

ВЛИЯНИЕ ВТОРИЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ НА ВЧ ПРОБОЙ ГАЗА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

© В.А.Лисовский, Н.Ю.Кропотов, В.И.Фареник

Высокочастотный емкостный газовый разряд в настоящее время широко используется в различных технологических процессах: при анизотропном травлении полупроводниковых, диэлектрических и металлических подложек [1], осаждении полупроводниковых покрытий [2], анодировании кремния и алюминия [3], осаждении алмазоподобных тонких пленок [4], накачке газовых лазеров [5-6]. При этом для оптимизации плазменных технологических процессов часто необходимо знать условия пробоя газа в разрядном устройстве [7], поэтому численное моделирование и экспериментальное измерение кривых зажигания ВЧ разряда представляют значительный интерес.

Пробой газа в однородном ВС поле посвящено большое количество экспериментальных и теоретических работ [8-15]. При проведении экспериментов [8-14], как правило, использовались электроды из одного и того же материала, а в теоретических моделях [12-15] вкладом вторично-эмиссионных процессов в ВЧ пробой газа пренебрегалось. Поэтому если для пробоя газа в постоянном электрическом поле влияние материала электродов выяснено довольно подробно [16], то для ВЧ пробоя газа этот вопрос остается открытым.

В настоящей работе экспериментально и теоретически исследован пробой газа в однородном ВЧ поле при различных материалах электродов. Полученное нами уравнение пробоя газа, учитывающее вторичную электронную эмиссию с поверхности электродов, удовлетворительно описывает измеренные нами кривые зажигания ВЧ разряда.

Кривые зажигания ВЧ разряда измерялись в воздухе, аргоне, CF_4 и SF_6 при давлениях газа $p = 10^{-3}$ – 10 Тор в диапазоне ВЧ напряжений $U_{rf} \leq 1500$ В и частоте поля $f = 13.56$ МГц. Расстояние между плоскими параллельными электродами диаметром 100 мм изменялось в диапазоне $L = 6$ – 54 мм. Использовались электроды из нержавеющей стали и дюралюминия, а также стальные электроды, покрытые сажей и полимерной пленкой. Обезгаживание и отжиг металлических электродов не проводились. На один

из электродов подавалось ВЧ напряжение, второй электрод был заземлен. Для исключения постоянного напряжения автосмещения между электродами подключался дроссель индуктивностью 4 мГн.

Методика измерения кривых зажигания ВЧ разряда была следующей. При фиксированном давлении газа ВЧ напряжение на электродах медленно повышалось до потенциала пробоя. В области неоднозначной зависимости пробойного напряжения от давления газа при достаточно низком давлении $p \sim 10^{-3}$ Тор устанавливалась определенная величина ВЧ напряжения, а затем давление газа в камере плавно увеличивалось до зажигания разряда. Характерное время задержки зажигания ВЧ разряда для чистых металлических электродов не превышало 1с. Значительное время задержки пробоя (5–10с) наблюдалось при зажигании ВЧ разряда между электродами, покрытыми материалом с низким коэффициентом вторичной электронной эмиссии (сажей либо полимерной пленкой со сложным рельефом поверхности, образовавшейся на электродах при длительном горении ВЧ разряда в технологических газах). Точность измерения пробойных ВЧ напряжений была ± 2 В в диапазоне $U_{rf} \leq 500$ В и ± 5 В в диапазоне $U_{rf} > 500$ В.

На рис. 1–2 представлены кривые зажигания ВЧ разряда в воздухе, SF_6 и CF_4 при различных материалах электродов. Из рисунков видно, что кривые зажигания ВЧ разряда практически не зависят от материала электродов в диапазоне давлений газа вблизи и справа от точки перегиба (см., например, [14]). В области давлений слева от точки перегиба наблюдается заметное расхождение между кривыми зажигания, измеренными для электродов из различных материалов. Чем выше коэффициент вторичной электронной эмиссии материала электродов δ , тем меньшие ВЧ напряжения нужны для пробоя газа, кривая зажигания отклоняется в область более низких давлений. Использование электродов с более высоким значением δ оказывает на кривую зажигания ВЧ разряда такое же влияние, как и небольшое увеличение расстояния между электродами L (это видно из сравнения рис. 1, а и б). Практически на всех экспериментальных кривых хорошо видна область неоднозначной зависимости пробойного ВЧ напряжения от давления газа [11,13,14], расположенная слева от минимума кривых зажигания.

Рассмотрим механизмы рождения и ухода заряженных частиц, принимающие участие в пробое газа. При достаточно высоком давлении газа вторичная эмиссия электронов с поверхности электродов, по-видимому, заметной роли в пробое не играет, а доминируют ионизация молекул газа электронами, дрейф электронов в ВЧ поле и диффу-

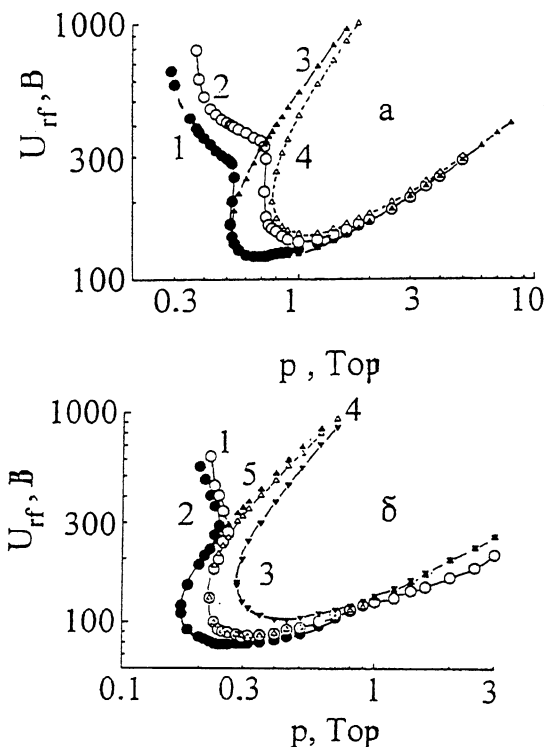


Рис. 1. Зависимость пробойного ВЧ напряжения от давления воздуха при а — $L = 14$ мм; 1 — чистые стальные электроды, 2 — стальные электроды покрыты сажей, 3 — расчет из (2) для $\delta = 0.1$, 4 — расчет из (2) для $\delta = 0.02$; б — $L = 20$ мм; 1 — стальные электроды, 2 — электроды из дюралюминия, 3 — расчет из (2) для $\delta = 0.02$, 4 — расчет из (2) для $\delta = 0.1$, расчет из (2) для $\delta = 0.2$.

зия электронов к стенкам и электродам разрядной камеры. При понижении давления увеличивается амплитуда смещения электронов в ВЧ поле, т. е. большее количество электронов сталкивается с поверхностью электродов в соответствующей половине периода ВЧ поля. Часть столкнувшихся с электродом электронов возвращается в объем камеры в виде либо вторичных электронов, эмитированных из электродов, либо первичных электронов, отразившихся от поверхности электродов. Вторичная электронная эмиссия с поверхности электродов уменьшает потери электронов на стенках и электродах разрядной камеры, т. е. большее число электронов принимает участие в ионизации молекул газа и для пробоя нужны меньшие величины ВЧ напряжения. Поэтому при понижении давления газа роль вторичной

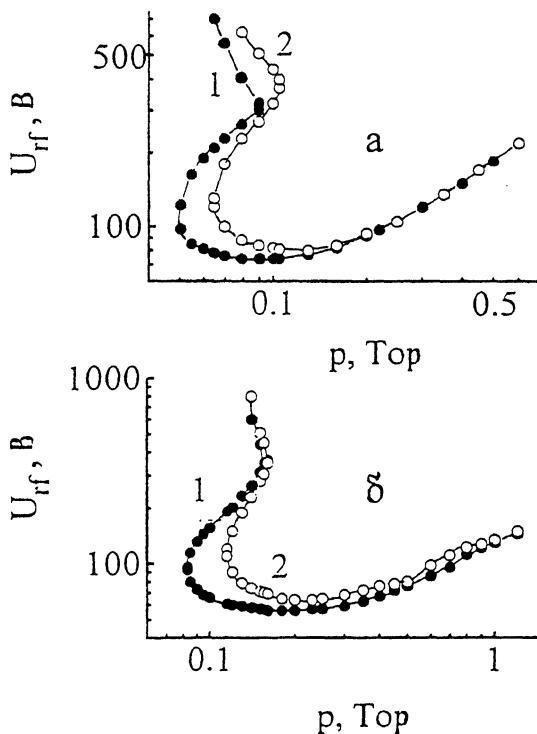


Рис. 2. Зависимость пробойного ВЧ напряжения от давления газа для а — SF_6 : 1 — чистые стальные электроды, 2 — стальные электроды покрыты сажей; б — CF_4 : 1 — электроды из дюралюминия, 2 — стальные электроды; $L = 20$ мм.

электронной эмиссии в пробое газа возрастает. В области точки поворота кривой зажигания амплитуда смещения электронов в ВЧ поле примерно равна половине расстояния между электродами и заметная часть электронов из-за осцилляций в ВЧ поле уходит в электроды [11], однако благодаря вторичной электронной эмиссии кривая зажигания проходит в области более низких давлений газа, чем для незамитирующих электродов.

Рассмотрим простую феноменологическую одномерную модель ВЧ пробоя газа с учетом вторичной электронной эмиссии с поверхности электродов. Пусть перед пробоем плотность электронов равна n_e . ВЧ поле изменяется по закону $E = E_0 \cos \omega t$. При этом предполагается, что диаметр электродов намного больше межэлектродного расстояния L , т. е. рассматривается случай однородного ВЧ поля. Вкладом ионов в развитие пробоя пренебрегаем, так

как высокочастотное поле на ионы из-за их инерционности практически не влияет. Электронное облако осциллирует в ВЧ поле и попеременно касается электродов. Границы его из-за диффузии электронов в течение периода ВЧ поля расплываются на расстояние $d \approx \sqrt{2D_e/f}$. В электроды могут уходить только те электроны, которые покинули электронное облако вследствие диффузии. Тогда в полупериоде ВЧ поля, когда электроны движутся к одному из электродов, на 1 см^2 поверхности электрода может попасть dn_e электронов. С этого же 1 см^2 электрода может выйти $dn_e \delta$ вторичных электродов, которые совместно с плазменными электронами участвуют в ионизации молекул газа. Тогда, используя методику [15], можно записать критерий ВЧ пробоя:

$$\frac{\nu_i}{D_e} \left(\frac{L}{2} - \frac{\mu_e E_0}{\omega} \right)^2 \left\{ \arccos \left(\frac{d\delta\omega}{\mu_e E_0} \right) \right\}^{-2} = 1, \quad (1)$$

где ν_i — частота ионизации молекул газа электронами, D_e — коэффициент диффузии электронов, μ_e — подвижность электронов. После замены ν_i , D_e и μ_e выражениями из [15], получим уравнение ВЧ пробоя с учетом вторичной электронной эмиссии:

$$\exp \left(\frac{B_0 p}{\sqrt{2} E_0} \right) = A_1 p \pi \left(L - \frac{E_0 \Lambda}{\sqrt{2} B_0 p C_2} \right) \times \\ \times \left\{ 2 \arccos \left\{ \delta \left(\frac{2\pi m \omega}{e E_0} \right)^{1/2} \left(\frac{3\pi}{2\lambda} \right)^{-1/4} \right\}^{-1} \right\}. \quad (2)$$

Здесь E_0 — амплитуда ВЧ поля, Λ — вакуумная длина ВЧ поля, A_1 , B_0 , C_2 , λ и ρ — молекулярные константы, табулированные в [14,15], e и m — заряд и масса электрона соответственно. При отсутствии вторичной электронной эмиссии с поверхности электродов ($\delta = 0$) уравнение (2) переходит в уравнение Кихары для пробоя газа в однородном ВЧ поле [15]:

$$\exp \left(\frac{B_0 p}{\sqrt{2} E_0} \right) = A_1 p L \left(1 - \frac{E_0 \Lambda}{\sqrt{2} B_0 p C_2 L} \right). \quad (3)$$

Как видно из рис. 1, уравнение (2) удовлетворительно описывает измеренные нами кривые зажигания ВЧ разряда при различных материалах электродов. Значения коэффициента вторичной электронной эмиссии δ были взяты из работ [17,18]. Таким образом, в настоящей работе экспериментально и теоретически исследовано влияние материала электродов на кривые зажигания ВЧ разряда низкого давления.

Полученное нами уравнение пробоя газа в однородном ВЧ поле, учитывающее вторичную электронную эмиссию с поверхности электродов, удовлетворительно описывает экспериментальные кривые зажигания.

Список литературы

- [1] *Flamm D.L., Donnely V.M., Ibbotson D.E.* // J. Vac. Sci. Technol. 1983. V. B1. P. 23.
- [2] *Coburn J.W., Kay E.* // Plasma Chem. Plasma Process. 1982. V. 2. P. 1.
- [3] *Ligenza J.R.* // J. Appl. Phys. 1965. V. 36. P. 2703.
- [4] *Yalamanchi R.S., Thutupalli G.K.M.* // Thin solid Films. 1988. V. 164. P. 103.
- [5] *Мышенков В.И., Яценко Н.А.* // Квант. электрон. 1981. Т. 8. С. 2121.
- [6] *Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А.* Высокочастотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения. М.: Изд-во МФТИ; Наука-Физматлит, 1995. 320 с.
- [7] *Lisovsky V.A., Yegorenkov V.D., Farenik V.I.* Record-Abstracts of IEEE Int. Conf. on Plasma Science. 1995. Madison, USA. P. 162.
- [8] *Githens S.* // Phys. Rev. 1940. V. 57. P. 822.
- [9] *Chenot M.* // Annales de Physique. 1948. V. 3. N 5. P. 277.
- [10] *Pim J.A.* Proc. IEEE. 1949. P. 3. V. 96. N 40. P. 117.
- [11] *Левитский С.М.* // ЖТФ. 1957. Т. 27. С. 970.
- [12] *Thompson B.E., Sawin H.H.* // J. Appl. Phys. 1986. V. 60. N 1. P. 89.
- [13] *Лисовский В.А., Егоренков В.Д.* // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 17. С. 66.
- [14] *Lisovsky V.A., Yegorenkov V.D.* // J. Phys. D. 1994. V. 27. P. 2340.
- [15] *Kihara T.* // Rev. Modern Phys. 1952. V. 24. P. 45.
- [16] *Мик Дж., Крэгс Дж.* Электрический пробой в газах. М.: ИЛ, 1960. 606 с.
- [17] *Бронштейн И.М., Фрайман Б.С.* Вторичная электронная эмиссия. М.: Наука, 1969. 408 с.
- [18] *Martin N.L.S., von Engel A.* // J. Phys. D., 1977. V. 10. N 6. P. 863.

Харьковский
государственный университет

Поступило в Редакцию
4 октября 1996 г.