакуумной дуги источника с магнитной стабилизацией и фокусировкой. Другой поток состоит из атомов мишени, распыляемой ионами первого потока. Таким образом, эффект снижения концентрации МЧ, достигаемый фокусировкой первичного потока, усиливается смешением последнего с дополнительным бескапельным потоком атомов распыляемой мишени. Интенсивность дополнительного потока повышается в присутствии аргона. Концентрация распылённых атомов достигает 100% при давлении аргона ~ 2 Па. Если катод и мишень изготовлены из разных материалов, то, изменяя давление аргона, можно управлять соотношением этих металлов в общем потоке на подложку, осажая таким образом двухкомпонентное покрытие нужного состава. При прочих равных условиях источник позволяет осажать покрытие равной толщины на площади на порядок, превышающей площадь равнотолщинного покрытия, осаждаемого источником без распыляемой мишени. При этом температура конденсации не превышает 473 К.

В последние годы опубликовано несколько работ Бейлиса и др. [39-41], посвящённых исследованию с горячим тугоплавким анодом (HRAVA – hot refractory anode vacuum arc). Схема источника плазмы на базе HRAVA приведена на рис. 11.

Дуга в источнике поддерживается между торцами цилиндрических катода и анода из графита или молибдена. Анод теплоизолирован и при токах 150...200 А разогревается до температуры, при которой происходит реиспарение осевшего на нём катодного металла (например, меди). Покидающие анод пары уже не содержат МЧ. Поступая в разрядный промежуток, пары ионизируются и растекаются в радиальном направлении. Экран, окружающий катод, не позволяет анодному и катодному потокам смешиваться на подложке. В зоне конденсации потока, поступающего на подложку с анода (см. зона 4а, рис. 11), формируется покрытие, в котором содержание МЧ на три порядка ниже, чем в конденсатах, получаемых с применением традиционных источников плазмы.

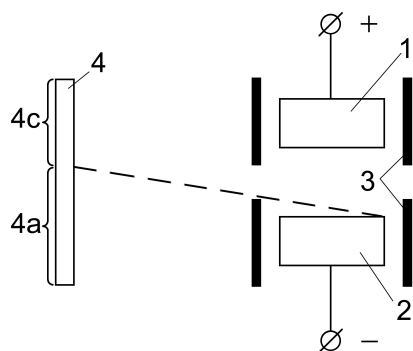


Рис. 11. Источник плазмы на базе вакуумной дуги с горячим тугоплавким анодом: 1 анод; 2 катод; 3 экраны; 4а, 4с области осаждения анодного и катодного потоков

Так называемая шунтирующая дуга в вакууме может рассматриваться как один из альтернативных видов импульсного разряда, который можно использовать для осаждения бескапельных покрытий [42, 43]. Схема цепи с шунтирующим вакуумно-дуговым разрядом показана на рис. 12.

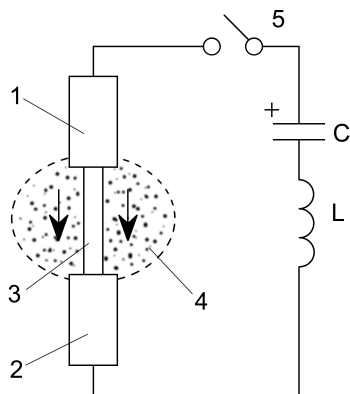


Рис. 12. Схема цепи с шунтирующей дугой: 1 анод; 2 катод; 3 стержень; 4 плазма шунтирующего разряда; 5 ключ; С ёмкостной накопитель; L индуктивность разрядного контура

Здесь стержень 3 из плазмообразующего металла закреплён между анодом 1 и катодом 2. В течение импульса тока разряда ёмкости С шунтирующий дуговой разряд развивается по следующему сценарию. В начальный момент при нарастании тока стержень нагревается, возникает и усиливается собственное магнитное поле вокруг стержня. По мере того как сопротивление и температура стержня растут, увеличивается падение напряжения на стержне, повышается напряженность поля вдоль стержня. Возникает и усиливается электронная эмиссия, появляется слабый ток через плазму. Стержень разогревается до предела, ток достигает максимума. Эмитируемые электроны удерживаются сильным магнитным полем стержня, происходит интенсивная ионизация газа и паров металла, из которого изготовлен стержень, развивается интенсивный тлеющий разряд в магнитном поле, переходящий в шунтирующую дугу. Начинается интенсивное распыление стержня, формируется мощный поток металлической плазмы в радиальном направлении, который может быть использован для формирования покрытий. Дальнейшее повышение тока ведёт к неустойчивости и развалу плазмы. На этом процесс либо прекращается, либо (при достаточной длительности импульса) происходит переход в режим обычной дуги с микропятном на катоде. Авторы публикаций [42, 43] считают, что шунтирующий разряд весьма перспективен для применения в качестве мощного импульсного источника плазмы, свободной от макрочастиц, а также в качестве источника ионов в технике имплантации погружением в плазму.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из приведенных данных видно, что за последние полтора-два десятилетия многое достигнуто в понимании механизмов подавления эмиссии МЧ в процессе формирования плазменных потоков с применением вакуумно-дугового разряда катодного типа. С учётом сложившихся представлений об этих механизмах разработан ряд источников эрозионной плазмы с пониженным (на несколько порядков величины) содержанием МЧ на базе нетривиальных технических решений, без применения фильтрующих систем. Разработки имеют различную степень готовности к практическому применению. Особый интерес как объекты дальнейших исследований и разработок представляют, на наш взгляд, нетрадиционные направления решения проблемы макрочастиц: вакуумные дуги с горячим тугоплавким анодом, шунтирующие дуговые разряды.

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. А.А. Андреев, Л.П. Саблев, В.М. Шулаев, С.Н. Григорьев. *Вакуумно-дуговые устройства и покрытия*. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005, 236 с.
 4. В.М. Хороших. *Стационарный дуговой разряд низкого давления в системах плазменной обработки поверхностей*: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2002, 313 с.
 5. И.И. Аксёнов. *Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы*. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2002, 212 с.
 6. B. Druz, Y. Yevtukhov, I. Zaritskiy, Diamond-like carbon overcoat for TFMH using filtered cathodic arc system with Ar-assisted arc discharge // *Diamond and Related Materials*. 2005, v. 14, p. 1508 - 1516.
 7. И.И. Аксёнов. Вакуумно-дуговые источники фильтрованной плазмы: история, теория, практика, перспективы // *Вакуумные технологии и оборудование*. Харьков: ННЦ ХФТИ, "Константа", 2003, с. 238 - 258.
 8. R.L. Voxman and S. Goldsmith. Macroparticle contamination in cathodic arc coatings: generation, transport and control // *Surf. Coat. Technol.* 1992, v. 52, p. 39 - 50.
 9. B. Jüttner, V.F. Puchkarev, E. Hantzsche, and I. Beils. Cathode Spots // *R.L. Voxman, D.M. Sanders, Ph.J. Martin (Eds.), Handbook of Vacuum Arc Science and Technology*, Noyes Publications, Park Ridge, NJ, USA, 1995, p. 73 - 281.
 10. В.И. Раховский. *Физические основы коммутации электронного тока в вакууме*. М.: «Наука», 1970, 536 с.
 11. И.И. Аксёнов, В.М. Хороших. *Потоки частиц и массоперенос в вакуумной дуге*: Обзор. М.: «ЦНИИАтоминформ», 1984, 57 с.
 12. I.I. Beils, I.D. Garibashwily, G.A. Mesyats, V.A. Skvortsov, V.E. Fortov. Electromagnetic and gasodynamic processes of the explosive electron emission from the metal spikes // *Proc. XIVth Int. Symp. On Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, SantaFe, NM, Sept.1990, p. 548 - 551.
 13. Andre Anders, Approaches to rid cathodic arc plasmas of macroparticles and nanoparticles: a review // *Surf. Coat. Technol.* (120 - 121), p. 319 - 330.
 14. Г.А. Месяц. *Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга*. М.: «Наука», 2000, 424 с.
 15. G.W. McClure. Plasma expansion as a cause of metal displacement in vacuum arc spots // *J. Appl. Phys.* 1974, v. 45, N5, p. 2078 - 2084.
 16. E.W. Gray, J.R. Pharney. Electrode erosion by particle ejection in low-current arcs // *J. Appl. Phys.* 1974, v. 45, N2, p. 667 - 671.
 17. В.И. Раховский и А.М. Ягудаев. К вопросу о механизме разрушения электродов в импульсном разряде в вакууме // *ЖТФ*. 1969, v. 39, N2, с. 317 - 320.
 18. Andre Anders. Growth and decay of macroparticles: A feasible approach to clean vacuum arc plasmas? // *J. Appl. Phys.* 1997, v. 82, N8, p. 3679 - 3688.
 19. He Junjia, Liu Chun, Zou Jiyan, Cheng Lichun, Floating Potential of an Isolated Macroparticle in Vacuum Arc Deposition Plasmas // *Proc. 19th Int. Symp. On Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, Xi'an, 2000, p. 575 - 578.
 20. И.И. Аксёнов, И.И. Коновалов, Е.Е. Кудрявцева, В.В. Кунченко, В.Г. Падалка, В.М. Хороших. Исследование капельной фазы эрозии катода стационарной вакуумной дуги // *ЖТФ*. 1984, v. 54, N8, с. 1530 - 1533.
 21. M. Keidar, I. Beilis, R.L. Voxman, S. Goldsmith, Macroparticle interaction with a substrate in cathode vacuum arc deposition // *Surf. Coat. Technol.* 1996, v. 86 - 87, p. 415 - 420.
 22. И.И. Аксёнов, В.Г. Падалка, В.М. Хороших. *Формирование потоков металлической плазмы: Обзор*. М.: «ЦНИИАтоминформ», 1984, 83 с.
 23. И.И. Аксёнов, А.А. Андреев. О движении катодного пятна вакуумной дуги в неоднородном магнитном поле // *Письма в ЖТФ*. 1977, т. 3, №23, с. 1272 - 1275.
 24. I US Patent № 4,551,221. I. Axenov, V.G. Bren, V.G. Padalka, L.P. Sablev, R.I. Stupak, V.M. Khoshikh. Nov. 5. 1985.
 25. И.И. Аксёнов, В.Г. Падалка, В.Т. Толок, В.М. Хороших. Исследование движения потоков плазмы вакуумной дуги в линейной протяжённой плазмооптической системе // *Физика плазмы*. 1980, т. 6, №4, с. 918 - 924.
 26. US Patent № 5,126,030. Hiroshi Tamagaki. June 30, 1992.
 27. P. Sathrum and B.F. Coll. Plasma and deposition enhancement by modified arc evaporation source // *Surf. Coat. Technol.* 1992, v. 50, p. 103 - 109.
 28. B.F. Coll. Plasma Deposition Interaction with an Enhanced Arc // *Thin Films Proc. of the joint 4th Int. Symp. TATF'94 and the 11th Conf. HVITF'94*, Dresden, march 7 - 11, 1994, pp.3 - 17.
 29. B.F. Coll, D.M. Sanders. Design of vacuum arc-based sources // *Surf. Coat. Technol.* 1996, v. 81, p. 42 - 51.
 30. Пат. Украины № 10775. В.Ф. Семенюк, Л.С. Осипов. 25.12.96, заявлено 19.04.96.
 31. US Patent № 6,103,074, Aug. 15, 2000, Filled: Feb. 14. 1998. V.N. Khominich.
 32. I.I. Aksenov, V.E. Strel'nitskij. Vacuum-Arc Discharge as an Instrument for PVD Process of DLC Films Deposition // *Харьковская научная ассамблея ISDF - 5*, Харьков, 2002, с. 39 - 64.
 33. P. Siemroth, Th. Schülke, B. Schultrich. High-Current Arc - a new Source for High Rate Deposition // *Thin Films Proc. of the joint 4th Int. Symp. TATF'94 and the 11th Conf. HVITF'94*, Dresden, march 7 - 11, 1994, p. 42 - 47.
 34. B. Petereit, P. Siemroth, H.-H. Schneider, H. Hilgers. High current filtered arc deposition for ultrathin carbon overcoats on magnetic hard discs and read-write heads // *Surf. Coat. Technol.* 2003, v. 174 - 175, p. 648 - 650.

35. А.И. Маслов, Г.К. Дмитриев, Ю.Д. Чистяков, Импульсный источник углеродной плазмы для технологических целей // *ПТЭ*. 1987, №2, с. 146 – 149.
36. И.И. Аксёнов, В.А. Белоус. Зажигание вакуумной дуги в стационарных источниках металлической плазмы от автономного плазменного инжектора // *ПТЭ*. 1979, №3, с. 160 – 162.
37. H.-J. Scheibe, D. Dreschner, Preparation of diamond-like films by laser-controlled arc deposition (LASER - ARC) // *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.
38. I.I. Aksenov, V.M. Khoroshikh. Coating deposition by condensing the particle flux from the target sputtered in the low pressure arc plasma // *Trends and New Application of Thin Films*, by Horst Hofmann (ed.), Switzerland, Trans Tech Publication Ltd, 1998, p. 291.
39. I.I. Beilis, R.L. Boxman, S. Goldsmith, Ion acceleration I radially expanding plasma of the hot refractory anode vacuum arc // *Appl. Phys. Letters*. 1999, v. 75, N18, p. 2734 – 2736.
40. I.I. Beilis, S. Goldsmith, R.L. Boxman. The hot refractory anode vacuum arc: a new plasma source for metallic film deposition // *Surf. Coat. Technol.* 2000, v. 133 - 134, p. 91 – 95.
41. I.I. Beilis, A. Shashurin, D. Arbilly, S. Goldsmith, R.L. Boxman. Copper-film deposition by a hot refractory anode vacuum arc // *Surf. Coat. Technol.* 2004, v. 177 - 178, p. 233 – 237.
42. Ken Yukimura, Sadao Masamune, Shunting arc plasma generation and ion extraction // *Surf. Coat. Technol.* 2002, v. 156, p. 31 – 37.
43. I. Levchenko, M. Keidar, K. Yukimura. The model and numerical simulation of shunting arc ignition // *Proc. the XXIst ISDEIV*, Yalta, Crimea, sept. 27 – oct. 1, 2004, p. 498 – 501.

ЗАГЛУШЕННЯ ЕМІСІЇ МАКРОЧАСТОК У ВАКУУМНО-ДУГОВИХ ДЖЕРЕЛАХ ПЛАЗМИ

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

Наведено короткий аналітичний огляд методів заглушення емісії мікро- та наночастинок у бесфільтровому вакуумно-дуговому розряді, які часто називають макрочастками або краплями. Розглянуто 12 варіантів стаціонарних та імпульсних плазмових джерел, включаючи класичні (з магнітними полями різних конфігурацій, з уведенням у розрядний простір реакційного газу) та нетрадиційні (з використанням дуги у режимі гарячого анода, з шунтуючим дуговим розрядом).

SUPPRESSION OF MACROPARTICLE EMISSION IN VACUUM ARC PLASMA SOURCES

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

Methods of suppression of emission of micro- and nanoparticles, also referred to as macroparticles or droplets in vacuum arc plasma sources without filtering systems, are reviewed in this paper. There are considered 12 variants of the pulsed and steady-state sources of a plasma flow with small macroparticle contamination including the classic ones, which are based on magnetic fields of different configuration and reactive gases inlet as well as nontraditional devices, based on the hot refractory anode vacuum arc and the shunting vacuum arc discharge.