

- [1] К уд р и н Л.П. Статистическая физика плазмы. М.: Атомиздат, 1974.
- [2] З а м а л и н В.М., Н о р м а н Г.Э., Ф и л и н о в В.С. Метод Монте-Карло в статистической термодинамике. М.: Наука, 1977.
- [3] I s h i m a r u S. - Rev. Mod. Phys., 1982, v. 54, N 4, p. 1017.
- [4] Ф о р т о в В.Е., Я к у б о в И.Т. Физика неидеальной плазмы. Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1984.
- [5] Д е р ж и е в В.И., Ж и д к о в А.Г., Я к о в л е н к о С.И. Излучение ионов в неравновесной плотной плазме. М.: Энергоатомиздат, 1986.
- [6] Л а г а р ь к о в А.И., С е р г е е в В.М. - уФН, 1978, т. 125, с. 409.
- [7] V e r l e t L. - Phys. Rev., 1967, v. 159, N 1, p. 98.
- [8] К о г а н В.И., С е л и д о в к и н А.Д. - Beitr. Plasma Phys., 1969, v. 9, p. 199; C h a n d r a - s e k h a r S., v o n N e u m a n n J., A s t r o p h y s. J., 1942, v. 95, p. 489; 1943, v. 97, p. 1.

Поступило в Редакцию

24 июня 1987 г.

В окончательной редакции

16 ноября 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 4

26 февраля 1988 г.

ОСОБЕННОСТИ ПРОБОЯ ГАЗА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ОДНОРОДНОМ ПОЛЕ

Н.Ю. К р о п о т о в, Ю.А. К а ч а н о в,
А.Г. Р е у к а, В.А. Л и с о в с к и й,
В.Д. Е р о р е н к о в, В.И. Ф а р е н и к

Исследованию пробоя газов низкого давления в высокочастотном электрическом поле между плоскопараллельными электродами посвящено много работ [1, 2, 3]. Однако применение в настоящей работе нестандартной экспериментальной методики позволило выявить некоторые особенности кривой зажигания, которые ранее не удавалось наблюдать ввиду их нахождения в узкой области давлений.

Эти особенности имеются как на левой, так и на правой ветвях кривой зажигания, причем на левой ветви наблюдается неоднозначная зависимость напряжения зажигания от давления, а на правой,

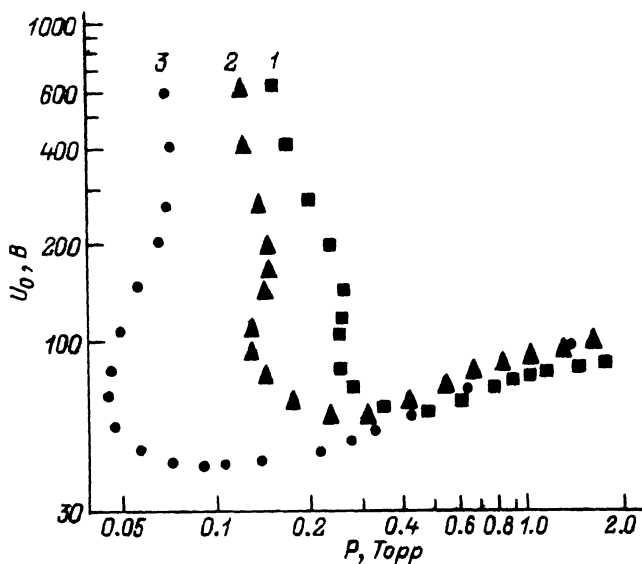


Рис. 1. Зависимость потенциала зажигания от давления аргона. 1 - $d = 14$ мм, 2 - $d = 20$ мм, 3 - $d = 29$ мм.

в определенных условиях, имеется точка перегиба. На основе диффузионной кинетической теории ВЧ-пробоя [4] получены соотношения между значениями давления точки перегиба, точки минимума и точки поворота кривой зажигания, которые хорошо согласуются с наблюдаемыми в экспериментах.

Эксперименты проводились при частоте электрического поля $f = 13.56$ МГц, давлении газа $P = 10^{-2}$ – 10 Торр и расстоянии $d = 14$ – 30 мм между плоскими круглыми электродами диаметром 100 мм.

Правая ветвь кривой зажигания снималась стандартным методом. При фиксированном давлении в рабочей камере увеличивалось напряжение на электродах до момента пробоя. Для исследования левой ветви в работе применялась следующая методика. При достаточно низком давлении ($\sim 10^{-3}$ Торр) устанавливалась определенная величина ВЧ напряжения, а затем плавно увеличивалось давление газа в вакуумной камере до момента пробоя.

В результате исследований на обеих ветвях кривой зажигания обнаружены особенности поведения потенциала зажигания. Левая ветвь является многозначной функцией давления газа, т.е. одному значению давления газа соответствует несколько значений напряжений пробоя. Правая ветвь имеет перегиб, причем перегиб существует только при малых межэлектродных расстояниях, когда минимум кривой приходится на давления, при которых $v_{en} \gg \omega$ (v_{en} – частота электрон-нейтральных столкновений, ω – частота электрического поля). На больших расстояниях, когда минимум кривой смещается в область низких давлений, перегиб не обнаруживается.

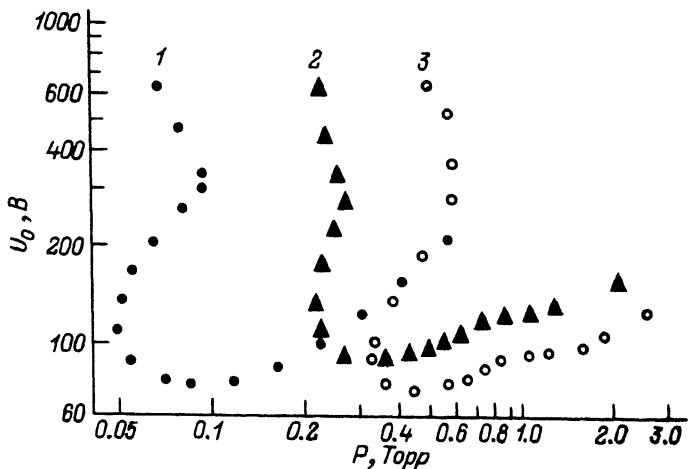


Рис. 2. Зависимость потенциала зажигания от давления различных газов. Расстояние между электродами 20 мм, 1 - SF_6 , 2 - водород, 3 - воздух.

Кривые зажигания для различных газов приведены на рис. 1, 2.

Из экспериментальных кривых на рис. 1, 2 следует, что для описания высокочастотного пробоя газов в исследуемой области изменения параметров применима диффузионная кинетическая теория ВЧ-пробоя [4]. Пользуясь в случае заполнения ВЧ-диода водородом H_2 аппроксимационной формулой для частоты электрон-молекулярных столкновений [5, 6] $\frac{\nu_{en}}{\rho} = 5.9 \cdot 10^9$ ($1/(с \cdot \text{Торр})$), легко показать, что параметры, соответствующие ветвям кривой зажигания в водороде (рис. 2), справа от минимума и слева от минимума кривой при напряжении пробоя $U_0 \leq U_{\text{поворот}}$ удовлетворяют условиям применимости диффузионной теории ВЧ-пробоя [4, 5, 7]:

$$\nu_{en} \gg \omega, \quad \lambda_e \ll d,$$

$$E_{lim} \leq \frac{d}{2} \frac{m_e \omega \nu_{en}}{e}, \quad (1)$$

где λ_e - длина свободного пробега электрона, e - заряд электрона, E_{lim} - предельная амплитуда электрического поля, при которой все электроны достигают стенок разрядной камеры за половину периода изменения поля. В кинетической теории ВЧ-пробоя [4] не учитываются столкновения электронов со стенками и явления вто-

ричной электронной эмиссии. Концентрация электронов в момент пробоя предполагается достаточно низкой, что позволяет пренебречь пространственным зарядом и рекомбинацией электронов в объеме газа. Рассматриваемая теория ВЧ-пробоя учитывает свободную диффузию и дрейф электронов в высокочастотном электрическом поле, а также возбуждение и объемную ионизацию молекул газа.

Уравнение высокочастотного пробоя газа кинетической теории ВЧ-пробоя легко привести к виду:

$$\exp\left(\alpha \frac{P}{U_0}\right) + \beta U_0 - \gamma P = 0, \quad (2)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{1}{\sqrt{2}} B_0 L, \quad \beta = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{A_1 \lambda}{B_0 C_2 C_2}, \quad \gamma = A_1 L,$$

U_0 - потенциал пробоя (В), P - давление газа (Торр), L - расстояние между плоскими электродами (см), λ - вакуумная длина волны высокочастотного поля (см), B_0, A_1, C_2 - константы, определенные в [4].

Покажем, что из уравнения (2) следует не только существование минимума, но и точки перегиба кривой и точки поворота. Используя, что в точке минимума $\frac{dU_0}{dP} = 0$, в точке поворота $\frac{d^2U_0}{dP^2} = \infty$,

а в точке перегиба $\frac{d^2U_0}{dP^2} = 0$, получим из (2) соотношение между значениями давления и напряжения в этих точках. Так, для значений давлений имеем

$$\frac{e}{2} < \frac{P_{\text{перегиб}}}{P_{\text{минимум}}} < e, \quad (3)$$

$$P_{\text{поворот}} < P_{\text{минимум}} < P_{\text{перегиб}}, \quad (4)$$

где e - основание натуральных логарифмов.

Для значений напряжения в точках минимума и перегиба кривой зажигания имеем следующее соотношение:

$$\frac{U_{\text{перегиб}}}{U_{\text{минимум}}} = \frac{e}{2}. \quad (5)$$

Для применимости модели минимум кривой должен приходиться на давление рабочего газа, при котором выполняется условие $\nu_{en} \gg \omega$. При малых расстояниях минимум кривой находится при высоких давлениях ($\nu_{en} \gg \omega$) и область перегиба ярко выражена. При увеличении расстояния минимум смещается в область низких давлений, где $\nu_{en} \approx \omega$, и перегиба не наблюдается. Измеренные

зависимости потенциала зажигания от давления в атмосфере аргона при различных расстояниях между электродами приведены на рис. 1. Отмеченные особенности поведения потенциала зажигания также наблюдаются в атмосфере SF_6, H_2 , воздуха. Результаты измерений приведены на рис. 2.

Из кривой зажигания в водороде следует, что значения давления и напряжения в точках минимума, перегиба и поворота кривой зажигания удовлетворяют соотношениям (3)–(5).

Как видно из рис. 1, 2, неоднозначность левой ветви наблюдается как при малых расстояниях между электродами $d = 14$ мм, так и при больших $d = 20$ – 30 мм. По-видимому, механизм пробоя в случае высокочастотного поля на левой ветви кривой зажигания в области больших значений напряжения аналогичен механизму на постоянном токе. При $U_0 > U$ поворот половину периода поля электрон успевает пройти весь межэлектродный зазор, и разряд развивается аналогично разряду постоянного тока. Отклонение левой ветви кривой в область высоких давлений связано, по-видимому, с уменьшением сечения ионизации. С ростом напряжения увеличивается эмиссия с электродов, и кривая зажигания отклоняется в область низких давлений [1, 8].

Л и т е р а т у р а

- [1] М и к Дж., К р э г с Дж. Электрический пробой в газах. М.: ИИЛ, 1960. 605 с.
- [2] Т h o m p s o n В.Е. and S a w i n Н.Н. – J. Appl. Phys., 1986, v. 60, N 1, p. 89–94.
- [3] R i c h a r d s А.Д., Т h o m p s o n В.Е., S a w i n Н.Н. – Appl. Phys. Lett., 1987, v. 50, p. 492.
- [4] К и h a r a Т. – Reviews of Modern Physics., 1952, v. 24, N 1, p. 45–61.
- [5] М а к – Д о н а л д. Сверхвысокочастотный пробой в газах. М.: ИИЛ, 1960.
- [6] М с D о n a l d А.Д., В r o w n S.С. – Phys. Rev., 1949, v. 76, p. 1634.
- [7] В r o w n S.С., М с D o n a l d А.Д. – Phys. Rev., 1949, v. 76, p. 1692.
- [8] У л ь я н о в К.Н., Ч у л к о в В.В. Тез. докл. УП Всес. конф. по физике низкотемпературной плазмы. Ташкент, май 1987 г. Ташкент: ФАН, 1987, ч. П, с. 101.

Ленинградский государственный
университет им. А.А. Жданова

Поступило в Редакцию
23 ноября 1987 г.