

04:09;12

©1995

## ПОВЕДЕНИЕ ПОСТОЯННОГО ПОТЕНЦИАЛА ПЛАЗМЫ В ВЧ РАЗРЯДЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

*В.А.Лисовский, О.В.Красников*

Высокочастотный газовый разряд емкостного типа широко используется при различных технологических процессах [1-3], поэтому изучение этого типа разряда представляет значительный интерес. Механизмы многих происходящих в ВЧ разряде явлений можно объяснить, зная распределение ВЧ и постоянного потенциалов плазмы [4-7]. Как известно [4,5,7], постоянная составляющая потенциала плазмы  $\Phi_{p1}$  при удалении от электрода к границе приэлектродного слоя монотонно возрастает, в квазинейтральной плазме  $\Phi_{p1}$  сохраняет свое постоянное значение, а в некоторых случаях возникает асимметричное относительно центра разряда распределение  $\Phi_{p1}$  [6]. В настоящей работе экспериментально показано, что при переходе ВЧ разряда из слаботоочного ( $\alpha$ ) в сильноточный ( $\gamma$ ) режим горения [4,8] в центральной области разряда при давлениях газа  $p \gtrsim 0.1$  Тор наблюдается минимум постоянного потенциала плазмы, что вызвано, по-видимому, формированием в ВЧ разряде стационарных двойных плазменных слоев.

Эксперименты проводились в воздухе, аргоне, гексане и циклогексане при давлении газа  $p = 5 \cdot 10^{-3} - 2$  Тор в диапазоне ВЧ напряжений  $U_{нч} \leq 10^3$  В, частоте ВЧ поля  $f = 13.56$  МГц и расстояниях между плоскопараллельными электродами из нержавеющей стали диаметром 100 мм  $L = 10 - 54$  мм. На один из электродов (нижний) подавалось ВЧ напряжение, второй (верхний) электрод заземлялся. Для удаления напряжения автосмещения между электродами подключался дроссель индуктивностью в несколько мГн. Измерения  $\Phi_{p1}$  проводились одиночным цилиндрическим зондом двумя независимыми методами: по нулевому значению второй производной зондового тока, которая определялась методом модулирования зондового тока низкочастотным напряжением (метод второй гармоники), а также с помощью измеренных плавающего потенциала зонда и температуры электронов  $T_e$  [9]. Расхождение полученных двумя способами значений  $\Phi_{p1}$  не превышало 20%.

При низких давлениях газа ( $p < 0.1$  Тор), особенно при небольших расстояниях между электродами ( $L < 1.5$  см),

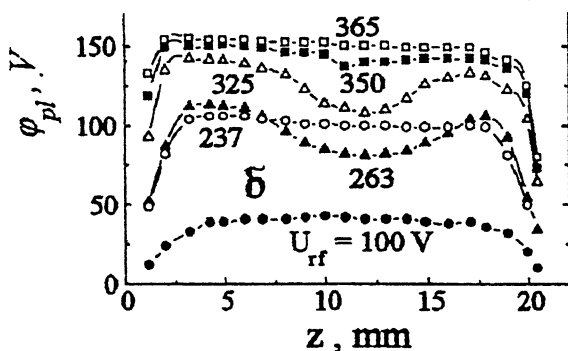
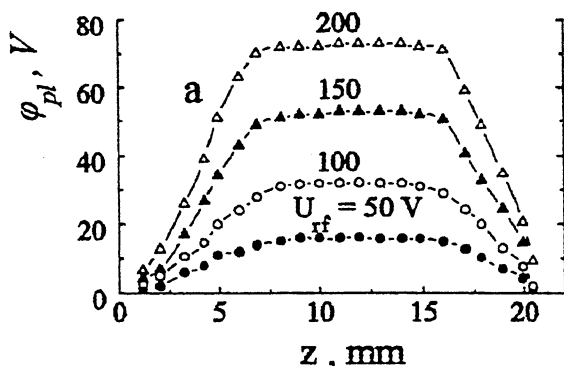


Рис. 1. Осевые профили постоянного потенциала плазмы при различных ВЧ напряжениях и давлениях аргона: а —  $p = 0.1$  Тор, б —  $p = 1.1$  Тор,  $L = 22$  мм.

в исследуемом диапазоне давлений  $\Phi_{pl}$  в квазинейтральной плазме при удалении от центра разряда сохраняет свое постоянное значение либо медленно понижается, а в приэлектродных слоях  $\Phi_{pl}$  быстро уменьшается вплоть до нуля (рис. 1, а). Профиль  $\Phi_{pl}$  в разряде в воздухе при этом довольно симметричен, однако в разряде в аргоне наблюдается заметная асимметрия  $\Phi_{pl}$  относительно центра разряда, уже начиная с  $p \gtrsim 10^{-3}$  Тор.

Повышение давления приводит к тому, что распределение  $\Phi_{pl}$  в ВЧ разряде в воздухе также становится заметно асимметричным, однако при низких ВЧ напряжениях  $\Phi_{pl}$  в квазинейтральной плазме распределен монотонно. При переходе ВЧ разряда из  $\alpha$ - в  $\gamma$ -режим горения на осевом распределении  $\Phi_{pl}$  вблизи границ приэлектродных слоев появляются максимумы, а в центральной области разряда наблюдается минимум (рис. 1, б). При дальнейшем увеличе-

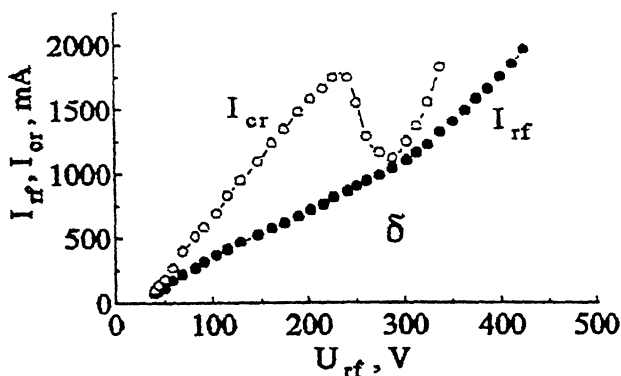
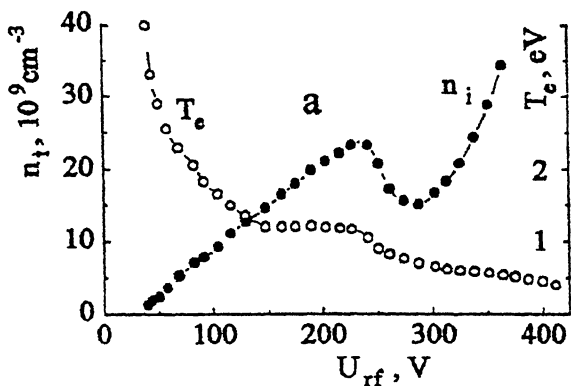


Рис. 2. Аргон,  $L = 22$  мм,  $p = 1.1$  Тор. *a* — зависимости плотности плазмы и температуры электронов от ВЧ напряжения; *б* — зависимости амплитуды ВЧ тока и критического тока от ВЧ напряжения.

нии ВЧ напряжения минимум на осевом распределении  $\Phi_{pl}$  в центре разряда исчезает. Подобное поведение  $\Phi_{pl}$  для поперечного ВЧ разряда наблюдалось в работе [6], однако, как признают авторы [6], причиной этого могла быть сложная конфигурация разрядной камеры.

Мы считаем, что естественным объяснением наблюдаемого осевого профиля  $\Phi_{pl}$  может быть формирование двойных слоев в центральной области разряда. Существует ряд критериев [10], удовлетворение которых позволяет сделать вывод, что мы имеем дело с двойными плазменными слоями.

Во-первых, в работе [11] показано, что при  $\alpha - \gamma$  переходе ВЧ разряда наблюдается немонотонное поведение плотности плазмы  $n_i$  в центре разрядной камеры (рис. 2, *a*), со-

провожающееся появлением ионизационной неустойчивости низкочастотных плазменных шумов и колебаний); при этом уменьшается  $T_e$  в квазинейтральной плазме. Одновременное уменьшение  $n_i$  и  $T_e$  в центре разряда дает возможность удовлетворить критерию равенства разрядного тока  $j_{гг}$  критическому току [10]

$$j_{гг} = en_i \sqrt{2kT_e/m_e}, \quad (1)$$

выполнение которого приводит к формированию двойных слоев. Как видно из рис. 2, б, измеренная амплитуда ВЧ тока при  $\alpha - \gamma$  переходе близка к величине критического тока, рассчитанного из экспериментальных значений  $n_i$  и  $T_e$  (рис. 2, а), измеренных нами. Как показано в работе [12], формирование двойного плазменного слоя сопровождается появлением ионизационной неустойчивости, что согласуется с нашими наблюдениями и результатами [11].

Во-вторых, для существования двойного слоя должен выполняться следующий критерий [10]:

$$\frac{\Delta E}{4\pi en_i d} = \frac{\Delta n_i}{n_i} \geq \frac{m_e}{m_i}, \quad (2)$$

где  $\Delta n_i$  — среднее отклонение от точной зарядовой нейтральности,  $\Delta E$  — изменение постоянного электрического поля на длине двойного слоя  $d$ ,  $m_e$  и  $m_i$  — массы электрона и иона соответственно. И рис. 1 и 2 видно, что условие (2) выполняется практически во всем диапазоне ВЧ напряжений, при котором наблюдается минимум  $\Phi_{р1}$  в центре разряда. Поэтому при  $\alpha - \gamma$  переходе ВЧ разряда на осевом распределении  $\Phi_{р1}$  в центральной области минимум появляется, по-видимому, из-за формирования двойных плазменных слоев.

Следует отметить, что минимум на осевом распределении  $\Phi_{р1}$  наблюдается в диапазоне давлений, когда начинает играть роль диссоциативная ион-электронная рекомбинация, удаляющая из центра разряда поступающие от границ приэлектродных слоев положительные ионы [13]. В этом же диапазоне давлений набравшие в приэлектродных слоях энергию электроны [7,14] тормозятся вблизи центра разряда и, формируя область отрицательного объемного заряда, стабилизируют образующийся двойной слой.

Косвенным доказательством наблюдаемого поведения  $\Phi_{р1}$  может служить факт удержания отрицательно заряженных пылевых частиц вблизи границ приэлектродных слоев [15,16]. В настоящей работе показано, что при определенных условиях при горении ВЧ разряда в гексане и циклогексане образуются хорошо видимые глазом пылевые частицы (диаметром порядка 0.05–0.1 мм), которые возникают и

удерживаются в разряде на границах приэлектродных слоев как вблизи нижнего, так и вблизи верхнего электродов (результаты исследований свойств образовавшихся пылевых частиц и их влияния на характеристики ВЧ разряда будут опубликованы позже). Если бы профиль  $\Phi_{p1}$  был как на рис. 1, а, то удержание пылевых частиц вблизи верхнего электрода было бы невозможным. Наличие же "потенциальных ям" вблизи границ приэлектродных слоев позволяет удерживать не только медленные электроны, но и довольно массивные отрицательно заряженные пылевые частицы.

Таким образом, в настоящей работе получено, что в области давлений  $p \gtrsim 0.1$  Тор на осевом профиле постоянной составляющей потенциала плазмы в центре ВЧ разряда при  $\alpha - \gamma$  переходе появляется минимум. Это связано, по-видимому, с формированием в ВЧ разряде двойных плазменных слоев и косвенно подтверждается фактом удержания отрицательно заряженных пылевых частиц на границах приэлектродных слоев.

### Список литературы

- [1] Flamm D.L., Donneley V.M., Ibbotson D.E. // J. Vac. Sci. Technol. 1983. V. B1. P. 23.
- [2] Coburn J. // Plasma Chem. Plasma Process. 1982. V. 2. P. 1.
- [3] Яценко Н.А. // Инж.-физ. журн. 1992. Т. 62. С. 739.
- [4] Левитский С.М. // ЖТФ. 1957. Т. 27. С. 970, 1001.
- [5] Sabadil H., Klagge S., Kammeyer M. // Plasma Chem. Plasma Process. 1988. V. 8. P. 425.
- [6] Kaneda T., Kubota T., Ohuchi M., Jen-Shis Chang. // J. Phys. D. 1990. V. 23. P. 1642.
- [7] Кузовников А.А., Савинов В.П. // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия. 1973. № 2. С. 215.
- [8] Яценко Н.А. // ЖТФ. 1981. Т. 51. С. 1195.
- [9] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.
- [10] Block L.P. // Astrophysics and Space Science. 1978. V. 55. P. 59.
- [11] Лисовский В.А., Егоренков В.Д., Красников О.В. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 21. С. 90.
- [12] Johnson J.C., D'Angelo N., Merlino R.L. // J. Phys. D. 1990. V. 23. P. 682.
- [13] Smith D., Goodall C.V., Adams N.G., Dean A.G. // J. Phys. B. 1970. V. 3. P. 34.
- [14] Kaganovich I.D., Tsendin L.D. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1992. V. 20. P. 66.
- [15] Selwyn G.S., Singh J., Bennett R.S. // J. Vac. Sci. Technol. 1989. V. A7. P. 2758.
- [16] Selwyn G.S., Heidenreich J.E., Haller K.L. // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. P. 1876.

Научный  
физико-технологический центр  
Харьковский государственный  
университет  
Харьков

Поступило в Редакцию  
14 августа 1994 г.  
В окончательной редакции  
17 июля 1995 г.