

04:07  
©1993

## ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЧ ЕМКОСТНЫХ РАЗРЯДОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ НАКАЧКИ ГАЗОВЫХ ЛАЗЕРОВ

*Н.А.Яценко*

1. Известно [1-10], что параметры ВЧ емкостного разряда (ВЧЕР) зависят от частоты ВЧ поля  $f$ . Данный факт имеет важное значение для многочисленных приложений ВЧЕР в лазерной технике [3,4,6,10], современной плазменной технологии [7,8] и др. Однако имеющиеся в литературе попытки [3,6] объяснить наблюдаемые на опыте эффекты, например, увеличение активной проводимости плазмы ВЧЕР  $\sigma_{пл}$  с ростом  $f$ , рассматривая лишь явления, происходящие в плазменном столбе, оказались неудачными. Действительно, в диапазоне частот ВЧ поля  $f = (1-100)$  МГц и давлений газа  $p = (1-100)$  Тор — типичных для лазерной техники — активная проводимость плазменного столба в ВЧ поле практически не должна зависеть от частоты  $\omega = 2\pi f$  в соответствии с известным выражением

$$\sigma_{пл} = \frac{en_e \nu_m}{m(\omega^2 + \nu_m^2)}, \quad (1)$$

т.к. в рассматриваемой области  $\omega$  и  $p$  — частота столкновений электронов плазмы с нейтральными частицами  $\nu_m \gg \omega$ , и поэтому  $\sigma_{пл} = \frac{en_e}{m\nu_m}$ , где  $e, m$  — заряд и масса электрона.

В настоящей работе предлагается иной подход к проблеме частотных характеристик объемной плазмы ВЧЕР, являющейся активной средой газового лазера. В основе его лежит учет влияния приэлектродных слоев пространственного заряда (ПСПЗ), всегда возникающих в стационарном ВЧЕР (в том числе и среднего давления [1,2]) на характеристики плазменного столба и обратное воздействие [11]. В этом случае, как показано ниже, не возникает принципиальных затруднений в интерпретации наблюдаемых на опыте особенностей ВЧЕР, а свойства активной среды лазера с ВЧ накачкой легко прогнозируются.

2. Эксперименты проводились с ВЧ емкостным разрядом в диапазоне частот и интервале давлений, упомянутых выше. Мощность ВЧ источника достигала нескольких киловатт. Исследовалась только слаботочная форма самостоятельного ВЧЕР, т.е. ВЧ емкостной разряд, ПСПЗ которого

не пробиты [2,5,9,11]. Электродная система была образована двумя плоскими металлическими пластинами, размещенными на расстоянии  $h$  друг от друга. Ограничения на величину  $h$  определялись областью существования слаботочной формы ВЧЕР: сверху — пробоем ПСПЗ при выполнении на характерной толщине слоев  $d_{сл} = \frac{v_{др}}{\omega}$  критерия Таунсенда [2,11] ( $v_{др}$  — скорость дрейфа электронов в плазме), а снизу — условием  $h > 2d_{сл}$  [12].

Поскольку целью работы являлось изучение частотных характеристик ВЧЕР, а параметры слаботочной формы зависят еще и от величины напряжений на электродах  $U_{вч}$ , то для определенности исследовался нормальный режим горения разряда, реализуемый на разных частотах. В этом случае можно однозначно интерпретировать результаты опытов.

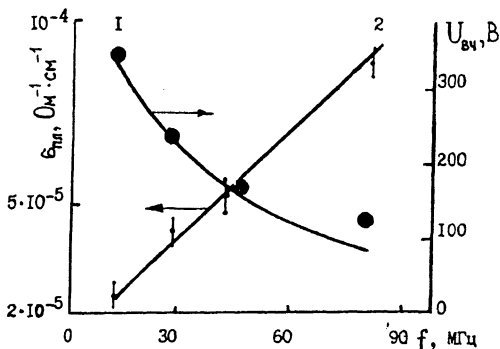
Заметим, что в нормальном режиме горения, если сила тока в цепи разряда  $I_{вч} < j_{н1} S_{эл}$ , разряд сжимается в поперечном направлении до тех пор, пока его площадь сечения  $S$  не удовлетворит равенству  $I_{вч} = j_{н1} S$ . Здесь  $j_{н1}(\omega, p, h)$  — нормальная (минимальная) плотность разрядного тока [2,11],  $S_{эл}$  — площадь электрода.

3. В процессе работы определялись в зависимости от частоты ВЧ поля величины нормального (минимального) ВЧ напряжения на электродах  $U_{вч} = U_{\min}(f)$  и соответствующие значения проводимости плазмы  $\sigma_{пл}(f)$ . Типичные данные приведены на рис. 1. Измерения выполнялись по методикам [12]. Одновременно методом активного зондирования ВЧЕР [12] находилась и активная проводимость ПСПЗ  $\sigma_{сл}$  на разных частотах. Найдено, что с ростом  $f$  увеличивалась и  $\sigma_{сл}$ . Однако во всем исследованном диапазоне частот отношение  $\frac{\sigma_{пл}}{\sigma_{сл}} > 10^2$ .

Данный факт важен, так как позволяет пренебречь активной составляющей проводимости ПСПЗ по сравнению с емкостной и из уравнения непрерывности разрядного тока получить выражение:

$$\sigma_{пл}(\omega) = \varepsilon \varepsilon_0 \omega \frac{E_{сл}}{E_{пл}}, \quad (1)$$

где  $E_{пл}$ ,  $E_{сл}$  — напряженности электрического поля в плазме и в слое соответственно,  $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-14}$  Ф/см,  $\varepsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость ПСПЗ,  $\varepsilon \approx 1$ . Значение  $E_{пл}$  в (1) определяется ионизационным балансом в плазме и при  $\omega \ll \nu_m$  от частоты практически не зависит.  $E_{сл}$  в нормальном режиме горения можно оценить, пользуясь представлениями о механизме эффекта нормальной



**Рис. 1.** 1 — зависимость нормального значения ВЧ напряжения на электродах в слабotoчном ВЧЕР от частоты ВЧ поля. Разряд в  $\text{CO}_2$  при  $p = 30$  Тор,  $h = 9$  мм; 2 — связь проводимости плазменного столба слабotoчного ВЧЕР в нормальном режиме с частотой ВЧ поля. Разряд в воздухе при  $p = 10$  Тор,  $h = 10$  мм.

плотности тока в слабotoчном ВЧЕР [11]. Согласно [11],

$$j_{н1} = \left( \frac{\varepsilon\varepsilon_0\omega^2 C' p d_{пл}}{2v_{др}} \right)^{\frac{1}{\alpha+1}}, \quad (2)$$

где  $d_{пл} = h - 2d_{сл}$ ,  $C'$ ,  $\alpha$  — величины, определяемые составом газа, причем для исследованных газов  $\alpha \approx 1$ . Считая, что в ПСПЗ  $j_{н1}$  переносится током смещения, получим для нормального режима горения

$$E_{сл} = \left( \frac{C' p d_{пл}}{2\varepsilon\varepsilon_0 v_{др}} \right)^{1/2} \quad (3)$$

Из (3) видно, что при фиксированных условиях  $E_{сл}$  также практически не зависит от частоты поля.

Таким образом, с учетом (3) и в соответствии с (1),  $\sigma_{пл}(\omega)$  можно аппроксимировать при прочих одинаковых условиях линейной функцией, что совпадает с экспериментальными данными (рис. 1).

С учетом слоевой структуры ВЧ разряда и формулы (2) выражение для ВЧ напряжения на электродах в нормальном режиме горения слабotoчного ВЧЕР можно записать в виде

$$U_{\min} = \frac{1}{\omega} \left( \frac{4C' v_{др}}{\varepsilon\varepsilon_0} p d_{пл} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

Из (4) видно, что чем выше частота ВЧ поля, тем меньшее ВЧ напряжение необходимо для поддержания стацио-

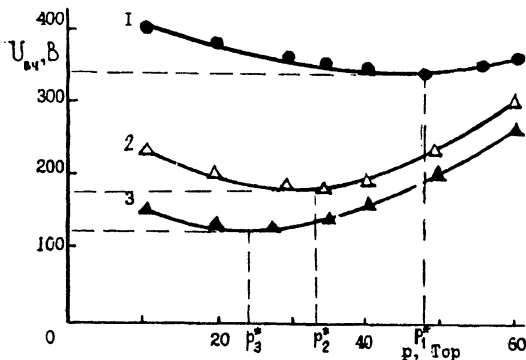


Рис. 2. Зависимость ВЧ напряжения на электродах в слаботочном ВЧ разряде от давления лазерной смеси на  $\text{CO}_2$  при  $f = 40$  (1), 81 (2) и 100 МГц (3), и удельном энергокладе  $w = 20 \text{ Вт/см}^3$ .  $p_1^*$ ,  $p_2^*$ ,  $p_3^*$  — величины давлений, при которых  $U_{вч}(p)$  достигает минимума при  $f = 40$ , 81 и 100 МГц соответственно.

нарного ВЧ разряда в режиме нормальной плотности тока. Обнаруживается и удовлетворительное согласие расчета по формуле (4) с экспериментом (рис. 1). Более того, аналогично можно получить и выражение для величины  $\epsilon = E/p$  в плазменном столбе, которое показывает, что  $\epsilon$  действительно уменьшается с ростом  $f$  при прочих одинаковых условиях [3,6]. Однако этот эффект связан с “падающим” характером  $U_{пл}(j)$  [11], но не с отличием элементарных процессов в плазме ВЧЕР и разряда постоянного тока.

Чтобы убедиться в этом, проведены специальные опыты в разрядной камере, образованной двумя кварцевыми пластинами толщиной  $\delta = 1 \text{ см}$ . На одну из сторон каждой пластины напылялось металлическое покрытие. Получено, что  $j_{н1}$  и рассеиваемая в разряде мощность, измеренная калориметрически, меньше в том случае, когда напыленные поверхности пластин расположены с наружной стороны камеры, хотя в обоих случаях  $w = \text{const}$ . Понятно, что если бы параметры ВЧЕР целиком определялись плазменным столбом, то наличие диэлектрического покрытия не оказало бы влияния на характеристики плазмы, и они зависели бы только от частоты. По существу, в описанных опытах, когда напыленные поверхности располагались с наружной стороны, искусственным путем был увеличен импеданс ПСПЗ, и тем самым уменьшено  $j_{н1}$ .

На основе реальной слоевой структуры слаботочного ВЧЕР, можно понять и другие особенности в его поведении, например, немонотонную зависимость  $U_{вч}(p)$  при фиксированном энергокладе  $w$  (см. рис. 2). Действительно, с учетом того что  $\sigma_{сл} \ll \sigma_{пл}$ ,  $U_{вч}(p)$  может быть представлено

в виде выражения:

$$U_{\text{вч}}(p) = \left[ (\varepsilon d_{\text{пл}})^2 p^2 + \left( \frac{2wv_{\text{др}}}{\varepsilon \varepsilon_0 \omega^2 \varepsilon} \right)^2 \frac{1}{p^2} \right]^{1/2}, \quad (5)$$

которое имеет минимум по давлению.

Представленный в работе экспериментальный материал и его анализ показывают важность учета реальной слоевой структуры ВЧЕР для понимания его частотных характеристик и эффективного использования в технике газовых лазеров и других приложениях.

### Список литературы

- [1] Кузовников А.А., Ковалевский В.Л., Савинов В.П. // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. 1983. Т. 24. В. 4. С. 28–32.
- [2] Яценко Н.А. // ЖТФ. 1981. Т. 51. В. 6. С. 1195–1204.
- [3] He D., Hall D.R. // IEEE J. of Quant. Electron. 1984. V. QE-20. P. 23–28.
- [4] Hoffmann P. // SPIE. 1986. V. 650. P. 23–28.
- [5] Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н. // ТВТ. 1987. Т. 25. В. 5. С. 1008–1010.
- [6] Акимов А.Г., Коба А.В., Липатов Н.И. и др. // Квантовая электроника. 1989. Т. 16. В. 5. С. 938–944.
- [7] Tours M.F., Ernie D.W. // J. Appl. Phys. 1990. V. 68. N 12. P. 6125–6132.
- [8] Surendra M. and Graves D.B. // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 59. N 17. P. 2091–2093.
- [9] Smirnov A.S., Tsendin L.D. // IEEE Trans. Plasma Science. 1991. V. 19. N 2. P. 130–140.
- [10] Яценко Н.А. // Изв. РАН Сер. физическая. 1992. Т. 56. В. 12. С. 77–85.
- [11] Яценко Н.А. // ЖТФ. 1988. Т. 58. В. 2. С. 294–301.
- [12] Яценко Н.А. // Инж. физич. журнал. 1992. Т. 62. В. 5. С. 739–752.

Институт проблем механики РАН

Поступило в Редакцию  
24 июня 1993 г.