

01;04

# Объемно-плазменная генерация ионов $H^-$ в низковольтном ксенон-водородном разряде. I

© 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 21 ноября 2005 г.)

Предложена теория низковольтного разряда, горящего в смеси молекулярного водорода с ксеноном. Показано, что в плазме такого разряда при межэлектродном расстоянии  $L = 1$  см и полном давлении плазмы  $p_0 \sim 1$  Торг может быть получена значительная концентрация ( $N_{H^-} \geq 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ) отрицательных ионов водорода, образованных путем диссоциативного прилипания разогретых тепловых электронов к колебательно-возбужденным молекулам  $H_2$ . В рассчитанных режимах горения разряда достигается температура электронов  $T_e \approx (1-2)$  эВ, соответствующая максимуму констант скорости  $e-v$ -обмена молекулы  $H_2$ . Это обеспечивает сравнительно высокую колебательную накачку молекул  $H_2$  в разряде.

PACS: 52.80.-s

Для создания объемно-плазменного источника (ОПИ) ионов  $H^-$  в [1] было предложено использовать низковольтный (НВ) разряд в молекулярном водороде. В плазме такого разряда ионы  $H^-$  образуются вследствие диссоциативного прилипания (ДП) разогретых тепловых электронов к колебательно-возбужденным молекулам в основном электронном состоянии  $X'\Sigma_g^+(v)$  [2]. В разряде катодное падение напряжения  $\phi_1 \leq E_d/e$ , где  $E_d \approx 8.8$  эВ — порог прямой диссоциации молекулы  $H_2$  электронным ударом из основного состояния. Выполнение этого условия исключает прямую диссоциацию молекул  $H_2$  из основного состояния электронным катодным пучком и уменьшает концентрацию  $N_H$  атомарного водорода в плазме разряда. Последнее существенно снижает скорость колебательной релаксации молекул  $H_2$  и улучшает (по сравнению с обычно используемым относительно высоковольтным разрядом [3]) колебательную функцию распределения (КФР) молекул вследствие уменьшения концентрации атомов  $H$ , так как атомарный водород обладает весьма большой (по сравнению с молекулярным водородом) константой скорости  $v-t$ -обмена с молекулами  $H_2$ . Ранее в качестве такого НВ-разряда рассматривался НВ цезий-водородный разряд, в котором малая добавка легкоионизирующейся примеси — цезия — позволяла достаточно просто осуществить НВ-режим горения разряда с большой концентрацией  $n_e$  электронов плазмы и малым катодным падением  $\phi_1$  [1,4].

В ряде случаев, однако, использование цезия в качестве ионизирующейся примеси нежелательно. В связи с этим встает вопрос о замене цезия другой примесью или об использовании для объемно-плазменной генерации ионов  $H^-$  чисто водородного НВ-разряда. В настоящем сообщении кратко излагается теория НВ-разряда, горящего в смеси  $H_2$  с инертным газом — ксеноном. Условия горения разряда выбраны так, что ионизирующимся газом является  $Xe$ , но разряд по-прежнему горит в НВ-области, где  $\phi_1 \leq E_d/e$ . Такой разряд опти-

мизирован. Найдено оптимальное полное давление  $p_0$  плазмы в газоразрядном промежутке и оптимальный компонентный состав смеси  $Xe-H_2$  для получения максимального значения концентрации  $N_{H^-}(L)$  ионов  $H^-$  на прианодной границе плазмы, откуда ионы  $H^-$  могут быть сравнительно легко извлечены. Работа выполнена по предложению Физико-технического центра ФИАН им. П.Н. Лебедева (г. Протвино).

Расчеты проводились для межэлектродного расстояния  $L = 1$  см, тока эмиссии катода  $j_s = 10$  А/см<sup>2</sup> (катод из  $LaB_6$ ), температуры катода  $T_1 = 1900$  К и анода  $T_2 = 600$  К. Рассматривался стационарно горящий разряд. Для расчета газоразрядного промежутка решалась система гидродинамических уравнений, описывающих многокомпонентную плазму разряда в смеси  $Xe-H_2$ . Эта система содержит уравнения движения и непрерывности для потоков частиц, кроме молекулярного водорода, а также уравнение непрерывности для потока энергии электронов. Концентрация ионов  $H^-$  находилась из условия ионизационно-рекомбинационного равновесия этих ионов. Используемая система уравнений и граничных условий аналогична [4]. При решении уравнений движения и непрерывности для атомов  $Xe$  задавались нулевые граничные условия для потоков атомов  $Xe$  на границах плазмы с катодом и анодом. Эти условия (равно как и граничные условия для других потоков) соответствуют отсутствию перетекания вещества между электродами в стационарном разряде. Уравнение движения молекулярного водорода не решалось, вместо этого использовалось условие постоянства по зазору полного давления плазмы  $p_0$ .<sup>1</sup>

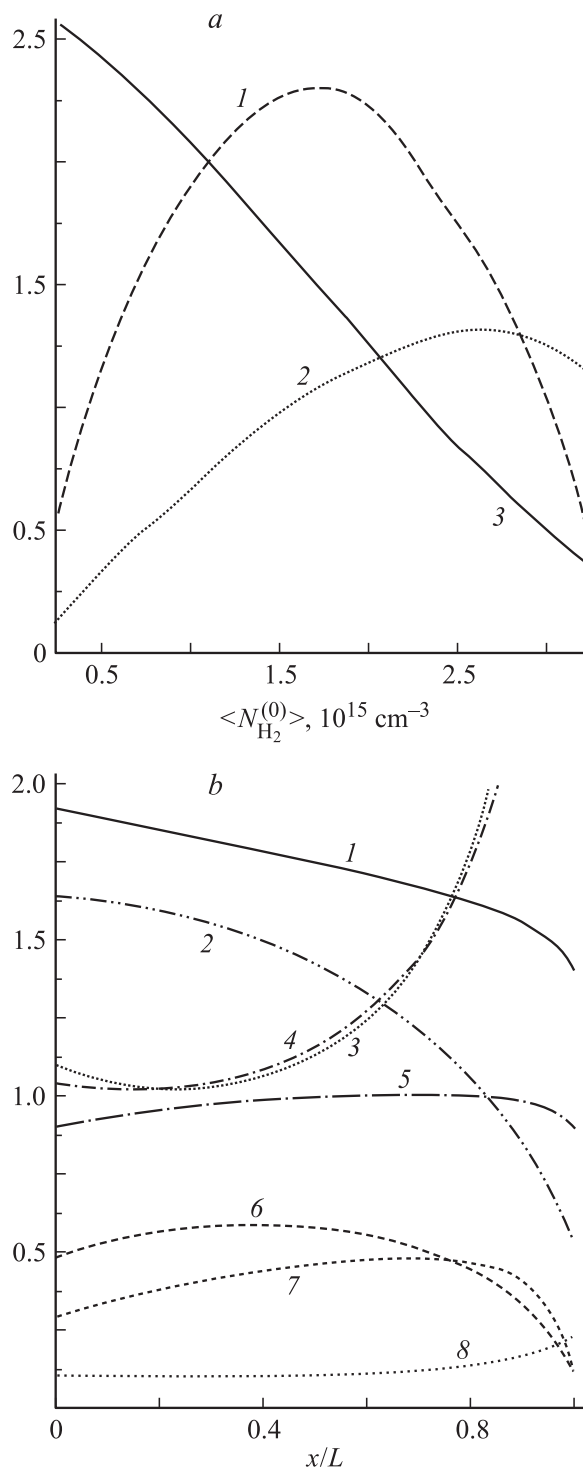
<sup>1</sup> В эксперименте давление  $p_0$ , как правило, задается внешними по отношению к газоразрядному промежутку условиями. Например, если в  $Xe-H_2$ -разряде разрядный промежуток заключен в колбу, заполненную смесью нейтральных газов  $Xe$  и  $H_2$ , то в стационарном разряде, в отсутствие газодинамических течений и конвективных потоков, давление  $p_0$  совпадает с суммарным давлением нейтралов в колбе.

Теплопроводность электронов и входящий в уравнение энергии термодиффузионный фактор  $k_e^{(T)}$ , в отличие от [4], определялись по методу Фроста, что связано со сложной энергетической зависимостью сечения рассеяния электронов на атомах Хе. Кинетические коэффициенты для компонент плазмы вычислялись аналогично [4]. Для определения температуры газа  $T_g$  решалось уравнение теплопроводности газа, которое формулировалось аналогично [5] с учетом различных механизмов объемного тепловыделения. Вклад относительно тяжелых атомов Хе в теплопроводность не учитывался.

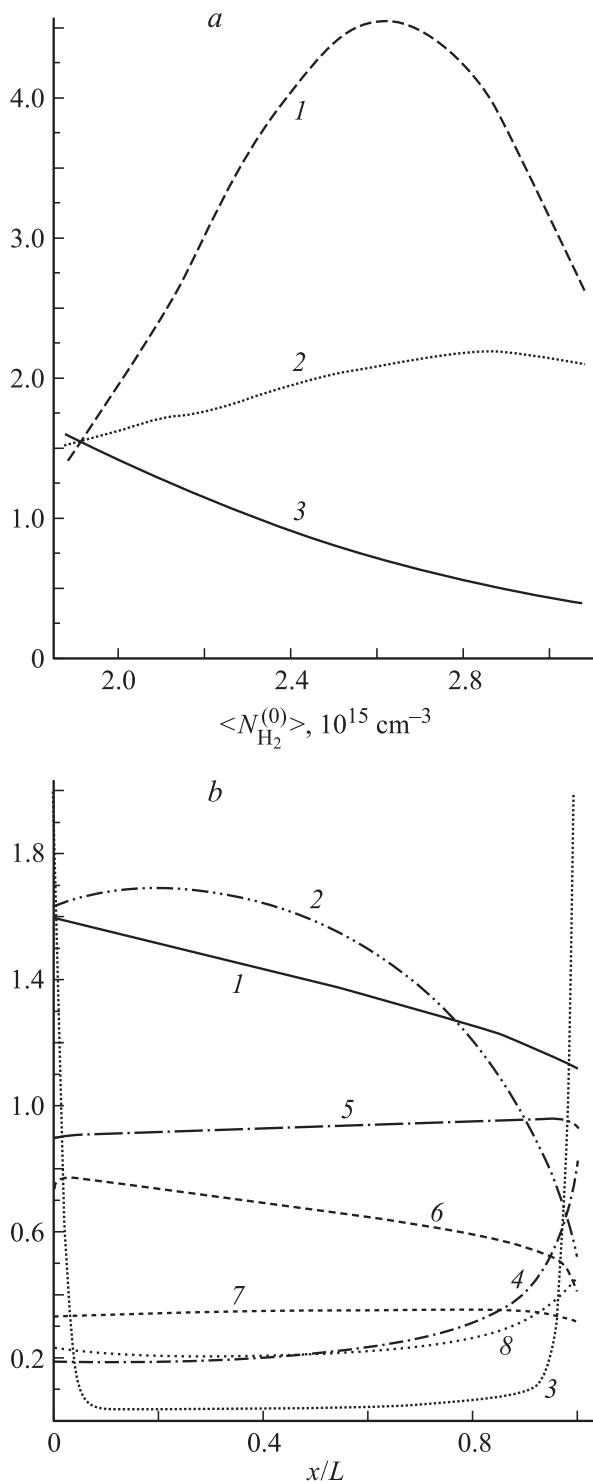
В данной работе рассматривался диапазон электронных температур в плазме  $T_e < 2$  eV. В этом случае приближенно можно учитывать лишь ионизацию более легкоионизирующейся примеси — ксенона. При рассмотрении кинетики ионизации Хе пренебрегалось влиянием водорода на скорость ионизации ксенона  $\Gamma_{\text{Xe}^+}$ . Как и в [6], коэффициент ионизации Хе  $K_i(T_e)$ , при степенях ионизации, превышающих  $10^{-2}$ , представлялся в виде экспоненциальной зависимости от  $1/T_e$ . Наряду со значением  $K_i(T_e)$ , определенным в [6], в расчетах использовалось также измененное значение коэффициента ионизации  $K_i(T_e)$ , рассчитанное с учетом работ [7–9], откуда заимствовались сечения соответственно возбуждения переходов  $6s[3/2]_2 \rightarrow 6s'[1/2]_1$ ,  $6s'[1/2]_0$ ,  $6p[1/2]_1$ ;  $6s[3/2]_1 \rightarrow 6s'[1/2]_1$ ,  $6s'[1/2]_0$ ,  $6p[1/2]_1$  и сечения ионизации из нижних возбужденных состояний, рассматриваемых в дискретном спектре. Рассчитанное таким образом значение  $K_i(T_e)$  оказалось в несколько раз меньше величины  $K_i(T_e)$ , определенной в [6]. Для решения системы дифференциальных уравнений, описывающих плазму в газоразрядном промежутке, использовался модифицированный нами для неравномерной сетки узлов метод Адамса 6-го порядка, который позволяет получить нужную точность и достаточно устойчив.

На рис. 1 и 2 в качестве примера приведены соответственно результаты расчетов двух модификаций НВ-разряда: НВ ксенон-водородного разряда (в качестве коэффициента ионизации Хе здесь использовано значение  $K_i(T_e)$ , полученное в настоящей работе) и НВ цезий-водородного разряда. Оба разряда оптимизированы по компонентному составу соответствующей смеси газов: Хе–H<sub>2</sub> (рис. 1) или Cs–H<sub>2</sub> (рис. 2). Оптимизация проведена при одинаковом полном давлении  $p_0$  плазмы в зазоре.

Рис. 1, *a* и 2, *a* иллюстрируют оптимизацию режимов горения разряда. Здесь по горизонтальной оси отложены расчетные полные концентрации молекулярного водорода  $\langle N_{\text{H}_2}^{(0)} \rangle = \langle N_{\text{H}_2} + 1/2 N_{\text{H}} \rangle = 1/L \int_0^L (N_{\text{H}_2}(x) + 1/2 N_{\text{H}}(x)) dx$ . По вертикальной оси отложены расчетные значения концентрации отрицательных ионов водорода  $N_{\text{H}^-}(L)$  на прианодной границе плазмы (кривая 1), значения концентрации ионов Н<sup>-</sup> в центре зазора  $N_{\text{H}^-}(L/2)$  (кривая 2), а также усредненная по газоразрядному промежутку полная расчетная концентрация атомов и ионов ксено-



**Рис. 1.** *a* — Зависимость  $N_{\text{H}^-}(L)$ ,  $N_{\text{H}^-}(L/2)$  и  $\langle N_{\text{Xe}}^{(0)} \rangle$  от  $\langle N_{\text{H}_2}^{(0)} \rangle$  для НВ Хе–H<sub>2</sub>-разряда при  $p_0 = 0.6$  Торр. 1 —  $N_{\text{H}^-}(L)$ ,  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ; 2 —  $N_{\text{H}^-}(L/2)$ ,  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ; 3 —  $\langle N_{\text{Xe}}^{(0)} \rangle$ ,  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . *b* — Распределение параметров НВ Хе–H<sub>2</sub>-разряда по зазору при  $p_0 = 0.6$  Торр.  $\langle N_{\text{Xe}}^{(0)} \rangle = 1.5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\langle N_{\text{H}_2}^{(0)} \rangle = 1.66 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\varphi_1 = 9 \text{ V}$ ,  $\varphi_2 = 2.09 \text{ V}$ ,  $U = 6.79 \text{ V}$ ,  $j = 8.83 \text{ A/cm}^2$ . 1 —  $T_e$ ; 2 —  $10T_g$ , eV; 3 —  $N_{\text{Xe}}$ ; 4 —  $N_{\text{H}_2}$ ,  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ; 5 —  $0.1\varphi$ , V; 6 —  $n_e$ ,  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ; 7 —  $N_{\text{H}}$ ,  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ; 8 —  $N_{\text{H}^-}$ ,  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ .



**Рис. 2.** *a* — Зависимость  $N_{H^-}(L)$ ,  $N_{H^-}(L/2)$  и  $\langle N_{Cs}^{(0)} \rangle$  от  $\langle N_{H_2}^{(0)} \rangle$  для НВ Cs-H<sub>2</sub>-разряда при  $p_0 = 0.6 \text{ Torr}$ . 1 —  $N_{H^-}(L)$ ; 2 —  $N_{H^-}(L/2)$ ,  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ; 3 —  $\langle N_{Cs}^{(0)} \rangle$ ,  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ . *b* — Распределение параметров НВ Cs-H<sub>2</sub>-разряда по зазору при  $p_0 = 0.6 \text{ Torr}$ .  $\langle N_{Cs}^{(0)} \rangle = 0.75 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\langle N_{H_2}^{(0)} \rangle = 2.6 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\varphi_1 = 9 \text{ V}$ ,  $\varphi_2 = 2.77 \text{ V}$ ,  $U = 6.62 \text{ V}$ ,  $j = 9 \text{ A/cm}^2$ . 1 —  $T_e$ ; 2 —  $10T_g$ , eV; 3 —  $N_{Cs}$ ,  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ; 4 —  $N_{H_2}$ ,  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ; 5 —  $0.1\varphi$ , V; 6 —  $n_e$ ,  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ; 7 —  $N_H$ ,  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ; 8 —  $N_{H^-}$ ,  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ .

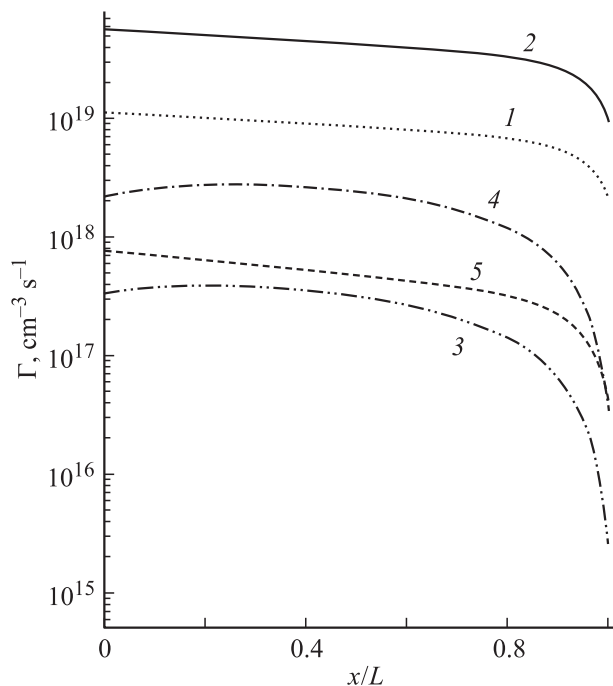
на  $\langle N_{Xe}^{(0)} \rangle = 1/L \int_0^L (N_{Xe}(x) + N_{Xe^+}(x)) dx$  (кривая 3 на рис. 1, *a*) и полная расчетная концентрация атомов и ионов цезия  $\langle N_{Cs}^{(0)} \rangle = 1/L \int_0^L (N_{Cs}(x) + N_{Cs^+}(x)) dx$  (кривая 3 на рис. 2, *a*). Оптимизированный режим горения разряда характеризуется таким набором величин  $\langle N_{H_2}^{(0)} \rangle$  и  $\langle N_{Xe}^{(0)} \rangle$  (рис. 1, *a*) или  $\langle N_{H_2}^{(0)} \rangle$  и  $\langle N_{Cs}^{(0)} \rangle$  (рис. 2, *a*), который соответствует достижению максимума на кривой 1. При этом в ксенон-водородном или цезий-водородном разряде достигаются максимальные значения концентрации отрицательных ионов водорода  $N_{H^-}(L)$  на прианодной границе квазинейтральной плазмы.

Оптимизация ксенон-водородного разряда проводилась также и при других значениях  $p_0$ , отличных от 0.6 Torr. Значение  $p_0 = 0.6 \text{ Torr}$ , использованное выше, примерно соответствует максимальной концентрации  $N_{H^-}(L)$ , которую можно получить, варьируя величину  $p_0$ , в НВ ксенон-водородном разряде при межэлектродном расстоянии  $L = 1 \text{ cm}$ . Отметим, что в ксенон-водородном разряде Хе по сравнению с водородом (атомарным [10] и молекулярным [11]) мало влияет на  $v-t$ -релаксацию молекул водорода, а следовательно, и на КФР молекул.

Как и должно быть, в оптимизированном разряде средняя концентрация ксенона  $\langle N_{Xe}^{(0)} \rangle$  в плазме существенно превышает среднюю концентрацию цезия  $\langle N_{Cs}^{(0)} \rangle$ . Замена ионизирующей примеси цезия на ксенон приводит также к увеличению температуры электронов  $T_e$  (ср. кривые 1 на рис. 1, *b* и 2, *b*, а также см. работы [12–15], посвященные исследованию НВ цезий-водородного разряда). Однако максимальные значения концентрации  $N_{H^-}(L)$ , полученные при заданной величине  $p_0$  в оптимизированных режимах двух типов отличаются не значительно. Например, в рассмотренном случае, при  $p_0 = 0.6 \text{ Torr}$ , в ксенон-водородном разряде оптимизированное значение  $N_{H^-}(L) \approx 2.25 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ , в то время как в цезий-водородном разряде —  $\approx 4.5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ .

Остановимся на той роли, которую играет ионизация водорода в процессе ионообразования в плазме ксенон-водородного НВ-разряда. Для этого сравним расчетные скорости генерации ионов водорода со скоростью ионизации ксенона  $\Gamma_{Xe^+}$ .

На рис. 3 построены расчетные распределения скорости ионизации ксенона по длине заполненного плазмой газоразрядного промежутка (кривые 1 и 2). Кривая 1 рассчитана в настоящей работе, 2 соответствует расчетной скорости ионизации ксенона  $\Gamma_{Xe^+} = K_i(T_e(x))n_e(x)N_{Xe}(x)$ , в которой использованы распределения по зазору величин  $T_e(x)$ ,  $n_e(x)$ ,  $N_{Xe}(x)$ , полученные в настоящей работе, и значение  $K_i(T_e)$ , рассчитанное в [6]. Различие между кривыми 1 и 2 соответствует различию между коэффициентами ионизации ксенона, использованными в настоящей работе и в [6], что вполне укладывается в рамки обычной погрешности в определении коэффициента ионизации и



**Рис. 3.** Распределение скорости ионизации ксенона (1, 2) и водорода (3–5) по зазору. Параметры разряда соответствуют рис. 2, b.

связано с разбросом используемых сечений возбуждения дискретных уровней электронным ударом (ср., например, с [16, с. 50]), где проиллюстрирован типичный разброс экспериментальных и расчетных значений коэффициента ионизации для цезиевой плазмы). Кривые 3 и 4 на рис. 3 представляют собой значения скорости ионизации  $\Gamma_{H^+}(x)$  атомарного водорода, рассчитанные аналогично кривой 2, т. е. с использованием полученных в настоящей работе распределений  $T_e(x)$ ,  $n_e(x)$ ,  $N_H(x)$ , и известных данных о коэффициенте ионизации атомарного водорода, рассчитанных в [17] для двух предельных значений вероятности  $w_{ph}$  выхода фотона из плазмы в серии Лаймана. Кривая 3 соответствует оптически полностью прозрачной плазме, когда для всех линий, включая серию Лаймана,  $w_{ph} = 1$ . Кривая 4 соответствует оптически полностью непрозрачной в серии Лаймана плазме, когда для всех линий этой серии  $w_{ph} = 0$ . Кривая 5 на рис. 3 отражает скорость ионизации  $\Gamma_{H_2^+}(x)$  молекулярного водорода, определенную аналогично кривым 3 и 4, т. е. с использованием рассчитанных в настоящей работе параметров плазмы:  $T_e(x)$ ,  $n_e(x)$ ,  $N_{H_2}(x)$  и известных теоретических значений коэффициентов ионизации молекулярного водорода [18]<sup>2</sup>.

Из представленных на рис. 3 данных видно, что, несмотря на имеющийся разброс значений коэффициента ионизации, в рассмотренном НВ ксенон-водородном

<sup>2</sup> Коэффициент ионизации молекулярного водорода рассчитан в [18] в приближении оптически прозрачной плазмы. Для слоя плазмы молекулярного водорода протяженностью  $L = 1$  см оптическая толщина плазмы в полосах Лаймана или Вернера  $\sim 0.1-0.2$  [19].

разряде скорость генерации ионов Хе явно превышает скорость ионизации  $H_2$ . Видно также, что в ионизацию водорода значительный вклад может вносить атомарный водород, обладающий достаточно сильным поглощением в серии Лаймана. Соответствующая скорость ионизации  $\Gamma_{H_2^+}(x)$  может приближаться к представленной на кривой 4.

Появление в плазме ксенон-водородного разряда сравнительно большой концентрации  $N_H$  атомарного водорода связано с предельной по величине вкладываемой мощности модификацией НВ-разряда, которая соответствует максимально допустимому катодному падению напряжения  $\phi_1 = E_d/e$ , и следовательно, максимальным значениям электронной температуры и степени диссоциации молекулярного водорода. При уменьшении катодного падения и температуры электронов  $T_e$  в плазме степень диссоциации молекулярного водорода довольно быстро уменьшается. При этом ионизация атомарного водорода перестает вносить заметный вклад в ионообразование в плазме. Одновременно с уменьшением  $T_e$  уменьшается и относительный вклад в ионообразование вследствие ионизации молекулярного водорода при уменьшении  $T_e$  по сравнению с коэффициентом ионизации ксенона (ср. рис. 3 в [18] с рис. 6 в [6]). Таким образом, в НВ ксенон-водородных разрядах рассматриваемого типа, когда  $\phi_1 \leq E_d/e$  и  $j_s \leq 10 \text{ A/cm}^2$ , основной вклад в ионообразование в плазме должна вносить ионизация ксенона.

В заключение отметим основные результаты.

1. В работе выполнено первое теоретическое рассмотрение НВ ксенон-водородного разряда, плазма которого образуется, в основном, путем ионизации примеси инертного газа — ксенона.

2. Проведена оптимизация параметров плазмы разряда и показано, что при оптимальном выборе концентраций компонент смеси водород-ксенон в плазме разряда может быть получена концентрация  $N_{H^-}$  ионов  $H^-$ , близкая к той, которая (при прочих равных условиях) достигается в НВ цезий-водородном разряде. Достигнутая в настоящей работе расчетная концентрация ионов  $H^-$  в прианодной области плазмы ксенон-водородного разряда  $N_{H^-}(L) \approx 2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  при  $L = 1$  см.

3. Рассчитанные режимы горения НВ ксенон-водородного разряда оптимальны также с точки зрения выбора напряжения горения разряда и величины катодного падения ( $\phi_1 \approx E_d/e$ ). При этом мощность, вносимая в плазму электронным катодным пучком, почти полностью трансформируется в энергию тепловых электронов [20], а электронная температура в плазме ( $T_e \approx 1-2 \text{ eV}$ ) достаточна для эффективной ионизации газа и достижения почти максимальных констант ДП.

Отметим также, что при  $T_e \approx (1-2) \text{ eV}$  достигается максимум константы скорости  $e-v$ -обмена ( $v = 0 \Leftrightarrow v = 1$ ) для молекулы  $H_2$  (см., например, [21]). Это приводит к интенсивной колебательной накачке

молекул  $H_2$ , несмотря на относительно большую концентрацию  $N_H$  атомарного водорода.<sup>3</sup>

Авторы благодарны В.Е. Балакину за предложение темы исследования и поддержку работы.

## Список литературы

- [1] *Бакшт Ф.Г., Иванов В.Г.* // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. Вып. 11. С. 672–675.
- [2] *Bacal M., Hamilton G.W.* // Phys. Rev. Lett. 1979. Vol. 42. N 23. P. 1538–1540.
- [3] *Hiskes J.R.* // J. Appl. Phys. 1980. Vol. 51. N 9. P. 4592–4594.
- [4] *Бакшт Ф.Г., Елизаров Л.И., Иванов В.Г.* // Физика плазмы. 1990. Т. 16. № 7. С. 854–861.
- [5] *Бакшт Ф.Г., Елизаров Л.И., Иванов В.Г., Юрьев В.Г.* // Физика плазмы. 1988. Т. 14. № 1. С. 91–97.
- [6] *Бакшт Ф.Г., Иванов В.Г.* // ЖТФ. 1978. Т. 48. Вып. 4. С. 688–699.
- [7] *Zeman V., Bartschat K., Norew C., Mc-Conkey J.W.* // Phys. Rev. A. 1998. Vol. 58. N 2. P. 1275–1281.
- [8] *Fons J.T., Lin C.C., Mc-Conkey J.W.* // Phys. Rev. A. 1998. Vol. 58. N 6. P. 4603–4615.
- [9] *Erwin D.E., Kunc J.A.* // Phys. Rev. A. 2004. Vol. 70. N 2. P. 022705(1–6).
- [10] *Gorse C., Capitelli M., Bacal M., Bretagne J., Laganà A.* // Chem. Phys. 1987. Vol. 117. P. 177–195.
- [11] *Dove J.E., Teitelbaum H.* // Chem. Phys. 1974. Vol. 6. P. 431–444.
- [12] *Бакшт Ф.Г., Иванов В.Г., Коньков С.И., Школьник С.М.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 8. С. 17–22.
- [13] *Baksht F.G., Ivanov V.G., Kon'kov S.I., Shkol'nik S.M., and Bacal M.* // J. Phys. D. Appl. Phys. 2003. Vol. 36. N 2. P. 122–128.
- [14] *Бакшт Ф.Г., Елизаров Л.И., Иванов В.Г., Коньков С.И., Митрофанов Н.К., Школьник С.М.* // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 3. С. 256–260.
- [15] *Бакшт Ф.Г., Иванов В.Г.* // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 6. С. 572–576.
- [16] Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма. Под ред. Б.Я. Мойжеса и Г.Е. Пикуса. М.: Наука, 1973. 480 с.
- [17] *Johnson L.C., Hinnov E.* // JQSRT. 1973. Vol. 13. P. 333–358.
- [18] *Sawada K., Fujimoto T.* // J. Appl. Phys. 1995. Vol. 78. N 5. P. 2913–2924.
- [19] *Chan W.F., Cooper G., Brion C.E.* // Chem. Phys. 1992. Vol. 168. P. 375–388.
- [20] *Бакшт Ф.Г., Иванов В.Г.* // Физика плазмы. 1986. Т. 12. № 3. С. 286–293.
- [21] *Janev R.K., Langer W.D., Evans K.Jr., Post D.E.Jr.* Elementary Processes in Hydrogen–Helium Plasmas. Springer-Verlag, 1987.
- [22] *Lepp S., Shull J.M.* // Astrophysical J. 1983. Vol. 270. N 2. Pt 1. P. 578–582.

<sup>3</sup> Например, при параметрах плазмы, представленных на рис. 1, *b*, частота переходов  $v = 1 \rightarrow v = 0$  в молекуле  $H_2$  вследствие  $e-v$ -обмена на порядок превышает частоту этого перехода вследствие  $v-t$ -обмена с атомарным водородом [10,22].