

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АСИММЕТРИЧНОГО ВЧ ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА В ВОДОРОДЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

В.А. Лисовский^{1,2}, С. Дине¹, Ж. Жоли¹, Ж. Гуйон¹, Ж.-П. Бут¹

¹ *Laboratoire de Physique et Technologie des Plasmas, Ecole Polytechnique, Palaiseau 91128, France*

² *Харьковский национальный университет, 61077, Харьков, пл. Свободы 4, Украина*

Поступила в редакцию 1 июля 2003 г.

В работе приведены результаты зондовых и оптических исследований асимметричного ВЧ емкостного разряда в водороде низкого давления. Получены зависимости потенциала плазмы, температуры электронов, плотности плазмы, постоянного напряжения автосмещения между электродами и функции распределения электронов по энергиям от приложенного ВЧ напряжения при различных давлениях водорода. Также измерены интенсивности трех первых линий серии Бальмера и одной молекулярной линии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: высокочастотный емкостный разряд, низкие давления, зонд, оптическое излучение, водород.

Газоразрядная плазма в водороде широко используется для очистки поверхности и травления полупроводниковых материалов [1 - 3]. Высокочастотный разряд в смеси водорода с метаном применяется для осаждения алмазных и алмазоподобных тонких пленок. Это привело к появлению большого количества экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованию характеристик ВЧ разряда в водороде (смотри, например, [4 - 13]).

В настоящей работе зондовым и оптическим методами исследованы характеристики асимметричного ВЧ разряда в водороде низкого давления. Одиночным цилиндрическим зондом мы определили зависимости плотности плазмы, температуры электронов и постоянной составляющей потенциала плазмы в центре ВЧ разряда в широком диапазоне приложенных ВЧ напряжений и давлений водорода. Оптическим методом получены интенсивности первых трех линий серии Бальмера для атомарного водорода, а также интенсивность одной из молекулярных линий.

УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились при давлениях газа $p = 0,08 - 0,5$ Торр в диапазоне амплитудных значений ВЧ напряжений $U_{rf} \leq 600$ В и частоте ВЧ поля $f = 13,56$ МГц. Расстояние между плоскими параллельными электродами из нержавеющей стали диаметром 120 мм было равно $L = 30$ мм. ВЧ напряжение прикладывалось к одному из электродов, второй электрод был заземлен, при этом плазма была ограничена заземленной металлической сеткой. Площадь ВЧ электрода была в 2 раза меньше площади заземленных поверхностей (электрода и сетки). Напуск водорода в разрядную камеру был равен $40 \text{ см}^3/\text{сек}$.

Температура электронов T_e , потенциал плазмы и плотность плазмы n_i определялись с помощью одиночного цилиндрического зонда из вольфрама (длина зонда 10 мм, диаметр – 0,38 мм), установленного в центре разряда. Плотность плазмы n_i рассчитывалась из ионной ветви зондового тока I_{pr} и измеренной температуры электронов T_e по методике, описанной в работах [14 - 16]. При этом мы использовали значения температуры электронов, определенные из вольт-амперных характеристик зонда (линейного участка электронного тока на зонд, построенного в полулогарифмическом масштабе).

Видимое излучение, выходящее из центра разряда, с помощью линз направлялось на щель монохроматора, к которому был подключен фотоэлектронный умножитель. Измерялись интенсивности первых трех линий серии Бальмера H_α , H_β и H_γ с длинами волн 6562,8 Å, 4861,3 Å и 4340,5 Å, соответственно, а также интенсивность молекулярной полосы водорода с длиной волны 4683 Å.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис.1 показаны зависимости температуры электронов в центре разряда от приложенного ВЧ напряжения при различных давлениях водорода. Из рисунка видно, что повышение ВЧ напряжения приводит к уменьшению температуры электронов, причем перед потуханием разряда наблюдаются максимальные значения температуры электронов. По-видимому, это вызвано тем, что плазма перед потуханием разряда имеет маленькую плотность, ВЧ поле в ней велико, поэтому электроны могут сильно разогреться в этом поле. С ростом давления водорода температура электронов монотонно уменьшается. Подобное поведение температуры электронов в ВЧ разряде в аргоне описано ранее в работе [17].

На рис.2 представлены зависимости плотности плазмы в центре разряда от ВЧ напряжения при различных давлениях водорода. Из этого рисунка следует, что повышение ВЧ напряжения приводит к монотонному росту плотности плазмы. Повышение давления водорода также приводит к увеличению плотности плазмы. Резкое увеличение плотности плазмы при больших значениях ВЧ напряжения связано с переходом разряда из слаботочного в сильноточный режим, когда приэлектродные слои становятся источниками пучков быстрых электронов, интенсивно ионизирующих молекулы газа.

На рис.3 показаны зависимости постоянной составляющей потенциала плазмы в центре ВЧ разряда от ВЧ напряжения для различных давлений водорода. Из рисунка видно, что при давлениях водорода более 0,2 Торр значения потенциала плазмы слабо зависят от давления газа, в то время как при низких давлениях водорода потенциал плазмы быстро увеличивается с уменьшением давления. Мы можем из данных, представленных на рисунках 2 и 3, оценить величину отношения ВЧ поля в квазинейтральной плазме к давлению газа E_{pl}/p . Для этого мы используем приведенную в [18] формулу для постоянного потенциала плазмы

$$\Phi_{pl} = 3\pi e n_i \mu_e^2 E_{pl}^2 / \omega^2, \quad (1)$$

где μ_e – подвижность электронов в водороде, $\mu_e = 0,37 \cdot 10^6 / p \text{ см}^2 \text{ Торр} / (\text{В} \cdot \text{с})$ [19]. Из формулы (1) легко получить выражение для E_{pl}/p для частоты ВЧ поля 13.56 МГц:

$$\frac{E_{pl}}{p} = \sqrt{\Phi_{pl} \cdot 3.91 \cdot 10^{10} / n_i}. \quad (2)$$

На рис.4 представлены значения E_{pl}/p , определенные по формуле (2) из данных для плотности плазмы и постоянного потенциала плазмы. Хорошо видно, что при низких давлениях водорода (0.15 Торр и ниже) отношение E_{pl}/p достигает больших значений порядка 40–60 В/(см Торр) и быстро растет с уменьшением давления, в то время как при давлениях выше 0,3 Торр отношение E_{pl}/p в слаботочном режиме горения разряда практически не зависит от давления водорода и лежит в диапазоне 20–30 В/(см Торр). Перед потуханием разряда ВЧ поле в плазме резко увеличивается, что приводит к разогреву электронов (что мы и видим на рис.1).

На рис.5 показаны вторые производные зондового тока от напряжения на зонде, измеренные в центре разряда для двух различных давлений водорода при различных ВЧ напряжениях. Эти вторые производные описывают функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ). Хорошо видно, что ФРЭЭ в ВЧ разряде не является

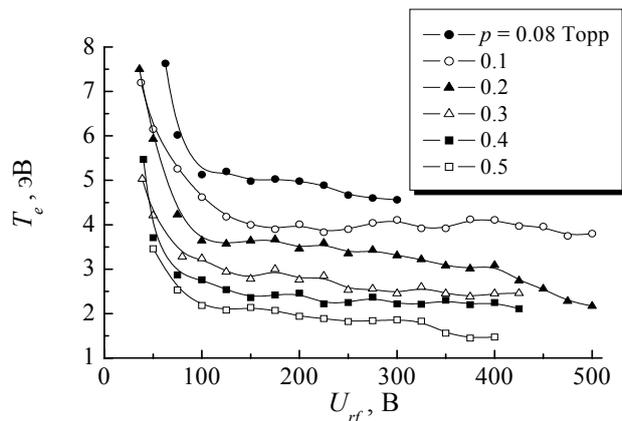


Рис.1. Зависимость температуры электронов в центре ВЧ разряда от ВЧ напряжения при различных давлениях водорода.

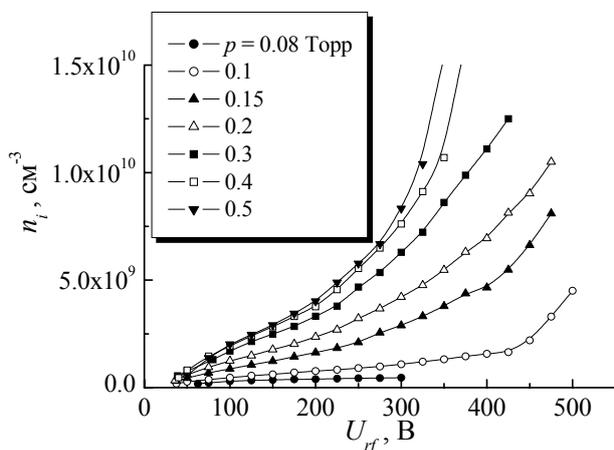


Рис.2. Зависимость плотности плазмы в центре ВЧ разряда от ВЧ напряжения при различных давлениях водорода.

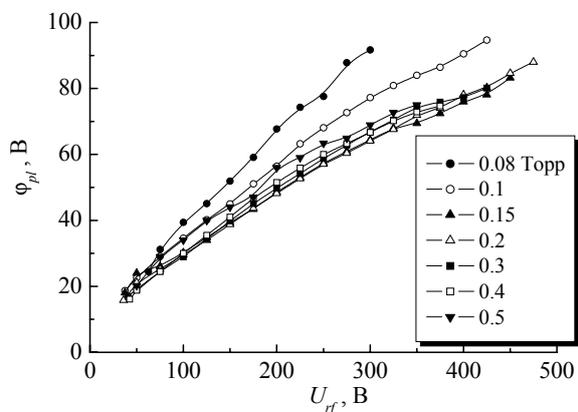


Рис.3. Зависимость потенциала плазмы в центре ВЧ разряда от ВЧ напряжения при различных давлениях водорода.

максвелловской, кроме основной группы холодных электронов наблюдается группа электронов высокой энергии. При давлении водорода 0,1 Торр ФРЭЭ содержит гораздо больше электронов высокой энергии, чем при 0,5 Торр. Также из этого рисунка следует уменьшение температуры электронов и увеличение плотности плазмы с повышением давления водорода.

Так как площади заземленного и ВЧ электродов не равны, то между электродами возникает постоянное напряжение автосмещения. На рис.6 показаны зависимости постоянного напряжения автосмещения между электродами от давления водорода при различных значениях ВЧ напряжения. В отличие от теоретических предсказаний, сделанных в работах [20, 21], из нашего рисунка видно, что постоянное

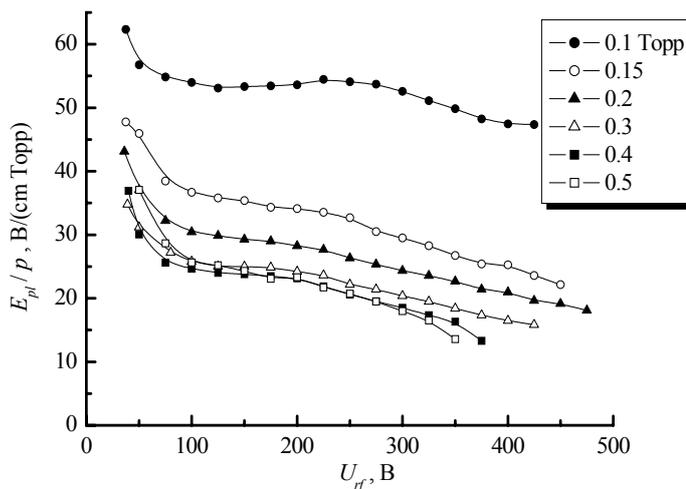


Рис.4. Зависимость отношения ВЧ поля в квазинейтральной плазме к давлению от ВЧ напряжения при различных давлениях водорода.

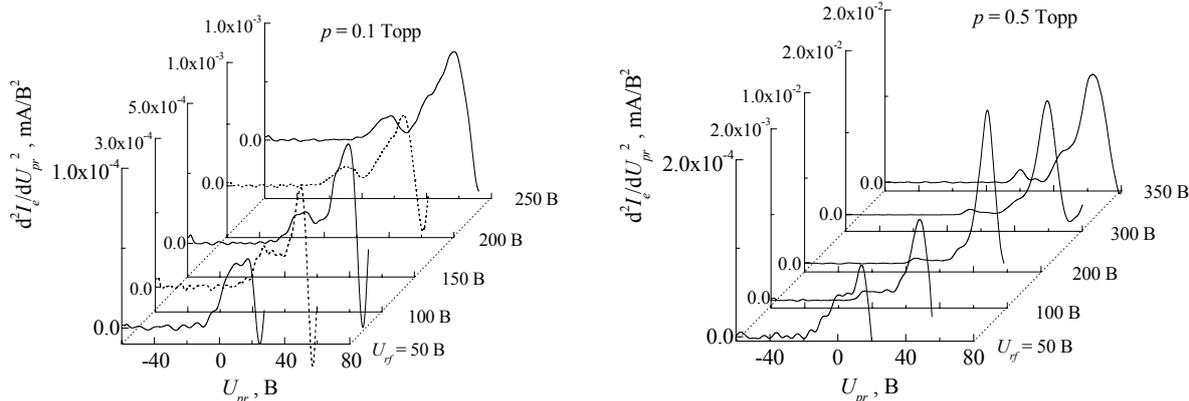


Рис.5. Зависимость вторых производных зондового тока от напряжения на зонде при различных ВЧ напряжениях и давлениях водорода 0,1 Торр и 0,5 Торр.

напряжение автосмещения зависит не только от величины приложенного ВЧ напряжения, но также и от давления газа. Авторы работы [22] получили, что постоянное напряжение автосмещения зависит от давления газа как $U_{dc} \propto p^{-0.5}$. Однако из наших результатов следует, что при давлениях водорода более 0,2 Торр постоянное напряжение автосмещения изменяется по закону $U_{dc} \propto p^{-0.2}$ (пунктирная кривая на рис. 6).

На рис.7 представлены зависимости интенсивностей линий серии Бальмера H_α , H_β и H_γ , а также интенсивности молекулярной полосы водорода H_m с длиной волны 4683 Å от ВЧ напряжения при давлении газа 0,5 Торр. Анализ приведенных на рисунке данных показывает, что интенсивность молекулярной

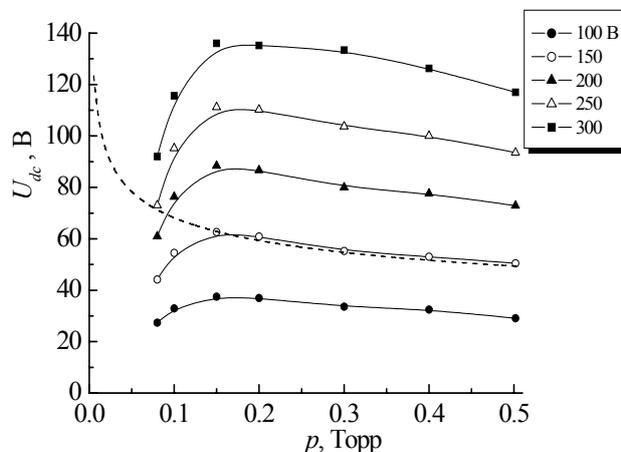


Рис.6. Зависимость постоянного напряжения автосмещения между электродами от давления водорода при различных ВЧ напряжениях.

полосы пропорциональна величине ВЧ напряжения в степени 1,4. В то же время для интенсивностей атомарных линий серии Бальмера при низких ВЧ напряжениях этот показатель степени равен 1,8, а при больших ВЧ напряжениях после перехода разряда в сильноточный режим показатель степени достигает 2,6.

Таким образом, в настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования асимметричного ВЧ емкостного разряда в водороде. Зондовым методом определены температура электронов, плотность плазмы, потенциал плазмы, функции распределения электронов по энергиям в центре разряда. Сделаны оценки величины ВЧ поля в квазинейтральной плазме. Показано, что постоянное напряжение автосмещения зависит не только от ВЧ напряжения, но и от давления газа. Измерены интенсивности трех первых линий серии Бальмера атомарного водорода и интенсивность одной из молекулярных полос.

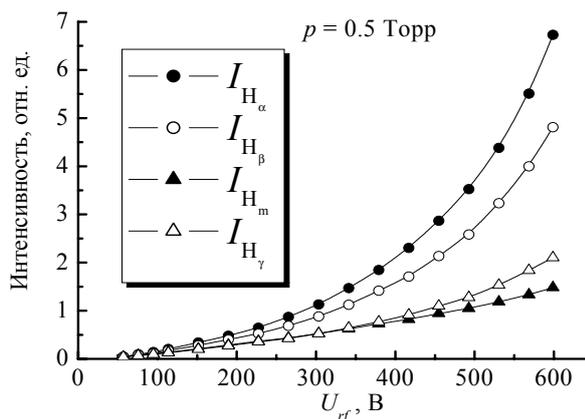


Рис.7. Зависимости интенсивностей трех первых линий серии Бальмера и интенсивности одной молекулярной полосы излучения ВЧ разряда от приложенного ВЧ напряжения при давлении водорода 0,5 Торр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K.D. Choquette, R.J. Shul, A.J. Howard, D.J. Rieger, R.S. Freund, R.C. Wetzel // J. Vac. Sci. Technol. B. –1995. - Vol. 13. - P. 40.
2. Y. Aoki, S. Aoyama, H. Uetake, K. Morizuka, T. Ohmi // J. Vac. Sci. Technol. A. – 1993. - Vol. 11. - P. 307.
3. H. Tsai, D.B. Bogy // J. Vac. Sci. Technol. A. - 1987. - Vol. 5. - P. 3287.
4. T. Kokubo, F. Tochikubo, T. Makabe // Appl. Phys. Lett. - 1990. - Vol. 56. - No. 9. - P. 818.
5. J.-P. Booth, J. Derouard, M. Fadlallah, N. Sadeghi // J. Appl. Phys. - 1993. - Vol. 74. - No. 2. - P. 862.
6. S. Kakuta, T. Kitajima, Y. Okabe, T. Makabe // Jpn. J. Appl. Phys. - 1994. - Vol. 33. - No. 7B. - P. 4335.
7. O. Leroy, P. Stratil, J. Perrin, J. Jolly, P. Belenguer // J. Phys. D. - 1995. - Vol. 28. - No. 3. - P. 500.
8. S.B. Radovanov, K. Dzierzega, J.R. Roberts, J.K. Olthoff // Appl. Phys. Lett. - 1995. - Vol. 66. - No. 20. - P. 2637.
9. V. Schulz-von der Gathen, H.F. Dobele // Plasma Chemistry and Plasma Processing. - 1996. - Vol. 16. - No. 4. - P. 461.
10. W.G. Graham, C.M.O. Mahony // J. Phys. IV France. - 1997. - Vol. 7. - P. C4 209.
11. C.M.O. Mahony, R. Al Wazzan, W.G. Graham // Appl. Phys. Lett. - 1997. - Vol. 71. - No. 5. - P. 608.
12. S. Longo, I.D. Boyd // Chemical Physics. - 1998. - Vol. 238. - P. 445.
13. L. Cherigier, U. Czarnetzki, D. Luggenholscher, V. Schulz-von der Gathen, H.F. Dobele // J. Appl. Phys. - 1999. - Vol. 85. - No. 2. - P. 696.
14. G.J. Schulz, S.C. Brown // Phys. Rev. - 1955. - Vol. 98. - No. 6. - P. 1642.
15. Z. Zakrzewski, T. Kopiczynski // Plasma Physics. - 1974. - Vol. 16. - No. 12. - P. 1195.
16. M. Tichy, M. Sicha, P. David, T. David // Contrib. Plasma Phys. - 1994. - Vol. 34. - No. 1. - P. 59.
17. В.А. Лисовский // ЖТФ. - 1998. - Т. 68. - No. 5. - С. 52.
18. Ю.П. Райзер, М.Н. Шнейдер, Н.А. Яценко. Высокочастотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложение. М.: Изд-во МФТИ; Наука-Физматлит, 1995.
19. Ю.П. Райзер. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.
20. Y.P. Song, D. Field, D.F. Klemperer // J. Phys. D. - 1990. - Vol. 23. - No. 6. - P. 673.
21. E. Kawamura, V. Vahedi, M.A. Lieberman, C.K. Birdsall // Plasma Sources Sci. Technol. - 1999. - Vol. 8. - No. 3. - P. R45.
22. Y. Catherine, P. Couderc // Thin Solid Films. - 1986. - Vol. 144. - No. 2. - P. 265.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF NONSYMMETRIC RF CAPACITIVE DISCHARGE IN LOW PRESSURE HYDROGEN

V.A. Lisovskiy^{1,2}, S. Dine¹, J. Jolly¹, J. Guillon¹, J.-P. Booth¹

¹ Laboratoire de Physique et Technologie des Plasmas, Ecole Polytechnique, Palaiseau 91128, France

² Kharkov National University, 4 Svobody sq., Kharkov, 61077, Ukraine

The paper reports the results of probe and optical investigations of the nonsymmetric RF capacitive discharge in low-pressure hydrogen. The dependences of plasma potential, electron temperature, plasma density, DC self-bias voltage between electrodes and electron energy distribution functions on applied RF voltage were obtained for different hydrogen pressures. The intensities of three Balmer lines and one of molecular line were measured too.

KEY WORDS: RF capacitive gas discharge, low pressure, probe, optical irradiation, hydrogen.