

УДК 537.525

DOI: 10.17223/00213411/62/7/47

*В.В. ДЕНИСОВ, Н.Н. КОВАЛЬ, Ю.А. ДЕНИСОВА, И.В. ЛОПАТИН, Е.В. ОСТРОВЕРХОВ***ВЛИЯНИЕ АНОДА НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА С ПОЛЫМ КАТОДОМ НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЛАЗМЫ \***

Представлены результаты исследования влияния геометрических размеров, формы и расположения анода сильнооточного несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом при низком ( $\approx 1$  Па) давлении с током до 100 А на степень неоднородности азимутальных распределений концентрации плазмы. Проведенные азимутальные измерения показали, что при инжекции потока электронов с током, превышающим в несколько раз ток электронов, образованных в результате процессов вторичной ионно-электронной эмиссии, величина средней длины пути электронов до ухода на анод  $L$  значительно ниже, чем для самостоятельного режима горения разряда. Получено, что при инжекции потока электронов в тлеющий разряд с полым катодом расположение анода значительным образом влияет на степень неоднородности концентрации плазмы. Расположение анода кольцевой формы в месте, не допускающем прямой видимости между направлениями инжекции электронов и поверхностью анода позволяет достигнуть минимального значения коэффициента неоднородности.

**Ключевые слова:** тлеющий разряд с полым катодом, анод разряда, распределение концентрации плазмы, коэффициент неоднородности, поток электронов.

**Введение**

Химико-термическая обработка, позволяющая насытить поверхностные слои деталей машин и механизмов атомами таких элементов, как азот (азотирование), углерод (карбонизация), бор (борирование), является одним из основных методов упрочнения поверхности в промышленности [1]. Азотирование сталей в плазме разрядов низкого ( $\approx 1$  Па) давления менее затратно по времени по сравнению с процессом азотирования в плазме тлеющего разряда при давлениях 100–1000 Па [2]. Дуговые разряды низкого давления [3, 4] несмотря на это преимущество еще не так широко внедрены в производство. Основной причиной являются относительно высокие затраты для обеспечения однородного распределения концентрации плазмы в больших ( $> 0.1$  м<sup>3</sup>) вакуумных объемах. Тлеющий разряд с полым катодом в самостоятельной форме горения позволяет создать в вакуумной камере, внутренние стенки которой являются катодом, однородную плазму при нижнем пороговом давлении газа в катодной полости порядка до  $10^{-2}$  Па [5]. В несамостоятельной форме тлеющий разряд с полым катодом, поддерживаемый внешней инжекцией электронов, стабильно зажигается и горит при рабочих давлениях вплоть до  $5 \cdot 10^{-3}$  Па [6]. Изменение величины тока электронов, инжектированных в полый катод, ускоренных в прикатодном падении потенциала и осциллирующих в разрядном объеме до момента термализации или ухода на анод, позволяет независимо регулировать основные рабочие параметры – рабочее давление, напряжение горения и ток тлеющего разряда, а также значительно, на 2 порядка повысить значение тока тлеющего разряда, а соответственно и концентрации плазмы. Так, в работе [7] при токе инжектированных электронов около 50 А величина тока тлеющего разряда составила около 370 А, а величина концентрации азотной плазмы около  $10^{12}$  см<sup>-3</sup> при рабочем давлении 1 Па. Инжекция электронов в полый катод создает значительный градиент концентрации плазмы, вызванный повышенной вероятностью ионизации газа нерассеянным пучком электронов вблизи выходной апертуры источника электронов. Данная проблема частично решается использованием формы эмиссионного электрода, отклоняющей направление инжекции электронов [8]. Концентрация плазмы также снижается вблизи анода, при этом измерения азимутальным зондом [9] показали, что снижение плотности ионного тока составляет несколько десятков процентов и более по сравнению со средней величиной. То есть расположение анода может сказаться на параметрах плазмы вблизи изделий, а значит повлиять на результат ионно-плазменной обработки. Кроме того, как показано в [5] для самостоятельного тлеющего разряда, в котором разряд поддерживается за счет процессов ионно-электронной эмиссии, для обеспечения высокой эффективности работы полого катода, необходимо уменьшать отношение площади анода к площади катода  $S_a/S_c$ . Это приводит к снижению вероятности ухода быстрых электронов на анод, то есть к увеличению их средней длины пути в полном катоде. Этот фак-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 18-38-00836 и 19-08-00370.

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала  
**«Известия высших учебных заведений. Физика»**  
осуществляется на платформе  
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU  
на платной основе:

<https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>