

04

© 1992

ПРОБОЙ ГАЗА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ В КОМБИНИРОВАННЫХ ПОЛЯХ

В.А. Л и с о в с к и й., В.Д. Е г о р е н к о в

В различных технологических процессах часто используется комбинация постоянного и ВЧ электрических полей (например, при анодировании кремния [1], алюминия [2], для накачки лазеров [3-6] и т.д.), поэтому изучение возникновения разряда в таких комбинированных полях представляет значительный интерес.

Как известно [7, 8], в области малых давлений слева от минимума кривых зажигания ВЧ разряда имеется область неоднозначной зависимости пробойного ВЧ напряжения U_{rf} от давления газа p . Вместе с тем, комбинированный разряд, соответствующий слаботочной форме ВЧ разряда, характеризуется немонотонной зависимостью пробойного ВЧ напряжения U_{rf} от приложенного постоянного напряжения U_{dc} . С увеличением U_{dc} пробойное ВЧ напряжение сначала растет [7, 9 - 11], достигает максимума и затем уменьшается [7, 11]. Представляет интерес исследовать влияние внешнего постоянного электрического поля на характер пробоя ВЧ разряда более детально и, в частности, определить его влияние на величину области неоднозначности.

На границах области неоднозначности кривая зажигания ВЧ разряда проходит через две точки поворота. Давление газа на левой границе области неоднозначности (более низкое p , первая точка поворота) обозначим через p_1 , на правой границе (вторая точка поворота, при более высоком p) - p_2 . Введем относительную ширину области неоднозначности $l = (p_2 - p_1)/p_1$. В настоящей работе получено, что l с ростом U_{dc} линейно уменьшается вплоть до нуля, а при больших U_{dc} , когда постоянное поле вносит вклад в ионизацию газа, на левой кривой зажигания снова появляется область неоднозначности, причем l с ростом U_{dc} линейно увеличивается. Здесь также выведены уравнения пробоя в комбинированном поле при различном соотношении величины ВЧ и постоянного полей. Результаты расчетов в области применимости полученных уравнений удовлетворительно согласуются с измеренными нами кривыми зажигания.

В настоящей работе измерялись кривые зажигания продольного комбинированного разряда (постоянное и ВЧ напряжения прикладывались к одним и тем же электродам) в аргоне, воздухе и CF_4 в диапазоне $U_{dc} = 0 - 600$ В и $U_{rf} = 0 - 10^3$ В при $p = 10^{-2} - 10$ Тор и частоте ВЧ поля $f = 13.56$ МГц. Расстояние между

электродами из нержавеющей стали диаметром 100 мм $L = 7 - 54$ мм. Правая ветвь кривой зажигания снималась следующим методом. При фиксированных U_{dc} и давлении ВЧ напряжение на электродах повышалось до возникновения пробоя. Для исследования левой ветви при достаточно низком давлении ($\sim 10^3$ Тор) устанавливались определенные величины U_{dc} и U_{rf} , а затем давление плавно увеличивалось до возникновения пробоя.

В результате исследований получено, что небольшое U_{dc} вызывает заметное увеличение U_{rf} на правой ветви кривой зажигания (рис. 1, а и рис. 2, а), при этом ширина l с ростом U_{dc} линейно уменьшается вплоть до нуля (рис. 2, б), а минимум кривой зажигания смещается в область более высоких давлений. При больших U_{dc} , когда постоянное поле вносит вклад в ионизацию газа, U_{rf} проходит через максимум и уменьшается, достигая нуля, когда U_{dc} становится равным потенциалу зажигания разряда на постоянном токе (рис. 1, б). Максимум кривой зажигания смещается в область более низких давлений, а на левой ветви снова появляется область неоднозначности, причем ее ширина l с ростом U_{dc} увеличивается по линейному закону. При больших U_{rf} левые ветви кривых зажигания комбинированного разряда асимптотически стремятся к кривой зажигания ВЧ разряда при $U_{dc} = 0$. Из рис. 1, б видно, что появление области неоднозначности при больших U_{dc} наблюдается при $U_{rf} \approx U_{dc}$.

При небольших межэлектродных зазорах (< 10 мм) область неоднозначности выражена слабо и для ее исчезновения достаточно приложить $U_{dc} \sim 25$ В (рис. 3). При малых зазорах L на кривой зажигания ВЧ разряда может появиться второй минимум, что было показано в [7, 12]. Повышение U_{dc} приводит к тому, что минимум, соответствующий слаботочной форме ВЧ разряда, исчезает, на кривых зажигания комбинированного разряда остается только второй минимум, соответствующий сильноточной форме ВЧ разряда, при этом повторное появление области неоднозначности при больших U_{dc} и $U_{rf} \approx U_{dc}$ отсутствует.

Интерпретацию полученных результатов при произвольном отношении амплитуды ВЧ и постоянного полей выполнить затруднительно, поэтому мы рассмотрим два предельных случая, облегчающих истолкование.

С л у ч а й с л а б о г о п о с т о я н н о г о п о л я .
Рассмотрим вначале ВЧ разряд с наложенным на него небольшим постоянным электрическим полем, когда оно не вносит вклад в ионизацию газа. Тогда в критерии ВЧ пробоя [13]

$$\frac{L_{rf}^2}{x^2} \cdot \frac{\nu_i}{D} = 1, \quad (1)$$

где $L_{rf} = L - (2 \cdot K \cdot E_{rf} / D)$ - диффузионная длина разрядной камеры в присутствии ВЧ поля, E_{rf} - амплитуда ВЧ поля, ν_i -

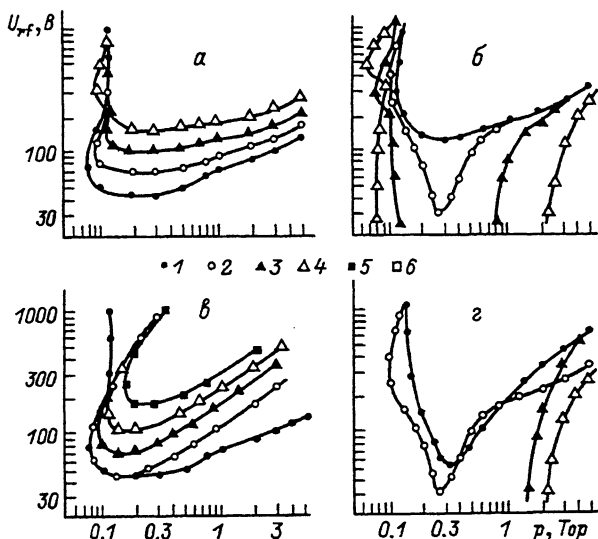


Рис. 1. Кривые зажигания комбинированного разряда в аргоне, $L = 23$ мм: а) 1 - $U_{dc} = 0.2 - 25$, 3 - 50, 4 - 100 В; б) 1 - $U_{dc} = 125$, 2 - 150, 3 - 200, 4 - 300 В; в) 1 - $U_{dc} = 0$, эксперимент, 2 - 5 расчет по (3) : 2 - $U_{dc} = 0.3 - 25$, 4 - 50, 5 - 100 В; г) 1 - $U_{dc} = 150$ В и 3 - $U_{dc} = 300$ В - расчет по (7), 2 - $U_{dc} = 150$ и 4 - $U_{dc} = 300$ В - эксперимент.

частота ионизации, D - коэффициент диффузии, K - подвижность электронов, можно заменить L_{rf} на диффузионную длину камеры при совместном действии ВЧ и небольшого постоянного электрических полей L_{dc} [14]

$$L_{dc} = L_{rf} \cdot \left[1 + \left(\frac{E_{dc} \cdot L_{rf}}{2\pi D/K} \right)^2 \right]^{-1/2}, \quad (2)$$

где E_{dc} - величина постоянного электрического поля. После замены ν_i , D и K выражениями из [13] приходим к уравнению ВЧ пробоя газа при наложенном слабом постоянном электрическом поле:

$$A_1 \rho L \cdot \left(1 - \frac{E/B_0 \rho}{C_2 L / \Lambda} \right) = \exp \left(\frac{B_0 \rho}{2E} \right) \cdot \left\{ 1 + \left[\frac{E_{dc}}{E_{rf}} \cdot \left(1 - \frac{E/B_0 \rho}{C_2 L / \Lambda} \right) \cdot A_1 \rho L \cdot \left(\frac{c_i \rho}{2\sigma} \right)^{1/2} \right]^2 \right\}^{1/2}, \quad (3)$$

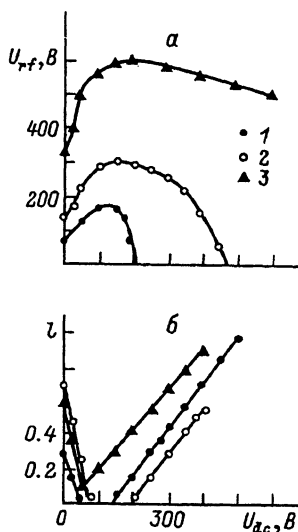


Рис. 2. а) Зависимость пробойного ВЧ напряжения U_{rf} от приложенного постоянного напряжения U_{dc} в аргоне при $L = 23$ мм; 1 - $p = 1$, 2 - 5, 3 - 10 Тор; б) зависимость относительной ширины области неоднозначности l от U_{dc} при $L = 23$ мм в воздухе - 1, CF_4 - 2, аргоне - 3.

где $E = E_{rf} / \sqrt{2}$, A_1 , B_0 , C_2 , c_1 , ρ , β - молекулярные константы, табулированные в [13], λ - вакуумная длина волны ВЧ поля. При $E_{dc} = 0$ (3) сводится к уравнению Кихары для ВЧ пробоя газа [13]. При $p \geq p$ перегиб [8] и $U_{dc} \geq 20$ В численное значение слагаемого в квадратных скобках в (3) значительно больше 1, поэтому (3) можно упростить:

$$\exp\left(\frac{B_0 \rho}{2E}\right) = \frac{E_{rf}}{E_{dc}} \cdot \left(\frac{2\beta}{c_1 \rho}\right)^{1/2}. \quad (4)$$

В отличие от [11], уравнение (3) позволяет рассмотреть влияние E_{dc} на область неоднозначности. Как видно из рис. 1, а и 1, в, кривые зажигания, рассчитанные из уравнения (3), удовлетворительно согласуются с экспериментальными кривыми зажигания в области применимости (3).

Случай сильного постоянного поля. Здесь мы считаем, что U_{dc} близко к потенциалу зажигания разряда на постоянном токе, поэтому в качестве первого приближения возьмем уравнение пробоя в постоянном поле

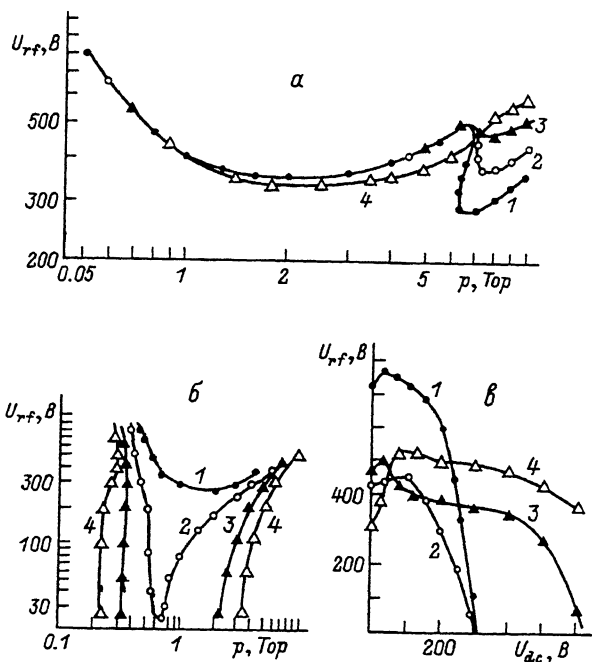


Рис. 3. а) и б) Кривые зажигания комбинированного разряда в воздухе при $L = 7.5$ мм: а) 1 - $U_{dc} = 0.2 - 25$, 3 - 50, 4 - 100 В; б) 1 - $U_{dc} = 200$, 2 - 300, 3 - 400, 4 - 500 В; в) зависимость пробойного ВЧ напряжения U_{rf} от приложенного постоянного напряжения U_{dc} в воздухе при $L = 7.5$ мм: 1 - $p = 0.55$, 2 - 1, 3 - 6, 4 - 8 Тор.

$$\gamma \cdot [e^{\alpha L} - 1] = 1, \quad (5)$$

где α и γ - соответственно первый и второй коэффициенты Таунсенда, и в (5) вместо постоянного поля E_{dc} введем согласно [14] эффективное поле E_{eff}

$$E_{eff}^2 = E_{dc}^2 - \frac{\nu_c^2}{\nu_c^2 + \omega^2} \cdot \frac{E_{rf}^2}{2}, \quad (6)$$

где ν_c - частота электрон-атомных столкновений, $\omega = 2\pi f$. Тогда мы приходим к следующему уравнению пробоя

$$U_{rf} = \left\{ \frac{2(\nu_c^2 + \omega^2)}{\nu_c^2} \cdot \left[\left(\frac{B_0 p L}{\Gamma \kappa(A_0 p L, \Gamma)} \right)^2 - U_{dc}^2 \right] \right\}^{1/2}, \quad (7)$$

где $\Gamma = ((1 + \gamma)/\gamma)$, A_0 - константа [13]. Как видно из рис. 1, г, в области применимости (7) (вблизи потенциала зажигания разряда на постоянном токе) кривые зажигания, рассчитанные из урав-

нения (7), удовлетворительно согласуются с экспериментальными кривыми зажигания.

Таким образом, в настоящей работе экспериментально и теоретически изучен пробой газа низкого давления в комбинированном (ВЧ + постоянном) электрическом поле. Исследовано влияние слабого постоянного электрического поля на область неоднозначной зависимости U_{rf} от давления газа (на левой ветви кривой зажигания ВЧ разряда). Получено, что увеличение U_{dc} приводит к линейному уменьшению относительной ширины области неоднозначности l . Однако при больших U_{dc} на левой ветви кривой зажигания снова появляется область неоднозначности, причем ее ширина l с ростом U_{dc} увеличивается по линейному закону. Для случаев слабого и сильного постоянного электрического поля выведены уравнения пробоя, удовлетворительно описывающие полученные нами экспериментальные результаты.

В заключение авторы благодарят Н.А. Яценко за обсуждение работы и ценные замечания.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] L i g e n z a J.R. // J. Appl. Phys. 1965. V. 36. P. 2703.
- [2] M i l e s J.L., S m i t h P.H. // J. Electrochem. Soc. 1963. V. 110. P. 1240.
- [3] E s k b r e t h A.C., D a v i s J.W. // Appl. Phys. Lett. 1972. V 21. P 25.
- [4] B r o w C.O., D a v i s J.W. // Appl. Phys. Lett. 1972. V. 21. P. 480.
- [5] Я ц е н к о Н.А. Автореф. дис. на соискание. уч. ст. к.ф.-м.н. М.: МФТИ, 1978. 24 с.
- [6] Я ц е н к о Н.А. // Препринт ИПМ АН СССР. № 338. М.: 1988. 44 с.
- [7] Л е в и т с к и й С.М. // ЖТФ. 1957. Т. 27. С. 970.
- [8] К р о п о т о в Н.Ю., К а ч а н о в А.Ю., Р е у к а А.Г., Л и с о в с к и й В.А., Е г о р е н к о в В.Д., Ф а р е н и к В.И. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. С. 359.
- [9] K i r c h n e r F. // Ann. der Physik. 1925. V. 77. P. 287.
- [10] V a r e l a A.A. // Phys. Rev. 1947. V. 71. P. 124.
- [11] S e n S.N., B h a t t a c h a r j e e B. // Can. J. Phys. 1965. V. 43. P. 1543; 1966. V. 44. P. 3270.
- [12] G i t h e n s S. // Phys. Rev. 1940. V. 57. P. 822.
- [13] K i h a r a T. // Rev. Mod. Phys. V.24. P. 45.
- [14] V a r n e r i n L.J., B r o w n S.C. // Phys. Rev. 1950. V. 79. P. 46.