

УДК 537.534.7; 621.384.66(088.8)

DOI: 10.17223/00213411/63/10/102

*А.П. СЕМЕНОВ, И.А. СЕМЕНОВА, Д.Б.-Д. ЦЫРЕНОВ, Э.О. НИКОЛАЕВ***СВОЙСТВА МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ  
В УСЛОВИЯХ ИНИЦИИРОВАНИЯ ПУЧКОМ УСКОРЕННЫХ ИОНОВ  
ЭМИССИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ЭЛЕКТРОДАХ РАЗРЯДА \***

Рассмотрено влияние ионного пучка, инжектируемого вдоль оси анодного электрода планарного магнетрона, на зажигание аномального тлеющего разряда низкого давления в магнетроне. Определены характеристики зажигания разряда при давлениях  $< 8 \cdot 10^{-2}$  Па и свойства планарного магнетрона при облучении катода магнетрона пучком ионов аргона. Установлено, что напряжение зажигания разряда падает с повышением энергии ионов и пороговым образом зависит от тока ионного пучка. Показана перспектива расширения функциональных возможностей планарных магнетронов за счет согласования режимов распыления центрального анода ионным пучком и катода магнетрона плазменными ионами аномального тлеющего разряда.

**Ключевые слова:** магнетронный разряд, пучок ионов, эмиссионные процессы, свойства, применение.

**Введение**

Аномальный тлеющий разряд находит применение в магнетронных распылительных системах планарного типа, широко используемых для выращивания покрытий полифункционального назначения [1, 2]. Разряд зажигается в скрещенных электрическом и магнитном полях, причем магнитное поле удерживает плазму разряда вблизи катода-мишени, что способствует повышению плотности плазмы и, как следствие, росту ионного тока на катод. Для разряда характерны [3, 4], во-первых, постоянная площадь на катоде, в которую втекает ток, во-вторых, возрастание тока разряда с повышением напряжения горения. Обычно разряд устойчиво зажигается и стационарно горит в диапазоне давлений рабочего газа 0.2–6 Па [4]. Однако при этих давлениях не выполняется соотношение  $l \ll \lambda$ , где  $l$  – расстояние катод – подложка,  $\lambda$  – длина свободного пробега атомов, покидающих катод в результате распыления катода плазменными ионами, ускоренными в катодном слое.

Длину свободного пробега распыленных атомов в газе при давлении  $p$  можно рассчитать из соотношения  $\lambda = 4kT(\pi p)^{-1}(\sigma_1 + \sigma_2)^{-2}(1 + M_1/M_2)^{-1/2}$ , где  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура;  $p$  – давление газа;  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $M_1$ ,  $M_2$  – соответственно диаметр ( $\sigma = 2r$ , где  $r$  – газокинетический радиус) и масса атомов, покидающих катод, и атомов газа. При  $p = 0.2$ –6 Па,  $\sigma_1 = 2.56 \cdot 10^{-10}$  м (медный катод),  $\sigma_2 = 3.84 \cdot 10^{-10}$  м (аргон),  $M_1/M_2 = 1.6$  в приближении  $T = 3 \cdot 10^2$  К следует, что свободный пробег атомов  $\lambda = 1.3 \cdot 10^{-3}$ – $4 \cdot 10^{-2}$  м.

В этих условиях расстояние катод – подложка  $l$  должно быть менее  $\sim 10$  мм, что вряд ли допустимо, учитывая неконтролируемое радиационное и термическое влияние плазмы разряда на покрытие и невозможность достижения его однородной толщины. Кроме того, столкновительный перенос распыленных атомов затрудняет получение покрытий с совершенной структурой и достижение требуемой точности воспроизведения ростовых режимов.

Условие  $l < \lambda$  выполняется при давлениях  $< 0.2$  Па, для которых  $\lambda$  сравнительно велика,  $\lambda > 10$  см. Однако при низких давлениях напряжение зажигания сильно зависит от давления [4], и разряд зажигается при относительно высоких напряжениях  $> 10$  кВ. Поэтому при низких давлениях часто возникает ситуация, когда напряжение зажигания разряда превышает напряжение источника питания. Длина свободного пробега электронов  $\lambda_e$  оказывается много больше расстояния  $d$  между катодом и анодом магнетрона.

Известно, что для снижения напряжения зажигания разряда можно инжектировать в область заряда электроны, что способствует ионизации газа и частичному распылению материала электродов [5]. Инжектировать в газ низкого давления электроны можно с потоком проникающей газо-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 20-08-00207\_а и госзадания Министерства науки и высшего образования РФ, тема № 0336-2019-0009.

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>