

## Высокоресурсный электродуговой плазматрон постоянного тока

*А. Ф. Пискунков, В. А. Рябый, В. В. Свотина*

Федеральный государственный научно-исследовательский институт прикладной  
механики и электродинамики, Москва, Россия

*Х.-Дж. Ли, В. Ю. Плаксин*

Национальный университет г. Чеджу, Республика Корея

*Представлены два варианта конструкции нового электродугового плазматрона, даны их конструктивно-сборочные чертежи и спецификации. Приведены результаты измерений удельной эрозии анода, оказавшейся на 4—5 порядков величины ниже традиционного уровня. Рассмотрены особенности рабочего процесса нового источника плазмы: вид вольт-амперной характеристики разряда, указания на диффузный характер анодной привязки дуги, проявления химической активации газов, подаваемых в технологический канал плазматрона.*

PACS: 52.50.Dg; 52.50.Nr; 52.75.Nn

*Ключевые слова:* плазматрон, электрическая дуга, эрозия, анод, канал, плазмохимический процесс.

### Введение

В работе [1] предложен новый электродуговой плазматрон постоянного тока с горячим стержне-

вым катодом (вольфрам, легированный 2 % двуокиси тория, лантана или церия) и холодным сопловым анодом (водоохлаждаемая медь). Его новизна заключается в специальной конструкции

анода, обеспечившей вихревой и распределенный характер анодной привязки дуги, что привело к резкому снижению скорости эрозии медного анода. В работе [2] изучались вольт-амперные характеристики (ВАХ) данного источника плазмы, а в работе [3] были представлены результаты проведения с его помощью плазмохимического процесса реформирования дизельного топлива в синтез-газ (смесь водорода  $H_2$  с угарным газом  $CO$ ).

Подача на вход дизельного двигателя небольшого количества этой горючей смеси привела к снижению содержания токсичных окислов азота  $NO_x$  в выхлопных газах двигателя. Помимо указанной работы, в лаборатории проф. Ли Х.-Дж. университета г. Чеджу были сделаны также успешные попытки применения данного плазматрона для проведения гетерогенных плазмохимических процессов осаждения и травления тонких пленок на кремниевых пластинах [4]. Результаты этих исследований указывают на вполне определенную перспективу использования нового плазматрона для решения и таких технологических задач как гомогенная плазмохимия, например снижение токсичности выхлопа газотурбинных двигателей путем плазменной поддержки горения топлива, а также решения гетерогенных процессов типа формирования наноструктур на поверхности твердотельных подложек.

В упомянутых публикациях новый плазматрон представлен в виде принципиальных схем, недостаточно полно раскрывающих техническую суть перспективного технологического инструмента. Кроме того, разные этапы изучения поведения дугового разряда необычной формы и, в частности, его анодной привязки и удельной эрозии холодного анода и горячего катода отражены в разных публикациях. В этой связи появилась необходимость в рамках единой статьи рассмотреть оба проверенных в изготовлении и испытанных варианта конструкции данного плазматрона, а также представить все имеющиеся данные о поведении разряда и элементов конструкции в ходе продолжительных испытаний.

### Постановка задачи

Ресурс электродуговых плазматронов постоянного тока определяется эрозией их электродов — анода и катода. Остальные элементы их конструкции разрушаются незначительно и практически не ограничивают срока жизни устройства. В традиционных электродуговых плазматронах постоянного тока используют горячий (термоэмиссионный) стержневой катод и холодный (водоохлаждаемый) сопловой анод [5].

Обычно стержневой катод выполняют из вольфрама, легированного 1,5—2 % двуокиси тория или лантана для снижения работы выхода эмиттирующей поверхности. В силу высокой химической активности горячего вольфрама такие катоды должны работать в нейтральной газовой среде, например в аргоне или азоте. Ранее выполненные исследования уноса массы горячих вольфрамовых катодов показали, что их удельная эрозия составляет  $m_w \sim 10^{-9}$  г/Кл [5]. Этот же порядок величины подтвердили также и значительно поздние проведенные эксперименты [6], давшие в результате тщательных измерений  $m_w \sim 5 \cdot 10^{-9}$  г/Кл. В работе [6] регистрация поля температур на кончике вольфрамового катода и его видеосъемка при токе дуги 200 А выявили локальный нагрев катода до температуры плавления вольфрама  $T = 3380$  °С. Тем самым было установлено, что ток дугового разряда в исследованных устройствах был обеспечен не только термоэлектронной эмиссией торированного вольфрама, но и жидкометаллическим механизмом катодной привязки дуги.

Отметим, что приведенный результат [6] был получен при работе плазматрона на токе дуги 200 А в течение 1 ч.

Таким образом на данном режиме катод терял  $10^{-6}$  г/с, т. е. за месяц ( $720$  ч  $\approx 2,5 \cdot 10^6$  с) он потерял бы  $\sim 2,5$  г, или  $\sim 129$  мм<sup>3</sup> вольфрама, которые можно представить как укорочение катода диаметром 4 мм примерно на 10 мм.

Водоохлаждаемый анод, обычно медный, разрушается значительно быстрее — его средняя удельная эрозия на 4 порядка величины выше:  $m_{Cu} \sim 10^{-5}$  г/Кл [7]. Следовательно, эрозия анода традиционного электродугового плазматрона является ограничивающим фактором для его ресурса, который едва ли превысит величину  $\sim 10$  ч. Существенным моментом является также и загрязнение плазмы парами меди, что резко ограничивает круг технологических применений обычных плазматронов.

Такое положение дел с указанными источниками плазмы существует давно, с момента их изобретения, и это прискорбно, поскольку данные устройства просты по конструкции, недороги в изготовлении и безопасны в эксплуатации, что делает их привлекательным технологическим инструментом. Поэтому задача уменьшения эрозии анода электродуговых плазматронов постоянного тока, эквивалентная задаче повышения ресурса этих источников плазмы, представляется полезной и актуальной. Ее решение упростило бы внедрение высоких плазменных технологий в производство и

исследовательскую практику. Если эрозию анода удалось бы довести, по крайней мере, до уровня уноса массы горячего вольфрамового катода, то ресурс плазматрона в целом удалось бы поднять до величин порядка  $10^3$  ч. Эта оценка особенно верна при ограничении тока дуги умеренными значениями не более 100 А.

### Т-плазматрон

В работах Ю. С. Дудникова с сотрудниками [8] из Института теоретической и прикладной механики СО АН СССР, а также О. И. Ясько и сотрудников [9] из Института тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова было установлено, что для фиксации привязки электрической дуги постоянного тока в трубчатом анодном канале необходимо в поток плазмы ввести локальное газодинамическое возмущение. Таким фиксатором может послужить либо кольцевой вихрь на ступеньке внезапного расширения трубчатого канала (применительно к реальной конструкции это решение представлено в [10]), либо радиальный вдув дополнительного потока газа. Локализация анодной привязки в такой ситуации по-видимому обусловлена снижением давления в газовом вихре и соответствующим уменьшением энергозатрат на поддержание горения дуги.

Исходная задача разработки высокоресурсного плазматрона состояла не только в создании некой вихревой зоны на рабочей поверхности анода для подобной фиксации анодного пятна дуги постоянного тока, но и в увеличении площади пятна. Это привело бы к снижению плотности тока в опорном пятне дуги и, следовательно, к уменьшению скорости эрозии материала анода. Первым успешным решением данной задачи оказался Т-плазматрон, в котором цилиндрический анодный канал традиционного плазматрона со стержневым катодом и сопловым анодом был подсоединен к широкой стенке поперечного плоского канала подачи технологического газа. Идею такого плазматрона впервые высказал сотрудник Государственного института азотной промышленности Ю. Л. Родинов, который начал лабораторные исследования подобного устройства, но в дальнейшем, к сожалению, их прервал. Схема этого плазматрона, имеющего проточный тракт в виде буквы Т (отсюда и название “Т-плазматрон”), представлена на рис. 1. На рис. 2 дан конструктивно-сборочный чертеж одного из вариантов Т-плазматрона (расшифровка позиций дана в табл. 1).

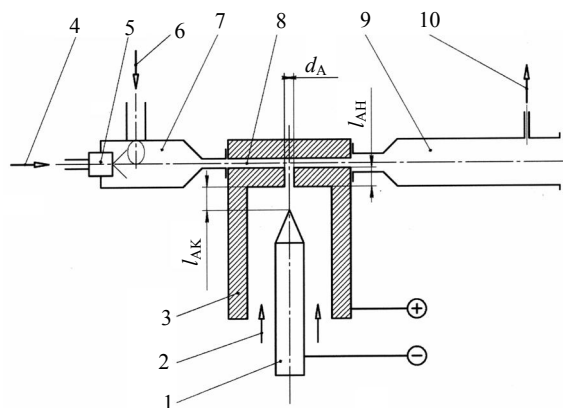


Рис. 1. Схема Т-плазматрона, подготовленного к реформированию углеводородного топлива в синтез-газ (смесь водорода с угарным газом):

1 — катод; 2 — подача аргона; 3 — анод; 4 — подача топлива; 5 — форсунка; 6 — подача воздуха; 7 — камера смешения; 8 — технологический канал; 9 — камера реформирования; 10 — к газоанализатору;  $l_{AK}$  — расстояние анод—катод;  $d_A$  и  $l_{AH}$  — диаметр и длина анодного канала, соответственно

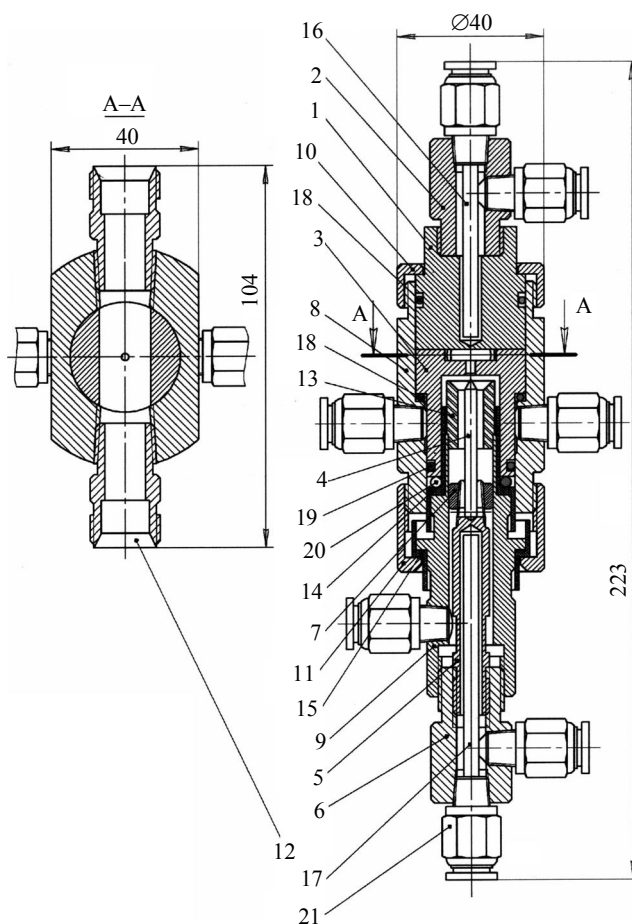


Рис. 2. Вариант конструкции Т-плазматрона. Анодный выходной канал  $\varnothing 2$  мм, технологический канал  $4 \times 3$  мм, мощность до 4 кВт (обозначения позиций — см. в табл. 1)

Таблица 1

Спецификация деталей модели Т-плазматрона

№ пози-ций к рис. 2	Наименование детали	Материал	Кол.
1	Антианод	Медь	1
2	Охладитель-АА (антианода)	Латунь	1
3	Анод	Медь	1
4	Катод	W — 2 % ThO <sub>2</sub>	1
5	Корпус катода	Медь	1
6	Охладитель-К (катода)	Латунь	1
7	Гайка	"	1
8	Корпус плазматрона	"	1
9	Аргоновая форсунка	"	1
10	Накидная гайка-1	"	1
11	Накидная гайка-2	"	1
12	Штуцер	Ст.Х18Н10(12)Г	2
13	Высокотемпер. изолятор*	Корунд	1
14	Изолятор-1	Фторопласт-4	1
15	Изолятор-2	Полиэтилен	1
16	Трубка Ø4×0,5 мм, L = 75 мм	Медь	1
17	Трубка Ø4×0,5 мм, L = 93 мм	"	1
18	Прокладка Ø <sub>in</sub> 24—Ø <sub>sec</sub> 2,6 мм	Резина	2
19	Прокладка Ø <sub>in</sub> 18,7—Ø <sub>sec</sub> 2,6 мм	"	1
20	Прокладка Ø <sub>in</sub> 14,5—Ø <sub>sec</sub> 4 мм	"	1
21	Штуцер One-touch KV2**	Узел	8

\* Машинообрабатываемая окись алюминия Alumina 998 (корунд 99,8 %) производства фирмы Vesuvius McDanel Co., USA: www.vesuviusmcdanel.com/materials.

\*\* Штуцер One-touch fitting connector Series KV2 (под нейлоновую трубку Ø8×1,25 мм; монтажная резьба 1/8" конич.) производства SMC Corp. of America, USA: www.smcetech.com.

На входе в технологический канал плазматрона установлена топливно-воздушная форсунка для реформирования смеси воздуха с парами горючего в синтез-газ. Поток данного технологического газа должен был взаимодействовать с поперечно вдуваемым потоком аргоновой плазмы, в результате чего могло возникнуть вихревое движение смешивающихся газов с соответствующим локальным понижением статического давления. Реальность такого предположения мог подтвердить только эксперимент и, в частности, оценка уровня эрозии анода.

Из схемы (см. рис. 1) видно, что при давлении аргона в газоразрядной зоне не ниже статического давления на выходе из анодного канала технологический газ не может вступить в контакт с раскаленным вольфрамовым катодом, чем обеспечивается защита катода плазматрона и работоспособность генератора плазмы в целом.

В качестве источника электропитания устройства использовался сварочный инверторный выпрямитель MICRO 350X со встроенным высоко-

вольтным ВЧ-осциллятором поджига дуги производства Кореи. Он позволял запускать плазматрон при межэлектродных расстояниях  $l_{AK} \leq 14$  мм (отсчитывались согласно схеме на рис. 1). Сглаживающий фильтр инвертора обеспечивал пульсацию тока и напряжения дуги порядка  $\pm 25\%$  в диапазоне частот  $10^3 \div 10^6$  Гц.

Особенности рабочего процесса Т-плазматрона

На рис. 3 показан Т-плазматрон, а на рис. 4 — его ВАХ для тока дуги до 140 А при межэлектродных расстояниях  $l_{AK} = 2$  и 9 мм.

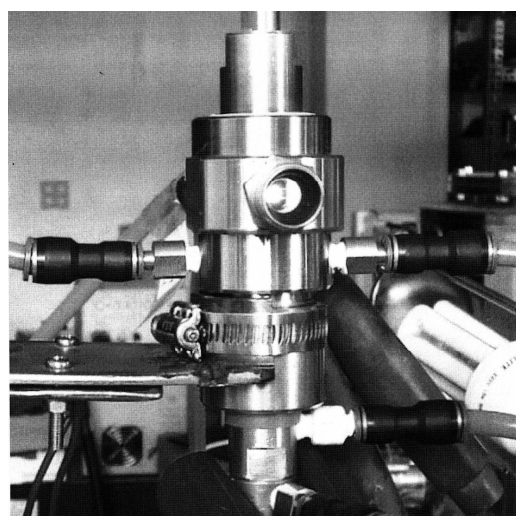


Рис. 3. Работающий Т-плазматрон

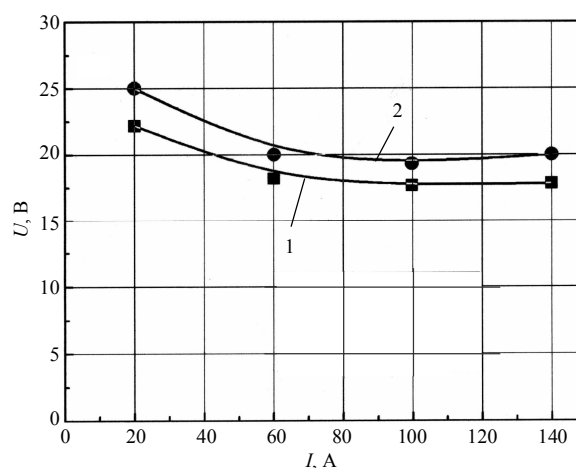


Рис. 4. ВАХ Т-плазматрона для двух различных величин межэлектродного расстояния:

1 —  $l_{AK} = 5$  мм; 2 —  $l_{AK} = 12$  мм.

Диаметр анодного канала  $d_A = 2,3$  мм, длина анодного канала  $l_A = 4$  мм; расходы аргона через катодный и технологический каналы  $Q_{AK} = Q_{AT} = 5$  л/мин;  $l_{AK} = 2$  и 9 мм; длина дуги составила  $\geq 6$  и 13 мм

Факт получения распределенной анодной привязки дуги могли бы косвенно подтвердить измерения эрозии анода плазматрона. В качестве пер-

вого шага были предприняты продолжительные запуски Т-плазматрона, когда он работал в течение полного рабочего дня несколько дней подряд с визуальным контролем состояния рабочей поверхности анода (анодного канала и прилегающих поверхностей на входе и выходе). Существенных эрозионных разрушений обнаружено не было, за исключением некоторого скругления острой кромки на входе в анодный канал.

Измерения скорости эрозии анода весовым методом были выполнены за время непрерывной работы плазматрона в течение 12 ч. Начальный вес анода 3 (см. рис. 2) определялся после его просушивания и протирки спиртом с использованием лабораторных аналитических весов, имеющих точность отсчета массы 0,1 мг:  $M_{A0} = 25,8632$  г. Через 12 ч масса анода уменьшилась на  $\Delta M_A = 1,1$  мг. Параметры плазматрона были при этом следующими: диаметр анодного канала  $d_A = 2,5$  мм, межэлектродное расстояние  $l_{AK} = 6$  мм, ток дуги  $I = 50$  А, напряжение  $U = 16$  В, расход аргона через катодный узел  $Q_{AK} = 2$  л/мин, расход воздуха в технологическом канале  $Q_{BT} = 10$  л/мин.

Таким образом, удельная эрозия материала анода составила

$$m_A = \frac{\Delta M_A}{I\tau} = \frac{1,1 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 4,32 \cdot 10^4} \approx 5 \cdot 10^{-10} \text{ г/Кл.}$$

В последующих экспериментах удельная эрозия анода измерялась еще более тщательно. Темный налет внутри анода снимался не только спиртом, но и четыреххлористым углеродом. Был принят во внимание унос материала анода стартовыми импульсами осциллятора, для чего были проведены 20 стартов дуги на токе в 100 А и получили результат  $\sim 0,14$  мг/пуск. Время непрерывной работы плазматрона при этом же токе разряда составило 18 ч — два цикла по 9 ч непрерывной работы. Параметры разряда:  $d_A = 2,5$  мм,  $l_{AK} = 2$  мм, напряжение дуги  $U = 12,5$  В,  $Q_{AK} = 2$  л/мин,  $Q_{BT} = 20$  л/мин. При  $M_{A0} = 99,5479$  г унос массы составил  $\Delta M_A = 2,6$  мг. За вычетом 0,28 мг, унесенных двумя пусковыми импульсами осциллятора, получили:

$$m_A = \frac{2,32 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 6,48 \cdot 10^4} \approx 3,6 \cdot 10^{-10} \text{ г/Кл.}$$

По сравнению с удельной эрозией анода традиционных плазматронов ( $m_{Cu} \sim 10^{-5}$  г/Кл — см. выше) имеем снижение почти на пять порядков величины, что достаточно уверенно указывает на реализацию искомой формы распределенной анодной привязки дуги.

Далее было организовано визуальное наблюдение взаимодействия течения технологического газа с поперечным потоком аргоновой плазмы из анодного канала плазматрона. Для этого было выполнено сквозное отверстие диаметром 8 мм в корпусе плазматрона напротив выхода аргоновой плазмы из анодного канала, и пропилен шириной 8 мм в боковой стенке технологического канала. Последний был закрыт со стороны аргоновой струи кварцевой пластинкой толщиной 1 мм. С помощью линзы, установленной напротив отверстия в корпусе, было получено изображение плазменного потока в технологическом канале, показанное на рис. 5.

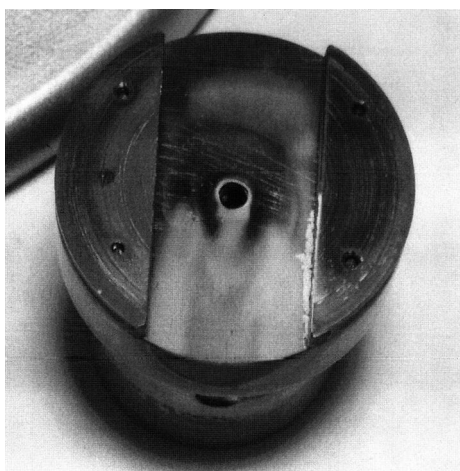


Рис. 5. Поток аргоновой плазмы, отклоняемый поперечным потоком технологического газа

Параметры плазматрона в этом эксперименте были следующими: диаметр анодного канала  $d_A = 2,5$  мм, межэлектродное расстояние  $l_{AK} = 4$  мм, ток дуги  $I = 50$  А, напряжение  $U = 14$  В, расход аргона через катодный узел  $Q_{AK} = 2$  л/мин, расход воздуха в технологическом канале  $Q_{BT} = 10$  л/мин. Предполагалось, что в дальнейшем боковое окно в тракте Т-плазматрона будет использовано для проведения спектральной диагностики плазмы.

Изображение потока аргоновой плазмы, сносимого поперечным течением технологического газа (воздуха), не давало информации о вихревом движении газов. Поэтому следующим шагом в изучении течения газовой смеси была организация длительного воздействия воздуха, нагретого и, возможно, частично активированного аргоновой плазмой, на свежую поверхность медного технологического канала. Зона взаимодействия имела следующие размеры: технологический канал  $13,5 \times 3$  мм, анодный канал  $d_A = 2,5$  мм, межэлектродное расстояние  $l_{AK} \approx 3,4$  мм; параметры разряда — ток дуги  $I = 100$  А, напряжение  $U = 14$  В, расход аргона через катодный узел  $Q_{AK} = 2$  л/мин, расход воздуха в технологическом канале  $Q_{BT} = 10$  л/мин. После работы плазматрона в течение 9 ч на стенках технологического канала остались

следы от воздействия горячих зон области взаимодействия двух струй. На рис. 6 можно видеть такой след на широкой стенке технологического канала, к которой подсоединен анодный канал.



*Рис. 6. След на “дне” технологического канала от плазменного вихря, возникающего при отклонения факела аргоновой плазмы поперечным потоком технологического газа*

На противоположной стенке образовался такой же след, который выглядел аналогично. Видно, что зона взаимодействия двух струй имеет поперечный размер, в несколько раз превосходящий диаметр анодного канала. Рассмотрение отпечатанной фигуры указывает на образование вихря, примыкающего к кромке анодного канала, к которой наклоняется сносимая воздушным потоком струя аргоновой плазмы (см. рис. 5), причем средняя часть вихря ориентирована поперек технологического канала, а его концы смещены в обе стороны от оси технологического канала и вдоль потока, образуя нечто похожее на “усы”. Температура газа в этих “усах” повышена, о чем свидетельствует “автограф” течения на стенке канала. Вполне возможно, что средняя высокотемпературная часть этого “автографа” и послужила распределенной анодной привязкой дуги, которая во много раз уменьшила эрозию материала анода. Сопоставляя рис. 5 и 6, можно сделать еще один важный вывод: судя по размеру и форме отпечатка вихревой зоны на обеих широких стенках технологического канала, вихрь имел диаметр, равный высоте технологического канала, и заполнял собой все его поперечное сечение.

Таким образом представляется логичным предположить, что в Т-плазматроне через посредство данного вихря аргоновая плазма передает тепловую энергию потоку технологического газа, прогревая его практически по всему сечению, что весьма важно для проведения плазмохимических реакций.

Приведенные рассуждения стимулировали попытку применения нового плазматрона для технологических целей. В качестве пробного процесса было избрано плазмохимическое травление плазмотстойкого фоторезиста TDMR-AR81 (производства Кореи) толщины  $\delta \approx 1$  мкм на монокристаллической кремниевой пластине с помощью струи активированного в плазме кислорода. Первую попытку провели при атмосферном давлении. Параметры плазматрона были следующими: диаметр анодного канала  $d_A = 2,5$  мм, межэлектродное расстояние  $l_{AK} = 2$  мм, ток дуги  $I = 50$  А, напряжение  $U = 14$  В,  $Q_{ArK} = 2$  л/мин, расход кислорода в технологическом канале  $Q_{KCT} = 10$  л/мин. В этом варианте травление фоторезиста отсутствовало даже при приближении кремниевой пластины вплотную к выходному отверстию технологического канала в корпусе плазматрона. Видимо, при атмосферном давлении скорость рекомбинации активированного кислорода столь велика, что на расстоянии  $\sim 30$  мм от струи аргоновой плазмы до среза выходного отверстия в корпусе плазматрона степень активации кислорода успевала снизиться до нуля. Следующую попытку повторили в вакуумной камере с откачкой механическим насосом, поддерживавшим динамический вакуум  $P \sim 3$  Торр при указанных расходах газов.

Особенностью этого опыта был поджиг дугового разряда с помощью осциллятора выпрямителя MICRO 350X. При пуске плазматрона в вакууме катодная привязка разряда уходила с кончика катода в его заделку в корпусе, плавилась керамический изолятор и гасила дугу. Причиной явился уход параметра  $Pd = 0,6$  Торр·см плазматрона на левую ветку кривой Пашена для аргона. В результате минимум этой кривой, определяющий пробой межэлектродного промежутка и поджиг дуги, стал соответствовать увеличенным межэлектродным расстояниям. Для преодоления этой трудности до начала откачки камеры или на ее начальной стадии подложка закрывалась заслонкой, и включался запуск плазматрона. Откачку камеры с работающим плазматроном продолжали до достижения давления  $P \sim 3$  Торр, затем заслонку резко отводили в сторону, что служило началом отсчета времени процесса.

В данном эксперименте кремниевая пластина с фоторезистом была установлена на расстоянии 20 мм от среза выходного отверстия в корпусе плазматрона, т. е. на расстоянии 50 мм от струи аргоновой плазмы, истекающей из анодного канала. При названных выше параметрах плазматрона фоторезист толщины 1 мкм удаляли с кремниевой пластины в течение 45 с, что соответствовало ско-

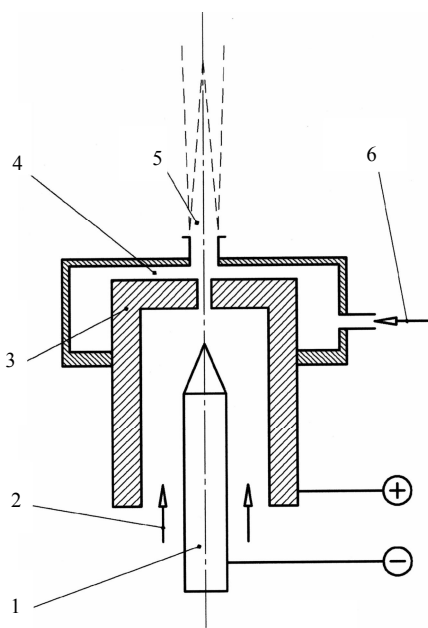
рости травления 1,3 мкм/мин. Последующий контроль поверхности пластины под микроскопом показал вполне удовлетворительное качество проведенного процесса.

В ходе экспериментального исследования Т-плазматрона выявлена оптимальная форма технологического канала, которая должна следовать форме вихря на внешней рабочей поверхности анода, а также соотношению размеров анодного и технологического каналов. Эти признаки были описаны в заявке, поданной в Корейское патентное ведомство в 2005 г., по которой Корейская экспертиза выдала патент [11].

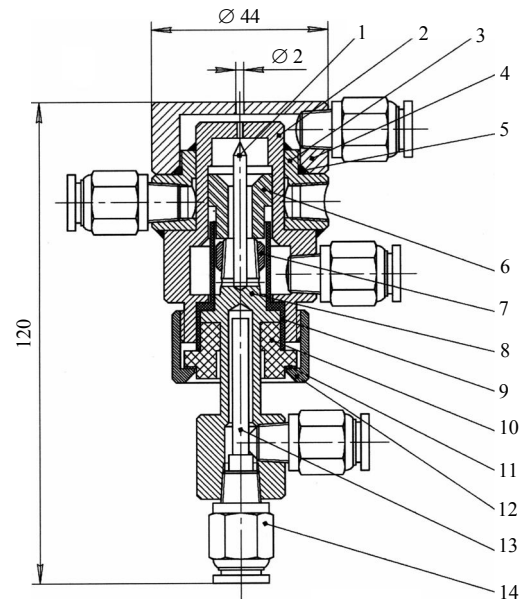
### А-плазматрон

В ходе дальнейших исследований выявилась возможность свернуть линейный технологический канал Т-плазматрона в круговую щель радиальной подачи технологического газа к выходу струи аргоновой плазмы из анодного канала. Интуитивно ощущалось, что при таком взаимодействии двух газовых течений можно было ожидать возникновения фиксирующего дугу вихря с одновременным образованием распределенной анодной привязки. Благодаря осесимметричной компоновке средств создания двух газовых потоков эту конструкцию плазматрона назвали А-плазматрон (от слова “аксиальный”).

Схема этого типа плазматрона представлена на рис. 7. Его конструкция показана на рис. 8, а спецификация деталей — дана в табл. 2.



**Рис. 7. Принципиальная схема А-плазматрона:**  
1 — катод; 2 — подача аргона; 3 — анод;  
4 — технологический канал; 5 — выходная струя;  
6 — подача технологического газа



**Рис. 8. Конструкция А-плазматрона**  
(обозначения позиций — см. в табл. 2)

Таблица 2

### Спецификация деталей А-плазматрона

№ позиций к рис. 8	Наименование	Материал	Кол.
1	Катод	W—2%ThO <sub>2</sub>	1
2	Анод	Медь	1
3	Кольцо охлаждения	"	1
4	Выходная форсунка	Латунь	1
5	О-прокладка $\varnothing_{in} 28,3, \varnothing_{sec} 1,78$	Резина	1
6	Высокотемпер. изолятор*	Корунд	1
7	Гайка цанги	Латунь	1
8	Корпус катода	"	1
9	Изолятор-1	Фторопласт-4	1
10	Изолятор-2	Полиэтилен	1
11	Нажимное кольцо	Латунь	1
12	Накидная гайка	"	1
13	Трубка $\varnothing 4 \times 0,5, L = 67$ мм	Медь, ст. нерж.	1
14	Штуцер One-touch KV2**	Узел	6

\* Машинообрабатываемая керамика Alumina 998 (corundum 99,8 %) produced by Vesuvius McDanel Co., USA: [www.vesuviusmcdanel.com/materials](http://www.vesuviusmcdanel.com/materials)

\*\* Штуцер One-touch fitting connector Series KV2 (для нейлоновой трубки  $\varnothing 8 \times 1,25$  mm; монтажная резьба 1/8" TP) Produced by SMC Corporation of America, USA: [www.smcetech.com](http://www.smcetech.com).

Видно, что с применением паяного анодного корпуса источник плазмы той же мощности, что и предыдущая модель (до 4 кВт), стал более компактным и удобным в обращении с ним. В частности, здесь осевой габарит устройства уменьшился почти вдвое, а продольно-разрезное выполнение изолятора 11 вместе с подбором размеров деталей

катодного узла обеспечивает освобождение корпуса катода от изолятора 10, кольца 11 и накидной гайки 12 для инспекции после запусков, регулировки катода и т. д. Аксиальное решение этого устройства в ряде случаев оказывается более удобным, чем Т-плазматрон, особенно при необходимости установить А-плазматрон в вакуумной камере для проведения технологических процессов.

На рис. 9 показан работающий А-плазматрон. Здесь выходная форсунка выполнена в варианте, пригодном для проведения технологических операций как в вакууме, так и в атмосфере.



Рис. 9. А-плазматрон в рабочем режиме

Конструктивные варианты и особенности относительных размеров рабочего тракта А-плазматрона описаны в опубликованной международной заявке № WO 2007/114556 [12], поданной Национальным университетом Чеджу, Республика Корея.

### Особенности рабочего процесса А-плазматрона

Контрольная регистрация ВАХ дуги А-плазматрона показала, что они в первом приближении ничем не отличаются от соответствующих характеристик предыдущей модели. Этот факт послужил добрым предзнаменованием в отношении природы анодной привязки в новой модификации плазматрона. Первое впечатление усилил визуальный осмотр анода после более или менее продолжительной работы А-плазматрона: следов эрозии обнаружить не удалось. Окончательно вопрос был решен измерением эрозии анода весовым методом.

Предварительные кратковременные пуски плазматрона показали, что для 30 стартов эрозия электродов, обусловленная пусковым осциллятором, оказалась  $\sim 0,1$  мг/пуск для анода и катода. Поскольку эта величина не выходит за пределы поля погрешности применявшихся в опытах аналитических весов, то при измерениях эрозии электродов она не учитывалась, тем более, что в данном эксперименте продолжительной  $20 \text{ ч} = 7,2 \cdot 10^4 \text{ с}$  использовались только два запуска дуги, что при-

вело к незначительной поправке. В этом эксперименте для полноты информации определялись также изменения массы вольфрамового катода и высокотемпературного керамического изолятора 6 (см. рис. 8).

Параметры А-Плазматрона и его рабочего процесса были следующие: анодный канал  $d_A = 2$  мм,  $l_{AK} = 2$  мм,  $Q_{AK} = 2$  л/мин,  $Q_{BT} = 10$  л/мин, параметры разряда – ток дуги  $I = 100$  А, напряжение  $U = 14$  В. Начальные массы контролируемых элементов плазматрона составили:  $M_{A0} = 79,5699$  г,  $M_{K0} = 5,1997$  г, масса керамического изолятора  $M_{IS0} = 4,1796$  г. После непрерывной двухсменной работы произошли следующие изменения масс этих элементов:  $\Delta M_A = -2,9$  мг,  $\Delta M_K = -45,9$  мг,  $\Delta M_{IS} = +0,4$  мг. Согласно (1) удельная эрозия анода А-плазматрона оказалась

$$M_A \sim 4 \cdot 10^{-10} \text{ г/кл.}$$

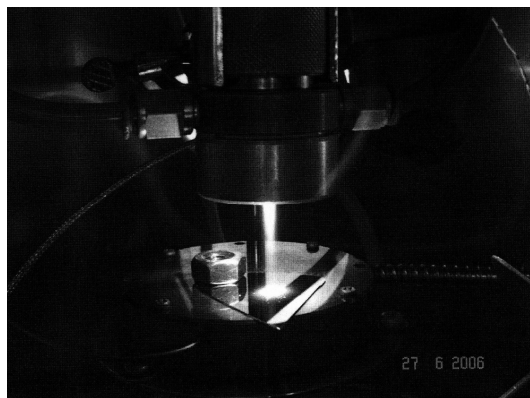
Этот результат очень важен для новой модификации высокоресурсного плазматрона, поскольку он свидетельствует, что вихревая и одновременно распределенная природа анодной привязки полностью сохранились (для сравнения напомним, что тщательные измерения в Т-плазматроне дали результат  $M_A \sim 3,6 \cdot 10^{-10}$  г/кл). Одновременно проведенные измерения уноса массы вольфрамового катода дали  $M_K \sim 6,6 \cdot 10^{-9}$  г/кл, что удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными [6]:  $M_K \sim 5 \cdot 10^{-9}$  г/кл.

Таким образом, следуя [6], логично полагать, что в обеих модификациях высокоресурсного плазматрона с горячим стержневым катодом наблюдается сочетание термоэмиссионного и жидкометаллического механизмов катодной привязки дуги. Что касается прироста массы керамического изолятора, то он вполне естествен, так как рядом с ним (см. рис. 8) находится катод — наиболее интенсивно испаряющийся элемент конструкции.

Для выявления способности А-плазматрона к активации технологического газа был проведен вакуумный процесс плазмохимического удаления плазмостойкого фоторезиста TDMR-AR81, аналогичный описанному в разделе 2.2 [6], за исключением двух параметров, затрудняющих ход процесса: расход кислорода через технологический канал был уменьшен до 4,5 л/мин, а расстояние от среза сопла до подложки увеличено до 75 мм (в опыте с Т-плазматроном эти параметры составили 10 л/мин и 50 мм, соответственно). В этих опытах удаление фоторезиста заняло 1,05 мин, что соответствовало скорости удаления фоторезиста  $\sim 0,95$  мкм/мин. Сравнение с данными подобного опыта для Т-плазматрона показывает, что активирующая способность А-плазматрона увеличилась почти в

три раза. Этот вывод подтвердили также эксперименты [3] с плазмохимическим реформированием дизельного топлива в синтез-газ: полнота реакции частичного окисления топлива в Т-плазматроне не превысила 30 %, а в А-плазматроне этот параметр достиг практически 100 %.

Представляет интерес предпринятая проф. Ли Х.-Дж. попытка интенсифицировать процесс травления того же самого фоторезиста с помощью А-плазматрона, в который в качестве технологического газа была подана смесь хладона  $CF_4$  ( $Q_{CF_4T} = 3$  л/мин) с кислородом ( $Q_{O_2T} = 1$  л/мин.) при расходе аргона через катодный узел  $Q_{ArK} = 1$  л/мин. При тех же параметрах разряда на расстоянии 70 мм от среза сопла плазматрона скорость травления фоторезиста составила около 7 мкм/мин (время удаления фоторезиста толщины  $\delta = 1$  мкм было  $\sim 8,5$  с). Внешний вид данного процесса показан на рис. 10.



**Рис. 10. Плазмохимическое травление фоторезиста TDMR-AR81 на кремниевой пластине с помощью А-плазматрона, установленного в вакуумной камере.**

Технологический газ — смесь 75 %  $CF_4$  и 25 %  $O_2$ , ток дуги  $I = 100$  А, расстояние между пластиной и плазматроном 70 мм, давление в камере  $\sim 3$  Торр

### Выводы

Новый плазматрон представляет собой недорогой, безопасный и качественный технологический инструмент, который найдет свое применение в области электроники, нанотехнологий, в лабораторной практике, в машиностроительной и химической отраслях промышленности. Это подтверждают выводы, которые можно сделать на основании представленной работы:

1. Разработаны две высокоресурсные модификации традиционного электродугового источника плазмы постоянного тока со стержневым катодом и сопловым анодом: Т- и А-плазматрон.

2. Экспериментально установлено, что обе модели имеют низкую удельную эрозию материала анода  $\sim 10^{-10}$  г/Кл, что эквивалентно повышенной чистоте генерируемой плазмы и увеличенному ресурсу источников вплоть до  $\sim 10^3 \div 10^4$  ч.

3. Приведены вольт-амперные характеристики плазматронов, рассмотрены проявления диффузного характера их анодно-дуговых привязок.

4. Показана пригодность новых плазматронов к проведению атмосферных и вакуумных технологических процессов в различных отраслях промышленности.

5. Установлено, что применительно к плазмохимическим процессам А-плазматрон в три раза более эффективен, чем его предыдущая модификация.

### Литература

1. Riaby V. A., Kim J. H., Mok Y. S., Choi C. K., Plaksin V. Yu., Lee H. J. Development of a high-durability atmospheric DC arc plasmatron. In: Proc. Intern. Symp. on dry processing (Cheju, Republ. of Korea, Nov. 2005). — Tokyo: Inst. Electr. Engineers of Japan, 2005. P. 359—360.
2. Lee H. J., Plaksin V. Yu., Riaby V. A. The volt-ampere characteristics of a DC arc plasmatron with a distributed anode spot// Thin Solid Films. 2007. V. 515. P. 5197—5201.
3. Plaksin V. Yu., Kim J. H., Mok Y. S., Lee H. J., Riaby V. A. Reduction of  $NO_x$  content in Diesel engine emission using plasmatron fuel converter. In: Proc. VI Korea-China Workshop on Clean Energy Technology (Busan, Rep. of Korea, July 2006). — Seoul: Korean Inst. Chem. Engs, 2006. P. 198—209.
4. Riaby V. A., Plaksin V. Yu., Kim J. H., Mok Y. S., Lee H. J., Choi C. K. Application of a high-durability DC arc plasmatron to plasma chemical processing of silicon substrates// Journal of the Korean Physical Society. 2006. V. 48. No. 6. P. 1696—1701.
5. Суриц А. Л. Плазмохимические процессы и аппараты. — М.: Химия, 1989.
6. Zhou X., Heberlein J. An experimental investigation of factors affecting arc-cathode erosion// J. Phys. D. 1998. V. 31. P. 2577—2590.
7. Райзер Ю. П. Физика газового разряда: Учебное руководство. — М.: Наука, 1987.
8. Дудников Ю. С. и др. Газофазный дуговой реактор: А.с. 216641 СССР, кл. В 0 1 J 19/08, 26.10.1965.
9. Ясько О. И. и др. Электродуговой плазмохимический реактор: А.с. 544329 СССР, кл. В 0 1 J 19/08, 11.11.1968.
10. Коротеев А. С., Миронов В. М., Свирчук Ю. С. Плазматроны: конструкции, характеристики, расчет. — М.: Машиностроение, 1993. С. 43.
11. Riaby V. A., Lee H. J., Savinov V. P., Kremen' A. I., Mok Y. S. DC arc plasmatron device, Korean Patent No. KR10-0721790, Int. Class<sup>6</sup> H05H 1/00, filed 01.02.2005, registered 18.05.2007.
12. Lee H. J., Mok Y. S., Riaby V. A., Plaksin V. Y. DC arc plasmatron and method of using the same, Int. Application No. WO 2007/114556 A1, Int. Class<sup>6</sup> H05H 1/30, filed 04.04.2006, published 11.10.2007.

Статья поступила в редакцию 24 июня 2009 г.

## High durability dc arc plasmatron

*A. F. Piskunkov, V. A. Riaby, V. V. Svochina*

Federal State Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics, 5 Leningrad road, 125080,  
Moscow, Russia  
E-mail: riame@sokol.ru

*H.-J. Lee, V. Yu. Plaksin*

Cheju National University, the city of Cheju, Chiju University, 66, Chijudelchakno Chiju City,  
Chiju-DO 690-154, Korea

*Two variants of a new DC arc plasmatron's design, their assembly drafts and part specifications are presented. The main feature of the new plasmatron is very low anode erosion rate that was measured to be 4 through 5 orders of magnitude lower than the one for conventional devices. Arc Volt-Ampere characteristics, manifestations of the anode spot's diffuse character and technologic gas plasma-chemical activation are considered.*

PACS: 52.50.Dg; 52.50.Nr; 52.75.Hn

*Keywords:* plasmatron, electric arc, erosion, anode, channel, plasma chemical process.

---

**Пискунков Артур Федорович**, начальник отдела  
**Рябый Валентин Анатольевич**, начальник лаборатории  
**Свотина Виктория Викторовна**, старший науч. сотр.  
125080, Москва, Ленинградское шоссе, 5, ФГНУ НИИ ПМЭ  
Тел. (499) 158-43-81; факс (499) 158-03-67; E-mail: riame@sokol.ru

**Ли Хин-Джу**, профессор

**Плаксин Вадим Юрьевич**, профессор-исследователь  
Chiju University, 66, Chijudelchakno Chiju City, Chiju-DO 690-154, Korea