

РАСПАД ПЛАЗМЫ, СОЗДАННОЙ СВОБОДНО ЛОКАЛИЗОВАННЫМ В ВОДОРОДЕ СВЧ-РАЗРЯДОМ

С. И. Грицинин, И. А. Косый, А. А. Матвеев, В. П. Силаков,
Н. М. Тарасова

Институт общей физики РАН, Москва, Россия

Свободно локализованный разряд в водороде возбуждается мощным СВЧ-лучом. Все процессы образования разряда и его поддержания при этом чисто объемные. Распад плазмы определяется по затуханию диагностического СВЧ-излучения. На начальной стадии послеразрядного периода распад близок к экспоненциальному, переходя затем в рекомбинационный. Обсуждается возможный механизм объяснения такого поведения.

В последние годы разрядная плазма в водороде привлекает особое внимание исследователей в связи с решением ряда прикладных проблем (в области плазмохимии, электроники и т. д.). В большинстве систем, используемых как основные для создания такой плазмы, невозможно принципиально избежать контактов последней с твердыми телами, такими как электроды, стенки камеры, зонды. В то же время именно гетерогенные процессы считаются ответственными за наблюдаемые в некоторых экспериментах аномалии, например в [1]. Однако процессы, происходящие в этих областях контактов, зависят от свойств поверхности, которые не всегда хорошо изучены и не могут адекватно описываться теорией. С этой точки зрения очевиден интерес к использованию мощного сходящегося импульсного СВЧ-излучения, которое позволяет возбудить разряд в свободном пространстве в отсутствие стенок камеры и электродов [2].

Настоящая работа посвящена изучению свойств таких разрядов, свободно локализованных в водороде.

Схема установки для определения свойств разрядов приведена на рис. 1. СВЧ-излучение вводится в камеру с диаметром много большим (35 см) размера сфокусированного СВЧ-излучения.

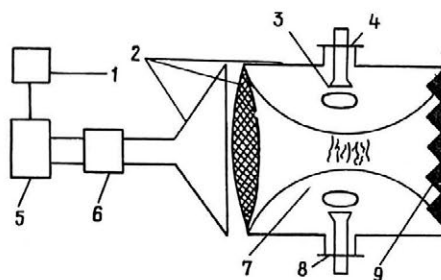


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
1 — модулятор; 2 — рупорно-линзовая система; 3 — СВЧ-диагностика; 4, 8, — окна; 5 — магнетрон; 6 — циркулятор; 7 — СВЧ-разряд; 9 — поглотитель

Параметры излучения следующие: длина волны $\lambda_f = 2,5$ см; импульсная мощность $P_i \leq 600$ кВт; длительность импульса $t_f \leq 100$ мкс; частота повторения $f = 0,1 - 10$ Гц.

Камера заполнялась водородом при давлении $50 \leq P \leq 300$ торр. Параметр $x = E_{эф}/N_m$ (где $E_{эф}$ — эффективная величина напряженности электрического СВЧ-поля, а N_m — плотность облучаемого нейтрального водорода) изменялся в пределах $2 \cdot 10^{-16} < E_{эф}/N_m < 10^{-15}$ В·см². В подпороговых условиях разряд

иницировался тем или иным способом [2] в области фокусировки СВЧ-излучения. Фотографии разрядов при разных давлениях приведены на рис. 2, а, б.

Концентрация электронов N_e измерялась по его поглощению в столкновительной плазме с помощью маломощного диагностического излучения с длиной волны $\lambda_d = 0,4$ см и сфокусированного рупорно-линзовой системой в пучок диаметром ~ 2 см.



а



б

Рис. 2. Фотография типичного разряда в водороде:
а — при давлении $P = 150$ торр; б — при давлении $P = 270$ торр

На рис. 3 приведен временной ход величины $1/N_e$ (в относительных единицах) в послеразрядный период, а на рис. 4 — зависимость характерного времени распада плазмы от давления.

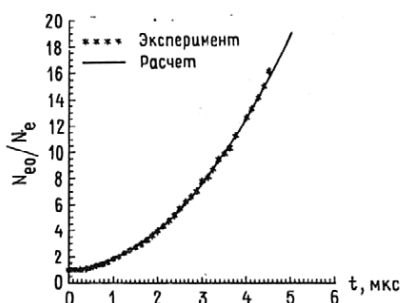


Рис. 3. Временная зависимость относительной величины обратной электронной плотности в водороде при давлении $P = 240$ торр

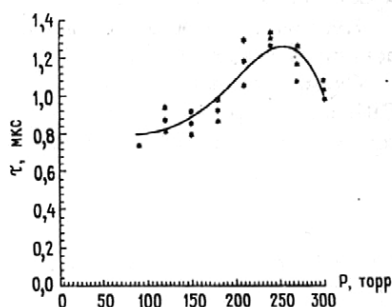
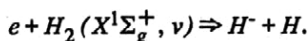


Рис. 4. Зависимость характерного времени распада плазмы от давления в водороде

Из рис. 3 видно, что сначала распад плазмы близок к экспоненциальному (за это время плотность электронов падает в 3—5 раз), и только на конечной стадии распад близок к рекомбинационному.

Полученные результаты можно было бы объяснить наличием отрицательных ионов H^- , образующихся в процессе диссоциативного прилипания:



Однако вычисления, выполненные в [3], показывают низкую эффективность такого процесса при сравнительно низких энерговкладах, использованных в экспериментах.

Объяснение временному ходу плотности электронов может дать предположение о наличии двух сортов ионов: H_3^+ с плотностью N_1 и относительно малым коэффициентом рекомбинации α_1 и H_3^+ (с плотностью N_2), образующихся из H_3^+ и имеющих существенно больший коэффициент рекомбинации α_2 .

Уравнения баланса для электронов и ионов можно записать в виде:

$$dN_e/dt = -\alpha_1 N_1 N_e - \alpha_2 N_2 N_e;$$

$$dN_1/dt = -\alpha_1 N_1 N_e - k N_1$$

$$dN_2/dt = -\alpha_2 N_2 N_e + k N_1.$$

Если скорость трансформации ионов kN_1 существенно превышает скорость рекомбинации $\alpha_1 N_1 N_e$, то система уравнений имеет аналитическое решение:

$$N_e = N_{e0} \Phi(t) / (1 + \alpha_2 N_{e0} \int_0^t \Phi(\tau) d\tau);$$

$$\Phi(t) = \exp\left(\frac{(\alpha_2 - \alpha_1) N_{e0}}{k} (1 - \exp(-kt))\right).$$

На рис. 3 приведена кривая, полученная по вышеприведенной формуле в предположении, что коэффициент $k = 10^6 \text{ с}^{-1}$, $\alpha_2 N_{e0} = 8 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$.

Расчеты, выполненные в рамках кинетической модели [3], показали, что основным ионом в момент выключения СВЧ-излучения является ион H_3^+ , который трансформируется затем в H_3^+ в ходе распада (рис. 5). Расчет выполнен для $E_{эф} = 4 \text{ кВ/см}$; $P = 100 \text{ торр}$.

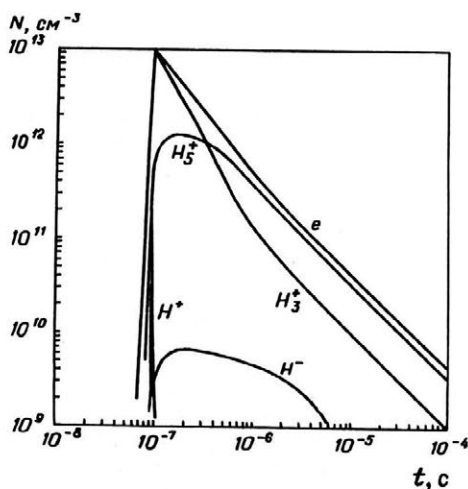


Рис. 5. Временной ход плотности электронов и ионов послеразрядной стадии в водороде (расчетные кривые)

Литература

1. De Graaf M. J., Severens R. et al. / ISPP-13. "Piero Caldirola". Industrial Applications of Plasma Physics, G. Bonizzoni, W. Hooke and E. Sindoni (Eds.), SIF, Bologna, 1993. P. 495—497.
2. Batanov G. M., Gritsinin S. I. et al. High Pressure Microwave Discharge / In Plasma Physics and Plasma Electronics; Kovrizhnykh L. M. (Ed) // Nova Science Publishers, 1989. P. 241—282.
3. Matveyev A. A., Silakov V. P. Kinetics of Non-Equilibrium Hydrogen Plasma in the Anode Region of the Thyatron Discharge // XII ESCAMPIG Abstracts, 1994.

* * *

Работа выполнена при поддержке Нидерландского Научного общества (грант 713-224).

Работа доложена на Международной конференции "Микроволновая плазма и ее применения".

PLASMA DECAY OF THE FREELY LOCALIZED MICROWAVE DISCHARGE IN HYDROGEN

S. I. Gritsinin, I. A. Kosygi, A. A. Matveyev, V. P. Silakov, N. M. Tarasova

General Physics Institute RAS, Moscow, Russia.

Freely localized discharge is excited by powerful microwave beam in hydrogen. All processes of gas discharge production and maintaining are volumetric in nature.

Plasma decay is determined by diagnostic microwave beam attenuation. In the initial post discharge stage the decay is closed to the exponential passing into the recombination only at the final stage of relaxation.

Possible mechanism of such behavior is discussed.