

04:09  
©1993

## $\alpha - \gamma$ ПЕРЕХОД И НЧ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ВЧ РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

*В.А.Лисовский, В.Д.Егоренков, О.В.Красников*

В связи с широким использованием ВЧ разряда в различных областях техники [1-8] большой интерес представляют исследования форм горения разряда и его перехода из слабotoчного в сильноточный режим. Хорошо известно [1,2], что ВЧ разряд может гореть в  $\alpha$  (слаботочном) и  $\gamma$  (сильноточном) режимах, причем переход из  $\alpha$  в  $\gamma$  режим сопровождается увеличением разрядного тока и плотности плазмы. Вместе с тем, при переходе ВЧ разряда в инертных газах из слабotoчного в сильноточный режим наблюдается немонокотное поведение активного ВЧ тока [6,7], т. е. с ростом ВЧ напряжения ток проводимости в цепи электродов после достижения максимума уменьшается, проходит через минимум и затем быстро увеличивается. Представляет интерес исследовать явления в газоразрядном промежутке, сопровождающие возникновение немонокотного поведения активного ВЧ тока в инертных газах.

В настоящей работе показано, что:

1) В ВЧ разряде низкого давления в аргоне наблюдается область немонокотного поведения плотности плазмы  $n_i$  в центральной части разряда, т.е. с ростом ВЧ напряжения  $n_i$  сначала увеличивается, достигает максимума, затем уменьшается и после прохождения минимума снова возрастает. При низких давлениях аргона немонокотное поведение плотности плазмы наблюдается одновременно с немонокотным поведением активного тока ВЧ разряда, при промежуточных же давлениях эти два явления существуют в различных диапазонах ВЧ напряжений.

2) В области немонокотного поведения плотности плазмы в ВЧ разряде возникают низкочастотные шумы и колебания повышенной амплитуды. Это явление нами идентифицировано как ионизационная неустойчивость (см., например, [9-14]).

Эксперименты проводились в аргоне в диапазоне давлений  $p = 10^{-2}$  Тор при частоте ВЧ поля  $f = 13.56$  МГц и расстояниях между параллельными плоскими электродами диаметром 100 мм из нержавеющей стали  $L = 7 - 54$  мм,  $n_i$  измерялась одиночным зондом.

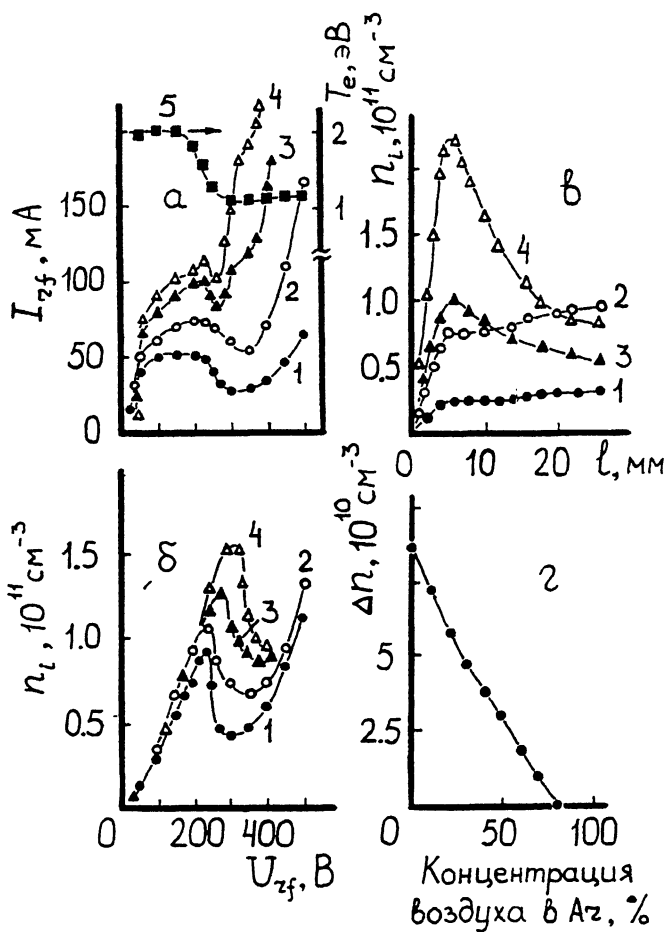


Рис. 1. Зависимость активного ВЧ тока в цепи электродов, температуры электронов в центре разряда (а) и плотности плазмы в центре разряда (б) от ВЧ напряжения при давлениях аргона: 1 —  $p = 0.4$ , 2 — 0.6, 3 — 0.8, 4 — 1.1 Тор; 5 —  $T_e$  при  $p = 0.4$  Тор; в — осевое распределение плотности плазмы (от электрода до центра разряда) при  $p = 0.5$  Тор: 1 —  $U_{zф} = 75$  Вб 2 — 190, 3 — 250, 4 — 350 В; г — зависимость величины  $\Delta n$  от концентрации воздуха в аргоне,  $p = 0.4$  Тор.  $L = 5.3$  см.

В диапазоне низких давлений аргона ( $p < 0.5$  Тор при  $L = 53$  мм) с ростом ВЧ напряжения сначала наблюдается увеличение плотности плазмы во всем разрядном объеме и активной составляющей ВЧ тока в цепи электродов; температура электронов  $T_e$  в разряде при этом сохраняет свое постоянное значение (рис. 1). При достижении некоторой величины ВЧ напряжения наблюдается одновременное уменьшение  $T_e$  и ВЧ тока; плотность плазмы  $n_i$  при этом растет только вблизи границ приэлектродных слоев, в центральных же областях разряда  $n_i$  резко уменьшается. В квазинейтральной плазме возникают низкочастотные ( $f_n < 160$  кГц) шумы. При дальнейшем увеличении ВЧ напряжения разряд выходит из области отрицательной дифференциальной проводимости, ВЧ ток и плотность плазмы растут,  $T_e$  также медленно увеличивается. Низкочастотные шумы при этом исчезают.

При более высоких давлениях аргона ( $p \geq 0.5$  Тор) уменьшение  $T_e$  и плотности плазмы в центре разряда наблюдается на возрастающей (сильноточной) ветви активного ВЧ тока, т.е. отрицательная дифференциальная проводимость и немонотонное поведение плотности плазмы в центре разряда находятся в разных диапазонах ВЧ напряжений. В центре разряда появляется положительный столб (ПС). С ростом ВЧ напряжения ПС постепенно исчезает, при этом  $n_i$  в центре разряда уменьшается и в плазме возникает ионизационная неустойчивость (низкочастотные плазменные шумы и колебания). На рис. 2, а показаны измеренный методом двух зондов дисперсионный закон  $\omega = \omega(k)$  ( $\omega$  — циклическая частота,  $k$  — волновое число колебаний), а также области существования и частота генерируемых колебаний. Полученный для ВЧ разряда закон дисперсии качественно совпадает с законом дисперсии бегущих страт в разряде на постоянном токе в аргоне [10]. Исследование поведения интегрального свечения ВЧ разряда во времени показало наличие бегущих страт, т.е. разряд в целом “мигает” с частотой генерируемых колебаний. При дальнейшем увеличении ВЧ напряжения  $n_i$  снова растет во всем разрядном объеме и ионизационная неустойчивость исчезает.

Введем величину  $\Delta n = n_{\max} - n_{\min}$ , описывающую уменьшение плотности плазмы в центре разряда ( $n_{\max}$  и  $n_{\min}$  — плотность плазмы в центре разряда в максимуме и минимуме зависимости  $n_i = n_i(U_{rf})$  соответственно,  $U_{rf}$  — амплитуда ВЧ напряжения). Исследование влияния молекулярной примеси (воздуха) в аргоне на характеристики ВЧ разряда показало, что наиболее ярко немонотонное поведение плотности плазмы выражено в чистом аргоне; при концентрации аргона в воздухе менее 20% этот эффект не на-

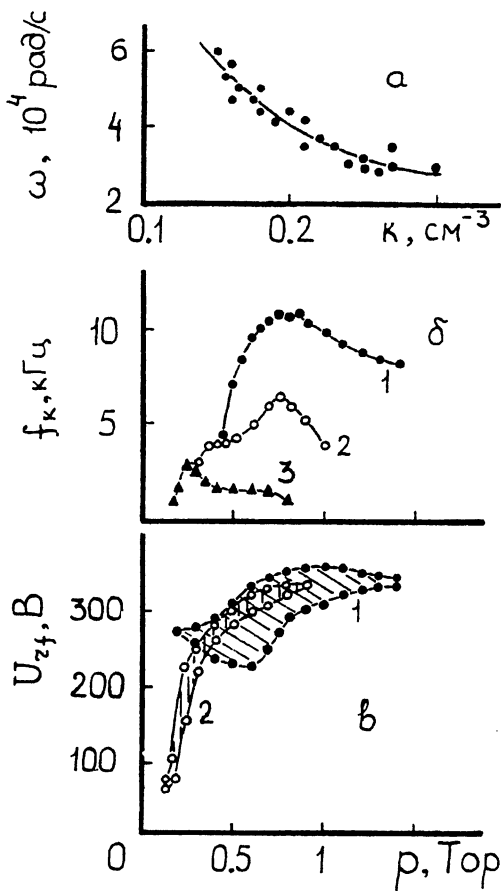


Рис. 2. *a* — закон дисперсии генерируемых НЧ колебаний в чистом аргоне; *б* — зависимость частоты НЧ колебаний от давления газа при концентрации аргона в воздухе: 1 — 100%, 2 — 50%, 3 — 25%; *в* — область существования ионизационной неустойчивости: 1 — чистый аргон, 2 — 25% аргона в воздухе.  $L = 5.3$  см.

блюдается (рис. 1, з). На рис. 2, б, в показаны зависимости частоты колебаний от давления смеси воздуха с аргоном, а также области существования ионизационной неустойчивости при различных концентрациях аргона в воздухе. Из рис. 2, б видно, что увеличение концентрации воздуха в аргоне приводит к снижению частоты колебаний. В чистом аргоне при  $p < 0.5$  Тор — шумы и колебания. В то же время при концентрации аргона в воздухе 25% колебания совместно с шумами генерируются во всей области существования неустойчивости.

По-видимому, появление немонотонного поведения плотности плазмы в центре разряда вызвано экранировкой ВЧ поля областями повышенной плотности плазмы на границах приэлектродных слоев. При низких ВЧ напряжениях ионизация в основном происходит в разрядном объеме ( $\alpha$  — режим разряда), электроны набирают энергию в достаточно большом ВЧ поле в квазинейтральной плазме. Повышение ВЧ напряжения приводит к увеличению потока ионов из плазмы на электроды. Поскольку инертные газы имеют достаточно большой коэффициент ион-электронной эмиссии, то в аргоне ВЧ разряд переходит в  $\gamma$ -режим при довольно низких ВЧ напряжениях ( $U_{rf} \sim 200$  В). Когда разряд переходит в  $\gamma$ -режим, на границах приэлектродных слоев образуются области повышенной плотности плазмы и ВЧ поле “вытесняется” из плазмы в слои. При низких давлениях фарадеевы темные пространства (ФТП) ВЧ разряда соприкасаются в центре промежутка, а ПС отсутствует [15]. В ФТП весьма низки амплитуда поля и  $T_e$ , следовательно, ионизация атомов газа электронами невелика. Заряженные частицы в разрядном объеме теряются из-за рекомбинации электронов с ионами и диффузии частиц на стенку трубки в радиальном направлении, поэтому сильное снижение ионизации в плазме приводит к заметному уменьшению  $n_i$  в центре разряда. Такое состояние разряда является неустойчивым, поэтому в плазме возникают шумы. При более высоких давлениях в центре разряда появляется ПС, который, как известно, при неблагоприятных условиях стратифицируется. Поэтому в разряде генерируются низкочастотные колебания. Когда диффузия заряженных частиц от границ приэлектродных слоев в центр разряда и ионизация атомов газа пучками быстрых электронов компенсируют снижение ионизации газа из-за экранировки ВЧ поля,  $n_i$  в центре разряда начинает расти и ионизационная неустойчивость исчезает.

Таким образом, в настоящей работе обнаружена область немонотонного поведения плотности плазмы в центре ВЧ разряда низкого давления. Получено также, что в этой

области в разряде возникает ионизационная неустойчивость (плазменные шумы и колебания, бегущие страты).

### Список литературы

- [1] Левитский С.М. // ЖТФ. 1957. Т. 27. С. 1001.
- [2] Яценко Н.А. // ЖТФ. 1981. Т. 51. С. 1195; 1982. Т. 52. С. 1220; 1988. Т. 58. С. 294.
- [3] Яценко Н.А. // Препринт ИПМ АН СССР. № 338. 1988. 44 с.; № 381. 1989. 36 с.; № 465. 1990. 24 с.
- [4] Godyak V.A., Khanphoh A.S. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1986. V. 14. P. 112.
- [5] Vidaud P., Durrani S.M.A., Hall D.R. // J. Phys. D. 1988. V. 21. P. 57.
- [6] Кропотов Н.Ю., Лисовский В.А., Егоренков В.Д., Фареник В.И. // Матер. 2 Всесоюз. совещ. по высокочастотному разряду в волновых полях. Куйбышев, 1989. С. 16.
- [7] Кропотов Н.Ю., Лисовский В.А., Качанов Ю.А., Егоренков В.Д., Фареник В.И. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 21. С. 17.
- [8] Vohm Ch., Perrin J. // J. Phys. D. 1991. V. 24. P. 865.
- [9] Зайцев А.А., Джернетов Х.А., // ЖЭТФ. 1953. Т. 24. С. 516.
- [10] Зайцев А.А., Шилкин Б.Н. // Радиотехника и электроника. 1967. Т. 12. С. 736.
- [11] Недоспасов А.В. // УФН. 1968. Т. 94. С. 439.
- [12] Пекарек Л. // УФН. 1968. Т. 94. С. 463.
- [13] Зайцев А.А., Савченко И.А. // ЖТФ. 1975. Т. 45. С. 1541.
- [14] Ланда П.С., Мискинова Н.А., Пономарев Ю.В. // УФН. 1980. Т. 132. С. 601.
- [15] Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. С. 1476.

Поступило в Редакцию  
11 августа 1993 г.

---