

04

© 1992

СТРУКТУРА РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ
В КОМБИНИРОВАННЫХ ПОЛЯХ

В.А. Л и с о в с к и й

Как известно [1-7], для повышения устойчивости горения газового разряда используется комбинация постоянного и переменного электрического полей высокой частоты, причем ионизация в основном обеспечивается переменным полем. При этом основное внимание уделяется возможности увеличения вкладываемой в разряд мощности при средних давлениях ($p \geq 1$ Тор) и повышению устойчивости такого комбинированного разряда. В отличие от высокочастотного [8-13] и тлеющего [14-16] разрядов, структура которых изучена довольно детально, вопрос о структуре комбинированного разряда остается открытым. При исследовании структуры, как правило, измеряется оптический эмиссионный профиль разряда [12, 13] либо используются лентмюровские зонды [12]. В работе [17] для поперечного комбинированного разряда в области давлений 10^{-4} - 10 Тор получено, что перпендикулярные ВЧ и постоянное поля вызывают три типа разрядов: тлеющий разряд постоянного тока, в котором под действием ВЧ поля создается незначительная дополнительная ионизация; типичный ВЧ разряд, в котором электроды постоянного поля действуют как двойной зонд и собирают токи, ограниченные пространственными зарядами; промежуточный тип разряда, в котором ВЧ поле создает достаточно ионов для значительного изменения катодного падения тлеющего разряда. Радиальный оптический профиль разряда постоянного тока, поперечного безэлектродного ВЧ разряда и их комбинации измерен в [18].

В настоящей работе зондовым методом исследованы пространственная структура и формы существования продольного комбинированного разряда (постоянное и ВЧ напряжения подавались на одни и те же электроды). Наблюдались три различные стадии комбинированного разряда: ВЧ разряд, возмущенный постоянным электрическим полем, несамостоятельный тлеющий разряд и самостоятельный тлеющий разряд. Выяснены условия существования каждой стадии разряда, изучен переход из одной стадии в другую и получены пространственные профили плотности плазмы.

Комбинированный разряд создавался в воздухе при низком давлении ($p = 10^{-2}$ - 10 Тор) и частоте поля $f = 13.56$ МГц. Расстояние между плоскими электродами из нержавеющей стали диаметром 100 мм $d = 54$ мм. Измерения плотности плазмы проводились одиночным цилиндрическим зондом из нихрома (длина зонда 5 мм, диаметр 0,18 мм). В состав зондовой цепи входил резонансный

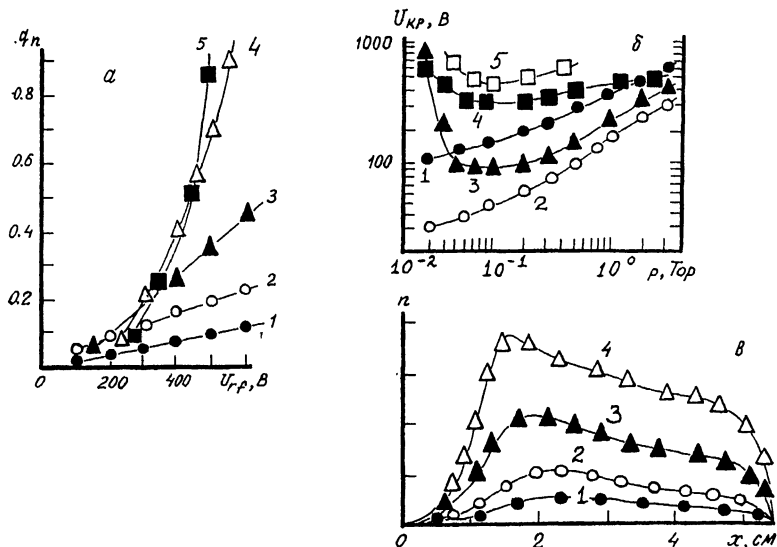


Рис. 1. а - зависимость q_n от приложенного ВЧ напряжения при: 1 - $p=0.05$, 2 - 0.1, 3 - 0.5, 4 - 1.5-2 Тор; б - 1 и 2 - кривые зажигания и потухания ВЧ разряда соответственно ($U_{dc}=0$), 3 - минимальное ВЧ напряжение $U_{кр}$, при котором разряд может перейти из первой формы во вторую, 4 - постоянное напряжение, необходимое для перехода разряда из первой формы во вторую при $U_{rf} = U_{кр}$, 5 - кривая зажигания самостоятельного тлеющего разряда ($U_{rf}=0$); в - профиль плотности плазмы для самостоятельного тлеющего разряда, $p=0.1$ Тор, 1 - $U_{dc}=310$ В, 2 - 400, 3 - 500, 4 - 600 В.

фильтр, настроенный на частоту f . Комбинированный разряд получался наложением на ВЧ разряд постоянного электрического поля. Диапазон изменения ВЧ напряжения $U_{rf}=0-10^3$ В, постоянного напряжения $U_{dc}=0-600$ В. На один из электродов подавалось ВЧ напряжение, второй электрод был заземлен. Потенциальный электрод служил „анодом“ (на него подавался положительный постоянный потенциал) и на приведенных ниже профилях плотности плазмы располагается справа.

Экспериментально наблюдались три различные формы продольного комбинированного разряда (аналогичные формам поперечного комбинированного разряда [17]) в зависимости от соотношения величины $q = U_{rf}/U_{dc}$ и некоторой величины q_n (рис. 1, а). Первой форме, когда $q > q_n$, соответствует ВЧ разряд, возмущенный постоянным полем. При $q = q_n$ происходит переход ВЧ разряда в несамостоятельный разряд на постоянном токе с поддержанием ионизации ВЧ полем. При $q \ll q_n$ существует третья форма - самостоятельный тлеющий разряд. При ВЧ напряжениях $U_{rf} < U_{кр}$ (рис. 1, б) могут существовать только первая и третья формы комбини-

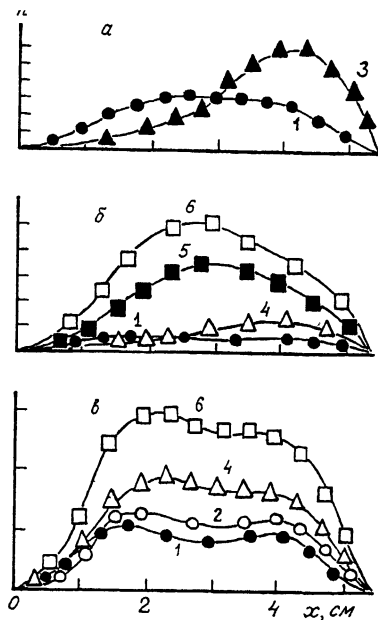


Рис. 2. Профиль плотности плазмы, $p=0,1$ Тор, а - $U_{rf}=75$, б - 90, в - 500 В: 1 - $U_{dc}=0$, 2 - 100, 3 - 130, 4 - 200, 5 - 250, 6 - 300 В.

рованного разряда, т. е. ВЧ разряд при повышении U_{dc} деформируется и гаснет, а затем происходит пробой промежутка между электродами постоянным полем и возникает самостоятельный тлеющий разряд. Впрочем, достаточно приложить к тлеющему разряду (в исследуемом диапазоне U_{dc}) довольно небольшое U_{rf} ($\sim 20-30$ В), чтобы тлеющий разряд из самостоятельного превратился в несамостоятельный. При $U_{rf} \geq U_{кр}$ с ростом постоянного напряжения комбинированный разряд последовательно переходит из первой во вторую, а затем в третью форму. Пространственные профили плотности плазмы (зависимости плотности ионов n_i от расстояния от „катода“) для самостоятельного тлеющего разряда при отсутствии ВЧ напряжения показаны на рис. 1, в, для первой и второй формы комбинированного разряда - на рис. 2 и рис. 3.

При $U_{rf} < U_{кр}$ плотность плазмы сравнительно небольшая и повышение U_{dc} приводит к заметному увеличению толщины слоя при „катоде“ (на „катодный“ слой может приходиться вплоть до 3/4 разрядного промежутка); толщина „анодного“ слоя при этом уменьшается незначительно, особенно при более высоких давлениях. Вблизи „анода“ появляется пик плотности и свечения. Для существования разряда необходимо, чтобы суммарная толщина „катодного“

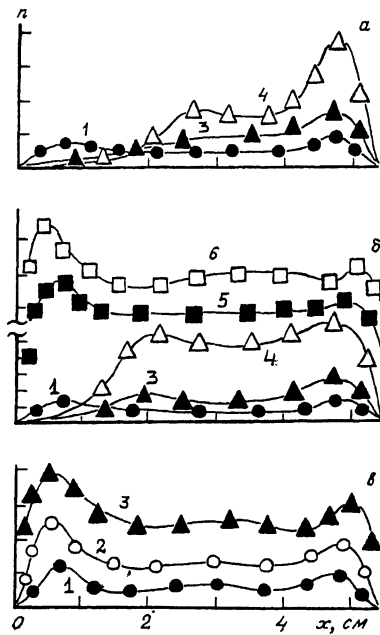


Рис. 3. Профиль плотности плазмы, $p=1$ Тор, а - $U_{rf}=190$, б - 225, в - 500 В: 1 - $U_{dc}=0$, 2 - 100, 3 - 150, 4 - 200, 5 - 210, 6 - 250 В.

и „анодного“ слоев была меньше расстояния между электродами, т. е. между приэлектродными слоями должен помещаться слой квазинейтральной плазмы. Дальнейшее повышение U_{dc} приводит к нарушению этого условия и разряд гаснет. Подобное явление наблюдалось в [19, 20]. Профили плотности плазмы при $U_{rf} < U_{кр}$ показаны на рис. 2, а и рис. 3, а.

При $U_{rf} = U_{кр}$ (рис. 2, б и рис. 3, б) плотность плазмы более высокая, толщина „катодного“ слоя с увеличением U_{dc} растет медленнее. Постоянное напряжение, приложенное к электродам, вытесняется квазинейтральной плазмой в приэлектродные слои. Если сумма постоянного и ВЧ полей становится достаточно большой, чтобы выбитые из „катода“ электроны могли набрать необходимую для ионизации молекул газа энергию, то в „катодном“ слое развиваются электронные лавины и разряд переходит во вторую форму. В зависимости от ρ разряд может перейти во вторую форму плавно либо скачком. При $\rho > 0.2$ Тор (справа от минимума $U_{кр}$ (рис. 1, б)) и $U_{rf} = U_{кр}$ ионизационная длина пробега электрона значительно меньше толщины „катодного“ слоя, поэтому при переходе разряда во вторую форму толщина слоя при „катоде“ резко уменьшается. При $\rho \lesssim 0.2$ Тор (вблизи и слева от минимума $U_{кр}$) ионизационная длина пробега электрона сравнима с толщиной „катодного“

слоя и при переходе разряда во вторую форму толщина слоя при „катоде“ заметно не изменяется и с ростом U_{dc} плавно уменьшается. Скачкообразный переход разряда во вторую форму при $\rho > 0.2$ Тор наблюдается в довольно узком диапазоне ВЧ напряжений: $U_{кр} \leq U_{рр} \leq U_{кр} + 20$ В. При более высоких $U_{рр}$ с ростом U_{dc} толщина „катодного“ слоя медленно увеличивается (рис. 2, в и рис. 3, в), при переходе разряда во вторую форму остается постоянной и затем при дальнейшем росте U_{dc} медленно уменьшается.

Таким образом, в настоящей работе экспериментально наблюдалось, что комбинированный разряд низкого давления может существовать в трех формах: ВЧ разряд, возмущенный постоянным электрическим полем; несамостоятельный тлеющий разряд с поддержанием ионизации ВЧ полем; самостоятельный тлеющий разряд. Выяснены условия существования каждой из форм разряда, измерены пространственные профили плотности плазмы.

Автор благодарит В.Д. Егоренкова и Н.А. Яценко за проявленный интерес к работе и ряд ценных замечаний.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] 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.
- [2] B r o w n C.O., D a v i s J.W. // Appl. Phys. Lett. 1972. V. 21. P. 480.
- [3] Р а х и м о в а Т.В., Р а х и м о в А.Т. // Физика плазмы. 1975. Т. 1. В. 5. С. 854.
- [4] К о з л о в Г.И., Я ц е н к о Н.А. // Письма в ЖТФ. 1978. Т. 4. В. 7. С. 422.
- [5] М ы ш е н к о в В.И., Я ц е н к о Н.А. // Физика плазмы. 1982. Т. 8. В. 3. С. 543.
- [6] М ы ш е н к о в В.И., Я ц е н к о Н.А. // Физика плазмы. 1982. Т. 8. В. 4. С. 704.
- [7] 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. 160 с.
- [8] К о в а л е в А.С., Р а х и м о в А.Т., Ф е о к т и с т о в В.А. // Физика плазмы. 1981. Т. 7. В. 6. С. 1411.
- [9] А х м а н о в А.С., Г а в р и л о в К.Л., К о в а л е в А.С., П о р о й к о в Ю.А. // Физика плазмы, 1989. Т. 15. В.11. С. 1374.
- [10] К о в а л е в А.С., М у р а т о в Е.А., О з е р е н к о А.А. и др. // Физика плазмы. 1985. Т. 11. В. 7. С. 882.
- [11] Я ц е н к о Н.А. // ЖТФ. 1988. Т. 58. В. 2. С. 294.
- [12] M u t s u k u r a N., K o b a y a s h i K., M a c h i Y. // J. Appl. Phys. V. 66. N. 10. P. 4688.

- [13] B l e t z i n g e r P., D e J o s e p h C.A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1986. V. 14. N 2. P. 124.
- [14] Б а б и ч е в В.Н., Г о л у б е в С.А., К о в а л е в А.С. и др. // Физика плазмы. 1980. Т. 6. В. 1. С. 195.
- [15] В е л и х о в Е.П., Г о л у б е в В.С., П а ш к и н С.В. // УФН. 1982. Т. 137. В. 1. С. 117.
- [16] К о в а л е в А.С., М у р а т о в Е.А., О з е р е н к о А.А. и др. // ЖТФ. 1984. Т. 54. В. 1. С. 56.
- [17] Y a m a n o t o K., O k u d a T. // Appl. Sci-ent. Res., Hague. 1955. V. 5. P. 144.
- [18] G o i c h m a n V.H., G o l d f a r b V.M., T e n d l e r M.B. Proc. 12 ICPIG, 1976. Eind-hoven. P. 109.

Харьковский государственный
университет

Поступило в Редакцию
3 июня 1992 г.