

УДК 337.521

КОНТРАКЦИЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО СТОЛБА ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В ПРОДОЛЬНОМ ЛАМИНАРНОМ ПОТОКЕ ГАЗА

Г. Г. АРУТЮНЯН, Г. А. ГАЛЕЧЯН, Л. Б. ТАВАКАЛЯН

НИИ физики конденсированных сред ЕГУ

(Поступила в редакцию 20 ноября 1982 г.)

Показано, что в разряде с продольным потоком электроположительного газа при постоянных значениях тока и давления увеличение скорости прокачки в пределах ламинарной формы течения приводит к сжатию положительного столба, уменьшению температуры электронов и продольного электрического поля.

Газовый разряд в продольном потоке электроположительного газа был исследован Джентлом, Ингардом и Бекефи [1]. Они получили, что в трубке с диаметром 0,6 см при постоянном токе 60 мА и давлении аргона 2,66 кПа увеличение скорости газа от нуля до значения $v = 40$ м/с приводит к уменьшению напряженности электрического поля от 3,6 до 2,8 В/см (при направлении потока аргона от катода к аноду). Авторы работы [1] отмечают, что им непонятен механизм, приводящий к уменьшению напряженности E при увеличении скорости газа через разряд в пределах малых скоростей прокачки, так как дальнейшее увеличение скорости аргона (более 120 м/с) приводит к резкому возрастанию E , которое связано с переходом потока в турбулентное течение.

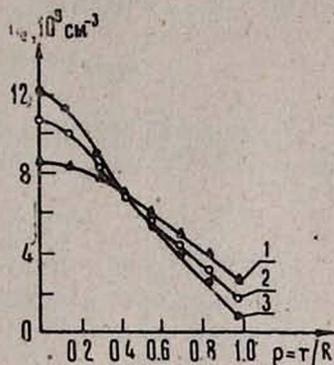
В настоящей работе экспериментально получено, что в разряде с продольным потоком электроположительного газа при постоянных значениях тока и давления увеличение скорости прокачки в пределах ламинарной формы приводит к сжатию положительного столба, сопровождаемому уменьшением продольного электрического поля, понижением температуры электронов и увеличением их концентрации на оси столба. Контракция разряда — явление, широко известное в физике плазмы, — заключается в сжатии положительного столба при увеличении тока или давления газа. Механизмы сжатия зависят от условия поддержания разряда и природы газа. Они приведены в обзоре Елецкого [2]. Здесь впервые излагаются результаты экспериментальных исследований сжатия положительного столба, вызванного продольной ламинарной прокачкой электроположительного газа (прокачка электроотрицательного газа приводит к расширению разряда [3]).

Измерения проводились в стеклянной разрядной трубке с внутренним диаметром 2,9 см, расстояние между полыми цилиндрическими электродами составляло 32 см. На расстоянии 10 см от анода был установлен ленточный зонд, который перемещался в радиальном направлении и позволял получать распределения концентрации и температуры электронов по

радиусу положительного столба при малых давлениях в разрядах гелия, аргона и азота со слабым ламинарным потоком и без потока.

На рис. 1 приведены распределения концентрации электронов по радиусу разряда в аргоне (поток направлен от катода к аноду). Из представленных графиков следует, что при постоянных значениях тока и давления газа в трубке концентрация электронов на оси разряда с продольным по-

Рис. 1. Распределение концентрации электронов по радиусу положительного столба в разряде аргона в трубке с диаметром 2,9 см при давлении 532 Па и токе 30 мА: кривая 1 — без потока газа; кривая 2 — в продольном потоке аргона при скорости 5 м/с; кривая 3 — при 10 м/с.



током выше, чем в случае без него, и распределение концентрации электронов по радиусу положительного столба круче. Увеличение скорости газа от 5 до 10 м/с приводит к еще большему повышению концентрации на оси и к дополнительному сжатию положительного столба. На рис. 2а представлены зависимости продольного электрического поля E от скорости газа, а на рис. 2б — распределение температуры электронов T_e по радиусу по-

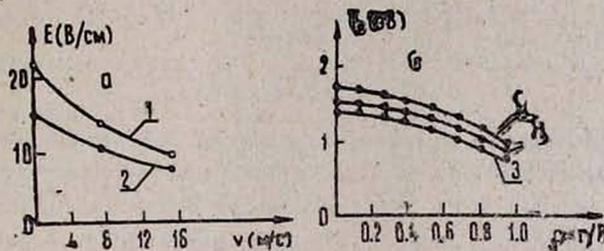


Рис. 2. а) Зависимость напряженности продольного электрического поля в разряде аргона от скорости потока газа, направленного вдоль положительного столба. Давление аргона в трубке— 532 Па при разрядном токе 30 мА. б) Распределение температуры электронов по радиусу разряда в аргоне при давлении 532 Па и токе 30 мА: кривая 1 — без потока газа; кривая 2 — в продольном потоке при скорости 5 м/с; кривая 3 — при 10 м/с.

ложительного столба при различных скоростях потока газа. Эксперименты были выполнены при давлениях от 0,133 кПа до 532 Па и было установлено, что с повышением давления при постоянных значениях тока и скорости газа относительная степень сжатия разряда возрастает. Многократные измерения концентрации электронов зондами показали, что ошибка измерения не превышает 5%. Из приведенных экспериментальных результатов следует, что, как и при контракции [2], увеличение скорости газа в пределах ламинарной формы течения вдоль разряда при постоянных значениях тока и давления вызывает сжатие положительного столба, увеличение концентрации зарядов на оси, уменьшение температуры электронов и продольного электрического поля.

Рассмотрим механизм сжатия разряда, вызванного увеличением скорости ламинарного потока. На рис. 2б видно, что при постоянном давлении $P = 532$ Па и токе 30 мА с повышением скорости аргона радиальный градиент температуры электронов возрастает. Так, при $v_1 = 0$ разность значений T_e на оси и при $r = 0,82$ составляет $\nabla T_{e_1} = 0,28$ эВ, при $v_2 = 5$ м/с — $\nabla T_{e_2} = 0,45$ эВ, а при $v_3 = 10$ м/с — $\nabla T_{e_3} = 0,54$ эВ, т. е.

$$\frac{\nabla T_{e_1}}{\nabla T_{e_2}} < 1. \quad (1)$$

Принимая во внимание, что $T_e \sim E/N$ [2] (E — продольное электрическое поле, N — концентрация нейтральных частиц), можно записать

$$T_{e_1} \sim \frac{E_1}{P} T_{g_1}, \quad T_{e_3} \sim \frac{E_3}{P} T_{g_3}. \quad (2)$$

P — давление газа в трубке, $P = NT_g$.

Далее, приведем (1) к виду

$$\frac{\nabla T_{e_1}}{\nabla T_{e_2}} \sim \frac{E_1}{E_3} \frac{T_{g_1}}{T_{g_3}} < 1. \quad (3)$$

Из рис. 2а следует, что при включении потока газа и увеличении его скорости происходит уменьшение продольного электрического поля:

$$\frac{E_1}{E_3} > 1. \quad (4)$$

Из соотношений (3) и (4) получаем

$$\nabla T_{g_3} > \nabla T_{g_1} > \nabla T_{g_2}$$

т. е. ламинарная прокачка газа, направленная вдоль положительного столба разряда, приводит к увеличению градиента температуры газа по радиусу трубки. Вследствие этого устанавливается более крутое изменение параметра E/N по радиусу разряда. Из-за экспоненциальной зависимости константы скорости ионизации от E/N в положительном столбе с потоком установится более крутое распределение концентрации электронов по радиусу трубки, т. е. произойдет сжатие разряда.

Теперь следует выяснить, почему в разряде при постоянных значениях тока и давления увеличение скорости потока приводит к увеличению градиента температуры газа в трубке.

При расстоянии 20 см от катода до зондов и средней скорости потока 10 м/с время прокачки аргона составляет $\tau = e/2v = 10^{-2}$ с. За это время атомы аргона продрейфуют в радиальном направлении на расстояние $r \approx 0,1$ см (значение коэффициента диффузии D определялось согласно [4]). Следовательно, тепло, выделяемое током в присоединенной части разряда, где плотность тока максимальна, не успевает распространиться в радиальном направлении вследствие более быстрого его переноса потоком газа в продольном направлении. Этот вывод был подтвержден экспериментально. Измерения температуры стенки трубки при $P = 532$ Па и $I = 30$ мА в аргоне с помощью термопарного датчика показали, что при отсутствии пото-

ка температура стенки равна 51°C , при $v_2 = 5$ м/с — $T_2 = 41^{\circ}\text{C}$ и при $v_2 = 10$ м/с — $T_2 = 36^{\circ}\text{C}$. Понижение температуры газа на периферии при увеличении потока приводит к росту плотности атомов N , что вызывает уменьшение амбиполярной диффузии зарядов ($D_a \sim N^{-1}$) и более крутое распределение $n_e(\rho)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gentle K. W., Ingard V., Bekefi G. Nature, 203, 1969 (1964).
2. Елещкий А. В. В кн. Химия плазмы, вып. 9. Энергоиздат, М., 1982.
3. Арутюнян Г. Г., Галечян Г. А., Тавакалян А. Б. ТВТ, 20, 1025 (1982).
4. Лясков В. А., Смирнов Б. М., Чайванов Б. Б. В кн. Химия плазмы, вып. 9. Энергоиздат, М., 1982.

ԳԱԶԻ ԵՐԿԱՅՆԱԿԱՆ ԼԱՄԻՆԱՐ ՀՈՍՔԻ ՄԵՋ ՄԱՐՄՐՈՂ ՊԱՐՊՄԱՆ ԴՐԱԿԱՆ ՍՅԱՆ ԿՈՆՏՐԱԿՑԻԱՆ

Գ. Գ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Գ. Ա. ԳԱԼԵՉՅԱՆ, Լ. Բ. ԹԱՎԱԿԱԿՅԱՆ

Ցույց է տրված, որ դրական երկայնական հոսքով էլեկտրադրական դադի պարպման մեջ հաստատուն հոսանքի և ճնշման դեպքում հոսքի արագության ավելացումը նրա լամինար տեսքի սահմաններում բերում է դրական սյան սեղմմանը, էլեկտրոնների ջերմաստիճանի և երկայնական էլեկտրական դաշտի փոքրացմանը:

CONTRACTION OF THE POSITIVE COLUMN OF GLOW DISCHARGE IN LONGITUDINAL LAMINAR GAS FLOW

G. G. ARUTYUNYAN, G. A. GALECHYAN, L. B. TAVAKALYAN

It is obtained that in the discharge with longitudinal flow of electropositive gas at constant current and pressure, the increase in pumping rate within the laminar form of the flow leads to the positive column contraction, to the decrease in electron temperature and in longitudinal electric field.