

01

©1994

## ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ВЧ ПРОБОЯ ГАЗА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

*В.А.Лисовский, В.Д.Егоренков*

Высокочастотный газовый разряд емкостного типа широко используется при различных технологических процессах: плазменное травление и осаждение полупроводниковых материалов [1,2], осаждение алмазоподобных тонких пленок [3,4], накачка газовых лазеров [5,6] и т.д. При этом для оптимизации плазменных технологических процессов часто необходимо знать условия пробоя газа в разрядном устройстве, поэтому численное моделирование и экспериментальное измерение кривых зажигания разряда в ВЧ однородном электрическом поле представляют значительный интерес.

На кривых зажигания ВЧ разряда можно выделить три характерных ветви. При низких давлениях газа и небольших межэлектродных промежутках ( $L \leq 1$  см) ярко выражена вторично-эмиссионная, резонансная (I) ветвь [7,10], при этом при пробое газа основную роль играет вторичная электронная эмиссия с поверхности электродов, а пробой газа в ВЧ поле развивается аналогично пробую в постоянном электрическом поле. Ветвь кривой зажигания от перегиба до точки поворота (рис. 1) часто называют диффузионной (II), так как для ее моделирования используют диффузионные теории [11-13]. При больших зазорах ( $L \geq 2$  см) вторично-эмиссионная ветвь выражена слабо и на кривой зажигания наблюдается переходный участок между вторично-эмиссионной и диффузионной ветвями: при этом в пробое газа одновременно участвуют ударная ионизация молекул газа электронами и вторичная электронная эмиссия с поверхности электродов. Третья ветвь (III) кривой зажигания ВЧ разряда располагается справа от точки перегиба [12].

В настоящей работе для экспериментально измеренных нами ВЧ кривых зажигания найдены аппроксимационные формулы, позволяющие численно получить ВЧ кривые зажигания в широком диапазоне ВЧ напряжений, давлений газа  $p$  и межэлектродных расстояний  $L$ .

Кривые зажигания ВЧ разряда измерялись в воздухе и аргоне в диапазоне ВЧ напряжений  $U = 0-1500$  В при  $p = 10^{-3}-20$  Тор, частоте ВЧ поля  $f = 13.56$  МГц и расстояниях между электродами из нержавеющей стали диаметром

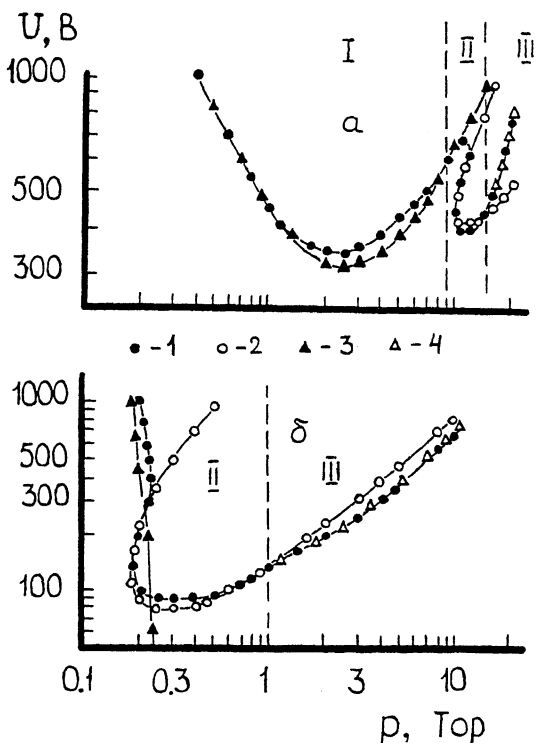


Рис. 1. Кривые зажигания ВЧ разряда в воздухе:

*a* —  $L = 0.65$  см, *б* —  $2.3$  см; 1 — эксперимент, 2 — расчет по (3), 3 — расчет по (1), 4 — расчет по (6); I — вторично-эмиссионная область, II — диффузионная область, III — область справа от точки перегиба.

$100$  мм  $L = 6-54$  мм. На измеренных кривых зажигания выделялись три вышеуказанные ветви, и затем методом наименьших квадратов подбирались аппроксимационные формулы, описывающие каждую ветвь. Для повышения точности определения аппроксимационных зависимостей было измерено большое количество кривых зажигания: для воздуха получено 22 кривых зажигания при различных расстояниях между электродами, для аргона — 17.

В результате найдено, что вторично-эмиссионную ветвь кривой зажигания ВЧ разряда (I) можно описать следующей зависимостью:

$$\frac{U}{p} = \frac{\alpha}{(pL)^2} + \beta, \quad (1)$$

$$\alpha = \alpha_1 \exp(\alpha_2 L); \quad \beta = \beta_1 - \beta_2 \exp(\beta_3 L), \quad (2)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_2, \beta_3$  — константы, зависящие от сорта газа (см. таблицу);  $U, В$ ;  $p, \text{Тор}$ ;  $L, \text{см}$ . Характер зависимости (1)

Значения молекулярных констант

	Воздух	Аргон
$\alpha_1$	70.1	36.93
$\alpha_2$	1.375	1.206
$\beta_1$	71	50
$\beta_2$	0.3	67.21
$\beta_3$	4.662	2.328
$C_2$	3116	5000
$b_0$	220	184
$b_1$	0.3	0.7
$a_1$	3	3.62
$a_2$	-1	0.49
$g_1$	2.204	0.837
$g_2$	0.863	0.922
$\lambda_1$	28.66	7.63
$\lambda_2$	-11.03	-1.94
$\mu_1$	0.377	0.24
$\mu_2$	1.034	1.149

выбран таким образом, чтобы асимптотики (1) ( $U \sim 1/p$  при малых  $p$  и  $U \sim p$  при больших  $p$ ) совпадали с соответствующими асимптотиками уравнения пробоя газа в постоянном электрическом поле, так как при низких давлениях и малых зазорах  $L$  пробой газа в ВЧ поле подобен пробую в постоянном электрическом поле с изменяющимся направлением поля через каждые полпериода (зажигаются при этом разряд в [8] назван мультипакторным, переключающимся). Характер зависимостей (2) подбирался так, чтобы (1), (2) хорошо описывали не только вторично-эмиссионную ветвь при малых зазорах  $L$ , но и переходный участок при больших  $L$ .

Для описания участка кривой зажигания в области неоднозначной зависимости пробойного ВЧ напряжения от давления газа  $p$  [7,12,13], а также вблизи и справа от минимума (вплоть до точки перегиба) кривой зажигания (диффузионная ветвь) (II) удобно использовать уравнение Кихары [11] для ВЧ пробоя:

$$\exp\left(\frac{B_0 p}{2E}\right) = A_1 p L \left(1 - \frac{E/B_0 p}{C_2 L/\Lambda}\right). \quad (3)$$

Однако мы используем вместо молекулярных констант Кихары  $B_0$  и  $A_1$  следующие зависимости, учитывающие

расстояние между электродами и сорт газа:

$$B_0 = \frac{b_0}{1 + \frac{b_1}{L^4}}; \quad A_1 = a_1 L + a_2, \quad (4)$$

где  $E = E_0/\sqrt{2}$  — эффективное ВЧ поле,  $C_2$ ,  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $a_1$  и  $a_2$  — константы, зависящие от сорта газа (см. таблицу),  $L$  — вакуумная длина волны ВЧ поля. На необходимость уточнения значений констант  $A_1$ ,  $B_0$  и  $C_2$  указывал еще сам Кихара [11], а затем и другие авторы [14–16]. Это связано с тем, что модель [11] не учитывает влияние вторичной электронной эмиссии на пробой газа в ВЧ поле, в то время как в [17] было показано, что именно в области применимости уравнения Кихары для ВЧ пробоя газа (3) (слева от точки перегиба) материал электродов заметно влияет на потенциалы зажигания разряда в ВЧ поле.

Для дальнейшего описания ВЧ пробоя необходимо точно знать давление, при котором на ВЧ кривой зажигания наблюдается точка перегиба. Для точки перегиба нами из кривых зажигания получено следующее уравнение [18]

$$p_{\text{перегиб}} = \frac{g_1}{L^4} + g_2. \quad (5)$$

Поведение кривой зажигания ВЧ разряда справа от точки перегиба (III) можно описать степенной функцией с началом координат в точке перегиба

$$U = U_{\text{перегиб}} + A(p - p_{\text{перегиб}})^B, \quad (6)$$

$$B = \frac{\mu_1}{L^2} + \mu_2, \quad A = \lambda_1 L + \lambda_2,$$

где  $g_1$ ,  $g_2$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\mu_1$  и  $\mu_2$  — константы, зависящие от сорта газа (таблица),  $U_{\text{перегиб}}$  — наименьшее ВЧ напряжение, получаемое из уравнения (3) при  $p = p_{\text{перегиб}}$ .

На рис. 1 и 2 показаны экспериментально измеренные и рассчитанные из уравнений (1), (3), (6) кривые зажигания ВЧ разряда в воздухе и аргоне соответственно. Как видно из рисунков, аппроксимационные уравнения (1), (3), (6) удовлетворительно описывают соответствующие участки экспериментальных кривых зажигания, а также поведение области неоднозначной зависимости пробойного ВЧ напряжения от давления газа  $p$ .

Таким образом, в настоящей работе методом наименьших квадратов получены аппроксимационные формулы, удовлетворительно описывающие различные участки

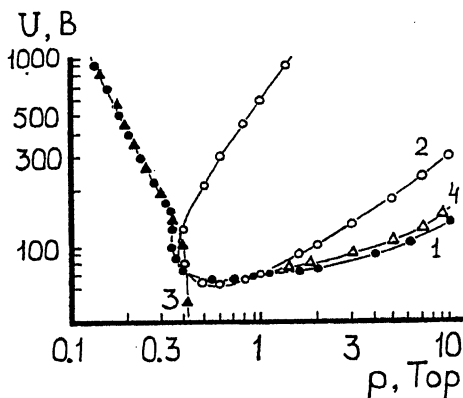


Рис. 2. Кривые зажигания ВЧ разряда в аргоне при  $L = 1.3$  см: 1 — эксперимент, 2 — расчет по (3), 3 — расчет по (1), 4 — расчет по (6).

(вторично-эмиссионную (I) и диффузионную (II) ветви, а также ветвь справа от точки перегиба (III)) экспериментально измеренных нами кривых зажигания ВЧ разряда в широком диапазоне давлений газа, межэлектродных расстояний и ВЧ напряжений. Полученные формулы позволяют моделировать процессы в технологических установках с различными газами.

### Список литературы

- [1] Flamm D.L., Donnelley 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] Kobayashi K., Mutsukura N., Machi Y. // J. Appl. Phys. 1986. V. 59. P. 910.
- [4] Vora H., Moravec T.J. // J. Appl. Phys. 1981. V. 52. P. 6151.
- [5] Мышенков В.И., Яценко Н.А. // Квантовая электроника. 1981. Т. 8. С. 2121.
- [6] Яценко Н.А. Препринт ИПМ АН СССР № 338. 1988. 44 с.; № 381. 1989. 36 с.; № 465. 1990. 24 с.
- [7] Левитский С.М. // ЖТФ. 1957. Т. 27. С. 970.
- [8] Brown S.C. Basic Data of Plasma Physics. New York, 1959. P. 209.
- [9] Githens S. // Phys. Rev. 1940. V. 57. P. 822.
- [10] Френсис Г. Ионизационные явления в газах М., 1964. 304 с.
- [11] Kihara T. // Rev. Modern Phys. 1952. V. 24. P. 45.
- [12] Кропотов Н.Ю., Качанов Ю.А., Реука А.Г., Лисовский В.А., Егоренков В.Д., Фареник В.И. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. С. 359.
- [13] Лисовский В.А., Егоренков В.Д. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 17. С. 66.
- [14] Sen S.N., Ghosh A.K. // Indian J. Phys. 1962. V. 36. P. 605.
- [15] Sen S.N., Bhattacharjee B. // Can. J. Phys. 1965. V. 43. P. 1543.

- [16] Анашкин Г.А. // Радиотехника и электроника. 1987. Т. 32. С. 2567.
- [17] Кропотов Н.Ю., Лисовский В.А., Фареник В.И. // Мат. II всесоюз. совещ. по ВЧ разряду в волновых полях. Куйбышев, 1989. С. 11.
- [18] Lisovsky V.A., Yegorenkov V.D. // IEEE Conference Record-Abstracts ICOPS'94. Santa-Fe, USA, 1994. P. 125.

Харьковский государственный  
университет

Поступило в Редакцию  
31 июля 1994 г.  
В окончательной редакции  
10 августа 1994 г.

---