

## НИЗКОВОЛЬТНЫЙ РАЗРЯД В ЦЕЗИЙ-ВОДОРОДНОМ ПОЛОМ КАТОДЕ

*Ф.Г.Бакит, В.Г.Иванов*

1. Интерес к низковольтному разряду (НР) в смеси Cs–H<sub>2</sub> связан с перспективами его использования в качестве источника колебательно-возбужденных молекул H<sub>2</sub> и ионов H<sup>-</sup> [1]. Это объясняется тем, что разряд может быть сравнительно легко реализован при оптимальной для генерации ионов H<sup>-</sup> электронной температуре  $T_e \approx 1$  Эв. При этом, с одной стороны, уже достигается максимальная скорость генерации ионов H<sup>-</sup> за счет диссоциативного прилипания тепловых электронов к колебательно-возбужденным молекулам H<sub>2</sub> [2], а с другой стороны, еще весьма мала скорость обдирки ионов H<sup>-</sup> электронным ударом [3]. Существенно, что разряд может быть реализован именно в низковольтном режиме, т.е. при достаточно малом катодном падении  $\varphi_1 < U_d$ , где  $U_d \approx 8.8$  В — порог прямой диссоциации молекул H<sub>2</sub> электронным ударом. Это обеспечивает весьма малую степень диссоциации H<sub>2</sub> и способствует интенсивной колебательной накачке молекул H<sub>2</sub> в НР [4].\* В настоящее время экспериментально показано наличие в НР в смеси Cs–H<sub>2</sub> высокого уровня колебательной накачки молекул водорода [6] и оптимальной для генерации H<sup>-</sup> электронной температуры  $T_e \approx 1$  эВ [7].

2. До сих пор НР в Cs–H<sub>2</sub> изучался лишь в плоской геометрии. Как расчеты, так и эксперименты были выполнены применительно к плоскому диоду с покоящейся цезий-водородной плазмой, в то время как реальные источники H<sup>-</sup> представляют собой прокачные системы. Наиболее простой такой системой, удобной для теоретического анализа, является диафрагмированный полый катод (ПК), заполненный цезий-водородной плазмой (см. рис. 1, а). Целью настоящего сообщения является приближенный теоретический анализ состояния плазмы в цезий-водородном ПК и определение концентрации N<sub>H</sub> ионов H<sup>-</sup> в зависимости от величины приложенного напряжения  $U$  и тока  $j_1$  эмиссии катода.

\* Вследствие весьма больших констант  $\nu - t$  релаксации молекул на атомах H образование атомарного водорода в разряде приводит к резкому уменьшению колебательной накачки молекул водорода [5].

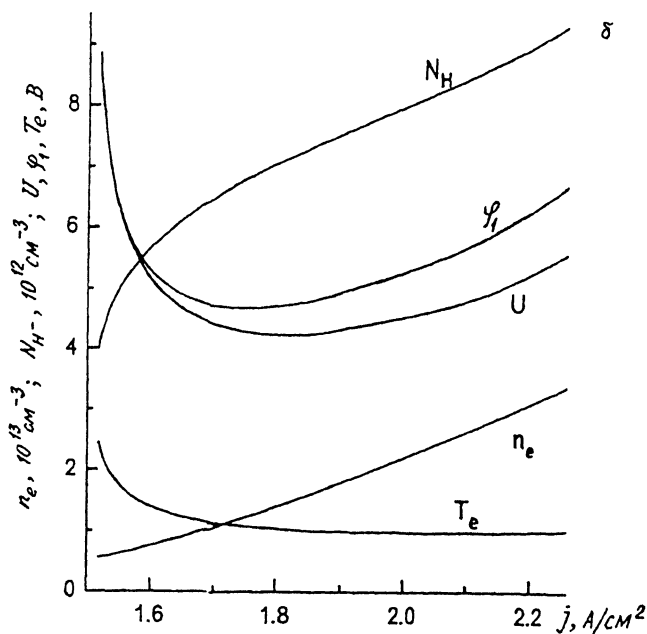
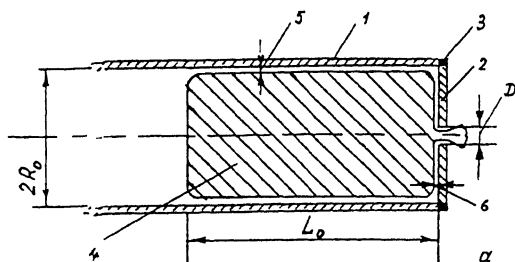


Рис. 1. Полый катод: 1 — катод, 2 — анод, 3 — изолятор, 4 — плазма, 5 и 6 — ленгмюровские слои, отделяющие плазму от катода и анода (а); зависимости параметров плазмы и напряжения между катодом и анодом от плотности тока на катоде.  $R_0 = 0.15$  см,  $L_0 = 1$  см,  $j_1 = 2$  А/см<sup>2</sup>,  $N_{H_2} = 10^{16}$  см<sup>-3</sup>,  $N_{Cs}^{(0)} = 10^{14}$  см<sup>-3</sup> (б).

3. Наиболее существенное различие между условиями генерации  $H^-$  в покоящейся и движущейся плазме связано с конечностью времени  $\tau_v$  формирования колебательной функции распределения (КФР) молекул  $H_2$ . В связи с этим были выполнены расчеты колебательной релаксации молекул  $H_2$  в цезий-водородной плазме. Решалась система нестационарных уравнений баланса для заселенностей колебательных уровней. Предполагалось, что при  $t = 0$  КФР соответствует распределению Больцмана с газовой темпе-

ратурой  $T$ . Считалось, что молекула с такой КФР помещается в цезий-водородную плазму, в результате чего ее КФР релаксирует к новому стационарному значению. В уравнениях колебательной кинетики учитывались следующие процессы:  $e - v$  обмен,  $v - v$  обмен,  $v - t$  обмен с молекулами и атомами водорода, переходы между колебательными уровнями в результате взаимодействия с атомами Cs в основном и возбужденных состояниях, обдирка ионов  $H^-$  колебательно-возбужденными молекулами, колебательная релаксация молекул  $H_2$  на стенках, ассоциативный отрыв и диссоциативное прилипание электронов. Константы скоростей процессов приведены в [4,8]. Расчеты показали, что при параметрах плазмы, оптимальных для генерации ионов  $H^-$ , КФР формируется за время  $\tau_v \lesssim 5$  мкс.

При достаточно малом диаметре  $D$  диафрагмы ( $D/2R_0 \leq \leq 0.1$ ) скорость течения молекулярного водорода в разрядной зоне  $V_0 \lesssim 0.1\nu_s$ , где  $\nu_s$  — скорость звука. При  $T = 0.1$  эВ длина  $L_\nu$ , на которой формируется КФР,  $L_\nu = V_0\tau_v \approx 0.1$  см, так что при длине разрядной зоны в ПК  $L_0 \approx 1$  см КФР молекул  $H_2$  успевает сформироваться.

4. Для приближенного определения параметров плазмы в ПК рассматривалась следующая теоретическая модель. Предполагалось, что длинная ( $L_0 \gg R_0$ ) цилиндрическая полость заполнена однородной плазмой, образующейся за счет ионизации Cs. Расчет проводился в два этапа (ср. с [9]). На первом этапе параметры плазмы (ее состав, КФР молекул  $H_2$ , заселенности основного и возбужденных уровней Cs и т. п.) определялись как функции электронной температуры  $T_e$ . Считалось, что генерируемые в плазме ионы  $Cs^+$ , молекулы  $H_2$ , атомы H, излучение и т. п. отводятся только в радиальном направлении, т. е. на боковую (эмитирующую) поверхность ПК. На втором этапе, при заданном токе эмиссии  $j_1$  с поверхности катода и заданной температуре  $T_e$  определялись: напряжение  $U$  между катодом и анодом, ток  $I$  разряда и приэлектродные потенциальные барьеры  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  в ленгмюровских слоях. Эти величины находились из решения системы уравнений, описывающих баланс заряженных частиц (электронов и ионов  $Cs^+$ ) и энергии электронов в разряде:

$$(j_1 - j_e + j_i)2\pi R_0 L_0 = (j_2 - j_i)\pi R_0^2, \quad (1)$$

$$2\pi R_0 L_0 [j_1(2T/q + \varphi_1) - j_e(2T_e/q + \varphi_1) - j_i E_{ion}] = \\ = \pi R_0^2 [j_e(2T_e/q + \varphi_2) + j_i E_{ion}] + W_0 \pi R_0^2 L, \quad (2)$$

$$U = \varphi_1 - \varphi_2, \quad (3)$$

$$I = 2\pi R_0 L_0 \cdot j. \quad (4)$$

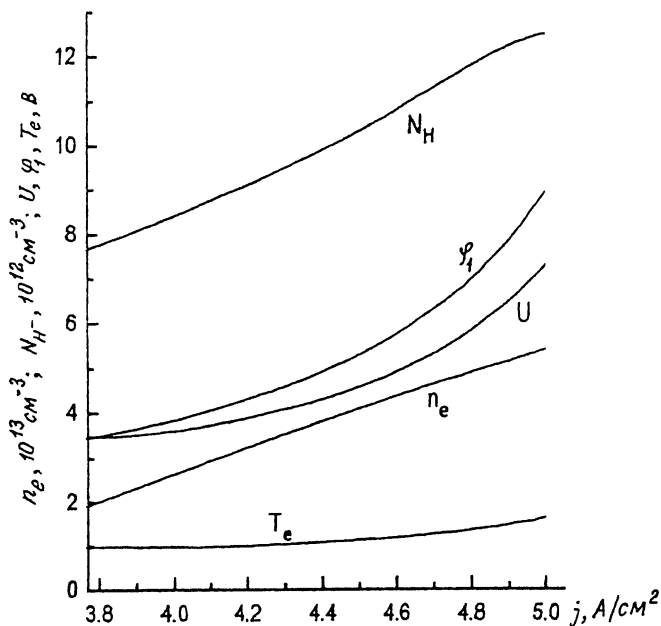


Рис. 2. Зависимости параметров плазмы и напряжения между катодом и анодом от плотности тока на катод.  $j_1 = 5 \text{ A/cm}^2$ , остальные параметры те же, что на рис. 1, б.

Здесь приняты следующие обозначения:  $j_e = \frac{1}{4} q n_e \nu_e \exp(-q\varphi_1/T_e)$ ,  $j_2 = \frac{1}{4} q n_e \nu_e \exp(-q\varphi_2/T_e)$  — плотности электронных токов из плазмы на катод и анод соответственно,  $j_i = 0.61q\sqrt{T_e/M_i} n_i$  — плотность ионного потока из плазмы на электрод,  $\varphi_2$  — прианодный потенциальный барьер, задерживающий поток электронов из плазмы на анод,  $E_{\text{ion}}$  — энергия ионизации Cs,  $j = j_1 - j_e + j_i$  — плотность полного тока на поверхности катода,  $n_e$  и  $n_i$  — концентрации электронов и ионов  $\text{Cs}^+$  в плазме ( $n_e + N_{\text{H}^-} = n_i$ ),  $W_0 = W_{e\nu} + W_{\text{er}} + W_{\text{et}} + W_{\text{rad}}$  — плотность объемных потерь энергии электронов соответственно вследствие передачи энергии при столкновениях на колебательные, вращательные и поступательные степени свободы  $\text{H}_2$ , а также потери энергии на излучение с возбужденных уровней Cs. Площадь диафрагмы считалась пренебрежимо малой по сравнению с площадью анода, а также пренебрегалось потерями заряженных частиц и энергии на задней торцевой границе разрядной зоны. Существенно, что НР организуется при тормозящем прианодном падении напряжения  $\varphi_2$ , так что генерируемые в плазме ионы  $\text{H}^-$  не теряются на электродах. Концентрация  $N_{\text{H}^-}$  в плазме находится из условия их ионизационно-рекомбинационного равновесия [8].

5. Типичные результаты расчетов представлены на рис. 1, б и 2. Здесь приведены зависимости  $n_e$ ,  $N_{H^-}$ ,  $\varphi_1$ ,  $T_e$  и  $U$  от плотности тока  $j$  на поверхности катода. Через  $N_{Cs}^{(0)}$  обозначена полная концентрация цезия в зазоре ( $N_{Cs}^{(0)} = N_{Cs} + n_i$ ). Видно, что в разряде действительно достигаются оптимальная электронная температура  $T_e \approx 1$  эВ и большие концентрации  $N_{H^-} \approx 10^{13}$  см $^{-3}$  при сравнительно небольшом катодном падении  $\varphi_1$  и небольших плотностях эмиссионного тока с поверхности катода  $j_1$  (порядка нескольких А/см $^2$ ). Прианодный потенциальный барьер  $\varphi_2 = \varphi_1 - U > 0$ , т. е. везде является тормозящим для плазменных электронов (малые значения  $\varphi_2 \approx 0$  имеют место лишь на неустойчивом, падающем участке вольтамперической характеристики и не реализуются в устойчивых режимах горения разряда в ПК). Используемые в расчетах плотности тока эмиссии порядка нескольких А/см $^2$  вполне достижимы при давлении цезия  $P_{Cs} \approx 10^{-2}$  Тор [10,11]. Принятое значение глубины затекания плазмы в полость  $L_0 = 1$  см также согласуется с имеющимися экспериментальными и расчетными данными по ПК [10,12]. Поэтому практическая реализация рассмотренного выше режима цезий-водородного ПК не должна встретить принципиальных затруднений.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 94-02-06370), Международного научного фонда (грант N TZ000) и INTAS (грант 94-316).

#### Список литературы

- [1] Бакшт Ф.Г., Иванов В.Г. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 11. С. 672-675.
- [2] Wadehra J.M. // Phys. Rev. A. 1984. V. 29. N 1. P. 106-110.
- [3] Janev R.K., Evans K., Langer W.D., Post D.E. Elementary processes in Hydrogen-Helium Plasmas. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 1987. 326 p.
- [4] Baksh't F.G., Djushev G.A., Elizarov L.I., Ivanov V.G., Kostin A.A., Shkolnik S.M. // Plasma Sources Sci. Technol. 1994. V. 3. N 1. P. 88-98.
- [5] Бакшт Ф.Г., Иванов В.Г. // ЖТФ. 1986. Т. 56. В. 8. С. 1562-1568.
- [6] Бакшт Ф.Г., Иванов В.Г., Никитин А.Г., Школьник С.М. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 22. С. 83-87.
- [7] Бакшт Ф.Г., Иванов В.Г., Костин А.А., Никитин А.Г., Школьник С.М. // ЖТФ. 1995. Т. 65. В. 8.
- [8] Бакшт Ф.Г., Елизаров Л.И., Иванов В.Г., Юрьев В.Г. // Физика плазмы. 1988. Т. 14. В. 1. С. 91-97.
- [9] Бакшт Ф.Г., Иванов В.Г., Костин А.А. // ЖТФ. 1993. Т. 63. В. 9. С. 173-177.

- [10] *Дюжес Г.А., Митрофанов Н.К., Старев Е.А., Школьник С.М., Юрьев В.Г.* Физические исследования дугового полого катода. Препринт ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 583. Л., 1978.
- [11] *Дюжес Г.А., Старцев Е.А., Школьник С.М.* // ЖТФ. 1978. Т. 48. В. 12. С. 2495-2499.
- [12] *Бакшт Ф.Г., Рыбаков А.Б., Юрьев В.Г.* Теория сильноточного дугового полого катода. Препринт ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 789. Л., 1982. 60 с.

Физико-технический  
институт им. А.Ф. Иоффе РАН  
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию  
10 июля 1995 г.

---