

01;04

## Объемно-плазменная генерация ионов $\text{H}^-$ в низковольтном ксенон-водородном разряде. II

© Ф.Г. Бакшт, В.Г. Иванов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: baksh@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 1 июня 2006 г.)

Теоретически рассмотрен низковольтный ксенон-водородный разряд при различных токах эмиссии катода ( $j_s = 2-20 \text{ A/cm}^2$ ) и межэлектродном расстоянии  $L = 1 \text{ cm}$ . Проведена оптимизация основных параметров плазмы разряда, в частности полной концентрации водорода и ксенона в объеме, для достижения наибольшей концентрации отрицательных ионов водорода  $N_{\text{H}^-}(L)$  на прианодной границе плазмы. В оптимизированных режимах рассчитаны распределения всех параметров плазмы по длине газоразрядного промежутка. По данным расчетов, при умеренных плотностях тока эмиссии катода  $j_s \approx 5-10 \text{ A/cm}^2$  в оптимизированных режимах горения разряда концентрация отрицательных ионов водорода в прианодной области плазмы составляет  $N_{\text{H}^-}(L) \approx (1.5-2.5) \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ . Полное давление плазмы при этом  $p_0 = 0.5-0.6 \text{ Torr}$ .

PACS: 52.80.-s

В [1] была изложена теория низковольтного (НВ) разряда в смеси ксенона с молекулярным водородом. В качестве примера был рассчитан разряд, горящий при полном давлении плазмы  $p_0 = 0.6 \text{ Torr}$ , токе эмиссии катода  $j_s = 10 \text{ A/cm}^2$  (катод из  $\text{LaB}_6$ ), температуре электродов: катода  $T_1 = 1900$ , анода  $T_2 = 600 \text{ K}$  и межэлектродном расстоянии  $L = 1 \text{ cm}$ . При заданном давлении  $p_0$  была проведена оптимизация компонентного состава плазмы для получения наибольшей концентрации  $N_{\text{H}^-}(L)$  отрицательных ионов водорода на границе плазмы с анодом (точнее, на границе с прианодным лентчужковым слоем). При этом варьировались полные концентрации ксенона  $\langle N_{\text{Xe}}^{(0)} \rangle$  и молекулярного водорода  $\langle N_{\text{H}_2}^{(0)} \rangle$ . Символ  $\langle \dots \rangle$  означает здесь усреднение величины по межэлектродному промежутку.

В результате было показано, что в НВ ксенон-водородном разряде может быть получена достаточно большая концентрация отрицательных ионов водорода (в рассмотренном примере  $N_{\text{H}^-}(L) \approx (2-2.5) \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ), которая примерно вдвое меньше оптимизированного значения  $N_{\text{H}^-}(L)$ , полученного, по данным расчетов, в цезий-водородном НВ-разряде. При этом предполагалось, что оба разряда горят при одинаковых значениях  $j_s$  и  $L$  и при катодном падении потенциала  $\phi_1 = 9 \text{ V}$ , примерно равном порогу прямой диссоциации  $E_d/e$  молекул  $\text{H}_2$  электронным ударом из основного электронно-колебательного состояния  $X^1\Sigma_g^+(0)$  ( $E_d \approx 8.8 \text{ eV}$ ). Считалось, что в каждом из этих разрядов плазма создавалась исключительно путем ионизации добавки: соответственно ксенона или цезия. Основное отличие между двумя указанными видами разряда состояло в том, что оптимизированное значение  $\langle N_{\text{Xe}}^{(0)} \rangle$ , как и должно быть, существенно превышало значение  $\langle N_{\text{Cs}}^{(0)} \rangle$ .

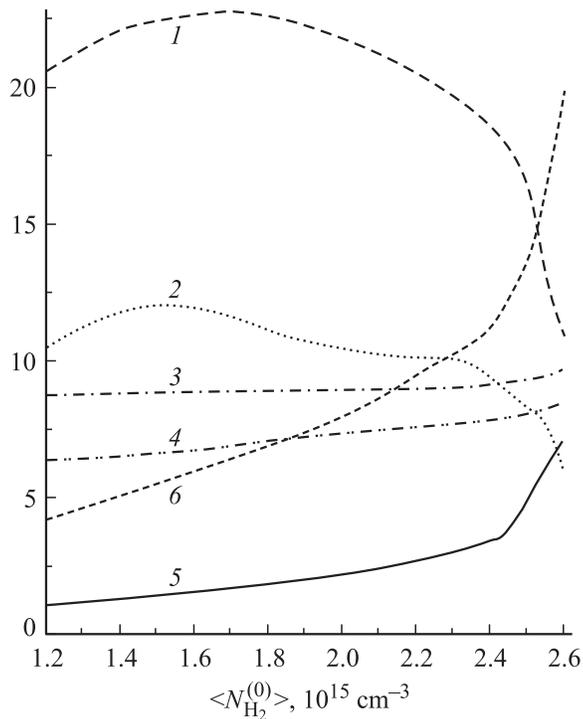
Температура  $T_e$  в ксенон-водородном разряде хотя и заметно превышала температуру  $T_e$  в цезий-водородном

разряде, все же была недостаточно высока для того, чтобы был существенным вклад в ионообразование от ионизации водорода: плазма создавалась вследствие ионизации ксенона, средняя концентрация  $\langle N_{\text{Xe}}^{(0)} \rangle$  которого в зазоре была близка к средней концентрации  $\langle N_{\text{H}_2}^{(0)} \rangle$  водорода.

Поскольку использование цезия в качестве ионизирующей примеси в ряде случаев нежелательно, представляет интерес подробнее рассмотреть ксенон-водородный разряд в качестве возможного источника ионов  $\text{H}^-$ . Этому посвящена настоящая работа, выполненная по предложению Физико-технического центра ФИАН им. П.Н. Лебедева (г. Протвино).

Основное внимание уделено зависимости параметров плазмы разряда и, в частности, концентрации отрицательных ионов водорода  $N_{\text{H}^-}(L)$  от тока эмиссии  $j_s$  катода. Что касается напряжения  $U$  на разрядном промежутке, то, как и в [1], оно будет выбираться таким, чтобы катодное падение потенциала  $\phi_1 \approx E_d/e$ . Это обеспечивает максимальный разогрев электронов плазмы катодным пучком при отсутствии прямой диссоциации молекул  $\text{H}_2$  пучковыми электронами из основного состояния (подробнее см. [2]).

Рассмотрим расчет и оптимизацию НВ ксенон-водородного разряда при различных токах эмиссии  $j_s$  катода. Методика расчета разряда была описана в [1,3]. В [1] оптимизация разряда проводилась при заданном давлении  $p_0$  путем варьирования усредненных по зазору концентраций водорода  $\langle N_{\text{H}_2}^{(0)} \rangle = \langle N_{\text{H}_2}(x) + N_{\text{H}}(x)/2 \rangle$  и ксенона  $\langle N_{\text{Xe}}^{(0)} \rangle = \langle N_{\text{Xe}}(x) + N_{\text{Xe}^+}(x) \rangle$ . В настоящей работе оптимизация разряда для получения максимальной величины  $N_{\text{H}^-}(L)$  проводится, при заданных  $j_s$  и  $L$ , путем варьирования как концентраций компонент плазмы  $\langle N_{\text{H}_2}^{(0)} \rangle$  и  $\langle N_{\text{Xe}}^{(0)} \rangle$ , так и полного давления  $p_0$  плазмы. Пример такой оптимизации при  $j_s = 10 \text{ A/cm}^2$  приведен



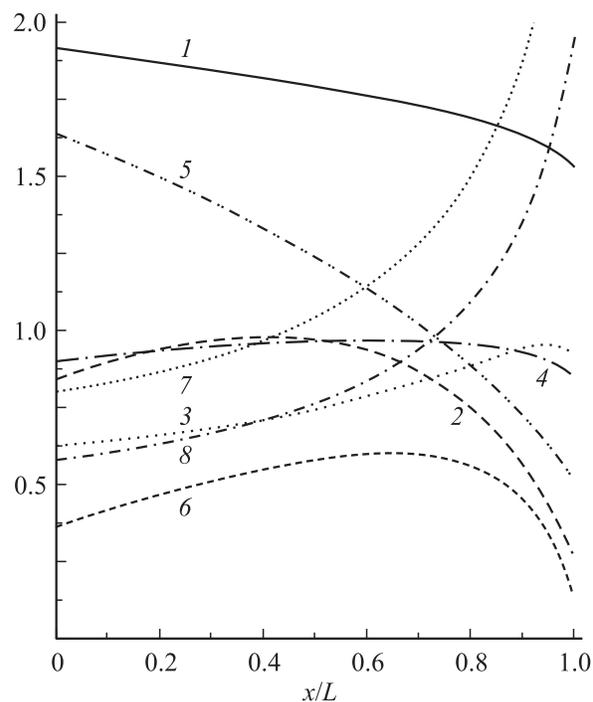
**Рис. 1.** Оптимизация параметров низковольтного разряда Хе/Н<sub>2</sub> для получения наибольшей концентрации ионов Н<sup>-</sup> на прианодной границе плазмы:  $L = 1 \text{ cm}$ ,  $j_s = 10 \text{ A/cm}^2$ ,  $T_1 = 1900$ ,  $T_2 = 600 \text{ K}$ ,  $\varphi_1 = 9 \text{ V}$ . 1 —  $N_{H^-}(L)$ ,  $10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ; 2 —  $n_e(L)$ ,  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ; 3 —  $j$ ,  $\text{A/cm}^2$ ; 4 —  $U$ ,  $\text{V}$ ; 5 —  $\langle N_{Xe}^{(0)} \rangle$ ,  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ; 6 —  $p_0$ ,  $10^{-1} \text{ Torr}$ . На рис. 3–5 параметры  $L$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  и  $\varphi_1$  те же, что на рис. 1.

на рис. 1. Для каждого  $\langle N_{H_2}^{(0)} \rangle$  путем вариации значений полного давления  $p_0$  и концентрации  $\langle N_{Xe}^{(0)} \rangle$  находилось максимальное значение  $N_{H^-}(L)$ , которое представлено кривой 1. Соответствующие значения  $\langle N_{Xe}^{(0)} \rangle$  и  $p_0$  показаны на кривых 5 и 6. На кривых 2–4 показаны значения концентрации электронов  $n_e(L)$  на прианодной границе плазмы, тока  $j$  разряда и напряжения  $U$  на разряде. Из рис. 1 видно, что при некотором значении  $\langle N_{H_2}^{(0)} \rangle \approx 1.66 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  (точнее, при соответствующем наборе величин  $\langle N_{H_2}^{(0)} \rangle$ ,  $\langle N_{Xe}^{(0)} \rangle$  и  $p_0$ ) достигается наибольшее возможное значение  $N_{H^-}(L)$ , которому соответствует максимум на кривой 1. Распределения параметров плазмы по газоразрядному промежутку, соответствующие указанному максимуму  $N_{H^-}(L)$  на кривой 1, приведены на рис. 1, *b* в [1]. Отметим, что величина  $p_0$  представляет собой суммарное давление всех компонент плазмы, в том числе электронов и ионов, причем  $p_0$  является постоянной, т. е. не зависящей от  $x$ , величиной. Из рис. 1 видно, в частности, что при практически неизменной величине тока  $j$  разряда, при увеличении  $p_0$  сверх значения  $p_0 \approx 1 \text{ Torr}$  наблюдается резкое уменьшение концентрации  $N_{H^-}(L)$  ионов Н<sup>-</sup>. Это объясняется соответствующим понижением температуры  $T_e$  электронов в плазме вследствие увеличения потерь

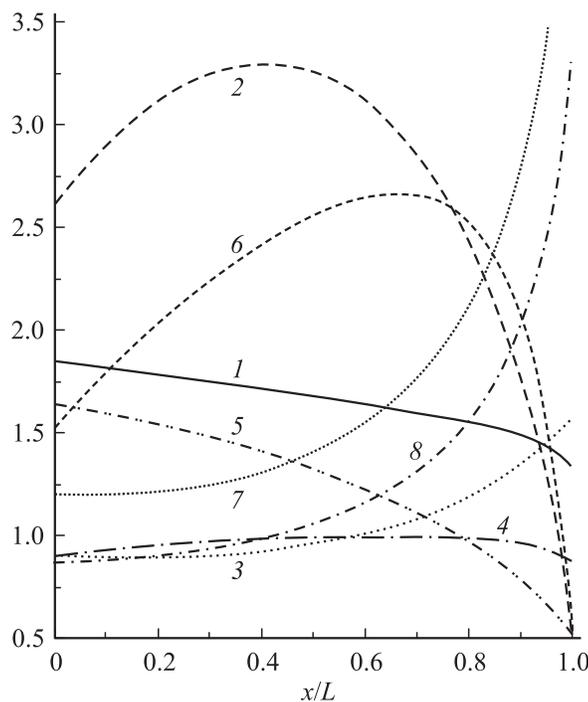
энергии электронов на разогрев компонент плазмы и, в частности, на колебательное возбуждение молекул Н<sub>2</sub>.

Результаты аналогичной оптимизации НВ-режима горения ксенон-водородного разряда для других значений тока эмиссии  $j_s$  катода представлены на рис. 2–5. На этих рисунках (для оптимизированных режимов горения разряда) приведены распределения по длине газоразрядного промежутка основных параметров плазмы, включая расчетную концентрацию отрицательных ионов водорода  $N_{H^-}(x)$ . Соответствующие значения тока эмиссии катода  $j_s$  и полного давления плазмы  $p_0$  приведены в подписях к рисункам. Отметим, что так же, как и в [1], на рисунках за нуль отсчета потенциала  $\varphi(x)$  принята поверхность катода, так что  $\varphi(0) = \varphi_1$  — падению потенциала в прикатодном ленгмюровском слое пространственного заряда. Прианодное падение потенциала  $\varphi_2$  приведено в подписях к рисункам. На рисунках приведены также распределения по длине газоразрядного промежутка концентрации электронов  $n_e(x)$ , газовой температуры  $T_g(x)$ , концентрации атомарного водорода  $N_H(x)$ .

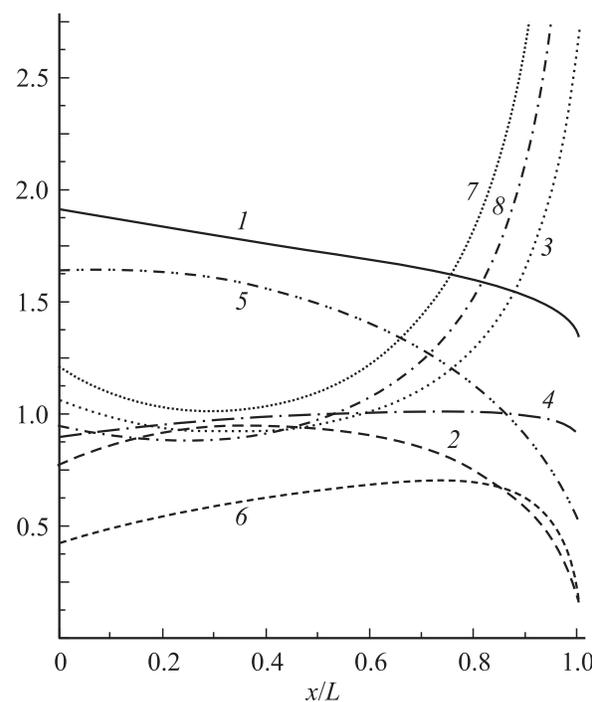
Из рис. 2–5 и рис. 1, *c* в [1] видно, что с увеличением тока эмиссии  $j_s$  возрастают концентрация  $N_{H^-}(L)$  и давление плазмы  $p_0$ , соответствующие оптимальным режимам горения разряда. Это связано с увеличением мощности  $jU$ , вкладываемой в плазму НВ-разряда при уве-



**Рис. 2.** Распределение параметров плазмы НВ разряда Хе/Н<sub>2</sub> по зазору в оптимальном режиме горения.  $J_s = 2 \text{ A/cm}^2$ ,  $p_0 = 0.3 \text{ Torr}$ ,  $\varphi_2 = 2.61 \text{ eV}$ .  $\langle N_{H_2}^{(0)} \rangle = 1.22 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\langle N_{Xe}^{(0)} \rangle = 0.96 \cdot 10^{15}$ ,  $U = 5.94 \text{ V}$ ,  $j = 1.81 \text{ A/cm}^2$ . 1 —  $T_e$ ,  $\text{eV}$ ; 2 —  $n_e$ ,  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ; 3 —  $N_{H^-}$ ,  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ; 4 —  $0.1\varphi$ ,  $\text{V}$ ; 5 —  $10 T_g$ ,  $\text{eV}$ ; 6 —  $N_H$ ,  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ; 7 —  $N_{Xe}$ ,  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ; 8 —  $N_{H_2}$ ,  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ .



**Рис. 3.** То же, что на рис. 2,  $j_s = 5 \text{ A/cm}^2$ ,  $p_0 = 0.5 \text{ Torr}$ ,  $\varphi_2 = 2.17 \text{ eV}$ .  $\langle N_{Xe}^{(0)} \rangle = 1.74 \cdot 10^{15}$ ,  $\langle N_{H_2}^{(0)} \rangle = 1.38 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $U = 6.53 \text{ V}$ ,  $j = 4.57 \text{ A/cm}^2$ . 1 —  $T_e, \text{ eV}$ ; 2 —  $n_e, 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ; 3 —  $N_{H^-}, 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ; 4 —  $0.1 \varphi, \text{ V}$ ; 5 —  $10 T_g, \text{ eV}$ ; 6 —  $N_H, 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ; 7 —  $N_{Xe}, 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ; 8 —  $N_{H_2}, 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ .



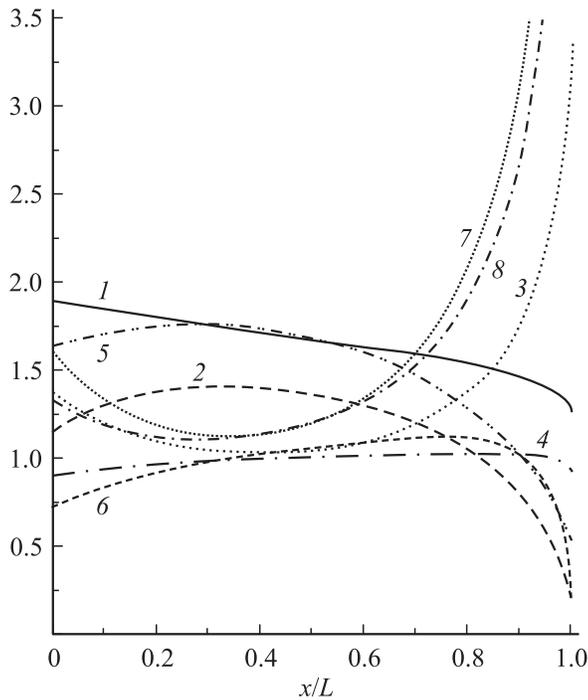
**Рис. 4.** То же, что на рис. 2,  $j_s = 15 \text{ A/cm}^2$ ,  $p_0 = 0.7 \text{ Torr}$ ,  $\varphi_2 = 2.16 \text{ eV}$ .  $\langle N_{Xe}^{(0)} \rangle = 1.63 \cdot 10^{15}$ ,  $\langle N_{H_2}^{(0)} \rangle = 1.58 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $U = 6.8 \text{ V}$ ,  $j = 13.3 \text{ A/cm}^2$ . 1 —  $T_e, \text{ eV}$ ; 2 —  $n_e, 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ; 3 —  $N_{H^-}, 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ; 4 —  $0.1 \varphi, \text{ V}$ ; 5 —  $10 T_g, \text{ eV}$ ; 6 —  $N_H, 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ; 7 —  $N_{Xe}, 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ; 8 —  $N_{H_2}, 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ .

личении тока  $j$ , что позволяет разогревать электроны до нужных значений  $T_e$  (близких к  $T_e \approx 2 \text{ eV}$ ) при больших давлениях плазмы  $p_0$ . Для практического использования, по-видимому, наибольший интерес будут представлять режимы горения НВ-разряда, соответствующие умеренным плотностям тока эмиссии катода  $j_s \approx 5\text{--}10 \text{ A/cm}^2$  и  $p_0 \approx 0.5\text{--}0.6 \text{ Torr}$ . По данным расчетов, в этих режимах концентрация ионов  $H^-$  в прианодной области плазмы составляет  $N_{H^-}(L) \approx (1.5\text{--}2.5) \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ . Отметим, что с увеличением тока эмиссии катода  $j_s$  отношение  $N_{H^-}(L)/n_e(L)$  концентрации отрицательных ионов к концентрации электронов уменьшается.

Интересно определить место рассмотренных выше оптимальных режимов горения НВ ксенон-водородного разряда на соответствующих вольт-амперных характеристиках (ВАХ) разряда. Для примера на рис. 6 приведен участок расчетной ВАХ ксенон-водородного разряда, соответствующий низковольтному режиму, при токе эмиссии катода  $j_s = 5 \text{ A/cm}^2$ . В этом случае ток эмиссии  $j_s$  заметно превышает ионный ток и обратный электронный ток, текущий из плазмы на катод. Поэтому ВАХ близка к характеристике с насыщением тока  $j$  разряда и  $j \approx j_s$ .

Характеристика ограничена со стороны больших напряжений на разряде значением напряжения  $U = U_2$ , при котором катодное падение потенциала  $\varphi_1$  таково, что при этом происходит смена механизма релаксации

в плазме катодного пучка электронов [2]. Это связано с тем, что при реализуемом в катодной области отношении  $n_e/N_{H_2} \sim 10^{-2}$  при больших значениях  $\varphi_1$  релаксация по энергии катодного пучка происходит уже не путем столкновений пучковых электронов с тепловыми электронами плазмы, как это предполагается в теории разряда, а путем возбуждения разлетного  $b^3\Sigma_u^+$  термина молекулы  $H_2$  и более высоко возбужденных состояний молекулы  $H_2$ :  $B^1\Sigma_u^+$ ,  $C^1\Pi_u^\pm$  и т.п. При этом энергия катодного пучка начинает расходоваться не столько на нагрев тепловых электронов, сколько на прямую диссоциацию, а также на электронное возбуждение молекулы  $H_2$ . Теория разряда, развитая в [1] и в настоящей работе, в таких условиях перестает быть применимой. Поскольку при  $U > U_2$  молекулярный водород в разряде начинает интенсивно разрушаться электронным катодным пучком, использование столь больших напряжений  $U$  на разряде должно приводить к уменьшению скорости объемной генерации ионов  $H^-$  в процессе диссоциативного прилипания тепловых электронов к колебательно возбужденным молекулам  $H_2$ . Поэтому для интенсивной объемной генерации ионов  $H^-$  в разряде наиболее целесообразно использовать лишь низковольтный участок ВАХ разряда, заключенный между точкой гашения  $U_1$  и напряжением  $U_2$ . При этом катодное падение  $\varphi_1$  лишь незначительно превышает порог прямой диссоциации  $E_d/e$  молекул катодным пучком.

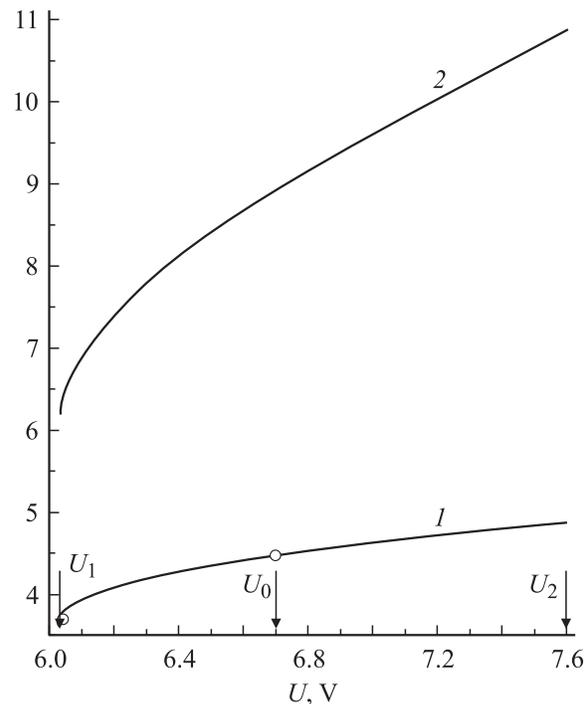


**Рис. 5.** То же, что на рис. 2,  $j_s = 20 \text{ A/cm}^2$ ,  $p_0 = 1 \text{ Torr}$ ,  $\varphi_2 = 1.85 \text{ eV}$ .  $\langle N_{\text{Xe}}^{(0)} \rangle = 1.93 \cdot 10^{15}$ ,  $\langle N_{\text{H}_2}^{(0)} \rangle = 2.14 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $U = 7.42 \text{ V}$ ,  $j = 17.7 \text{ A/cm}^2$ . 1 —  $T_e, \text{ eV}$ ; 2 —  $n_e, 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ; 3 —  $N_{\text{H}^-}, 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ; 4 —  $0.1 \varphi, \text{ V}$ ; 5 —  $10 T_g, \text{ eV}$ ; 6 —  $N_{\text{H}}, 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ; 7 —  $N_{\text{Xe}}, 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ; 8 —  $N_{\text{H}_2}, 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ .

Остановимся на некоторых особенностях расчета ВАХ разряда, приведенной на рис. 6. Расчет проводился следующим образом. Вначале при заданных параметрах разряда  $j_s$ ,  $L$ ,  $T_1$  и  $T_2$  проводилась оптимизация разряда, т.е. значения  $\langle N_{\text{Xe}}^{(0)} \rangle$ ,  $\langle N_{\text{H}_2}^{(0)} \rangle$  и  $p_0$  варьировались для получения максимальной величины  $N_{\text{H}^-}(L)$ . Соответствующая оптимальная точка показана на ВАХ разряда (рис. 6). Оптимальное напряжение на разряде обозначено как  $U_0$ . Затем рассчитывался участок ВАХ между точкой гашения  $U_1$  и максимальным напряжением  $U_2$ . Ввиду малости изменения напряжения  $U$  (а также и параметров плазмы) на этом участке характеристики, расчет проводился приближенно. Считалось, что на этом участке полное количество ксенона в газоразрядном промежутке постоянно и равно тому количеству ксенона, которое было определено в оптимальной точке, т.е. при  $U = U_0$ . Таким образом, при расчете ВАХ усредненная концентрация  $\langle N_{\text{Xe}}^{(0)} \rangle$  считалась постоянной. Отметим, что получающееся при этом изменение концентрации  $\langle N_{\text{H}_2}^{(0)} \rangle$  невелико и составляет  $|\Delta \langle N_{\text{H}_2}^{(0)} \rangle| / \langle N_{\text{H}_2}^{(0)} \rangle \leq 20\%$ . В ряде расчетов постоянной считалась величина  $\langle N_{\text{H}_2}^{(0)} \rangle$ , которая полагалась равной своему оптимизированному значению, рассчитанному для  $U = U_0$ . Получающаяся при этом ВАХ практически совпадала с приведенной на рис. 6, а относительное изменение  $|\Delta \langle N_{\text{Xe}}^{(0)} \rangle| / \langle N_{\text{Xe}}^{(0)} \rangle$  также не превышало 20%.

Проведенные расчеты показали, что оптимальные для генерации ионов  $\text{H}^-$  режимы горения НВ ксенон-водородного разряда (им соответствует катодное падение напряжения  $\varphi_1 \approx 9 \text{ V}$ ) реализуются при сравнительно низком напряжении  $U$  на газоразрядном промежутке и располагаются вблизи точки гашения разряда (рис. 6).

В заключение остановимся на определении концентрации положительных ионов водорода  $N_{\text{H}}^+$ ,  $N_{\text{H}_2}^+$  и  $N_{\text{H}_3}^+$  в разряде. Для самосогласованного определения концентрации положительных ионов водорода в рамках использованной в настоящей работе системы уравнений (см. [1]) дополнительно решались уравнения движения для положительных ионов совместно с соответствующими уравнениями непрерывности. В уравнениях непрерывности учитывались процессы генерации ионов  $\text{H}^+$  и  $\text{H}_2^+$  в результате ионизации атомарного [4] и молекулярного [5] водорода электронным ударом; основной процесс конверсии ионов  $\text{H}_2^+$ :  $\text{H}_2^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_3^+ + \text{H}$  [6], приводящий к образованию ионов  $\text{H}_3^+$ , диссоциативная рекомбинация ионов  $\text{H}_2^+$  [7] и  $\text{H}_3^+$  [8], а также взаимная нейтрализация ионов  $\text{H}^+$  и  $\text{H}^-$ ,  $\text{H}_2^+$  и  $\text{H}^-$ ,  $\text{H}_3^+$  и  $\text{H}^-$  [9]. В результате решения уравнений движения и непрерывности для положительных ионов с боровскими граничными условиями на обоих концах газоразрядного промежутка были получены распределения концентрации положительных ионов водорода по длине зазора.



**Рис. 6.** Участок ВАХ вблизи оптимального режима горения разряда.  $j_s = 5 \text{ A/cm}^2$ ,  $p_0 = 0.5 \text{ Torr}$ ,  $L = 1 \text{ cm}$ ,  $T_1 = 1850$ ,  $T_2 = 600 \text{ K}$ . Отмечены точка гашения разряда ( $U = U_1$ ) и точка, соответствующая оптимизированному режиму ( $U = U_0$ ). Усредненные полные концентрации водорода и ксенона в оптимизированном режиме при  $U = U_0$ :  $\langle N_{\text{H}_2}^{(0)} \rangle = 1.38 \cdot 10^{15}$ ,  $\langle N_{\text{Xe}}^{(0)} \rangle = 1.74 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . 1 —  $j(U), \text{ A/cm}^2$ ; 2 —  $\varphi_1(U), \text{ V}$ .

Полученные расчетные концентрации  $N_H^+$ ,  $N_{H_2}^+$  и  $N_{H_3}^+$  оказались на порядок и выше мешьюе, чем расчетная концентрация  $N_{Xe}^+$ . Например, в режиме горения разряда при токе эмиссии катода  $j_s = 10 \text{ A/cm}^2$ , согласно расчетам, отношение суммарной концентрации положительных ионов водорода к концентрации ионов  $Xe^+$  составляет менее 0.1. Так что, как и предполагалось, вклад положительных ионов водорода в концентрацию плазмы оказывается пренебрежимо малым. Это связано как со сравнительно малой скоростью генерации ионов  $H^+$  и  $H_2^+$  в рассматриваемых режимах горения разряда [1], так и с большой величиной подвижности и коэффициента диффузии относительно легких ионов водорода по сравнению с ионами  $Xe^+$ .

Таким образом, в работе проведена оптимизация режимов горения низковольтного ксенон-водородного разряда для интервала плотности тока эмиссии катода  $j_s = 1-20 \text{ A/cm}^2$ . В зависимости от  $j_s$  определены оптимальное полное давление плазмы  $p_0$  и ее компонентный состав, в частности количество ксенона и молекулярного водорода, которые обеспечивают максимальную концентрацию отрицательных ионов водорода  $N_{H^-}(L)$  на прианодной границе плазмы.

Авторы благодарны В.Е. Балакину за поддержку работы.

## Список литературы

- [1] Бакит Ф.Г., Иванов В.Г. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 7. С. 124–128.
- [2] Бакит Ф.Г., Иванов В.Г. // Физика плазмы. 1986. Т. 12. № 3. С. 286–293.
- [3] Бакит Ф.Г., Елизаров Л.И., Иванов В.Г. // Физика плазмы. 1990. Т. 16. № 7. С. 854–861.
- [4] Johnson L.C., Hinnov E. // QSRT.1973. Vol. 13. P. 333–358.
- [5] Sawada K., Fujimoto T. // J. Appl. Phys. 1995. Vol. 78. N 5. P. 2913–2924.
- [6] Shao J.D., Ng C.Y. // J. Chem. Phys. 1986. Vol. 84. N 8. P. 4317–4326.
- [7] Larrson M. et al. // Physica Scripta. 1995. Vol. 51. P. 354–358.
- [8] Jensen M.J. et al. // Phys. Rev. A. 2000. Vol. 63. N 5. P. 052 701.
- [9] Matveyev A.A., Silakov V.P. // Plasma Sources Sci. Technol. 1995. Vol. 4. P. 606–617.