

04:12

## Зависимость кинетики распада плазмы низковольтного цезий-водородного разряда от материала электродов

© А.Г. Никитин, С.М. Школьник

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 1 декабря 1995 г.)

1. Выполненные некоторое время назад расчеты [1,2] показали, что в низковольтном (НВ) разряде в смеси цезия с водородом ( $\text{Cs-H}_2$ ) могут быть реализованы условия для создания в объеме высокой концентрации отрицательных ионов водорода ( $\text{H}^-$ ). Это открывает перспективу использования такого разряда для создания эффективных источников  $\text{H}^-$ . Основным механизмом образования  $\text{H}^-$  является диссоциативное прилипание электронов к колебательно-возбужденным молекулам водорода  $\text{H}_2^*$  [3]. Оптимальные для диссоциативного прилипания значения электронной температуры  $T_e \sim 1 \text{ эВ}$  [4].

Первые экспериментальные исследования, выполненные в диоде с подогревным катодом и плоскопараллельной геометрией электродов, подтвердили возможность получения в НВ  $\text{Cs-H}_2$  разряде плазмы с параметрами, необходимыми для генерации  $\text{H}^-$  и, в частности, нужного уровня температуры электронов [5,6]. Измерения колебательной функции распределения молекул  $\text{H}_2^*$  в разряде представляют большие трудности и не осуществлены до настоящего времени. Поэтому весьма интересны эксперименты, в которых возможно наблюдение эффектов, связанных с наличием  $\text{H}_2^*$  в НВ  $\text{Cs-H}_2$  разряде.

2. Один из таких эффектов был обнаружен при исследовании послесвечения разряда [7]. В течение длительного времени после выключения тока в межэлектродном промежутке сохраняется плазма достаточно высокой концентрации с холодными электронами (рис. 1; на всех рисунках  $t = 0$  в момент выключения тока). Из результатов, приведенных на рис. 1,а, следует, что независимо от уровня  $T_e$  в разряде за время  $t \geq 10^{-5}$  с после отключения тока  $T_e$  падает до величин, близких к величине температуры эмиттера. Наблюдаемый уровень концентрации плазмы в послесвечении, очевидно, не может поддерживаться за счет ионизации атомов Cs столь холодными электронами. Эксперименты показывают, что концентрация в послесвечении, которая в отличие от температуры определяется именно параметрами разряда, сильно зависит от  $T_e$  разрядной плазмы (рис. 1,б). Существование плазмы в послесвечении поддерживается объемной ионизацией атомов Cs долгоживущими колебательно-возбужденными молекулами водорода [7] аналогично тому, что имеет место в смеси азота с щелочными металлами [8]. На

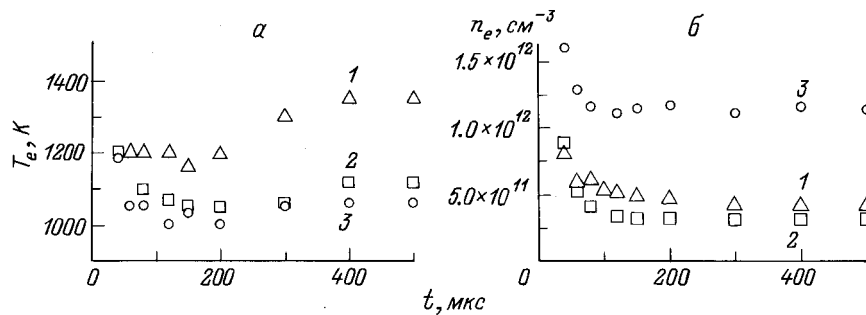
температуру электронов в послесвечении наличие в объеме  $\text{H}_2^*$  практически не влияет. В некоторых режимах наблюдалось лишь незначительное повышение  $T_e$  на поздних стадиях послесвечения (например, 1 на рис. 1,а).

Исследования также показали [7,9], что параметрами, сильно влияющими на концентрацию плазмы в послесвечении, являются давление водорода  $p_{\text{H}_2}$  и длительность разрядного импульса  $\tau$ . Настоящая работа посвящена описанию обнаруженной в последнее время сильной зависимости картины послесвечения от материала электродов.

3. Эксперименты по исследованию распада плазмы НВ  $\text{Cs-H}_2$  разряда проводились в двух полностью аналогичных по конструкции приборах. Здесь укажем лишь основные характеристики; подробное описание конструкции прибора, экспериментальной установки и техники измерений можно найти в [5].

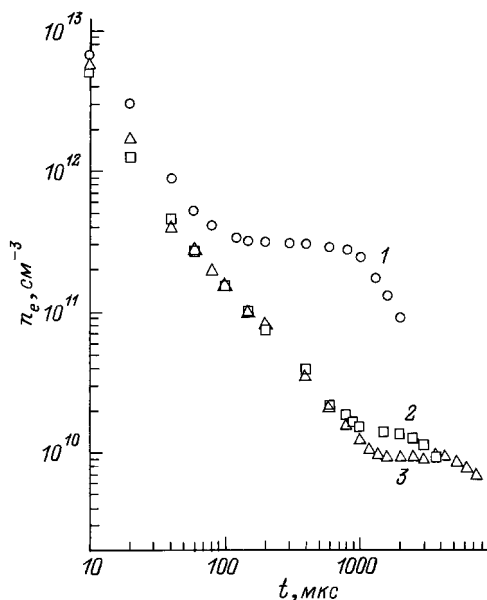
Приборы представляли из себя смонтированные в стеклянной колбе диоды с плоскопараллельной геометрией электродов (торцы цилиндров диаметром 12 мм, боковая поверхность которых была защищена керамикой  $\text{BeO}$ ). Катод с косвенным подогревом. Сквозь отверстие в центре анода вводился цилиндрический зонд диаметром 0.1 мм и длиной 2 мм, ориентированный параллельно электродам. Межэлектродный промежуток  $L = 3$  мм. Зонд располагался вблизи центра межэлектродного промежутка. В первом приборе катод был изготовлен из платины, а анод — из никеля ( $\text{Pt-Ni}$ ). Во втором приборе катод — монокристалл вольфрама (грань [110]), анод — медь  $M1$  ( $\text{W-Cu}$ ). Разряд питался прямоугольными импульсами тока варьируемой длительности ( $\tau \leq 2$  мс). Были приняты меры для быстрого гашения разряда (длительность заднего фронта не превышала 5 мкс). Частота следования импульсов составляла 10–25 Гц.

Исследованный диапазон параметров: напряжение разряда  $U \leq 8$  В, ток разряда  $I \leq 5$  А, температура катода  $850 \leq T_k \leq 1250$  К, давление водорода  $0.1 \leq p_{\text{H}_2} \leq 5$  Тор, концентрация атомов цезия  $5 \cdot 10^{13} \leq N_{\text{Cs}} \leq 3 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>. Напряжение, при котором поджигался разряд  $U_{\text{п}}$ , зависело от  $N_{\text{Cs}}$ ,  $p_{\text{H}_2}$  и  $T_k$ . Характерное значение  $U_{\text{п}} \approx 3-5$  В. При увеличении напряжения  $U$  до  $U - U_{\text{п}} \geq 1$  В, в большинстве режимов вольт-амперная характеристика насыщалась.



**Рис. 1.** Зависимость температуры (а) и концентрации электронов (б) от времени в распадающейся плазме. Катод — платина, анод — никель.  $p_{H_2} = 0.5 \text{ Тор}$ , длительность разрядного импульса  $\tau = 500 \text{ мкс}$ . Параметры разряда: 1 —  $N_{Cs} \approx 1.7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $T_k = 1230 \text{ К}$ ,  $U = 3.9 \text{ В}$ ,  $I = 1.0 \text{ А}$ ,  $n_e = 2.3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $T_{e0} = 7000 \text{ К}$ ; 2 —  $N_{Cs} \approx 1.7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $T_k = 1160 \text{ К}$ ,  $U = 3.5 \text{ В}$ ,  $I = 0.9 \text{ А}$ ,  $n_e = 2.1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $T_{e0} = 6300 \text{ К}$ ; 3 —  $N_{Cs} \approx 1.7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $T_k = 1160 \text{ К}$ ,  $U = 6.1 \text{ В}$ ,  $I = 2.0 \text{ А}$ ,  $n_e = 2.9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $T_{e0} = 7600 \text{ К}$ .

4. Характерный результат сравнения кривых распада плазмы НВ Cs–H<sub>2</sub> разряда в приборах с электродами из различных материалов приведен на рис. 2. Для корректного анализа влияния материала электродов на кинетику послесвечения были подобраны режимы, соответствующие примерно одинаковым условиям в разряде: одни и те же давления водорода и длительности разрядного импульса, близкие значения электронной температуры и концентрации.



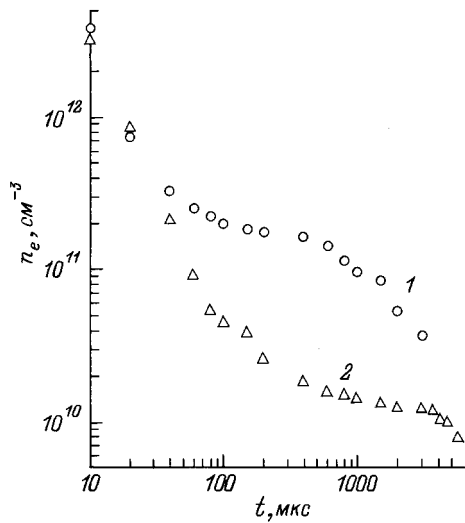
**Рис. 2.** Зависимость концентрации электронов от времени в распадающейся плазме.  $p_{H_2} = 0.5 \text{ Тор}$ ,  $\tau = 500 \text{ мкс}$ ; 1 — катод — платина, анод — никель,  $N_{Cs} \approx 1.7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $T_k = 1160 \text{ К}$ ,  $U = 4 \text{ В}$ ,  $I = 0.9 \text{ А}$ ,  $n_e = 2.1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $T_{e0} = 6300 \text{ К}$ ; 2 — катод — вольфрам, анод — медь,  $N_{Cs} \approx 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $T_k = 1170 \text{ К}$ ,  $U = 7.8 \text{ В}$ ,  $I = 1.1 \text{ А}$ ,  $n_e = 5.3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $T_{e0} = 6600 \text{ К}$ ; 3 — катод — вольфрам, анод — медь,  $N_{Cs} \approx 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $T_k = 1150 \text{ К}$ ,  $U = 5.5 \text{ В}$ ,  $I = 1.2 \text{ А}$ ,  $n_e = 5.1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $T_{e0} = 6500 \text{ К}$ .

Видно, что в обоих приборах распад разрядной плазмы, поначалу определяемый объемной трехчастичной рекомбинацией ионов Cs<sup>+</sup> с остывшими электронами и деионизацией на электродах, постепенно замедляется. На кривых появляется достаточно выраженное "плато". Это может быть объяснено лишь наличием источника ионообразования, интенсивность которого и определяет уровень плато. Как указано выше, ионизация атомов Cs происходит за счет энергии присутствующих в объеме колебательно-возбужденных молекул водорода. Результаты, приведенные на рис. 2, показывают, что эффективность источника ионообразования сильно зависит от материала электродов: концентрация плазмы на "плато" при прочих равных условиях изменяется более, чем на порядок величины.

5. Детальное исследование распада плазмы разряда с электродами (W–Cu) показало, что хотя концентрация долгоживущей плазмы в сопоставимых режимах значительно ниже, основные закономерности, обнаруженные при изучении распада с электродами (Pt–Ni) [7,9], сохраняются.

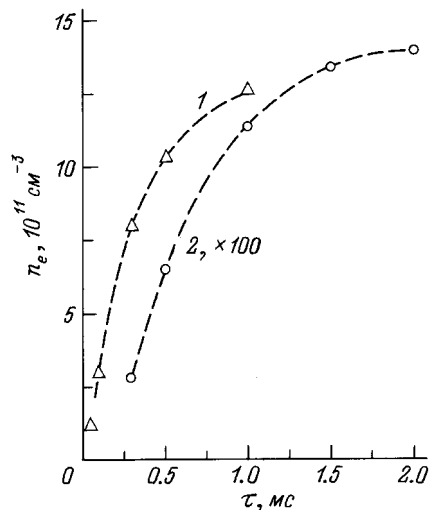
В экспериментах с электродами (Pt–Ni) на кривых  $n_e(t)$  был зарегистрирован подъем плато с уменьшением давления водорода. Зависимость от давления водорода, обнаруженная при исследовании разряда с электродами (W–Cu), показана на рис. 3. Видно, что имеет место та же закономерность — увеличения концентрации плазмы в послесвечении с уменьшением  $p_{H_2}$ .

На рис. 4 представлены зависимости уровня плато в разрядах с электродами из различных материалов от длительности разрядного импульса. Концентрация плазмы в послесвечении в обоих случаях вначале значительно возрастает при увеличении  $\tau$ . Затем наблюдается тенденция к насыщению. Характерное значение  $\tau$ , необходимое для установления квазистационарной картины распада,  $\tau^* \sim 1 \text{ мс}$ .



**Рис. 3.** Зависимость концентрации электронов от времени в распадающейся плазме. Катод — вольфрам, анод — медь,  $\tau = 1.5$  мс; 1 —  $p_{H_2} = 0.2$  Тор,  $N_{Cs} \approx 1.5 \cdot 10^{14}$  см $^{-3}$ ,  $T_k = 1000$  К,  $U = 4$  В,  $I = 0.7$  А,  $n_e = 2.8 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ ,  $T_{e0} = 5500$  К; 2 —  $p_{H_2} = 2$  Тор,  $N_{Cs} \approx 1.5 \cdot 10^{14}$  см $^{-3}$ ,  $T_k = 1000$  К,  $U = 6.6$  В,  $I = 1.5$  А,  $n_e = 2.0 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ ,  $T_{e0} = 5600$  К.

6. Полученные результаты показали, что материал электродов оказывает значительное влияние на процессы в послесвечении НВ Cs-H<sub>2</sub> разряда. Одной из причин столь существенного уменьшения концентрации плазмы в послесвечении при изменении материалов электродов может быть уменьшение



**Рис. 4.** Зависимость концентрации электронов на квазистационарной стадии распада от длительности разрядного импульса.  $p_{H_2} = 0.5$  Тор; 1 — платиновый катод и никелевый анод,  $U = 5.8$  В,  $I = 3.7$  А,  $n_e = 2.3 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ ,  $T_{e0} = 7300$  К,  $N_{Cs} \approx 10^{14}$  см $^{-3}$ ,  $T_k = 1000$  К; 2 — вольфрамовый катод и медный анод,  $U = 5$  В,  $I = 0.6$  А,  $n_e = 4.5 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ ,  $T_{e0} = 5800$  К,  $N_{Cs} \approx 1.7 \cdot 10^{14}$  см $^{-3}$ ,  $T_k = 1000$  К.

коэффициента поверхностной рекомбинации атомов водорода в молекулу H<sub>2</sub>. Это приводит к соответствующему увеличению степени диссоциации водорода в исходном разряде и в начале послесвечения и может вызвать значительное обеднение колебательной функции распределения молекул H<sub>2</sub> в области больших энергий (см., например, [10]). Эти вопросы потребуют дальнейшего исследования применительно к конкретным условиям низковольтного цезий-водородного разряда.

Авторы благодарны Ф.Г. Бакшту, В.Г. Иванову за полезные обсуждения и Б.И. Циркелю и А.Е. Богусhevскому за помощь в работе.

Исследование, описанное в этой работе, стало возможно частично благодаря поддержке гранта № NTZ300 Международного научного фонда и Российского правительства, а также грантов Российского фонда фундаментальных исследований (№ 94-02-06370) и INTAS (№ 94-316).

**Список литературы**

- [1] Бакшт Ф.Г., Иванов В.Г. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. Вып. 11. С. 672–675.
- [2] Бакшт Ф.Г., Иванов В.Г. // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 2. С. 195–200.
- [3] Bacal M., Hamilton G.V. // Phys. Rev. Lett. 1979. Vol. 42. N 23. P. 1538.
- [4] Wadehra J.M. // Phys. Rev. A. 1984. Vol. 29. N 1. P. 106.
- [5] Бакшт Ф.Г., Дюжнев Г.А., Елизаров Л.И. и др. // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 9. С. 148–152.
- [6] Бакшт Ф.Г., Иванов В.Г., Костин А.А. и др. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 8. С. 186–190.
- [7] Бакшт Ф.Г., Дюжнев Г.А., Елизаров Л.И. и др. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 22. С. 39–43.
- [8] Haug R., Reppenecker G., Schmidt C. // Chem. Phys. 1974. Vol. 5. N 2. С. 255–264.
- [9] Бакшт Ф.Г., Иванов В.Г., Никитин А.Г., Школьник С.М. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. Вып. 22. С. 83–88.
- [10] Бакшт Ф.Г., Иванов В.Г. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 8. С. 1562–1568.