

微波激励 CO₂ 激光器表面波放电特性的分析

徐启阳 宋一新 王新兵 谢明杰 李再光

(华中理工大学 激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

提要 提出一种放电结构和理论模型,对表面波发生器的表面波放电等离子体特性进行了分析。在给定的工作气压、注入微波功率及所吸收的外场功率情况下,利用这一理论可以求出放电管内电子密度、电子温度以及微波电场强度的绝对值和径向分布。分析表明,这种放电结构很适于 CO₂ 激光器高效率的微波激励。

关键词 微波激励 CO₂ 激光器,表面波发生器,气体放电等离子体

1 引言

目前大部分微波激励 CO₂ 激光器所采用的放电结构为矩形金属波导^[1,2]。当波导内的微波电场很强时,放电管管壁附近将形成一个强烈电离的薄层,它将把大部分微波能量反射回去,这种趋肤效应严重影响激光器工作。为了克服这一问题,本文采用了一种用表面波发生器产生表面波放电的结构。

2 放电等离子体特性

图1给出了由文献[3]所研究的表面波发生器(Surfatron)的结构,它由表面波发射装置和耦合器两大部分组成。前者为两段同轴金属圆管组成,一端接有一个金属短路活塞,另一端则由内外导体构成了一个环形间隙。从耦合器进入发射装置内的微波电场就是通过这一环形间隙耦合到放电管中去的。

整个 Surfatron 可以等效为如图2所示的传输线路。其中 Z_0 为微波源内阻, L_c 为由耦合器插入 Surfatron 内部导体所引起的等效感抗。通过改变 Surfatron 中耦合器的插入深度、环形隙的宽度以及耦合长度 l_2 和 l_1 的大小,就可以改变 Surfatron 的阻抗特性和频率特性。经耦合进入 Surfatron 中以表面波形式沿管壁向前传播的微波能量足够大时,使得管中微波电场强度达到或超过管内工作气体击穿电压,则管内产生电击穿,形成放电等离子体。

由 Surfatron 在放电管内产生等离子柱的角频度 ω_{pe} 为

$$\omega_{pe}^2 = \frac{ne^2}{m\epsilon_0} \quad (1)$$

式中 n 为电子密度, e, m 为电子电荷和电子质量, ϵ_0 为真空中介电常数。耦合长度 l_2 和 l_1 的相对

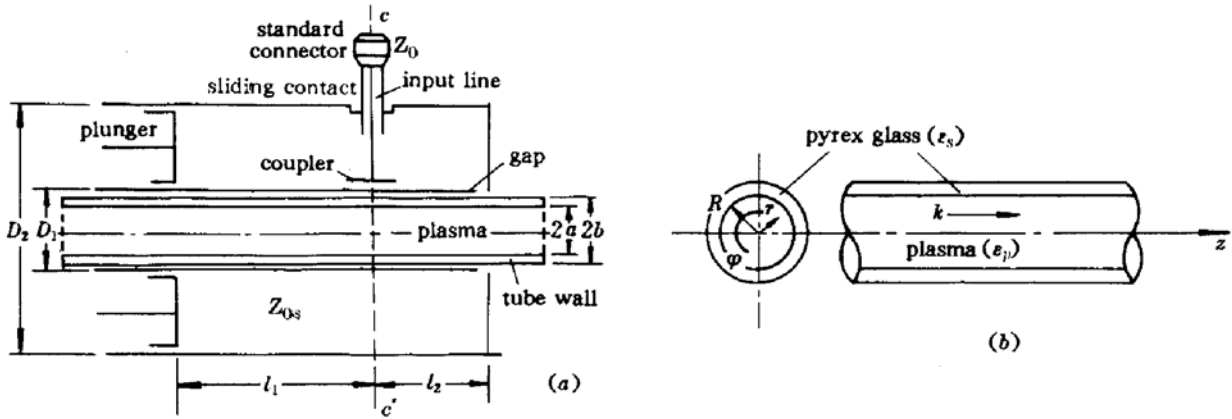


Fig. 1

(a) Axial Cross-Section of a surfatron; (b) Geometry of the plasma column

大小由下式可知

$$0.1 \leq (l_1 + l_2)/\lambda \leq 0.15 \tag{2}$$

式中 λ 为微波波长。参数 Z_0, L_c 与微波角频率 ω 有如下关系

$$\omega L_c \approx L_0(1/g_2 - 1)^{1/2} \tag{3}$$

当管内放电电阻为 R_g 时, (3) 式中的 g_2 为

$$g_2 = \frac{Z_0}{R_g} \frac{(\omega/\omega_{pe})^2}{1 + (\omega/\omega_{pe})^2} \tag{4}$$

放电管可视为一介质波导, 由于边界条件的限制, 波导内只存在角向对称的 TM 波, 其波矢可写为 $k = \beta + ia$, 方向为轴线 (Z) 方向 (见图 1)。

式中 $\beta = 2\pi/\alpha$, α 为由于等离子体吸收而造成的管内波场沿轴向的衰减系数。我们通过对管内在小信号增益条件下放电场的分析和推导, 可以得到描述管内表面波放电等离子体特性的下列一组方程。

(1) 电场强度分布函数

$$\frac{d^2 E_z}{dr^2} + \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\epsilon_p} \frac{d\epsilon_p}{dr} \frac{\beta^2}{\beta_0^2 \beta_p - \beta^2} \right) \frac{dE_z}{dr} + (\beta_0^2 \epsilon_p - \beta^2) E_z = 0 \tag{5}$$

$$E_r = -\beta_0^2 \frac{\beta}{\epsilon_p - \beta^2} \frac{dE_z}{dr} \tag{6}$$

$$\epsilon_p = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega + j\nu}$$

(2) 电子分布函数

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (nV_r r) = \nu_i n \tag{7}$$

$$V_r \frac{dV_r}{dr} = -\frac{e}{m} \frac{d\phi}{dr} - \frac{KT_i}{M} \frac{d}{dr} (\ln n) - (\nu_l + \nu_{in}) V_r \tag{8}$$

$$V_r = D_e \left[\frac{e}{KT_e} \frac{d\phi}{dr} - \frac{d}{dr} (\ln n) - \frac{\tau_e T_e}{D_e n} \frac{d}{dr} (\ln T_e) \right] \tag{9}$$

式中 ν_l 为电离频率, M 为离子质量, ν_{in} 为离子与中性气体分子的动量传输碰撞频率, D_e 为电子扩散系数, T_e 为电子温度, V_r 为电子的径向漂移速率, ν_e 为电子速率, ϕ 为电动势 ($E_A = -\Delta\phi$), τ_e

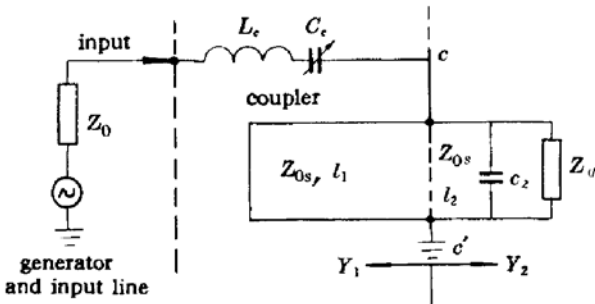


Fig. 2 Equivalent circuit of a surfatron

为电子的热扩散系数。对于 Maxwell 分布,有

$$\tau_e = \left\langle \left(\frac{1}{2} \frac{mV_e^2}{KT_e} - \frac{3}{2} \right) \frac{V_e^2}{3v_e} \right\rangle \frac{n}{T_e} = n \frac{\partial D_e}{\partial T_e}$$

(3) 电子能量平衡方程

$$\frac{1}{2} \frac{(eE)^2}{mv_e} \left(\frac{\bar{v}_c}{\omega} \right)^2 = \frac{3m}{M} KT_e \bar{v}_c + \left(\frac{8}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} n_e m \left(\frac{KT_e}{m} \right)^{3/2} \cdot \sum_j E_j C_j \left(2 + \frac{E_j}{KT_e} \right) \exp \left(- \frac{E_j}{KT_e} \right) \quad (10)$$

式中 \bar{v}_c 为有效动量传输碰撞频率,且

$$\bar{v}_c = - \int_0^{\infty} v_c \frac{\partial f}{\partial V_e} \frac{4\pi}{3} V_e^2 dV_e = \frac{\partial}{\partial T_e} (U v_c)$$

(4) 放电管吸收的外功率

$$P_w = \pi L_c \int_0^R \frac{(eE)^2}{mv_e} \left(\frac{\bar{v}_c}{\omega} \right)^2 n r dr \quad (11)$$

式中 L_c 为放电等离子体区的长度, R 为放电管半径。

(5) 平均等离子体密度 \bar{n}

$$\bar{n} = \frac{2}{R^2} \int_0^R n(r) dr \quad (12)$$

在给定的工作条件(如气体种类、气压、微波频率、放电管半径和放电管每单位长度上所吸收的微波功率等)下,对于任一给定的 \bar{n} 值,利用上述方程可分别求出电子密度 $n(r)$, 电子温度 T_e 和电场强度 $E(r)$ 的分布。

3 计算结果

计算时,取 $f = 800$ MHz, 放电管外径 $2b = 30$ mm, 内径 $2a = 25$ mm, 管壁材料 Pyrex 玻璃 $\epsilon_c = 4.25$ 。在不考虑 CO₂ 转动态激发的情况下,对气压比 He:Ne:CO₂ = 8:3:1 的混合气体的表面波放电特性进行计算机计算。计算中 N₂ 的动量传输截面引自文献 [4], 其前 8 个振动激光态的激光截面和电离截面分别为文献 [5, 6] 中所标之值, 其 10 个电子态的激发截面引自文献 [7], He 及 CO₂ 的截面参数引自文献 [8]。图 3、4 给出了在不同气压和平均等离子体密度的情况下,管内等离子体密度的分布状态计算值。从图可见,随着工作气压的上升,管内等离子体密度沿径向下降的变化梯度加大,而随着平均等离子体密度的增加,管内等离子体密度在轴线附近的分布却变得越来越平坦。这是由于管内电场的径向分布随着 \bar{n} 的增长而迅速上升所造成的(见图 5)。图 6 给出了在不同气压下管内电子温度分布的曲线,可见 T_e 沿放电管半径方向上的变化很小,即使在管内电场径向变化很大情况下也是如此。

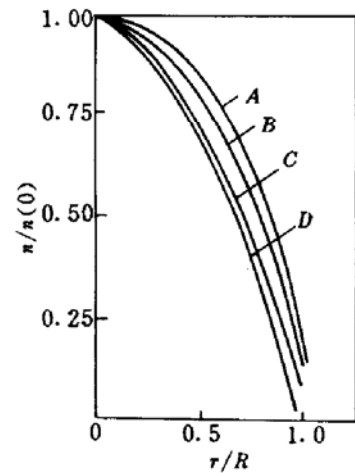


Fig. 3 Plasma density profiles obtained for an average plasma density $\bar{n} = 5 \times 10^{11}$ cm⁻³ and different pressures (kPa)
A: 1.33; B: 2.87; C: 4.00;
D: 8.00 (at $f = 800$ MHz)

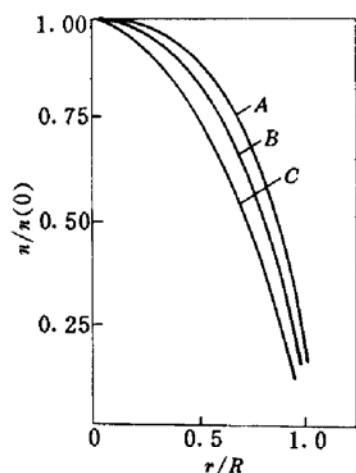


Fig. 4 Plasma density profiles obtained for a pressure of 2.87 kPa and different average plasma densities (cm^{-3})

A: 10^{11} ; B: 8×10^{11} ; C: 5×10^{11} (at $f = 800$ MHz)

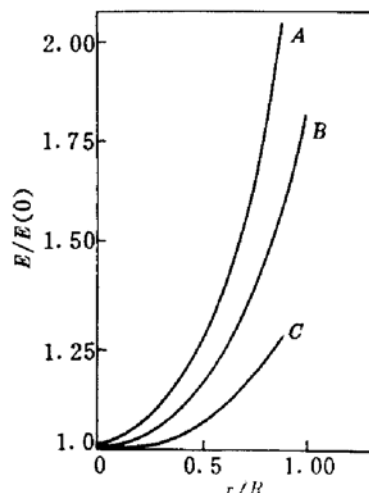


Fig. 5 Intensity profiles of the surface wave electric field obtained for a pressure of 2.67 kPa and different average plasma density (cm^{-3})

A: 10^{12} ; B: 8×10^{11} ; C: 5×10^{11}

理论分析说明, Surfatron 放电方式可克服矩形金属波导放电结构中出现的高频趋肤效应, 从而使激光器获得更为均匀和更高效率的微波激励。圆柱体放电管也为改善激光器光束质量和增加输出功率及效率创造了条件。因此, 为高功率 CO_2 激光器小型化研究开辟了新途径。

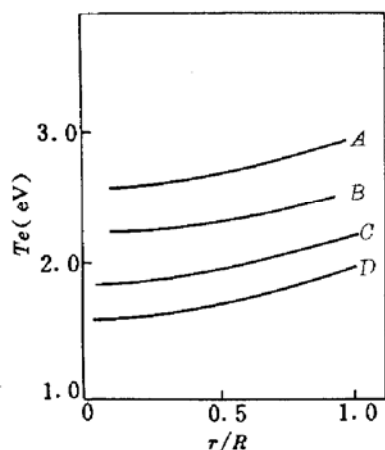


Fig. 6 Radial variation of the electron temperature for different pressures and average plasma densities

A: $p = 1.33$ kPa; $\bar{n} = 2 \times 10^{11}$;

B: $p = 2.67$ kPa; $\bar{n} = 5 \times 10^{11}$;

C: $p = 4.00$ kPa; $\bar{n} = 7 \times 10^{11}$;

D: $p = 8.00$ kPa; $\bar{n} = 9 \times 10^{11}$

参 考 文 献

- 1 Bidsch U, Budde M., Fischbach M. *et al.*. MIDAS-A Multikilowatt CO_2 laser System Excited by Microwaves. *Laser and Optoelectronic*, 1992, **24**(27):68
- 2 Wester R., Seiwert S. Investigation of microwave excited CO_2 laser discharge. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1991, **24**:1102~1107
- 3 M. Moisan, Z. Zakrzewski, R Pantel. The theory and characteristics of an efficient surface wave launcher (surfatron) producing long plasma columns. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1979, **12**:219~237
- 4 Engelhardt A. G., Phelps A. V., Risk C. G.. Determination of Momentum transfer and inelastic collision cross Sections for Electrons in Nitrogen Using Transport coefficients. *Phys. Rev.*, 1964, **135**:1566
- 5 Schulz G. J.. Vibrational Excitation of N_2 , CO_2 and H_2 by electron Impact. *Phys. Rev.*, 1964, **135**:988
- 6 Rapp D., Englander-Golden P.. Total cross section for ionization and attachment in gases by electron impact, I. positive ionization. *J. Chem. Phys.*, 1965, **43**:1464
- 7 Cartwright D. C., Trajmar S., Chutjian A.. Electron impact excitation of the electronic states of N_2 , II., *Integral*

cross sections at incident energies from 10 to 50 W. *Phys. Rev.*, 1977, **A16**:1064

- 8 J. J. Lowke, A. V. Phelps, B. W. Irwin. Predicted electron transport coefficients and operating characteristics of CO₂-N₂-Ne laser mixtures. *J. Appl. Phys.*, 1973, **44**(10):4664~4671

An Analysis of Characteristics of Surface Wave Discharge in the CO₂ Laser of Microwave Excitation

Xu Qiyang Song Yixin Wang Sinbin Xei Minje Li Zeiguang

(National Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Sci. & Tech., Wuhan 430074)

Abstract Parameter calculations of a cylindrical plasma column sustained by a surfatron are presented. From the calculations the absolute values and radial profiles of electron density and electron temperature are gained with the giving gas pressure, wave frequency and microwave power absorbed. An analysis shows that the surfatron can efficiently be used to the CO₂ laser of microwave excitation.

Key words microwave excited CO₂ laser, surfatron, gas discharge