

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННО-КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ КИНЕТИКИ В РАСПАДАЮЩЕЙСЯ ЦЕЗИЙ-ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ

*Ф.Г.Бахит, Г.А.Дюжев, Л.И.Елизаров,
В.Г.Иванов, А.Г.Никитин, С.М.Школьник*

1. Интерес к низковольтному (НВ) Cs-H₂ разряду стимулируется перспективой его использования в качестве эффективного источника отрицательных ионов водорода. До сих пор основное внимание уделялось изучению стационарного Cs-H₂ разряда [1-4]. В настоящей работе излагаются результаты первого экспериментального и теоретического исследования распадающейся плазмы НВ Cs-H₂ разряда.

2. Измерения проводились в плазме послесвечения импульсного НВ Cs-H₂ разряда (длительность разрядного импульса 500 мкс, частота повторения 25 Гц). Разряд зажигался в диоде с плоскопараллельными электродами (Ø12 мм, межэлектродное расстояние $L = 3$ мм). Платиновый катод имел косвенный подогрев. Цилиндрический вольфрамовый зонд диаметром 100 мкм и длиной 2 мм, ориентированный параллельно электродам, располагался на оси разряда на расстоянии 1 мм от катода. Давление водорода на оси разряда на расстоянии 1 мм от катода. Давление водорода p_{H_2} измерялось с помощью лампы ПМТ-6, концентрация цезия N_{Cs}^0 определялась по измеряемому полному поглощению резонансной линии Cs при выключенном разряде. Исследовался диапазон $p_{H_2} = (0.1-3)$ Тор, $N_{Cs}^{(0)} = (3 \cdot 10^{13} - 3 \cdot 10^{14})$ см⁻³. Электронная температура T_e определялась по линейному участку полулогарифмической зондовой характеристики; электронная концентрация n_e — из величины электронного ток насыщения. Использование метода стробируемого интегрирования [5] позволяет проводить измерения с временным разрешением $\simeq 1$ мкс. Время выключения прямоугольного разрядного импульса тока не превышало 5 мкс.

3. Экспериментальные исследования показали, что в послесвечении НВ Cs-H₂ разряда T_e уменьшается за время $\sim (20-30)$ мкс до величины газовой температуры T , близкой к температуре катода T_k . При изменении внешних параметров скорость уменьшения T_e меняется незначительно.

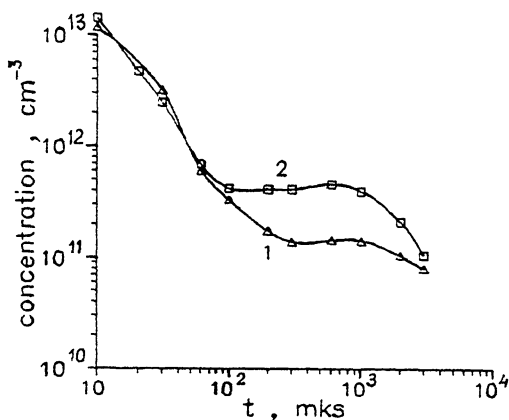


Рис. 1. Зависимость концентрации электронов от времени в распадающейся плазме.

1 — $p_{\text{H}_2} = 3 \text{ Тор}$, $N_{\text{Cs}}^{(0)} \approx 2.3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $T_k = 1170 \text{ К}$, $U_0 = 7.9 \text{ В}$, $I_0 = 3.4 \text{ А}$,
 $n_{e0} = 2.3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $T_{e0} = 7800 \text{ К}$;
 2 — $p_{\text{H}_2} = 1 \text{ Тор}$, $N_{\text{Cs}}^{(0)} \approx 2.1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $k = 1150 \text{ К}$, $U_0 = 7.6 \text{ В}$, $I_0 = 3.3 \text{ А}$,
 $n_{e0} = 2.3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $T_{e0} = 8550 \text{ К}$.

Характер изменения электронной концентрации иллюстрируется рис. 1, где приведены зависимости $n_e(t)$, соответствующие различным значениям p_{H_2} , $N_{\text{Cs}}^{(0)}$, T_k и начальным параметрам разряда: напряжения U_0 , тока I_0 , концентрации n_{e0} и температуры T_{e0} . Видно, что распад плазмы происходит в три стадии, отличающиеся характерными временами. Первая стадия связана с объемной трехчастичной рекомбинацией ионов Cs^+ с остывшими ($T_e \approx T$) электронами и с деионизацией плазмы на электродах (при $n_e < 10^{12} \text{ см}^{-3}$ деионизация происходит в основном на аноде, так как падение напряжения φ_1 в ленгмюровском слое у эмиттирующего катода меняет знак и начинает задерживать ионы). Вторая стадия характеризуется примерным постоянством n_e на временах $10^2 \text{ мкс} \lesssim t \lesssim 10^3 \text{ мкс}$ и может быть объяснена лишь наличием источника ионообразования. На третьей стадии плазма распадается на временах порядка нескольких мс. Подобные кривые $n_e(t)$ наблюдались во всем исследованном диапазоне параметров плазмы.

4. Поскольку в рассматриваемых условиях время распада плазмы близко к времени τ_e релаксации колебательной энергии водорода, естественно предположить, что ионизация цезия осуществляется присутствующими в объеме колебательно возбужденными молекулами H_2 . Для проверки этого предположения была рассчитана колебательная функ-

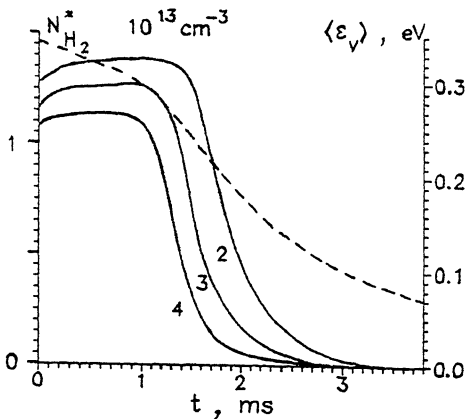


Рис. 2. Зависимости от времени концентрации $N_{H_2}^*$ высоковозбужденных молекул ($E_v \geq 3.89$ эВ). $N_{H_2} = 10^{16}$ см $^{-3}$, $N_{Cs}^{(0)} = 3 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$, $T_{v0} = 0.5$ эВ, $T_e = T = 0.1$ эВ. Цифры на кривых — концентрация электронов n_e в единицах 10^{11} см $^{-3}$. Пунктир — средняя колебательная энергия $\langle \epsilon_v \rangle$ для $n_e = 2 \cdot 10^{11}$ см $^{-3}$.

ция распределения молекул H_2 . Особенностью процесса релаксации колебательной функции распределения в данных условиях является то, что времена девозбуждения отдельных колебательных уровней τ_v малы по сравнению с временем τ_ϵ : $\tau_\epsilon \sim \tau_{10}^{(vt)} \sim \tau_{10}^{(ev)}$, где $\tau_{10}^{(vt)} = 1/N_{H_2} \cdot K_{10}^{(vt)}$, $\tau_{10}^{(ev)} = 1/n_e \cdot K_{10}^{(ev)}$ — времена девозбуждения уровня $v = 1$ за счет $v-t$ и $e-v$ обмена, N_{H_2} — концентрация молекул (соответствующие константы $K_{10}^{(vt)} \gtrsim 10^{-14}$ см 3 /с [6], $K_{10}^{(ev)} \gtrsim 10^{-9}$ см 3 /с [7]). Поэтому в рассматриваемом ниже масштабе времен $t \sim \tau_\epsilon$ определение колебательной функции распределения молекул сводится к решению квазистационарных уравнений для заселенностей N_v колебательно возбужденных состояний. При этом заселенности нескольких нижних колебательных уровней ($v = 0, 1, 2$), где сосредоточен основной запас колебательной энергии, описываются распределением Больцмана с температурой T_v . Последняя меняется во времени, следуя релаксационному уравнению Ландау–Теллера с учетом $v-t$ и $e-v$ обмена (по этому поводу см. [8]). Естественно, что из рассмотрения выпадают малые времена ($t \sim \tau_v \ll \tau_\epsilon$), т.е. первая, быстрая стадия распада. Расчет квазистационарной функции распределения проводился по методике [3], но без учета колебательно-го девозбуждения молекул на стенке.

5. Результаты расчета приведены на рис. 2. Здесь сплошные кривые дают суммарную концентрацию высоковозбужденных молекул $N_{H_2}^*$ с энергией колебательного возбуждения, превышающей энергию ионизации цезия: $E_v \geq 3.89$ эВ. Параметром на кривых является концентрация электронов n_e , выраженная в единицах 10^{11} см $^{-3}$. Пунктир — средняя колебательная энергия $\langle \varepsilon_v \rangle$ для $n_e = 2 \cdot 10^{11}$ см $^{-3}$. В качестве начального условия выбрано характерное значение средней колебательной энергии $\langle \varepsilon_v \rangle_0$ и соответствующее ему значение колебательной температуры T_{v0} , реализующиеся, по данным расчета, в исходном состоянии разрядной плазмы. Видно, что в исследуемом масштабе времен ($t \gtrsim 1$ мс) расчетная зависимость $N_{H_2}^*(t)$ характеризуется наличием двух участков. На первом участке, который по протяженности соответствует второй стадии послесвечения, имеет место примерное постоянство $N_{H_2}^*(t)$ во времени. Здесь, в результате резкого понижения концентрации n_e и температуры T_e по сравнению со значениями n_{e0} и T_{e0} в разряде, заселение высоковозбужденных колебательных состояний начинает определяться $v-v$ обменом (ср. с [2]). При этом установление почти не зависящего от времени значения $N_{H_2}^*$ является результатом конкуренции двух процессов: “триноровской диффузии” квантов в область больших v и уменьшения колебательной температуры молекул вследствие $v-t$ и $e-v$ обмена. Из сравнения кривых, соответствующих различным n_e , в частности, видно, что $e-v$ обмен играет существенную роль в процессе колебательной релаксации. На втором участке зависимости $N_{H_2}^*(t)$, где происходит резкое уменьшение концентрации колебательно возбужденных молекул, определяющую роль играет уменьшение заселенности нижних колебательных уровней и соответствующее уменьшение скорости $v-v$ обмена между этими уровнями и высоковозбужденными состояниями. Этот участок соответствует третьей стадии послесвечения: в эксперименте эта стадия затягивается вследствие уменьшения n_e при распаде плазмы (ср. зависимости $N_{H_2}^*(t)$, соответствующие разным n_e , на рис. 2). По известной концентрации плазмы на второй стадии распада можно оценить константу K_i скорости ионизации цезия колебательно возбужденными молекулами H_2 . Поскольку зонд расположен на расстоянии порядка длины свободного пробега иона от анода, имеем оценку $K_i \lesssim n_e \cdot \sqrt{T_e/M_i} / (N_{H_2}^* \cdot N_{Cs} \cdot L) \lesssim 10^{-10}$ см $^3 \cdot$ с $^{-1}$, что несколько ниже константы ионизации калия и натрия колебательно возбужденными молекулами азота [9].

6. Таким образом, расчеты, проведенные в рамках модели, учитывающей лишь объемные механизмы формирова-

ния колебательной функции распределения молекул H_2 и ионизации цезия; позволяет качественно правильно объяснить основные особенности плазмы послесвечения низковольтного цезий-водородного разряда. Однако, как показывает более детальное сравнение теории с экспериментом, эта модель не описывает все экспериментальные результаты и, в частности, подъем плато на зависимостях $n_e(t)$ (рис. 1) по мере уменьшения давления водорода. По-видимому, при анализе кинетики распада плазмы необходимо учитывать также и другие процессы, связанные с взаимодействием плазмы с электродами.

Авторы благодарны А.И.Лифшицу за полезные обсуждения.

Список литературы

- [1] Бакшт Ф.Г., Иванов В.Г. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 11. С. 672-675.
- [2] Бакшт Ф.Г., Елизаров Л.И., Иванов В.Г. // Физика плазмы. 1990. Т. 16. В. 7. С. 854-861.
- [3] Бакшт Ф.Г., Иванов В.Г. // ЖТФ. 1992. Т. 62. В. 2. С. 195-200.
- [4] Бакшт Ф.Г., Дюжев Г.А., Елизаров Л.И. и др. // ЖТФ. 1992. Т. 62. В. 9. С. 148-152.
- [5] Бакшт Ф.Г., Дюжев Г.А., Циркель Б.И. и др. // ЖТФ. 1977. Т. 47. В. 8. С. 1623-1629.
- [6] Неравновесная колебательная кинетика / Под ред. М.Капителли. М.: Мир, 1989. 391 с.
- [7] Janev R.K., Langer W.D., Evans K., Post D.E. Elementary Processes in Hydrogen-Helium Plasmas. Springer-Verlag, 1987. 326 p.
- [8] Ликальтер А.А., Мнацаканян А.Х. // ТВТ, 1973. Т. 11. В. 1. С. 202-204.
- [9] Haug R., Rappenecker G., Schmidt C. // Chem. Phys. 1974. V. 5. N 2. С. 255-264.

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

Поступило в Редакцию
10 октября 1993 г.