

где  $\epsilon$  — суммарная плотность излучения,  $\omega_0$  — частота, в окрестности которой выполняются условия черенковского излучения и поглощения. Предполагается, что частота  $\omega_0$  далека от собственных частот среды.

В рассматриваемом случае энергия нейтрона при взаимодействии с  $\sigma$ -компонентом излучения не изменяется. Полное изменение энергии нейтрона, обусловленное индуцированными процессами и спонтанным черенковским торможением с учетом (7) и (8), определяется выражением

$$\frac{dE_{\pi}^{\text{tot}}}{dx} = \frac{g^2 \mu_0^2}{E \beta c} \left( 1 - \frac{1}{n^2(\omega_0)} \right)^2 \omega_0 \epsilon - W_{\text{сп}}. \quad (9)$$

Мощность спонтанного черенковского излучения  $W_{\text{сп}}$ , как следует из (1) в пренебрежении дисперсией, имеет порядок  $\frac{g^2 \mu_0^2}{\beta^2 c^4} \omega_{\text{max}}^4$ , где  $\omega_{\text{max}}$  — максимальная частота, для которой выполняются условия черенковского излучения.

Для ускорения нейтронов необходимо, чтобы  $\frac{dE^{\text{tot}}}{dx} > 0$ . Это условие определяет минимальное значение плотности  $\epsilon^{\text{кр}}$ , при которой потери энергии из-за спонтанного торможения компенсируются реабсорбцией внешнего излучения:

$$\epsilon^{\text{кр}} = \frac{E \omega_{\text{max}}^4}{\pi \omega_0 c^3}.$$

Для видимого света, когда  $\omega_0 \sim \omega_{\text{max}} \sim 3 \cdot 10^{15}$  и энергии нейтрона  $4 \text{ Гэв}$ ,  $\epsilon^{\text{кр}} \sim 10^6 \text{ атм}$ . В этом случае при плотности  $\epsilon \sim 10^7 \text{ атм}$  увеличение энергии на расстоянии длины волны  $\lambda \sim 7000 \text{ \AA}$  составит  $\sim 10^{-17} \text{ эв}$ . Приращение энергии растет пропорционально плотности излучения и при взаимодействии нейтронов с мощными потоками излучения может стать весьма значительным.

Рассмотрение взаимодействия нейтрона с циркулярно-поляризованной волной приводит к тем же оценкам для критической плотности излучения и приращения энергии.

В заключение авторы благодарят участников семинара проф. А. А. Соколова за обсуждение.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Цытович В. Н. ДАН СССР, **142**, № 2, 319, 1962.
2. Куканов А. Б. «Оптика и спектроскопия», **10**, вып. 3, 289, 1961.

Поступила в редакцию  
15.2 1971 г.

Кафедра  
теоретической физики

УДК 533.9 : 537.52

Н. Ц. ГЕРАСИМОВ, В. А. ДОВЖЕНКО, Т. П. ЛЕБЕДЕВА, Г. С. СОЛНЦЕВ

## УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ СВЧ РАЗРЯДА В ВОЛНОВОДЕ

В работе приведены измерения баланса мощностей в СВЧ разряде в Аг. Для СВЧ разряда, возбуждаемого в трубке внутри волновода, характерными являются соотношения между подведенной  $W_{\text{пад}}$ , отраженной  $W_{\text{отр}}$ , прошедшей в согласованную нагрузку  $W_{\text{пр}}$  и поглощенной в разряде  $W_{\text{погл}}$  мощностями. Разряд возбуждался волной  $H_{10}$  на частоте  $3,3 \text{ Гц}$  в трубке с внутренним диаметром  $12 \text{ мм}$ , расположенной между широкими стенками волновода ( $72 \times 34 \text{ мм}^2$ ) (поле  $\vec{E}$  параллельно оси трубки). Горцами разрядной трубки служили коваровые диски, являвшиеся одновременно частью широких стенок волновода. В центре разрядной трубки размещался зонд с симметризирующим противовесом, обеспечивающим минимальное искажение поля [1]. Баланс мощностей измерялся с точностью 3—5% с помощью системы направленных ответвителей и градуированных аттенуаторов.

Измерения проводились в стационарном СВЧ разряде при  $W_{\text{пад}}$  до  $200 \text{ вт}$  и давлении от  $0,05$  до  $30 \text{ мм рт. ст.}$  Расчет баланса мощностей при различных дав-

лениях был выполнен с помощью  $T$ -образной эквивалентной схемы разряда [1, 2]. Параметром для расчета следует считать  $\nu_{эфф}/\omega$ , где  $\nu_{эфф}$  — эффективная частота столкновений,  $\omega$  — круговая частота поля.

Понятие  $\nu_{эфф}$  в Аг при давлениях выше 1 мм рт. ст. некорректно из-за зависимости частоты столкновений электронов от энергии. Расчеты показывают, что введение поправочных коэффициентов  $K_0(\omega/\nu_{эфф})$  и  $K(\omega/\nu_{эфф})$  [3] для Аг невозможно. По этой причине в качестве параметра сравнения экспериментальных и рас-

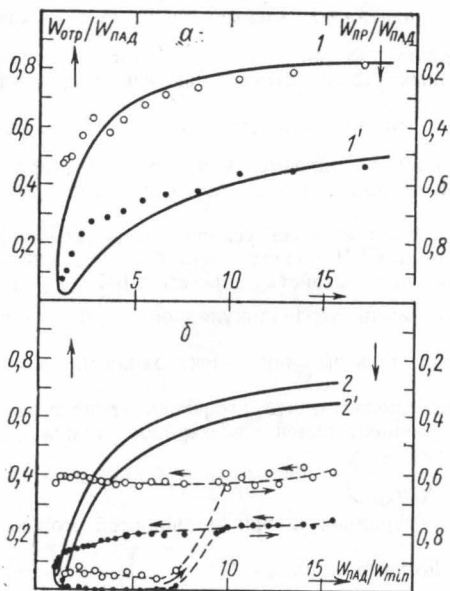


Рис. 1. Баланс мощности в СВЧ разряде при разных давлениях газа. Результаты расчета  $W_{пр}/W_{пад}$  (кривые 1 и 2) и  $W_{отр}/W_{пад}$  (кривые 1' и 2') при фиксированном  $\nu/\omega$ . а —  $p=10$  мм рт. ст.,  $\omega/\nu=1$ ; б —  $p=0,1$  мм рт. ст.,  $\nu/\omega=0,1$

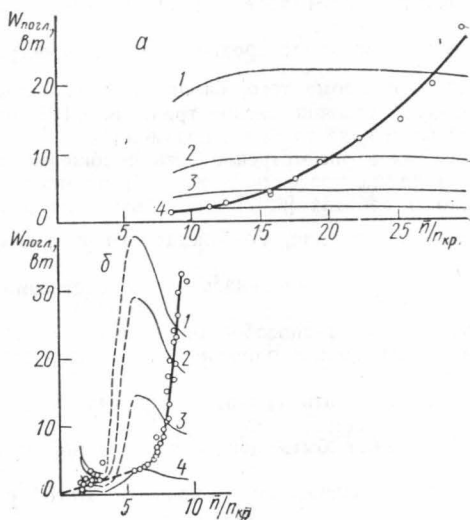


Рис. 2. Условия существования стационарного СВЧ разряда при разных давлениях газа (параметром кривых является  $W_{пад}$ ), а —  $p=2$ , б —  $p=0,1$  мм рт. ст. а: 1 — 70, 2 — 30, 3 — 15, 4 — 5 вт; б: 1 — 130, 2 — 100, 3 — 50, 4 — 3 вт

четных кривых при фиксированном давлении газа используется средняя частота столкновений  $\bar{\nu}(T_e)$ .

Результаты сопоставления экспериментальных и расчетных данных приведены на рис. 1 для давлений 10 и 0,1 мм рт. ст. Совпадение можно считать удовлетворительным в диапазоне от 20 до 2 мм рт. ст., если принять во внимание приближенный характер принятой модели разряда, не учитывающей ряд кинетических процессов в плазме и ее неоднородность. Заметим, что общий ход экспериментально полученной зависимости  $W_{мин}^1$  от давления согласуется в этой области с расчетом [1].

При давлениях ниже 1 мм рт. ст. наблюдается резкое различие между результатами расчета и экспериментом. В этой области давлений при одной и той же  $W_{пад}$  возможны два устойчивых состояния СВЧ разряда с различными  $\frac{W_{отр}}{W_{пад}}$ ,

$\frac{W_{пр}}{W_{пад}}$  и  $\frac{W_{полл.}}{W_{пад}}$ . Переход от одного состояния к другому сопровождается скачкообразным изменением концентрации электронов и интенсивности свечения разряда. Особенности СВЧ разряда в этой области давлений характеризуются также нарушением монотонного хода зависимости  $W_{мин}$  от давления газа [1].

Изменение характера СВЧ разряда можно качественно пояснить, рассматривая кинетические и электродинамические характеристики разряда:

<sup>1</sup>  $W_{мин} = \lim_{n \rightarrow 0} W_{пад}(\bar{n})$  есть минимальное значение падающей мощности, при котором разряд еще горит.

$$W_{\text{погл}} = f_1 \left( \frac{\bar{n}}{n_{\text{кр}}} \right), \quad (1)$$

$$\frac{W_{\text{погл}}}{W_{\text{пад}}} = f_2 \left( \frac{\bar{n}}{n_{\text{кр}}} \right), \quad (2)$$

где  $\frac{\bar{n}}{n_{\text{кр}}}$  — отношение средней по объему концентрации электронов к критической концентрации [4]. Уравнение (1) отражает равенство энергии, приобретаемой электронами в СВЧ поле и теряемой при различных столкновениях. Так как последняя сильно зависит от средней энергии электронов, то вид функции  $f_1 \left( \frac{\bar{n}}{n_{\text{кр}}} \right)$  определяется, кроме того, балансом заряженных частиц в плазме. Уравнение (2) характеризует условия распространения СВЧ волны в волноводе с локальной неоднородностью в виде трубки с плазмой.

Такое рассмотрение есть обобщение известного анализа условия существования разряда на постоянном токе [5] применительно к СВЧ разряду, оно было использовано в работах [6, 7] для объяснения резонансных свойств плазмы СВЧ разряда низкого давления, возбуждаемого в трубке с осью, перпендикулярной  $\vec{E}$ . Функция  $f_1 \left( \frac{\bar{n}}{n_{\text{кр}}} \right)$  измерялась непосредственно с использованием электродинамического или зондового способов определения  $\bar{n}$  [1]. Предполагая, что коэффициент поглощения СВЧ волны однозначно определяется концентрацией электронов в плазме, можно получить семейство кривых  $W_{\text{пад}} \cdot f_2 \left( \frac{\bar{n}}{n_{\text{кр}}} \right)$ , показывающих, какая мощность может быть поглощена плазмой с концентрацией  $\bar{n}$  при подводимой мощности  $W_{\text{пад}}$ . Пересечение кривых этого семейства с кривой  $f_1 \left( \frac{\bar{n}}{n_{\text{кр}}} \right)$  является условием существования СВЧ разряда.

При давлениях выше 1 мм рт. ст. существует не более одной точки пересечения каждой из кривых семейства  $W_{\text{пад}} = \text{const}$  с кривой  $f_1 \left( \frac{\bar{n}}{n_{\text{кр}}} \right)$  и поэтому для данной  $W_{\text{пад}}$  возможно только одно устойчивое состояние разряда (рис. 2, а). При низких давлениях (рис. 2, б) в некотором диапазоне  $W_{\text{пад}}$  возможны две точки пересечения при данном  $W_{\text{пад}}$ , что соответствует двум устойчивым состояниям СВЧ разряда с двумя значениями  $\frac{\bar{n}}{n_{\text{кр}}}$ . Какое из этих состояний осуществляется на опыте, зависит, как видно из рисунков 1 б и 2 б, от того со стороны высокого или малого уровня  $W_{\text{пад}}$  мы приближаемся к этому состоянию.

Таким образом, наблюдающиеся особенности связаны в основном с электродинамическими характеристиками системы волновод — плазма.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Gerasimov N. Z., Dovzhenko V. A., Lebedeva T. P., Solntzev G. S. «UHF Argon Discharge in Waveguides», X Intern. Conf. on Phen. in Ion. Gases. Oxford, 1971.
2. Справочник по волноводам. «Советское радио», 1952, стр. 272.
3. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. гл. 2. М., «Наука», 1967.
4. Голант В. Е. СВЧ методы исследования плазмы. М., «Наука», 1968.
5. Грановский В. Л. Электрический ток в газе, гл. XII. М., Гостехтеориздат, 1952.
6. Messiaen A. M., Vandenplas P. E. Phys. Fluids, 12, 2406, 1969.
7. Messiaen A. M., Vandenplas P. E. Phys. Lett., 25A, 339, 1967.