

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-83-90>

УДК 29.19.16

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ИМПУЛЬСНОГО УСКОРИТЕЛЯ ДУГОВОЙ ПЛАЗМЫ В ВАКУУМЕ

А. У. Амренова, А. М. Жукешов*, У. Б. Абдыбай, Ж. М. Молдабеков

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

* E-mail для контактов: zhukeshov@physics.kz

Для получения потока металлической плазмы разработан импульсный ускоритель вакуумной дуги и исследована его работа при вариации уровня вакуума в камере. При использовании электродов с аксиальной симметрией, показано формирование сначала тлеющего, а затем дугового разряда на катоде и дальнейшее ускорение плазмы анодным потенциалом. При высоком уровне вакуума 10^{-4} мбар наблюдали сжатие плазмы к оси системы и пинчевание плазмы в собственном магнитном поле. Также работа установки сопровождается генерацией высокоскоростного потока, скорость которого, по крайней мере, на порядок выше скорости основного потока. Обсуждается механизм генерации плазмы и особенности его ускорения, а также условия получения покрытий на установке при различном уровне вакуума. Установка, разработанная в данной работе, отличается простотой конструкции и эффективностью.

Ключевые слова: плазма, ускоритель, вакуумная дуга, импульсный разряд, диагностика плазмы, покрытия.

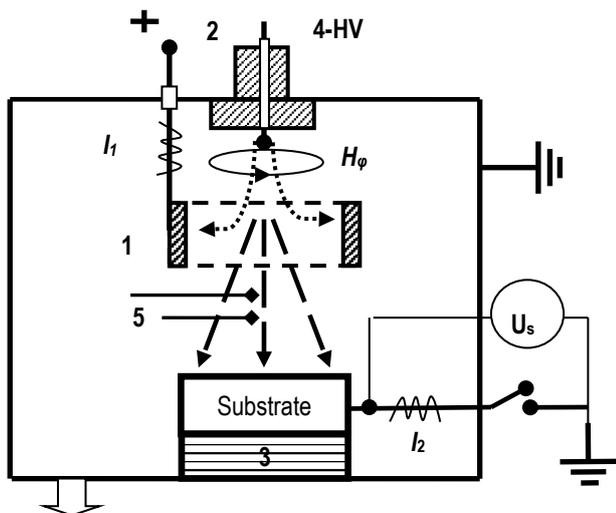
ВВЕДЕНИЕ

В последние годы уделяется большое внимание исследованиям в области плазменных технологий, как для получения наноматериалов, так и для нанесения функциональных покрытий. Одним из хорошо изученных методов является вакуумная дуга [1]. Как известно, в вакуумной дуге почти весь разрядный ток концентрируется на катоде в микроскопических (~ 10 мкм) катодных пятнах, а длительность существования отдельного пятна порядка 10^{-7} с [2]. Из опытов известно, что для поддержания дуги необходим минимальный ток 50 А (в стационарном режиме), а падение напряжения в прикатодной области должно быть 20–40 В [3]. Из теории искрового разряда также известно [4], что для пробоя вакуумного промежутка необходима напряженность поля не менее 10^6 В/см, когда речь идет об автоэмиссии с поверхности катода для формирования искры. При отсутствии нагрева катода или ионизирующего облучения, для зажигания разряда в вакууме применяют инициирующий электрод (триггер), который создает первоначальную искру на поверхности катода. Методы создания первоначальной искры хорошо известны и описаны в литературе [5]. Далее дуговой разряд горит в парах материала катодных пятен и формируется плазма в области падения потенциала. Для удержания пятен на поверхности катода обычно используется тангенциальное магнитное поле. Дальнейшие явления, связанные с формированием потока плазмы в межэлектродном пространстве, особенно процесс генерации и ускорения ионов, остаются недостаточно изученными [6–8]. В частности, до сих пор предметом обсуждения является механизм генерации кратковременных пучков ускоренных многозарядных ионов материала катода, регистрировавшихся еще в ранних экспериментах в высоковольтных искровых разрядах [9].

Как известно, в дуговых ускорителях происходит генерация микрокапель из материала катода, а также их выброс из области высоких давлений в вакуум. Во многих экспериментах исследователи пытаются избавиться от капель металла (микрочастицы размером 1–10 мкм), так как они нарушают однородность структуры осажденного ионного покрытия. Но в некоторых случаях, микрочастицы могут иметь положительное применение, например, при получении порошков. В работах [10, 11] были исследованы основные характеристики генерации микрочастиц (или капель) с катода в дуговых разрядах, но на стационарных установках с током порядка 200 А. Основную роль играет величина тока, температура катода и его материал. Проблемой является низкая эффективность генерации капельной фазы при использовании вакуумно-дугового разряда. Доля капельной составляющей в продуктах эрозии катода чрезвычайно низка для тугоплавких материалов (0,83% для Мо) и не высока для легкоплавких материалов (35,6% для Al). Мы предполагаем, что генерация микрочастиц из катода увеличивается при импульсах тока, значительно превосходящих постоянный ток. Необходимо также исследовать формирование плазмы в аксиальной геометрии электродов без внешнего магнитного поля. В работе [12] описан плазменный ускоритель вакуумной дуги, но его динамические характеристики не приводятся. Учитывая наш опыт эксплуатации импульсного плазменного ускорителя КПУ-30 [13], поставлена задача разработать устройство для распыления в высоком вакууме металлических электродов. В режиме с принудительным импульсным поджигом дуги ожидается формирование металлической плазмы высокой плотности в таком ускорителе при наличии глубокого вакуума в камере. Полученные потоки металлической плазмы предполагается использовать для создания материалов с неоднородной структурой для применения в энергетике и машиностроении.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для экспериментов разработана установка импульсной вакуумной дуги, схема работы которой показана на рисунке 1. Катод (2) изготавливался из меди, алюминия, титана и сплава железа в виде цилиндра диаметром 50 мм, анод 1 в виде отрезка трубы из нержавеющей стали, подложка (3) в виде стальных пластин 20×20 мм. Расстояние анод-катод было фиксировано $d = 60$ мм для экспериментов с разными анодами диаметром от 40 до 110 мм. Температуру катода во время работы определяли термопарой К-типа батарейным мультиметром. Подложка охлаждалась проточной водой через керамическую прокладку толщиной 8 мм. Поджигающий электрод (4) выполнен из вольфрамового прутка диаметром 3 мм. Инициирование катодного пятна осуществляется пробоем по кромке керамической трубки, куда вставлен поджигающий электрод с полированным торцом. Внешний диаметр трубки 6 мм, толщина стенки 1 мм. В свою очередь эта трубка вставляется в отверстие в катоде, а торцы трубки и электрода находятся на одной плоскости с поверхностью катода. Первичная плазма образуется на катоде в результате искры по торцевой поверхности керамики от поджигающего электрода.



1 – анод; 2 – катод; 3 – изолятор подложки; 4 – генератор поджига; I_1 , I_2 – пояса Роговского; U_s – пик-вольтметр; 5 – электрические зонды

Рисунок 1. Схема работы установки и методы диагностики импульсной дуги в вакууме

Для иницирования катодного пятна и зажигания дугового разряда используются два источника питания. Импульсный источник HV подключен к поджигающему электроду, а источник постоянного тока к аноду. Генератор высоковольтных импульсов с тиристорным ключом имеет следующие параметры: амплитуда выходного напряжения холостого хода трансформатора ~ 25 кВ, энергия импульса 5 Дж. Этой энергии достаточно для интенсивного испарения катода и формирования исходного пучка плазмы. Для

питания анода использовался сетевой выпрямитель с регулировкой выходного напряжения от 0 до +300 В с использованием автотрансформатора на 40 А. Разрядная емкость в источнике питания анода состояла из импульсных конденсаторов ИМ-100, использовалось параллельное включение от 4 до 12 конденсаторов.

Частота следования импульсов триггера задавалась цифровым генератором в пределах 5–20 Гц. Подложки располагались на изоляторе (3), или заземлялись, или на них подавалось смещение $\pm(0-100)$ В. Амплитуду тока определяли с использованием двух поясов Роговского, первый из которых был установлен на проводе, идущем к аноду, для измерения тока I_1 , а второй – на проводе от подложки к заземлению для измерения тока I_2 . Для повторяемости результатов использовали идентичные трансформаторы тока с одинаковым количеством витков (100), намотанных на ферритовом сердечнике, с обратным витком. По результатам пяти одинаковых измерений, расхождение в сигналах от этих двух приборов составило не более $\pm 5\%$. Импульсы тока измеряли цифровым осциллографом 200 МГц. Для измерения скорости ионов плазмы за анодом использовались два проволочных зонда и два миниатюрных магнитных зонда с количеством 10 витками. Зонды были ориентированы перпендикулярно к оси разряда и располагались непосредственно за анодом (позиция 5) на расстоянии 50 мм друг от друга. Заряд подложки измеряли аналоговым пик-вольтметром U_s , настроенным на частоту импульсов генератора. Для откачки вакуумной камеры использовали последовательно роторный масляный насос и диффузионный паромасляный насос. Измерения давления в камере проводили универсальными вакуумными датчиками. Все эксперименты проводили при давлении в камере соответствующему низкому $p_1 = (4-6) \cdot 10^{-2}$ мбар и высокому $p_2 = (2-4) \cdot 10^{-4}$ мбар уровню вакуума. Далее понятия низкий вакуум и высокий (глубокий) вакуум будут относиться к этим двум значениям соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работа установки при различном давлении

В экспериментах была исследована геометрия с аксиально-симметричной формой анода и катода без применения внешнего магнитного поля. Экспериментировали с алюминием, медью, титаном, железом. При использовании разных анодов было установлено, что длинные аноды с малым (55–100 мм) диаметром в форме трубки не дают плазме выйти из него, поэтому на подложках покрытия не осаждаются. В таких анодах напылению подвергается их внутренняя сторона. Более широкие (100–120 мм) аноды дают поток плазмы в сторону подложки, но это можно наблюдать только при глубоком вакууме. В целом картина выглядела следующим образом. При уровне вакуума до $\sim 10^{-2}$ мбар наблюдали разные формы аномального тлеющего разряда, в рабочей камере на-

блюдалось свечение розоватого цвета, как показано на рисунке 2, а. Очевидно, это свечение соответствует спектру из остаточных газов в камере. При уровне вакуума $\sim(10^{-2}-10^{-3})$ мбар разряд начинал заполнять пространство в промежутке между катодом и анодом. На выходе из анода наблюдали слабое свечение, интенсивность которого зависела от тока анода. При достижении предельного напряжения происходило замыкание анод-катод током постоянной дуги. Значение этого напряжения зависело от давления в камере и размеров анода, в пределах (400–500) В. На подложках, установленных напротив анода, осаждались тонкие слои пыли, либо на них ничего не наблюдали. При достижении $6 \cdot 10^{-4}$ мбар возникало яркое пятно у поверхности катода, между анодом и катодом наблюдали столб разряда цилиндрической формы (рисунок 2, в). За анодом наблюдали расходящийся конусообразный пучок от центра анода к подложке (рисунок 2, б). Цвет исходящего пучка зависит от материала катода: зеленый – на медном катоде, голубой – на титановом, белый – на алюминиевом и железном. На подложках, установленных напротив анода, осаждались сплошные покрытия из металла.

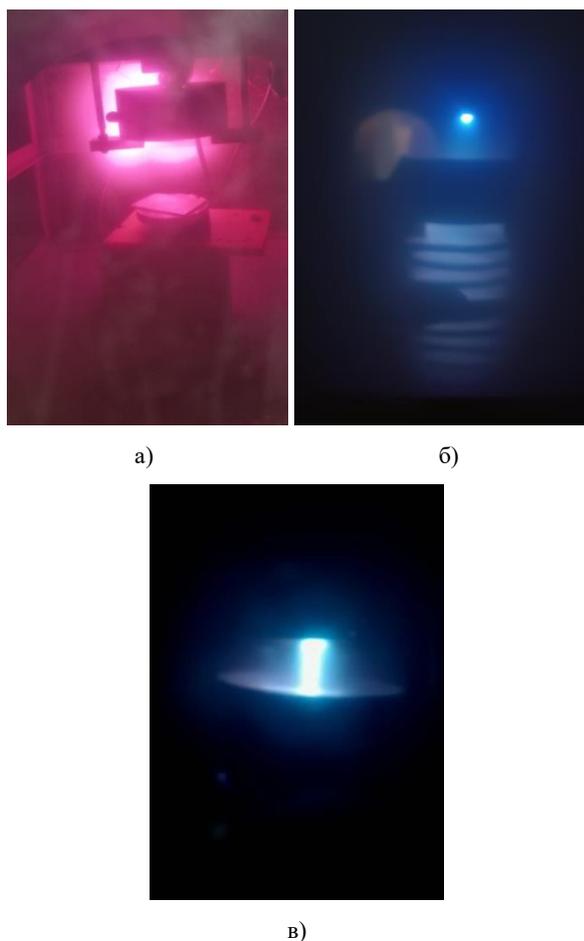


Рисунок 2. Тлеющий разряд на медном катоде (а), контрагированный разряд на титановом катоде (б), столб плазмы на медном катоде (в)

С целью выяснения особенностей существования разряда, исследована также эрозия поверхности катода из различных материалов, результаты представлены на рисунке 3. При низком вакууме наблюдали частичную эрозию как торцевой, так и боковой поверхности катодов. Рисунок на поверхности катода был характерным для эрозии первого типа [4] (узор в форме снежинок на рисунке 3, а). При глубоком вакууме наблюдали эрозию 2 типа (равномерное травление, на рисунке 3, б, в). Было использовано два способа поджига катода. При первом способе, керамическая трубка с высоковольтным электродом внутри вставлялась в сквозное отверстие в центре катода. Во втором случае электрод поджига прижимался к поверхности через керамическую трубку. По результатам опытов, при низком вакууме искровой пробой распространяется от центра поверхности к периферии. На поверхности образуется тонкий слой из осажденного материала катода. Мощность триггерного электрода такова, что при высоком вакууме искровой разряд переходит в дуговой. Это видно по кратерам на рисунке 3, а, где контрагировалась дуга. В дуговом режиме на поверхности катода наблюдается достаточно равномерная эрозия, а визуально наблюдается движение катодных пятен. При этом, из-за движения пятен по поверхности катода достигается равномерное расплавление поверхности (как видно из рисунка 3, б) на катодах из меди и алюминия. На катоде из сплава железа (рисунок 3, в) зона эрозии не превышала 30% от площади, расплавление наблюдалось в основном в центральной части. Катод из титана (рисунок 3, г) также слабо эродировал. В целом можно заметить, что центрально-осевое положение электрода дает более равномерную эрозию катодов.

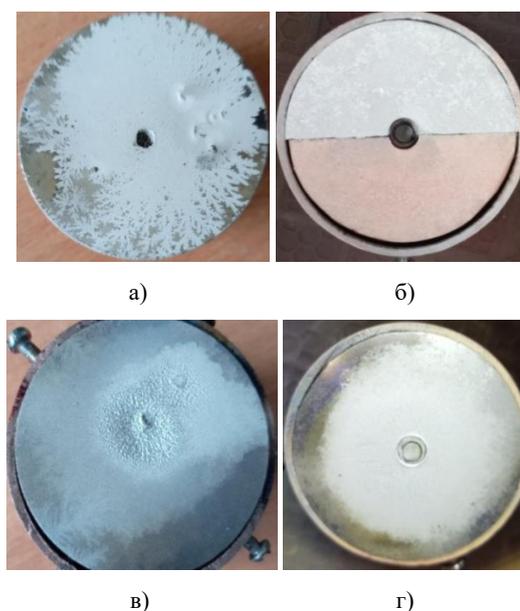


Рисунок 3. Образцы катодов диаметром 50 мм, подвергнутых эрозии в течение 20 мин работы на установке при разном давлении. а) Al – 10^{-2} мбар, б) Al и Cu при 10^{-4} мбар, в) Fe-Co-Ni-V-W при 10^{-4} мбар. г) Ti при 10^{-4} мбар

Разрядный ток ускорителя и ВАХ

При низком вакууме самостоятельный пробой промежутка катод-анод начинался при напряжении $U_a = 200 \pm 50$ В. При глубоком вакууме самостоятельный пробой не наблюдали вплоть до предела источника питания. При наличии высоковольтного триггера, напряжение зажигания разряда находилось в пределах 100 ± 50 В, независимо от уровня вакуума в камере. Характерные колебания тока анода (1), тока подложки (2), а также импульс электрода поджига (3) показаны на рисунке 4, а и 4, б. Кривая падения напряжения на участке на анод – катод (4) и ток анода (1) показаны на рисунке 4, в. На рисунке 4, г показаны ток анода (1) и импульсы напряжения на зондах 5 и 6, установленных на участке анод-подложка на расстоянии 100 мм друг от друга. Сигналы с зондов снимали с подключенного к зонду разделительного конденсатора емкостью 2400 пФ.

Амплитуда импульса токов $I_{1,2}$ определялась по напряжению на выходе пояса Роговского и количеству витков:

$$I_{1,2} = \frac{U_{1,2}}{R} \cdot 100,$$

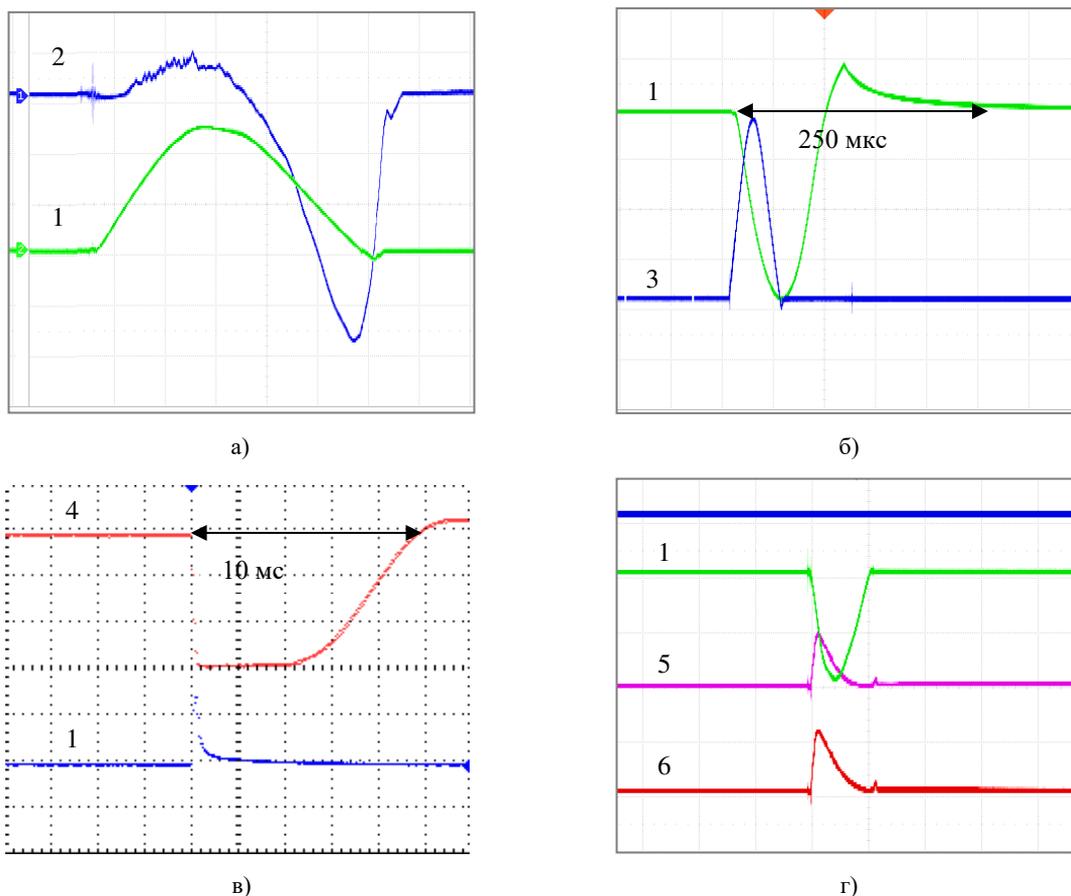


Рисунок 4. Ток анода (1) и ток подложки (2) (20 мкс/дел.) (а); ток анода (1) и импульс электрода поджига (3) (50 мкс/дел.) (б); ток анода (1) и падение напряжения на участке анод–катод (4) (300 В/дел., 2 мс/дел.) (в); ток анода (1) и сигналы от электрических зондов 5 и 6, расположенных в камере (20 мкс/дел.) (г)

где R – нагрузка катушки, 3 Ом. Данные расчетов этих токов от напряжения на аноде U_a приведены на рисунке 5. Отметим, что амплитуда импульса тока гораздо выше минимального тока (50 А), необходимого для работы стационарной дуги, но его длительность мала (порядка 100 мкс). Как видно из рисунка 5, а, наблюдается слабо нелинейная зависимость максимальной амплитуды обоих токов от напряжения на аноде. При повышении напряжении на аноде от 100 до 300 В ток I_2 достигает половины I_1 . Таким образом, ток с катода не весь уходит на анод, а его значительная часть идет в сторону подложки, формируя ионный поток.

По данным падения напряжения на участке анод – катод и разрядного тока построена ВАХ этого участка, которая показана на рисунке 5, б. Как видно, ВАХ падающая, что характерно для дугового разряда. Наконец, из рисунка 4, б видно, что максимум разрядного тока достигается, когда поджигающий импульс уже закончился (кривая 3 на рисунке 4, б).

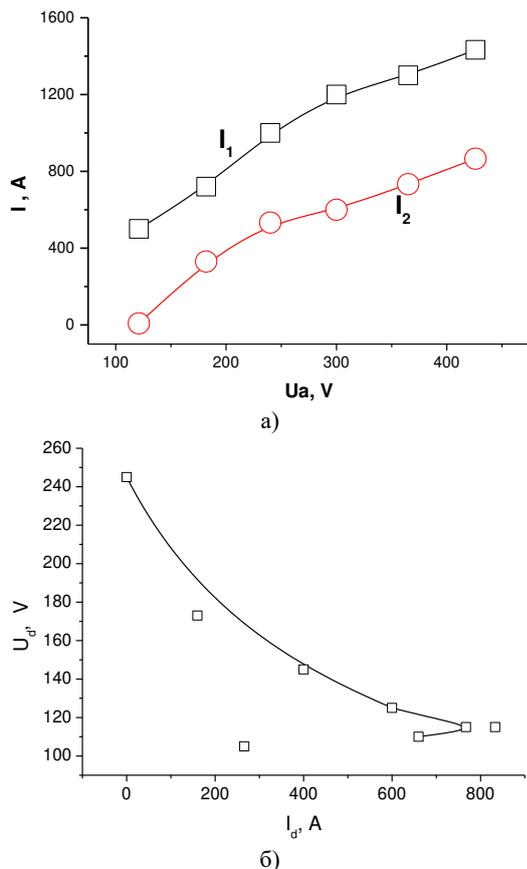


Рисунок 5. Зависимость амплитуды компонент тока в плазме от напряжения на аноде \$U_a\$ (а) и ВАХ столба плазмы в первой четверти разрядного импульса (б)

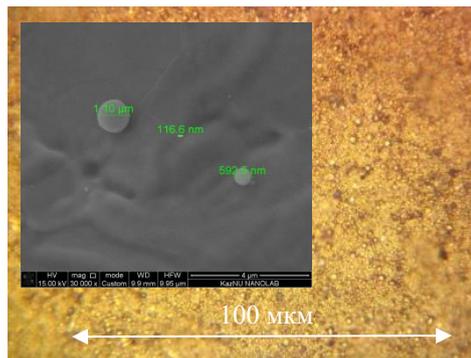
ОСАЖДЕНИЕ ПОКРЫТИЙ

На рисунке 6 приведены оптические фотографии толстых покрытий из меди на металлической подложке, осажденные при различном давлении \$10^{-2}\$ и \$10^{-4}\$ мбар. Как видно, при низком вакууме содержание микрочастиц значительное, средний размер частиц 0,1–1 мкм. При высоком вакууме \$10^{-4}\$ мбар покрытия осаждаются в виде сплошных слоев с неравномерной плотностью, размер частиц не превышает 0,4 мкм. Таким образом, морфология и структура осажденных на установке покрытий может регулироваться давлением в камере, а также осаждение капель металла. Однако детальное исследование свойств покрытий выходит за рамки данной публикации, здесь же фотографии покрытий приведены для демонстрации метода.

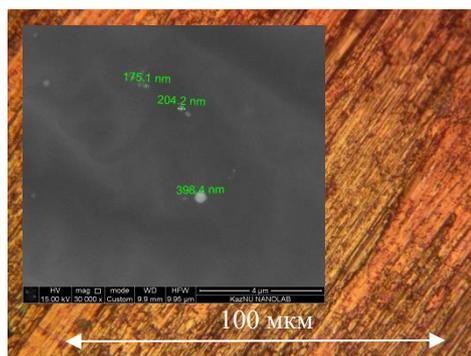
ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ УСТАНОВКИ

Максимальная амплитуда тока при высоком вакууме составила \$I_m = 1400\$ А, а его среднее значение зависит от частоты разряда. Значение \$I_{cp}\$ определяли по формуле:

$$I_{cp} = I_m \frac{\Delta t}{T}$$



а)



б)

Рисунок 6. Медное покрытие, осажденное на металлическую пластину при вакууме \$10^{-2}\$ мбар (а); то же при вакууме \$10^{-4}\$ мбар (б)

где \$I_m\$ – амплитуда тока, \$\Delta t\$ – длительность импульса разрядного тока, определяемая по осциллограмме (рисунок 4, в), \$T\$ – период следования импульсов. Очевидно, что амплитуда импульса может расти с ростом напряжения, но его длительность слабо меняется, так как параметры разрядного контура остаются постоянными. Поэтому, для расчета возьмем максимальные значения длительности. Для выбора значений длительности импульса воспользуемся данными на рисунках 4, а и 4, в. На рисунке 4, а ток анода имеет максимальную длительность 250 мкс, а на рисунке 4, в длительность импульса напряжения 10 мс. В проведенных выше экспериментах частота следования импульсов была \$f = 5\$ Гц, период \$T = 200\$ мкс, тогда значение среднего тока составит:

$$I_{cp} = 1400 \frac{250 \text{ мкс}}{200 \text{ мс}} = 1,75 \text{ А}$$

При оптимальном тепловом режиме на частоте \$f = 20\$ Гц, когда еще нет существенного нагрева трансформатора питания, \$T = 50\$ мкс, а значение \$I_{cp}\$ будет:

$$I_{cp} = 1400 \frac{250 \text{ мкс}}{50 \text{ мс}} = 7,00 \text{ А}$$

Напряжение на разряде действует в течение 10 мс (рисунок 4, в) амплитудой 300 В. Для оптимального теплового режима работы с частотой 20 Гц:

$$U_{cp} = 300 \frac{10 \text{ мс}}{50 \text{ мс}} = 60 \text{ В.}$$

При расчете средней мощности потребления $P_{cp} = I_{cp} \cdot U_{cp}$ получим значения 105 Вт и 420 Вт для 5 Гц и 20 Гц, соответственно. Таким образом, оценочные расчеты свидетельствуют о высокой энергоэффективности ускорителя, так как стационарные дуговые установки потребляют десятки и сотни киловатт энергии.

Оценим характеристики мощности установки по другому принципу, предложенному в публикации [15], посвященной исследованию аналогичной установки импульсной дуги. При работе с частотой f средний ток заряда накопителя будет равен среднему току, протекающему через электрод, который в свою очередь равен величине разряда конденсаторной батареи ΔQ в единичном акте, умноженному на f :

$$I_{cp} = \Delta Q \cdot f = (U_n - U_k) \cdot C \cdot f,$$

где U_n – начальное напряжение на конденсаторной батарее; U_k – конечное напряжение на конденсаторной батарее, примерно равное напряжению гашения дуги; C – емкость конденсаторной батареи. Средняя потребляемая мощность источника питания разряда будет равна:

$$P = (U_n^2 - U_k^2) \cdot C \cdot f / 2.$$

Согласно рисунку 4, в, $U_n = 300$ В, в то время как $U_k = 0$ В, так как в нашей установке дуга между импульсами полностью гаснет. При емкости в 400 мкФ и частоте 20 Гц по этой формуле получаем:

$$P = (300)^2 \cdot 400 \cdot 10^{-6} \cdot 20 / 2 = 360 \text{ Вт},$$

что близко к полученному выше значению 420 Вт.

Наконец, сравним данные с работой [15], где на импульсной дуговой установке с емкостью 10 мФ при напряжении 50 В получен средний ток 24 А на частоте 50 Гц, т.е. средняя мощность составит 1200 Вт. На нашей установке, при максимальной емкости конденсатора 1200 мкФ (максимальное количество конденсаторов в эксперименте было 12), при 50 Гц, для среднего тока получим значение 18 А, средняя потребляемая мощность составит 1080 Вт. Таким образом, сравнимую с установкой [15] мощность наша установка потребляет при емкости 1,2 мФ, что ниже на порядок.

ОБСУЖДЕНИЕ

Итак, в импульсном режиме возможна работа установки при разном уровне вакуума от 10^{-1} до 10^{-4} мбар, но характер разряда меняется при понижении давления от искрового к дуговому. Некоторые наблюдаемые явления в работе установки характерны для вакуумных дуговых разрядов. Во-первых, это яркие катодные пятна, которые перемещаются по поверхности катода, создавая равномерную эрозию. Как показали эксперименты с катодами, материалы с высокой атомной массой (медь и железо) также хорошо эродируют, как и материалы с легкой массой, та-

кие как алюминий и титан. Все они способны эродировать в высоком вакууме, но степень эрозии зависит также от температуры плавления катода. Оценить этот эффект на большом количестве материалов нам не удалось, но по факту, площадь эрозии титанового катода меньше, чем алюминиевого, при одинаковых условиях эксперимента. Данные по степени эрозии материалов в дуговом разряде (коэффициента выхода массы мкг/Кл) описаны в литературе достаточно подробно [4, 15]. Во-вторых, иногда наблюдались яркие искры от катода и от подложки, связанные с оторванными микрочастицами, а также распыление подложки как второго катода. В-третьих, потоком плазмы можно управлять магнитным полем, как показано на рисунке 3, с, где плазма находится внутри спирального соленоида. Но на этом визуальное сходство с дуговым разрядом заканчивается.

Детальное исследование характеристик тока анода, тока подложки и напряжения с зондов показало, что происходящие в установке процессы сложны и взаимосвязаны. Анодный ток представляет собой импульс 1400 А с узким максимумом. На токе подложки наблюдается два пика: амплитуда пологого положительного пика (сигнал 2 на рисунке 4, а) не зависит от напряжения, в максимуме 90 А, а острого отрицательного пика – пропорционально напряжению анода, в максимуме 700 А. Кроме этого, из графика 5, а видно, что ток с катода не весь уходит на анод, а его значительная часть идет в сторону подложки. Таким образом, второй пик на кривой 2 на рисунке 4, а мы связываем с ионным током на подложку. По полученным данным отметим, что работа установки имеет особенности, характерные как для дуговых, так и для импульсных плазменных ускорителей. Прежде всего – это осциллограмма тока анода, на которой нет характерной для дуги плато. Однако, из-за относительно большой длительности импульса 110 мкс, катодные пятна на ее поверхности успевают формироваться, что приводит к генерации металлической плазмы. Дальнейшее ускорение плазмы обеспечивается собственным магнитным полем тока, как и в плазменных ускорителях. На рисунке 4, а видно, что пик тока с подложки идет через 50 мкс после максимума разрядного тока на аноде. По этим данным можем оценить скорость потока ионов на подложку $v = L / t$, где L – расстояние анод – подложка, равное 150 мм. Для времени распространения сигнала в 50 мкс и скорости потока получим 0,3 см/мкс ($3 \cdot 10^3$ м/с).

Из рисунка 4, г видно, что установка генерирует высокоскоростной поток, который появляется на зондах 5 (рисунок 1) одновременно с началом разрядного тока (кривые 5 и 6 на рисунке 4, г, полученные для титанового катода). При расстоянии между зондами 10 см, если принять время прохождения за 2 мкс (цена малого деления на экране осциллографа), скорость этого потока явно выше 5 см/мкс ($5 \cdot 10^4$ м/с). Появление пучков ускоренных ионов материала катода наблюдали ранее авторы [14] и др.,

где были получены значения скорости ($2,22 \cdot 10^4$ м/с и $2,76 \cdot 10^4$ м/с) для ионов титана и алюминия соответственно. Как видно, оцененная нами скорость, по крайней мере, в несколько раз выше. По-видимому, их появление связано с начальным искровым разрядом, но при выключенном напряжении анода они не фиксируются. Авторы склоняются к мнению, что происходит выброс этих частиц в сторону подложки при их ускорении в электрическом импульсе поджигающего электрода (кривая 3 на рисунке 4, б). Изменение параметров разряда в экспериментах, таких как напряжение на аноде, емкость конденсаторов анода, не приводило к изменениям формы импульсов 5 и 6 на рисунке 4, г, а также их временной разницы. Однако при низком вакууме их также не наблюдали. Данный феномен требует дальнейших исследований с применением специальных методов наносекундной синхронизации.

После сжатия в собственном магнитном поле, столб плазмы распространяется вниз к аноду, и, по нашему предположению, потоки электронов и ионов начинают разделяться на два направления. На схеме на рисунке 1 ток электронов показан пунктирной стрелкой, а ток ионов – штриховой стрелкой. Вначале, электронный ток устремляется к аноду. На срезе анода, под действием радиальной компоненты электрического поля, электроны дрейфуют к аноду, столб плазмы начинает расширяться. Дальнейшее движение ионов происходит действием электрического поля объемного заряда электронов, далее они проходят анод, дрейфуют к подложке, и создают там положительный потенциал. В экспериментах замечено, что изолированная от камеры подложка заряжается до +60 В, величина которого измерена пик-вольтметром (прибор U₃ на рисунке 1). При подаче отрицательного смещения на подложку, появляются микродуги на его поверхности, в результате вторичной ион-электронной эмиссии. При повышении напряжения на аноде наблюдается сильная эрозия подложки, так как ионы ускоряются быстрее.

Выводы

В целом разработанная установка является неким гибридом между импульсным плазменным ускорителем, в частности импульсным ускорителем газовой плазмы, и дуговым ионным источником. При низком уровне вакуума дуга на катоде не формируется, газовая плазма носит форму аномального тлеющего разряда, а тока недостаточно для выброса плазмы за пределы анода. С повышением уровня вакуума усиленная эрозия катода способствует появлению дуговой плазмы. Сильный ток дуги сжимает плазму к оси, и за счет собственного магнитного поля плазма вытесняется из анода. Несмотря на большой импульс тока до (1400 А), его длительность (100 мкс) достаточно коротка для формирования устойчивой дуги на катоде и появления плато на кривой тока. Тем не менее, этого времени достаточно для генерации металлической плазмы в импульсе. Таким образом, задача по

разработке источника металлической плазмы решена.

В этом исследовании мы также обнаружили поток высокоскоростных частиц из плазмы дуги, который наблюдался рядом авторов ранее. Скорость этих частиц более $5 \cdot 10^4$ м/с, что гораздо выше скорости основного потока плазмы $3 \cdot 10^3$ м/с, и никак не зависит параметров разряда. Для выяснения механизма их образования пока недостаточно данных. По нашим наблюдениям, они формируются в результате действия импульса поджигающего электрода. Как отмечалось во введении, выяснению природы этих частиц посвящено довольно много работ и обсуждение идет до сих пор.

Установка, разработанная в данной работе, отличается простотой конструкции и эффективностью. Технологическая особенность применения установки в том, что при низкой потребляемой мощности не более 1 кВт, она способна генерировать поток чистой металлической плазмы. При давлении менее чем 10^{-4} мбар и при импульсных токах разряда порядка 1400 А, ионный ток на подложку составляет 600 А. Это очень много для обычной дуговой установки, и необходимы дополнительные измерения, например, цилиндрами Фарадея. При расширении в пространстве анода металлическая плазма подвергается ряду термодинамических и электрических процессов, в результате которых в плазме могут сформироваться наночастицы металла, как показано в [10–12]. Режим с расширением плазмы в вакуум интересен тем, что осаждаемые из плазмы слои из наночастиц могут быть использованы для создания новых приборов энергетики, таких как пористые электроды, поглотители газа и др. Несомненно, это довольно обширная тема для дальнейших исследований.

Данные исследования проводятся в рамках проекта МОН РК №AP19676182.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Pelletier J., Anders A. Plasma-based ion implantation and deposition: A review of Physics, Technology, and Application. //IEEE Transactions on Plasma Science. – 2005. – Vol. 33. – No. 6. – P. 1944–1959.
2. Jüttner B. Cathode spots of electric arcs // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2001. – Vol. 34. – P. 103.
3. Aksenov I.I., Aksyonov D.S. Physical aspects of vacuum-arc coating deposition // East Eur. J. Phys. – 2014. – Vol. 1. – No. 3. – P. 22–39.
4. Anders A. Cathodic arc. From Fractal Spots to Energetic Condensation. Springer Science /Business Media LLC. – 2008. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-79108-1>
5. Rysanek F, Burton R. L., Keidar M. Macroparticle Charging in a Pulsed Vacuum Arc Thruster Discharge. //42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 9-12 July 2006, Sacramento, California. Published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., AIAA 2006-4499.
6. I. Beilis. Cathode Spot Jets. Velocity and Ion Current // Plasma and Spot Phenomena in Electrical Arcs. Springer

- Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics (SSAOPP) – 2020. – Vol. 113. – P. 347-420.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-44747-2>
7. M. Song, Q. Zhou, W. Yang, Q. Sun, Y. Dong, H. Zhang, Z. Wang, Particle simulation on the ion acceleration in vacuum arc discharge // Plasma Sources Science and Technology. – 2023. – Vol. 32. – No. 9, (095002).
<https://doi.org/10.1088/1361-6595/acceaf>
 8. A.V. Kozyrev, V. Yu. Kozhevnikov, N. S. Semeniuk, A.O. Kokovin, Initial kinetics of electrons, ions and electric field in planar vacuum diode with plasma cathode // Plasma Sources Science and Technology. – 2023. – 32, 10, (105010). <https://doi.org/10.1088/1361-6595/acfff1>
 9. P.E. Belensov. Comments on the article “Collective acceleration of ions in systems with a virtual cathode” // Uspekhi Physics. – 2004. – Vol. 174. – No. 2.
 10. Khoroshyh V.M. Kapelnaya phasa cathodnoy erosiy v stationarnoy vacuumnoy duge. Physicheskaya engineeria poverchnosty. – 2005. – Vol. 2, No. 4. – P. 200–213 (In Russ.).
 11. Wegner K. et al., Design of metal nanoparticles synthesis by vapor flow condensation // Chem. Eng. Science. – 2002. – Vol. 57. – Issue. 10. – P. 1753–1762.
 12. Miyazawa, K., Yoshitake, M., & Tanaka, Y. HRTEM analyses of the platinum nanoparticles prepared on graphite particles using coaxial arc plasma deposition // Journal of Nanoparticle Research. – 2017. – Vol. 19(6). doi:10.1007/s11051-017-3895-6
 13. Baimbetov F. B, Zhukeshov A. M. and Amrenova A. U.. Dynamics of Plasma Flow Formation in a Pulsed Accelerator Operating at a Constant Pressure // Technical Physics Letters. – 2007/ – Vol. 33. – No. 1. – P. 77–79.
 14. Mesyats G.A., Barenol'ts S.A. Mechanism of anomalous ion generation in vacuum arcs // Physics-Uspekhi. – 2002. – Vol. 45. – No. 10. – P. 1001–1018.
<https://doi.org/10.1070/PU2002v045n10ABEH001247>
 15. Вершок Б.А., Дормашев А.Б., Маргулев И.Я. и др. Получение нанопорошка вакуумным импульсно-дуговым методом // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. – 2006. – Вып. 2. – С. 31–40. [Vershok B.A., Dormashev A.B., Margulev I.Ya. i dr. Poluchenie nanoporoshka vakuumnym impul'sno-dugovym metodom // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Termoyadernyy sintez. – 2006. – Issue 2. – P. 31–40.] (In Russ.)

ИМПУЛЬСТІ ДОҒАЛЫҚ ПЛАЗМАЛЫҚ ҮДЕТКІШТІҢ ВАКУУМДАҒЫ ЖҰМЫС ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

Ә. У. Әміренова, Ә. М. Жүкешов*, Ү. Б. Абдыбай, Ж. М. Молдабеков

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: zhukeshov@physics.kz

Металл плазма ағынын алу үшін вакуумдық доғаның импульстік үдеткіші жасалды және оның камерадағы вакуум деңгейінің өзгеруі кезіндегі жұмысы зерттелді. Аксиалдық симметриялық электродтарды қолданған кезде алдымен катодтағы солғын разряд, содан кейін доғалық разрядтың пайда болуы және плазманың анодтық потенциалмен одан әрі үдеуі көрсетілген. Вакуумның 10^{-4} мбар жоғары деңгейінде плазманың жүйенің осіне қарай ығысуы және плазманың өзінің магнит өрісінде қысылуы байқалды. Сондай-ақ жоғары жылдамдықты ағын генерациясы қондырғының жұмысына ілесе жүреді, оның жылдамдығы негізгі ағынның жылдамдығынан біршама жоғары. Плазманы генерациялау механизмі мен оны үдету ерекшеліктері, сондай-ақ вакуумның әртүрлі деңгейінде қондырғыда жабын алу шарттары талқыланады. Осы жұмыста жасалған қондырғы конструкциясының қарапайымдылығымен және тиімділігімен ерекшеленеді.

Түйін сөздер: плазма, үдеткіш, вакуумдық доға, импульстік разряд, плазма диагностикасы, жабын.

OPERATING FEATURES OF A PULSE ARC PLASMA ACCELERATOR IN VACUUM

A. U. Amrenova, A. M. Zhukeshov*, U. B. Abdybay, Zh. M. Moldabekov

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

* E-mail for contact: zhukeshov@physics.kz

The vacuum pulse arc plasma accelerator was designed especially for obtaining metal plasma streams also its performance under vacuum level variation in chamber was accurately explored. By using axial symmetric electrodes, the formation of firstly glow discharge after arc discharge has shown at the cathode and subsequent plasma acceleration with anodic potential. With a high vacuum level rate that equaled to 10^{-4} mbars, the plasma compression to the system axis and plasma electromagnetic pinch was clearly observed. Also presented installation accompanying the high-velocity stream generation process, that goes above the observed normal speed of the main stream. This work contains the discussion of plasma generation mechanisms and its features of acceleration, and conditions for receiving coverings at the unit under various vacuum levels. Designed unit presented on this work is characterized by its structure simplicity and almost effectiveness.

Keywords: plasma, accelerator, vacuum arc, impulsive discharge, plasma diagnostics, coverings.