

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЫ В МНОГОКАНАЛЬНОМ КАТОДЕ

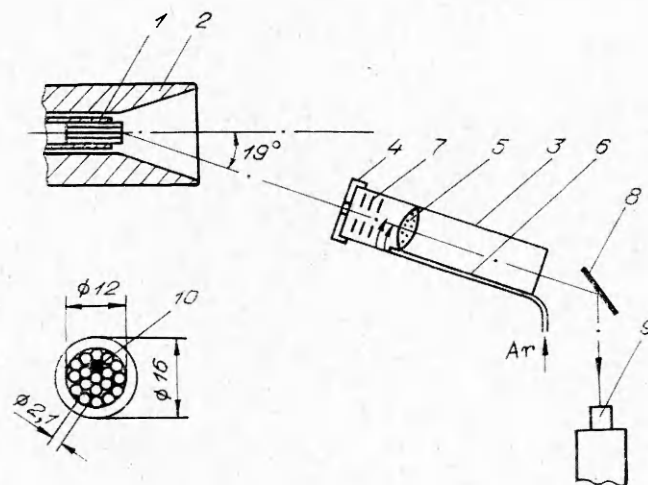
*Г. В. Бабкин, В. Г. Михалев,
Е. П. Морозов, А. В. Потапов*

(Москва)

В электроплазменных ускорителях и источниках плазмы находят применение полые катоды [1, 2]. Одним из возможных вариантов их выполнения является многоканальный катод [3, 4]. Хотя в настоящее время имеется значительное число работ по одноканальному полному катоду [3—6], физические условия в многоканальном катоде остаются неизученными, что связано с трудностями определения параметров плазмы в каналах малого поперечного сечения, высокой температурой рабочей поверхности и большой плотностью плазмы. Не выяснен вопрос о величинах давления, концентраций и температур, степени ионизации плазмы, о зависимости этих параметров от разрядного тока. В то время как имеющиеся экспериментальные материалы по одноканальному катоду относятся преимущественно к плазме различных газов, практические интересы охватывают в качестве рабочих тел также щелочные металлы.

В данной работе изучаются параметры плазмы в полном многоканальном катоде коаксиального источника плазмы мощностью 7 кВт, работающего на литии. Экспериментальное исследование проводится на основе использования специальной оптической системы наблюдения за плазмой на выходном участке каналов.

Схема экспериментального устройства изображена на фиг. 1. Катод 1 источника плазмы представляет собой пакет из 19 вольфрамовых трубок с внутренним диаметром 12 мм и внешним 16 мм. Трубки изготовлялись из вольфрамовой фольги шириной 25 мм и толщиной 0,05 мм путем сгиба без герметизации продольных стыков и выступали из обоймы на 5 мм. Анод-сопло 2 выполнено из молибдена и имел на выходе диаметр 60 мм. Рабочее тело (литий) подавалось в источник при помощи электро-



Фиг. 1

механической системы подачи. Пройдя через испаритель, литий в виде пара поступал в катод, где происходил его дальнейший разогрев и ионизация. Расход рабочего тела в основной серии опытов 0,01 г/с.

На расстоянии 110 мм от катода под углом 19° к его оси располагалась труба 3 из нержавеющей стали, закрытая спереди блендой 4 из алюминитрида бора. В трубе находилась кварцевая линза 5 с фокусным расстоянием $f = 150$ мм, которая защищалась от перегрева и запыления щелочным металлом путем обдува аргоном (по трубке 6), а также при помощи металлических экранов 7. Оптическая система, состоящая из линзы и зеркала 8, создавала на входной щели спектрографа 9 десятикратно увеличенное изображение избранного для наблюдения канала. Вклад излучения столба межэлектродной плазмы учитывался при помощи контрольного вольфрамового стержня 10, вставленного в один из соседних каналов.

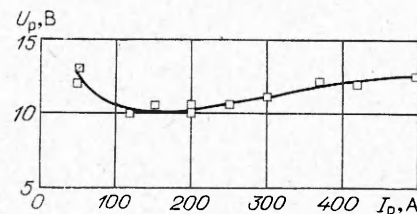
Рабочее давление в вакуумной камере при напуске аргона (с целью создания защитной завесы перед линзой) $\sim 5 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст. Ток разряда изменялся от 50 до 500 А, напряжение — от 10 до 15 В.

Для спектральных измерений применялся спектрограф ИСП-51 с камерами $f = 1300$ и 270 мм и интерферометр Фабри — Перо. Спектрограммы обрабатывались на микрофотометре МФ-4. Концентрация электронов в каналах катода измерялась по штарковскому уширению линии LiI 413,2 нм с использованием рекомендаций работы [7], концентрация нейтралов — по расстоянию между максимумами самообращения линии LiI 670,7 нм [8]. Температура электронов определялась методом Орнштейна по линиям Li I 497,2 нм и LiI 398,5 нм, температура тяжелой компоненты — по доплеровскому уширению спектральной линии LiI 497,2 нм. Ошибки измерений абсолютных величин не превышали для n_e 20%, T_a — 20%, T_e — 30%, n_a — 40%. Температура катода определялась оптическим пирометром ЭОП-66. Прикатодное падение потенциала контролировалось при помощи «плавающего» зонда, расположенного на расстоянии ~ 2 мм от торца катода.

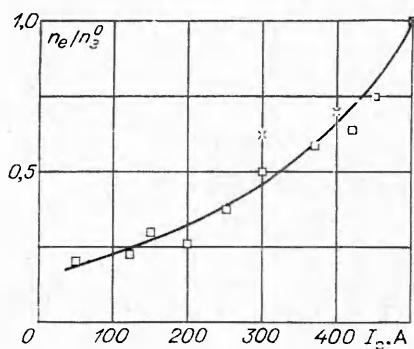
Типичная вольт-амперная характеристика разряда, возрастающая в диапазоне 150—500 А, представлена на фиг. 2. При снижении тока до 50 А разряд становится неустойчивым, его напряжение увеличивается, и при $I_p \approx 40$ А он гаснет. Величина прикатодного падения потенциала в описываемых опытах $\sim 80\%$ от общего напряжения разряда.

При наблюдении каналов катода под углом 19° к оси источника через окуляр оптического пирометра ЭОП-66 или их изображения на входной щели спектрографа по краям каналов виден ярко светящийся «серп», яркостная температура которого при $I_p = 400$ А приблизительно равна 2100 К, что для степени черноты стенок канала, соответствующей полированной поверхности вольфрама, дает «истинную» температуру ~ 2300 К. Яркостная температура более глубокой части канала ~ 1800 К. Толщина «серпа» соответствует глубине в 1—1,5 диаметра трубки, она дает возможность судить о размерах активной зоны горения разряда в канале полого многоканального катода. При токах $I_p = 300$ —500 А был произведен осмотр всех каналов катода. На этих режимах все каналы «светились», т. е. являлись активными.

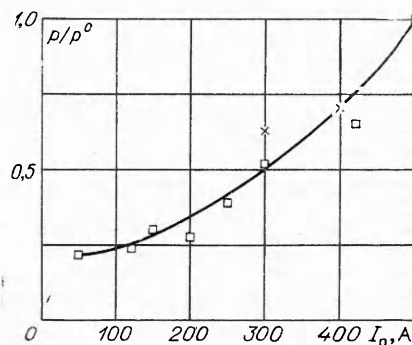
В течение часа работы исследуемые катоды не выходили из строя, однако охрупчивание фольги после эксперимента затрудняло их исполь-



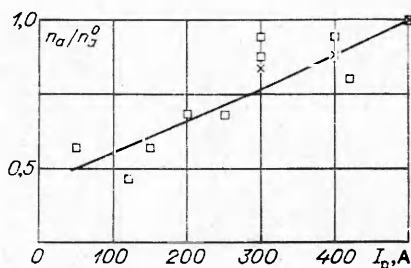
Ф и г. 2



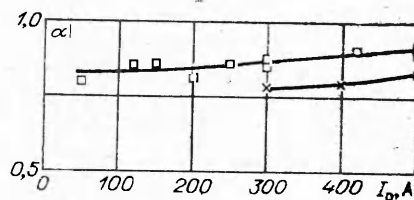
Ф и г. 3



Ф и г. 5



Ф и г. 4



Ф и г. 6

зование в дальнейшем. При разборке катодов после окончания опытов на внутренней поверхности трубок наблюдались следы горения разряда до глубины 1—1,5 диаметра трубки. Внешние поверхности трубок оставались блестящими. Плавкие индикаторы из молибденовой и стальной проволоки, помещающиеся между трубчатыми элементами катода, показали, что их температура при токе $I_p = 500$ А превышала по всей длине 1800 К, а в активной зоне достигала 2900 К (молибденовая проволочка оплавилась на глубину 5 мм).

Основные результаты спектроскопических исследований представлены на фиг. 3—6. Экспериментальные значения, обозначенные крестиками и квадратиками, относятся к разным опытам и соответственно к разным каналам катода. Как следует из графиков, концентрация электронов n_e (фиг. 3), концентрация нейтралов n_a (фиг. 4) и давление плазмы p (фиг. 5) в активной зоне, отнесенные к соответствующим значениям при токе 500 А, являются возрастающими функциями разрядного тока. (Давление плазмы рассчитывалось на основе измеренных значений концентраций и температур по соотношению $p = k[n_e T_e + n_i T_i + n_a T_a]$ в предположении квазинейтральности плазмы $n_e \approx n_i$ и равенства температур ионов T_i и атомов T_a .) Абсолютные величины этих параметров при $I_p = 500$ А составляют: $n_e^0 \approx 5 \cdot 10^{15}$ см⁻³, $n_a^0 \approx 5,7 \cdot 10^{14}$ см⁻³, $p \approx 4,5$ мм рт. ст. Несовпадение точек на фиг. 3,5 объясняется влиянием на p нейтральной компоненты. Изменение степени ионизации плазмы α с ростом I_p показано на фиг. 6. Во всем диапазоне токов разряда α превышает величину 0,75. В опытах не замечено изменение электронной температуры T_e и температуры нейтральных атомов T_a с током разряда. Средние значения температур: $T_e \approx 5500$ К, $T_a \approx 3000$ К.

Для выяснения влияния расхода рабочего тела на параметры плазмы в каналах катода проведен эксперимент при токе $I_p = 400$ А с различны-

ми расходами лития. Оказалось, что концентрация электронов в активной зоне слабо зависит от расхода рабочего тела. При уменьшении расхода лития в 12 раз (от 0,018 до 0,0015 г/с) величина n_e изменялась в 1,75 раза (от $1,75 \cdot 10^{15}$ до $1 \cdot 10^{15}$ см⁻³). При тех же условиях концентрация нейтральных атомов уменьшилась приблизительно в 2,6 раза, что соответствует увеличению α от ~ 88 до $\sim 92\%$.

На полученных спектрограммах отсутствуют спектральные линии ионов и атомов аргона. Это значит, что аргон, подаваемый в вакуумную камеру для защиты оптической системы, не вносит вклада в ионную компоненту плазмы. Подтверждением этого служит тот факт, что увеличение давления в вакуумной камере от $\sim 10^{-3}$ до $\sim 5 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст. за счет изменения расхода аргона не влияет на электрические параметры разряда. Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы при разработке теоретической модели рабочего процесса в многоканальном катоде.

Поступила 5 I 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. Fradkin D. V., Blackstock A. W. а. о. Experiments using a 25 kw hollow cathode lithium vapor MPD arcjet. — «AIAA J.», 1970, vol. 8, N 5, p. 886.
Рус. пер. — «Ракет. техн. и космонавтика», 1970, т. 8, № 5.
2. Агеев Л. И., Гришин С. Д., Михалев В. Г., Огородников С. П., Степанов В. Н. О характеристиках сильноточных источников плазмы с полым катодом. — «Радиотехника и электроника», 1975, т. 20, № 9, с. 93.
3. Delcroix J. L., Minoo P., Trindade A. R. Gas fed multichannel hollow cathode arcs. — «Rev. Scient. Instrum.», 1969, vol. 40, N 12, p. 1555—1562.
4. Trindade A. R. Étude des mecanismes de fonctionnement des cathodes creuses en regime d'arc. These d'Etat, Faculte des Sciences d'Orsay, 1970.
5. Delcroix J. L., Minoo P., Trindade A. R. Etablissement d'une regle generale pour une decharge d'arc a cathode creuse. — «J. de Physique», 1968, vol. 29, N 6, p. 605—610.
6. Lorente — Arcas A. Model of the discharge in the hollow cathode. — «Plasma Phys.», 1972, vol. 14, N 6, p. 651—659.
7. Holtmark I., Trumpp V. Über die Verbreiterung von Spektrallinien. — «Z. Phys.», 1925, Bd 31, S. 803.
8. Преображенский Н. Г. Спектроскопия оптически плотной плазмы. Новосибирск, «Наука», 1971.

УДК 621.365.2 : 621.365.95

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДУГ ПЛАЗМЕННЫХ ПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Н. И. Бортничук, В. Ю. Сандлер, А. В. Хотина

(Москва)

В плазменных плавильных печах с керамическим тиглем приходится (в отличие от обычных дуговых печей) иметь дело с длинными дугами (длина метр и более). При этом для реализации больших мощностей (десять мегаватт и выше) используются несколько дуг, горящих параллельно.