

- [2] А поллонов В.В., Державин С.И., Сироткина А.А. Препринт ИОФАН. М., 1987, № 230.
- [3] Silfäst W.T., Szeto L.H., and Wood O.R. II // J. Appl. Phys. 1979. V. 50. P. 7921-7923.
- [4] Данилычев В.А., Зворыкин В.Д., Холин И.В., Чугунов А.Ю. // Квантовая электроника. 1982. Т. 9. С. 92-98.
- [5] Райзер Ю.П. // УФН. 1965. Т. 87. С. 29-80.
- [6] Мультченко Б.Ф., Райзер Ю.П. // ЖЭТФ. 1971. Т. 60. С. 643-650.
- [7] Бойко В.А., Данилычев В.А., Дуванов Б.Н., Зворыкин В.Д., Холин И.В. // Квантовая электроника. 1979. Т. 6. № 6. С. 1323-1330.

Институт общей  
физики АН СССР,  
Москва

Поступило в Редакцию  
12 апреля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 21

12 ноября 1989 г.

04

#### ОСОБЕННОСТИ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛАБОТОЧНОЙ ФОРМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА Е-ТИПА

Н.Ю. Кропотов, В.А. Лисовский,  
Ю.А. Качанов, В.Д. Егоренков,  
В.И. Фареник

В связи с широким использованием высокочастотного (ВЧЕ) разряда в различных областях техники (лазеры, плазмохимия и т.д.) большой интерес представляют исследования различных форм горения разряда, а также перехода из слабotoчного в сильноtoчный режим [1-6].

В настоящей работе приведены результаты исследований вольт-амперных характеристик (ВАХ) ВЧЕ разряда между плоскопараллельными электродами из нержавеющей стали при частоте электрического поля 13.56 МГц в среде различных газов, в области давлений  $10^{-2}$ - $10$  Тор и напряжений, соответствующих слабotoчному режиму и переходу в сильноtoчный режим. Экспериментально показано наличие отрицательной дифференциальной проводимости в слабotoчной форме ВЧЕ разряда. Показано, что наличие молекулярной примеси (воздуха) приводит к уменьшению разрядного тока по сравнению со случаем отсутствия примеси.

Необходимо отметить, что существенным в исследовании ВЧЕ разряда является способ подключения разрядной камеры к высоко-

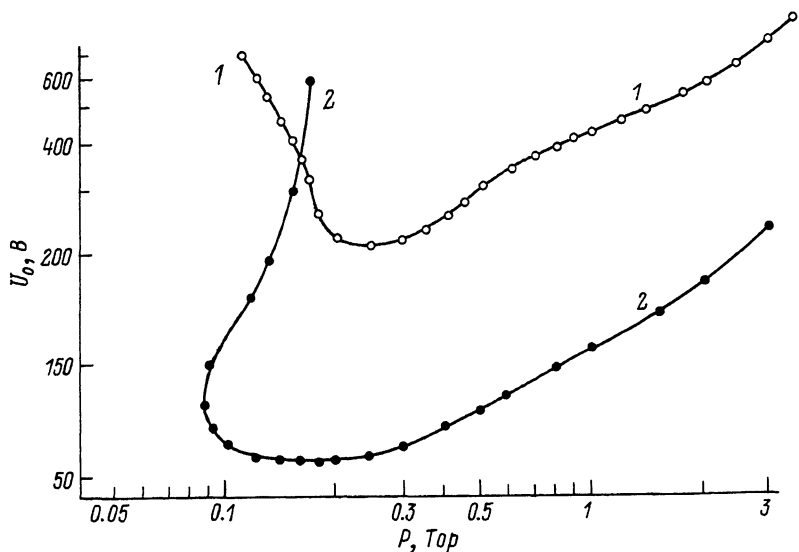


Рис. 1. Зависимости потенциала зажигания разряда от давления воздуха,  $\alpha = 28$  мм: 1 – электроды разомкнуты, 2 – электроды замкнуты по постоянному току.

частотному генератору. Возможны два способа подключения. В одном – электроды вакуумной системы замкнуты по постоянному току (параллельно электродам подключен дроссель с индуктивностью несколько мГн), в другом – разомкнуты. В случае отсутствия дросселя постоянное напряжение с выходного каскада ВЧ генератора заряжает выходную цепь, причем заряд распределяется между выходом генератора и электродами вакуумной камеры. При этом оказывается, что к электродам вакуумной камеры приложено не только переменное напряжение, но и постоянное напряжение, величина которого равна амплитуде переменного. Следовательно, пробой происходит при однополярном пульсирующем напряжении. Как видно из рис. 1, способ подключения ВЧ генератора существенным образом влияет не только на величину напряжения пробоя, но и на качественный вид зависимости. Значения напряжения пробоя в случае разомкнутых электродов близки к пробую на постоянном токе [7].

Исследования характера ВАХ, как и условий зажигания разряда в [8], проводились с замкнутыми по постоянному току электродами, что исключало перераспределение зарядов плазмы между электродами. Вольт-амперная характеристика разряда снималась следующим образом: при фиксированном давлении газа напряжение (после пробоя) понижалось до минимально возможной величины, близкой к потенциалу потухания разряда, затем с ростом напряжений фиксировались значения ВЧ тока и угла сдвига фазы между током и напряжением.

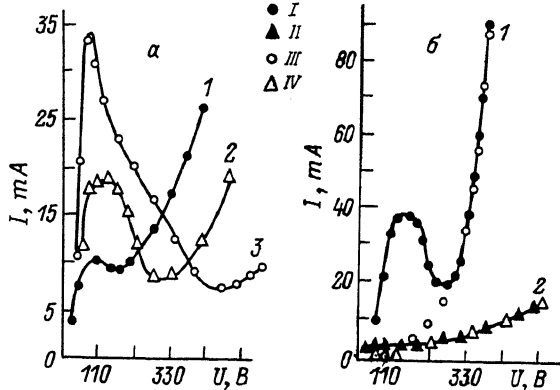


Рис. 2. а - ВАХ разряда при  $\alpha=50$  мм,  $P=0.3$  Тор, в: 1 - He, 2 - Ar, 3 - Xe; б - ВАХ разряда в Ar при  $\alpha=28$  мм, 1 -  $P=1$  Тор, 2 -  $P=0.06$  Тор, I, II - эксперимент, III, IV - расчет по (1).

На рис. 2, а приведены ВАХ ВЧ разряда в различных газах. При малых напряжениях (близких к потенциалу потухания) разряд занимает часть электродов. Увеличение напряжения приводит к расширению разряда по всей площади электродов и увеличению интенсивности свечения. Ярко выражены темные приэлектродные области и светящаяся центральная часть, аналогичная положительному столбу разряда постоянного тока. На ВАХ это соответствует первоначальному росту тока. При дальнейшем увеличении напряжения на разряде ток проводимости начинает падать, а свечение разряда остается только в узких приэлектродных областях, в центральной же части свечение исчезает. При этом мощность  $W = U \cdot J \cdot \cos \varphi$  ( $U$  - напряжение,  $J \cdot \cos \varphi$  - ток проводимости,  $\varphi$  - угол сдвига фазы между током и напряжением), потребляемая разрядом, падает. Интенсивности линий аргона ведут себя аналогично ВАХ (рис. 3, г).

Как видно из рис. 2, б, с ростом давления провал тока на ВАХ увеличивается. Увеличение давления приводит к увеличению длины «положительного столба» и уменьшению ширины приэлектродных областей [1]. Поскольку проявление отрицательной дифференциальной проводимости наблюдаются у газов, у которых ярко выражен эффект Рамзауэра, можно предположить, что увеличение напряжения на разряде приводит к росту числа упругих соударений - повышению омического сопротивления «положительного столба». Ввиду этого происходит перераспределение падения напряжения между приэлектродными областями и «положительным столбом», что приводит к снижению электрического поля в слоях и к уменьшению ионизации.

Дальнейшее повышение напряжения на разряде приводит к росту тока. Структура свечения разряда не меняется, увеличивается

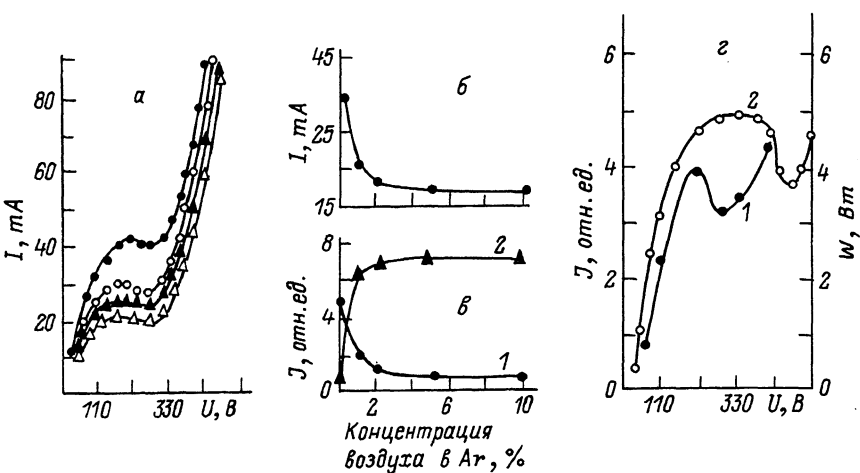


Рис. 3. а - ВАХ разряда при  $d=14$  мм и  $P=1$  Тор в: 1 - Ar, 2 - 99% Ar + 1% воздуха, 3 - 98% Ar + 2% воздуха, 4 - 90% Ar + 10% воздуха; б и в - зависимости тока проводимости и интенсивностей линий излучения от концентрации воздуха в Ar при напряжении на разряде 220 В и  $P=1$  Тор,  $d=14$  мм: 1 - линия Ar (418.1 нм), 2 - линия N<sub>2</sub> (337.1 нм); г - зависимости: 1 - интенсивности линии Ar (418.1 нм) при  $d=14$  мм и  $P=1$  Тор, 2 - активной мощности ВЧ разряда в Хе при  $d=50$  мм и  $P=0.3$  Тор от напряжения на разряде.

интенсивность свечения в приэлектродных областях. Срыва разряда в сильнотоочный режим при расстояниях 2-5 см и давлениях до 1.5 Тор не наблюдается до напряжений 1000 В. По-видимому, рост тока связан с включением механизма вторичной эмиссии с поверхности электродов. Как видно из рис. 2, а, минимум тока проводимости приходится на меньшие напряжения для газа, у которого коэффициент вторичной ион-электронной эмиссии выше.

Аппроксимация экспериментальных данных по методу наименьших квадратов показала, что ВАХ разряда в аргоне справа от минимума тока для электродов из нержавеющей стали описывается функцией:

$$J \cdot \cos \varphi \approx e^{-(C_1 \cdot P + C_2) \cdot d} \cdot U_1^{C_3 + C_4 \cdot P \cdot d}, \quad (1)$$

где  $C_1 \approx 0.4$ ,  $C_2 \approx 0.1$ ,  $C_3 \approx 1.1$ ,  $C_4 \approx 0.118$ ,  $U_1 = U/5.56$ ,  $U$  - напряжение на разряде (В),  $J \cdot \cos \varphi$  - ток проводимости (мА),  $d$  - расстояние между электродами (мм),  $P$  - давление газа (Тор). Сравнение вычисленных значений тока проводимости с экспериментальными кривыми приведено на рис. 2, б.

В работе также изучались ВАХ ВЧ разряда при добавлении в аргон молекулярной примеси (воздух) небольшой концентрации. Как видно из рис. 3, а, наибольшее оседание ВАХ произошло при срав-

нительно небольшой добавке воздуха (до 2 %). При больших напряжениях на разряде ( $>500$  В) ВАХ для смеси воздуха с аргоном асимптотически стремится к ВАХ для чистого аргона. Это подтверждает то, что при больших напряжениях доминирующее влияние на развитие и протекание разряда оказывают поверхностные эффекты на электродах.

Таким образом, на ВАХ ВЧ разряда нужно различать три участка: участок нормальной плотности тока (слева от максимума ВАХ), участок с доминирующими объемными процессами (от максимума до минимума ВАХ), участок с доминирующими поверхностными процессами (справа от минимума ВАХ).

В результате проведенных исследований показано, что в используемых газах ВАХ слаботокового ВЧ разряда имеет спадающий участок. Степень уменьшения тока на этом участке зависит как от сорта газа, так и от давления. Также исследовано влияние небольшой примеси воздуха в аргоне на поведение ВАХ. Показано, что ВАХ изменяется в целом, причем качественный вид сохраняется.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Яценко Н.А. // ЖТФ. 1981. Т. 51. В. 6. С. 1195-1204.
- [2] Яценко Н.А. // ЖТФ. 1982. Т. 52. В. 6. С. 1220-1222.
- [3] Vilaud P., Durrani S.M.A. and Hall D.R. // Phys. D. J. Appl. Phys. 1988. V. 21. P. 57-66.
- [4] Яценко Н.А. Препринт ИПМ АН СССР, № 338, М., 1988. 44 с.
- [5] Яценко Н.А. Препринт ИПМ АН СССР, № 381, М., 1988. 36 с.
- [6] Кропотов Н.Ю., Лисовский В.А., Егоренков В.Д., Фареник В.И. Мат. 2 Всес. совещания „Высокочастотный разряд в волновых полях“, Куйбышев, 1989, С. 16.
- [7] Велихов Е.П., Ковалев А.С., Рахимов А.Т. Физические явления в газоразрядной плазме. М.: Наука, 1987. 160 с.
- [8] Кропотов Н.Ю., Качанов Ю.А., Реука А.Г., Лисовский В.А., Егоренков В.Д., Фареник В.И. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 4. С. 359.

Поступило в Редакцию  
21 июля 1989 г.