

04; 09

© 1992

ДИОДНЫЙ ЭФФЕКТ В НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОМ ВЧ ЕМКОСТНОМ РАЗРЯДЕ

А. М. Б у д я н с к и й, А. Г. П о к р о е в

Диодный эффект [1-4] является одной из наиболее интересных особенностей самостоятельного ВЧ емкостного (ВЧЕ) разряда низкого давления. Он проявляется главным образом в образовании приэлектродных слоев пространственного заряда и большого (порядка амплитуды U_0 приложенного ВЧ напряжения) положительного потенциала V в плазме относительно стенок.

В работах [1, 5, 6] образование стационарных полей связывается с пространственным ВЧ осцилляциями электронов в приэлектродных областях. В свою очередь, стационарные поля вызывают ускоренное движение положительных ионов из плазмы на стенки [1, 6], а ширину образующихся при этом приэлектродных слоев S нельзя объяснить только размахом ВЧ колебаний электронов [4, 6].

Наличие функциональной зависимости между плотностью плазмы n и напряжением U_0 в условиях самостоятельного ВЧЕ разряда усложняет изучение свойств приэлектродных слоев, которое по-прежнему представляет безусловный интерес.

Ниже приведены результаты экспериментальных исследований стационарных параметров приэлектродных слоев (ширины S , падения постоянного потенциала V и плотности ионного тока j_i) в условиях несамостоятельного ВЧЕ разряда с поддержанием плазмы не от ВЧ напряжения электродов, а от другого источника энергии.

Независимое изменение плотности плазмы n и напряжения U_0 в этих условиях позволило изучить количественную взаимосвязь стационарных параметров ВЧ приэлектродного слоя, обнаруживающую сходство с законом „трех вторых“ Чайльда-Ленгмюра в постоянном токе [7]. Кроме того, найдены простые соотношения, связывающие внутренние параметры плазмы ВЧ разряда со значением постоянного тока J' , возникающего в цепи ВЧ электродов различной площади [4].

Эксперименты проводились в несимметричном плоско-параллельном конденсаторе с электродами диаметром $d_1 = 8$, $d_2 = 5$ см и расстоянием между ними $L = 7.5$ см. Электроды размещались на оси цилиндрического вакуумного сосуда диаметром $D = 10$ см на внутренней поверхности его торцов. Разряд поддерживался при помощи индуктора, охватывавшего сосуд снаружи и подключенного к генератору ВЧ напряжения частотой 13.56 МГц. На электроды подавалась ВЧ напряжение $U_0 = 0-300$ В той же частоты, причем измерения проводились как при наличии гальванической связи между электро-

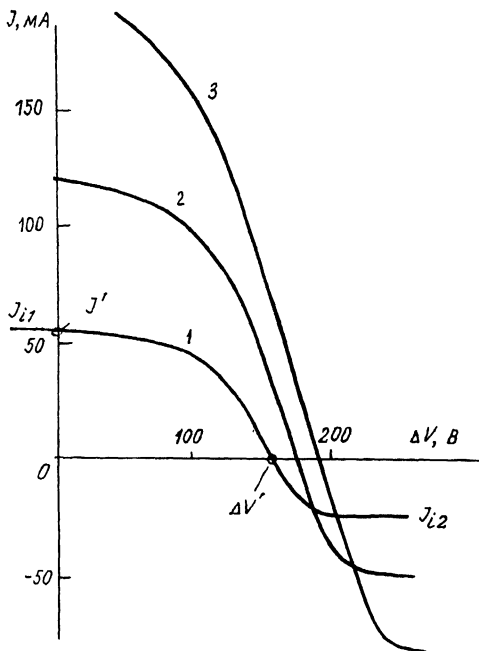


Рис. 1. ВАХ по постоянному току ВЧ электродов конденсатора при давлении $3 \cdot 10^{-2}$ Тор, ВЧ напряжении $U_0 = 170$ В и ВЧ мощностях W : 1 - 100 Вт, 2 - 200 Вт, 3 - 300 Вт. $\Delta V'$ - постоянное напряжение между электродами, J' - постоянный ток в их цепи

дами (J - включение электродов [4]), так и при ее отсутствии (V - включение). Измерения проводились в ВЧ разряде в воздухе при давлениях $3 \cdot 10^{-2} - 10^{-1}$ Тор. Электростатический экран, защищающий разряд от емкостной компоненты ВЧ поля индуктора, обеспечивал получение минимального потенциала плазмы ВЧ индукционного (ВЧИ) разряда ($V \lesssim +10$ В) [8] в отсутствие ВЧ напряжения U_0 . Толщина слоев S_1 и S_2 определялись по профилям ионного тока насыщения и плавающего потенциала двойного цилиндрического зонда в приэлектродных областях. Из-за отсутствия корректной модели ионного тока насыщения цилиндрического зонда при $r_a \sim r_D \sim \lambda$ (r_a - радиус зонда, r_D - дебаевский радиус, λ - длина свободного пробега ионов) [7], абсолютное значение плотности плазмы оценивалось по плотности ионного тока j_i ВЧ электродов, которую легко измерить. Для этого достаточно построить ВАХ потенциальных ВЧ электродов по постоянному току, обеспечив развязку цепей источников постоянного и переменного тока. Являясь естественной границей плазмы, ВЧ электроды, как плоские зонды, вносят минимальные возмущения в распределение ее плотности в объеме. Поскольку оба электрода в среднем за период ВЧ поля на-

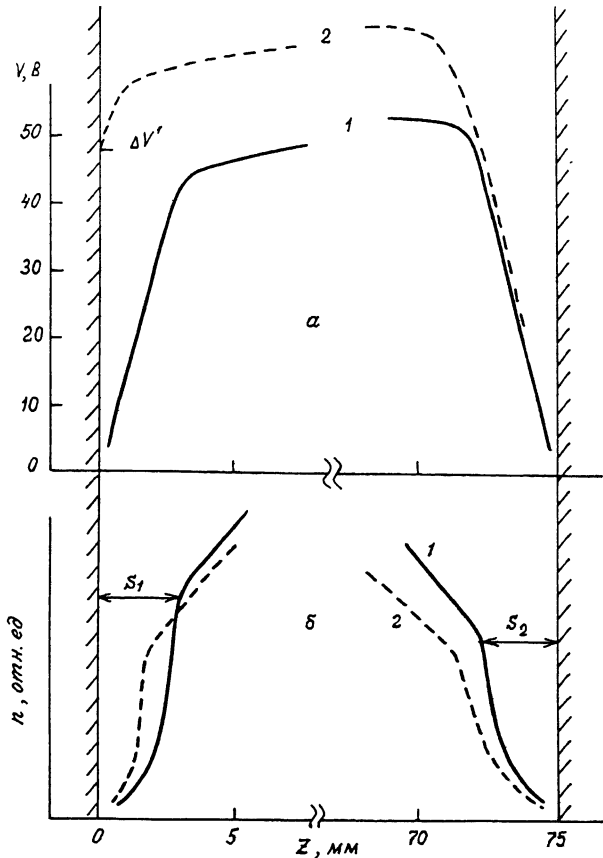


Рис. 2. Зондовые измерения профилей постоянного потенциала $V(z)$ и плотности плазмы $n(z)$ в приэлектродных областях при J -включении (сплошные кривые) и V -включении (пунктирные кривые) электродов конденсатора и давления $3 \cdot 10^{-2}$ Тор. а - $U_0 = 50$ В, 1 - $J' = 10$ мА, 2 - $\Delta V' = +50$ В; б - $U_0 = 170$ В, 1 - $J' = 20$ мА, 2 - $\Delta V' = +160$ В.

ходятся под отрицательным относительно плазмы напряжением, собираемые ими ионные токи равняются их ионным токам насыщения J_{i1} и J_{i2} . Типичные зондовые ВАХ ВЧ электродов устройства, по которым измерялись величины j_{i1} и j_{i2} , показаны на рис. 1.

Основные результаты экспериментов:

1. В случае примерного равенства значений n_1 и n_2 плотности плазмы на границах противоположных слоев (индуктор равноудален от электродов) наблюдается $J_{i1}/J_{i2} \approx (d_1/d_2)^2$.

$j_i, \text{ mA/cm}^2$	0.8	0.8	0.8	0.4	0.4	0.4	0.2	0.08
$V, \text{ B}$	50	70	170	50	70	160	150	150
$S, \text{ мм}$	1.8	2.2	4.4	2.8	3.4	5.6	7.2	8.5
$S_{(1)}, \text{ мм}$	1.46	1.81	3.03	2	2.31	3.93	5.0	6.79

2. При $U_0 > 50 \text{ В}$ постоянный ток короткого замыкания J' электродов приближается к значению ионного тока насыщения большего из электродов, т.е. J_{i2} (см. рис. 1).

3. Нижний предел скорости ионизации α в ВЧИ разряда, определяемый (в пренебрежении стоком зарядов на стенки сосуда) как сумма токов электродов $J_{i1} + J_{i2}$, в условиях эксперимента достаточно линейно зависит от ВЧ мощности W , причем $\alpha = (0.8 \div 1) W \frac{\text{mA}}{\text{Bт}}$, что согласуется с данными [9].

4. В V -включении электродов, как и в самостоятельном ВЧЕ разряде при низких давлениях [3], размеры слоев s_1 и s_2 и падения потенциала V_1 и V_2 существенно различаются, причем большему из электродов соответствуют меньшие значения s и V , а постоянная разность потенциалов электродов $\Delta V'$ приближается к амплитудному значению ВЧ напряжения U_0 (см. рис. 2).

5. В J -включении электродов $s_1 \approx s_2$ (при $n_1 \approx n_2$), а падения постоянного потенциала в слоях $V_1 \approx V_2$ приближаются к амплитудному значению ВЧ напряжения U_0 (в отличие от $\sim \frac{1}{2} U_0$ в симметричном конденсаторе [1, 2]).

6. Значению плотности тока ионов $j_i = 1 \text{ mA/cm}^2$ при давлении газа $3 \cdot 10^{-2} \text{ Тор}$ и температуре электронов $T_e = 3 \text{ эВ}$ соответствует оценка $n \approx 6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$.

7. Размеры слоев s_1 и s_2 растут с увеличением падений потенциала V_1 и V_2 и падают с ростом плотностей ионных токов j_{i1} и j_{i2} . Количественная взаимосвязь этих параметров в изученном диапазоне внешних условий оказывается близкой к закону "трех вторых" Чайльда-Ленгмюра [7]. Аналогичная ему в случае $\lambda \sim s$ приближенная интерполяционная формула [10] имеет вид

$$V = \frac{6}{5} \left(\frac{3}{2} \right)^{2/3} \left[\frac{M_i}{2e} \right]^{1/3} \left[4\pi j_i \right]^{2/3} \left(\frac{s + \lambda}{2s + \lambda} \right) \left(\frac{s + \lambda}{\lambda} \right)^{1/3} s^{4/3}. \quad (1)$$

Для измеренных при давлении $3 \cdot 10^{-2} \text{ Тор}$ значений j_i и V ниже приведены экспериментальные s и вычисленные $s_{(1)}$ по формуле (1) для молекулярных ионов азота N_2^+ значения ширины слоя. Видно, что формула (1), справедливая в случае постоянного тока, в условиях ВЧ разряда занижает ширину приэлектродного слоя в 1.2–1.4 раза, что согласуется с теоретическими результатами [11].

Таким образом, применение несамостоятельного ВЧЕ разряда для изучения электрических и пространственных характеристик ВЧ приэлектродных слоев позволяет экспериментально убедиться, что взаимосвязь их стационарных параметров s , V и j_i подобна закону "трех вторых", известному в случае постоянного тока.

Использование ВЧ электродов в качестве естественных плоских лентмюровских зондов позволяет количественно связать величину ионных токов насыщения электродов с величиной их постоянного тока короткого замыкания J' и интегральной скоростью ионизации в разряде. Зондовые ВАХ ВЧ электродов удобно использовать для простых и достаточно точных оценок плотности плазмы ВЧ разрядов.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Л е в и т с к и й С.М. // ЖТФ. 1957. Т. 27. В. 5. С. 1001-1009.
- [2] Г о д я к В.А. и др. // Вестник МГУ, Серия физики, астрономии. 1968. № 2. С. 126-127.
- [3] К ö h l e r K., С o b u r n J.W. et al // J. Appl. Phys. 1985. V. 57. N 1. P. 59-66.
- [4] Г о д я к В.А., К у з о в н и к о в а А.А. // Физика плазмы. 1975. Т. 1. В. 3. С. 496-501.
- [5] Г о д я к В.А. // Физика плазмы. 1976. Т. 2. В. 1. С. 141-151.
- [6] В е л и х о в Е.П., К о в а л е в А.С., Р а х и м о в А.Т. Физические явления в газоразрядной плазме. М.: Наука, 1987. 150 с.
- [7] К о з л о в О.В. Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат, 1969. 292 с.
- [8] Л а в р о в В.М., Щ е м е л и т и н С.Г. // ПТЭ 1971. № 4. С. 41-43.
- [9] D i V e r g i l i o W.F., G o e d e H., F o s n i g h t V.V. // Rev. Sci. Instrum. 1986. V. 57. N 7. P. 1254-1260.
- [10] Б у д я н с к и й А.М. П Всесоюз. совещ. „Высокочастотный разряд в волновых полях“. Тез. докл. Куйбышев, 1989. С. 15-16.
- [11] L i e b e r m a n M.A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1988. V. 16. N 6. P. 638.

Харьковский государственный
университет

Поступило в Редакцию
31 марта 1990 г.
В окончательной редакции
2 декабря 1991 г.