

04

Генерация ионов H^- в низковольтном ксенон-водородном разряде

© Ф.Г. Бакшт, В.Г. Иванов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
E-mail: baksh@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 28 июля 2006 г.

Теоретически показано, что в низковольтном ксенон-водородном разряде при оптимальных значениях концентрации водорода и ксенона (порядка 10^{15} cm^{-3}), а также при оптимальном полном давлении плазмы (порядка 1 Torr) может быть достигнута достаточно высокая (порядка нескольких единиц $\times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$) концентрация отрицательных ионов водорода в плазме разряда. Необходимые значения плотности тока эмиссии катода составляют величину порядка 10 A/cm^2 .

PACS: 52.80.-s

1. Для создания объемно-плазменного источника (ОПИ) ионов H^- было предложено использовать различные модификации низковольтного (НВ) разряда в молекулярном водороде [1,2]. В ОПИ ионы H^- образуются в плазме вследствие диссоциативного прилипания (ДП) разогретых до температуры $T_e \approx 1-2 \text{ eV}$ [3,4] тепловых электронов к колебательно-возбужденным ($v \approx 4-8$) [5,6] молекулам H_2 в основном электронно-колебательном состоянии $X^1\Sigma_g^+(v)$. Использование низковольтного разряда в молекулярном водороде для объемно-плазменной генерации ионов H^- перспективно потому, что разряд может гореть при сравнительно малом катодном падении потенциала $\phi_1 \leq E_d/e$, где $E_d \approx 8.8 \text{ eV}$ — порог прямой диссоциации молекул H_2 электронным ударом из основного электронно-колебательного состояния $X^1\Sigma_g^+(0)$. В результате в таком разряде отсутствуют неравновесные быстрые электроны катодного пучка с энергией $E > E_d$, достаточной для прямой диссоциации молекул H_2 . Существенно также, что низковольтные ($E \approx e\phi_1$) катодные электроны за счет парных кулоновских столкновений интенсивно нагревают захваченные в потенциальную яму тепловые электроны плазмы до требуемой электронной температуры $T_e \approx 1-2 \text{ eV}$. Теория показывает, что при характерных параметрах НВ

разряда энергия катодного пучка вследствие парных столкновений почти целиком расходуется на нагрев тепловых электронов [7].

Теоретическое исследование показывает, однако, что в чистом водороде осуществить требуемый НВ режим горения разряда с $\phi_1 \leq E_d/e$ и достаточно большой концентрацией ($n_e \sim 10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$) довольно трудно. Это связано как со сравнительно малой скоростью ионизации молекулярного [8] и атомарного [9] водорода, так и с большой подвижностью легких водородных ионов, т.е. с малым временем удержания положительных ионов водорода в плазме. Поэтому наиболее перспективными оказываются режимы горения НВ разряда в водороде с добавлением сравнительно легко ионизирующейся, желательной, тяжелой примеси, ионы которой обладают достаточно большим сечением рассеяния в газе. В качестве такой примеси первоначально рассматривался цезий. Созданная теория НВ цезий-водородного разряда [1,6,10] сравнивалась с экспериментом в ряде режимов горения (см., например, [5,11,12]). В результате было показано достаточно хорошее согласие между расчетными и экспериментальными данными. Однако в ряде случаев использование цезия в качестве примеси в разряде является нежелательным. Поэтому встает вопрос о замене цезия другой ионизирующейся примесью.

В настоящем сообщении излагаются результаты расчета НВ разряда, горящего в смеси водорода с инертным газом — ксеноном. При этом в области интересующих нас катодных падений $\phi_1 \leq E_d/e$ условия горения НВ ксенон-водородного разряда таковы, что плазма создается практически только за счет ионизации ксенона.

2. Цель настоящего сообщения в том, чтобы проиллюстрировать возможность достижения большой концентрации ионов H^- в плазме НВ ксенон-водородного разряда. Работа выполнена по предложению Физико-технического центра ФИАН им. П.Н. Лебедева (г. Протвино). В процессе выполнения работы были произведены расчеты состояния плазмы НВ ксенон-водородного разряда и путем подбора ряда параметров разряда: $\langle N_{\text{H}_2}^{(0)} \rangle$, $\langle N_{\text{Xe}}^{(0)} \rangle$ и p_0 , была произведена оптимизация параметров разряда с целью достижения наибольшей концентрации $N_{\text{H}^-}(L)$ отрицательных ионов водорода на границе плазмы с анодом ($x = L$). Из этой области ионы H^- могут извлекаться из разряда, например сквозь отверстие в аноде. Здесь $\langle N_{\text{H}_2}^{(0)} \rangle = \langle N_{\text{H}_2}(x) + N_{\text{H}}(x)/2 \rangle$, $\langle N_{\text{Xe}}^{(0)} \rangle$ и p_0 — соответственно усредненная по газоразрядному промежутку полная концентрация введенного в разряд молекулярного водорода;

усредненная по длине промежутка концентрация ксенона и полное давление плазмы, постоянное по длине газоразрядного промежутка. Последняя величина, давление p_0 , включает в себя давление как нейтральных, так и заряженных компонент плазмы.

Для описания ксенон-водородного разряда использовалась система уравнений и граничных условий, аналогичная той, которая применялась для расчета НВ цезий-водородного разряда [10] с той разницей, что ионизирующая добавка, цезий, была заменена на ксенон. Для определения скорости ионизации ксенона использовались результаты [2]. Для контроля малости вкладов ионов водорода H^+ , H_2^+ и H_3^+ в полную концентрацию заряженных частиц плазмы дополнительно (самосогласованно с остальными уравнениями) решались уравнения движения и непрерывности для ионов водорода. В уравнениях непрерывности учитывалась генерация ионов H_2^+ и H^+ вследствие ионизации молекулярного [8] и атомарного [9] водорода, конверсия ионов H_2^+ в ионы H_3^+ [13], а также диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов водорода [14,15] и взаимная нейтрализация положительных ионов водорода с ионами H^- [16]. Полученная в результате расчета концентрация положительных ионов водорода была на порядок и более меньше, чем концентрация ионов He^+ .

3. Остановимся на основных результатах расчетов. Расчеты показывают, что электроны плазмы разогреваются до температуры $T_e \approx 1.4-1.9$ eV, достаточно высокой для интенсивной колебательной накачки молекул H_2 : максимум константы скорости возбуждения электронным ударом основного колебательного перехода $v = 0 \rightarrow v = 1$ молекулы H_2 соответствует $T_e \approx 2$ eV [17]. Кроме того, достигнутые в разряде значения T_e близки к значениям электронной температуры, соответствующей максимумам констант ДП тепловых электронов [4] к колебательно-возбужденным молекулам H_2 в той части колебательного спектра молекулы ($v = 3-8$), которая вносит основной вклад в объемную генерацию ионов H^- в плазме.

Концентрация отрицательных ионов водорода $N_{H^-}(L)$, полученная в расчете, изображена на рис. 1 (кривая 1) как функция тока эмиссии j_s катода. Предполагается, что нужное значение тока эмиссии обеспечивается катодом из гексаборида лантана. На рис. 1 приведены также концентрация $n_e(L)$ и температура $T_e(L)$ электронов на прианодной границе плазмы (кривые 2 и 3). Поскольку при каждом заданном значении тока эмиссии катода j_s проводилась оптимизация разряда

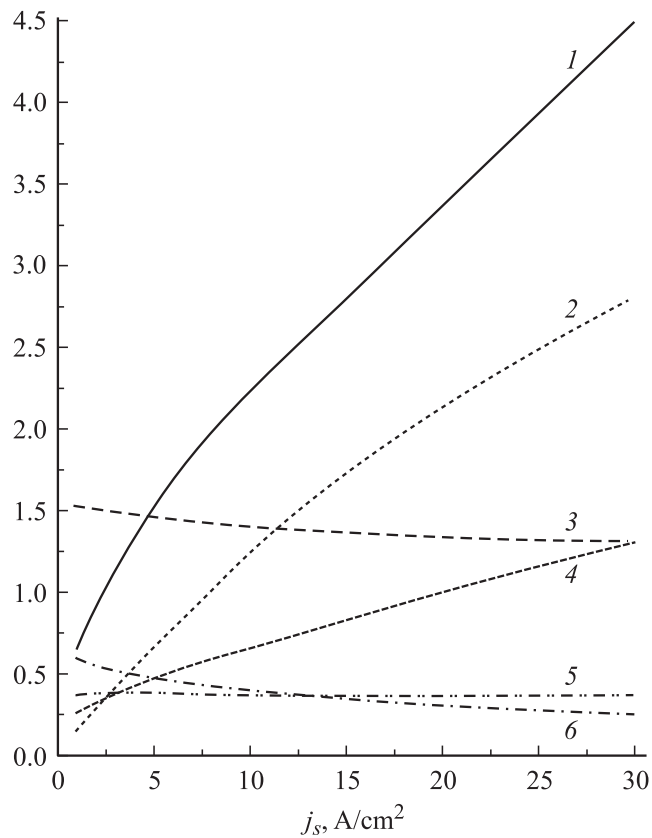


Рис. 1. Зависимость параметров плазмы низковольтного Xe/H₂ разряда в оптимальных режимах от тока эмиссии катода, $L = 1$ см, $T_1 = 1900$ К, $T_2 = 600$ К, $\phi_1 = 9$ В: 1 — $N_{H^-}(L)$, 10^{12} см⁻³; 2 — $n_e(L)$, 10^{13} см⁻³; 3 — $T_e(L)$, eV; 4 — p_0 , Torr; 5 — $\langle p_{H_2} + p_H \rangle / p_0$; 6 — $\langle p_{Xe} \rangle / p_0$.

по параметрам $\langle N_{H_2}^{(0)} \rangle$, $\langle N_{Xe}^{(0)} \rangle$ и p_0 , то указанные параметры разряда меняются вместе с величиной тока j_s . Отметим, что в разрядах рассматриваемого типа, вследствие малости ионного тока и обратного электронного тока из плазмы на катод, полный ток разряда $j \approx j_s$. Значение полного давления плазмы p_0 и усредненные по длине газо-

разрядного промежутка парциальные давления водорода $\langle p_{H_2} + p_H \rangle$ и ксенона $\langle p_{Xe} \rangle$ приведены в относительных единицах (по отношению к p_0) на кривых 4–6.

Расчет показывает, что при увеличении тока эмиссии катода j_s за счет вложения большей мощности в разряд удастся разогреть плазму более высокого давления p_0 до нужных значений электронной температуры T_e . При этом увеличению j_s сопутствуют увеличение как концентрации N_{H_2} молекулярного водорода, так и концентрации n_e электронов плазмы. Это приводит к увеличению скорости ДП и концентрации N_{H^-} отрицательных ионов водорода в плазме.

На рис. 2 приведены нормированные на единицу колебательные функции распределения f_v молекул H_2 для одного из оптимизированных режимов горения НВ ксенон-водородного разряда ($j_s = 10 \text{ A/cm}^2$). Видно, что колебательные функции распределения, рассчитанные в оптимизированном НВ ксенон-водородном разряде, довольно близки к колебательной функции распределения в НВ цезий-водородном разряде [6].

Концентрация n_e электронов, достигаемая за счет ионизации Хе в ксенон-водородном разряде, сравнительно мало отличается от величины n_e , характерной для цезий-водородного разряда (ср. рис. 1, *b* и 2, *b* в [2]). Заметное отличие наблюдается лишь в величине электронной температуры T_e (она, естественно, выше в ксенон-водородном разряде) и особенно в концентрации самой ионизирующейся примеси: концентрация Хе в оптимизированном ксенон-водородном разряде более чем на порядок превышает суммарную концентрацию нейтрального и ионизованного Cs. Расчетные концентрации отрицательных ионов водорода $N_{H^-}(L)$, получающиеся в разрядах обоого типа, сравнительно мало отличаются друг от друга. Например, при $j_s = 10 \text{ A/cm}^2$ концентрация $N_{H^-}(L)$ в ксенон-водородном лишь примерно вдвое меньше соответствующей величины в цезий-водородном разряде. Для практического применения наибольший интерес, по-видимому, будут представлять режимы горения с умеренной плотностью тока эмиссии $j_s \leq 10 \text{ A/cm}^2$. Отметим, что для расчетов оптимизированных режимов горения ксенон-водородного разряда при больших значениях тока эмиссии катода $j_s > 15\text{--}20 \text{ A/cm}^2$ в дальнейшем могут потребоваться уточнения, что связано с возникновением при таких j_s значительных градиентов ряда параметров плазмы в прианодной области.

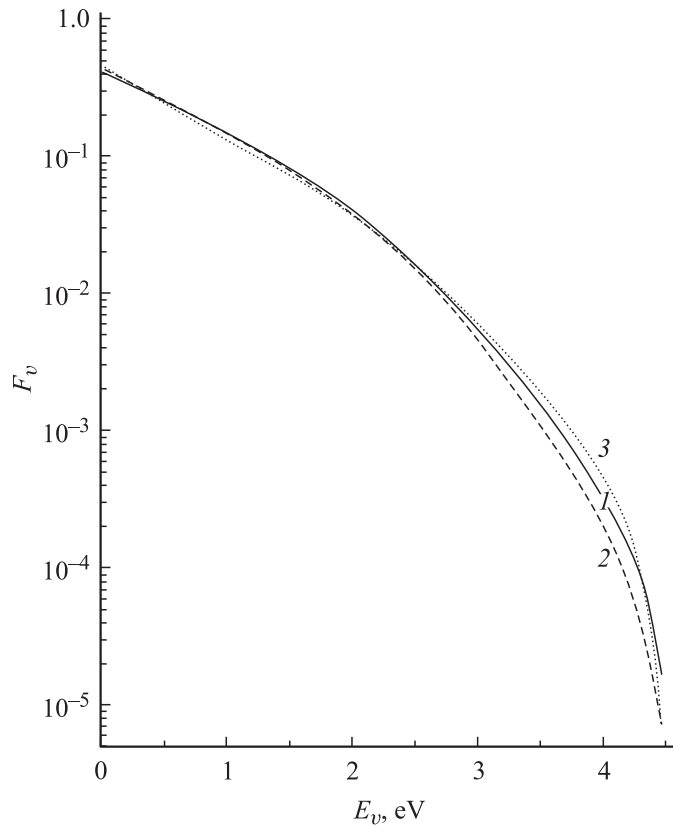


Рис. 2. Функция распределения молекул водорода по колебательным уровням в оптимальном режиме горения разряда. $j_s = 10 \text{ A/cm}^2$, $p_0 = 0.6 \text{ Torr}$, $\phi_1 = 9 \text{ V}$, $\phi_2 = 2.09 \text{ eV}$, $\langle N_{\text{Xe}}^{(0)} \rangle = 1.54 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\langle N_{\text{H}_2}^{(0)} \rangle = 1.66 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $U = 6.79 \text{ V}$, $j = 8.9 \text{ A/cm}^2$. 1 — $x/L = 0.05$; 2 — $x/L = 0.5$; 3 — $x/L = 0.95$.

Таким образом, в НВ ксенон-водородном разряде при оптимальном соотношении между концентрацией водорода и ксенона может быть достигнута достаточно высокая (\sim нескольких единиц $\times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$) концентрация N_{H^-} отрицательных ионов водорода.

Авторы благодарны В.Е. Балакину за поддержку работы.

Список литературы

- [1] Бакуит Ф.Г., Иванов В.Г. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 11. С. 672–675.
- [2] Бакуит Ф.Г., Иванов В.Г. // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 7. С. 124–128.
- [3] Wadehra J.N. // Phys. Rev. A. 1984. V. 29. N 1. P. 106–111.
- [4] Skinner A.D., Bruneteau A.M., Berlemont P., Leroy R., Bacal M. // Phys. Rev. E. 1993. V. 48. N 3. P. 2122–2135.
- [5] Baksht F.G., Ivanov V.G., Konkov S.I., Shkol'nik S.M., Bacal M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2003. V. 36. P. 122–128.
- [6] Бакуит Ф.Г., Иванов В.Г. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 6. С. 572–576.
- [7] Бакуит Ф.Г., Иванов В.Г. // Физика плазмы. 1986. Т. 12. № 3. С. 286–293.
- [8] Sawada K., Fujimoto T. // J. Appl. Phys. 1995. V. 78. N 5. P. 2913–2924.
- [9] Johnson L.C., Hinnov E. // JQSRT. 1973. V. 8. P. 333–358.
- [10] Бакуит Ф.Г., Елизаров Л.И., Иванов В.Г. // Физика плазмы. 1990. Т. 16. № 7. С. 854–861.
- [11] Бакуит Ф.Г., Иванов В.Г., Коньков С.И., Школьник С.М. // ЖТФ. 2001. Т. 71. В. 8. С. 17–22.
- [12] Бакуит 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.
- [13] Shao J.D., Ng C.Y. // J. Chem. Phys. 1986. V. 84. N 8. P. 4317–4326.
- [14] Larrson M. et al. // Physica Scripta. 1998. V. 51. P. 354–358.
- [15] Jensen M.J. et al. // Phys. Rev. A. 2000. V. 63. N 5. P. 0052701.
- [16] Matvejev A.A., Silakov V.P. // Plasma Sources Sci. Technol. 1995. V. 4. P. 606–617.
- [17] Janev R.K., Langer W.D., Evans K.Jr., Post D.E. Elementary Processes in Hydrogen-Helium Plasma. Springer-Verlag, 1987.