

微波激励 CO₂ 激光器波导耦合腔的研究

杨小康 王兆申 王 坚 睦聿文

(中国科学院等离子体物理所, 合肥 230031)

提要 利用微波波导耦合腔激励 CO₂ 激光器, 具有结构简单、放电阈值功率低、易调谐和阻抗匹配的特点。结合低频等效电路对腔的设计作了分析讨论, 并给出了气体放电的实验结果。

关键词 微波激励, CO₂ 激光器, 耦合腔

1 引言

用微波激励的气体放电, 允许的注入功率密度大, 能量耦合效率高, 放电稳定, 对气体无污染, 加之微波源效率高, 可调制性强, 体积小, 成本低, 使用方便, 促使微波激励的气体激光器, 包括原子、分子、准分子激光器^[1], 近年来受到广泛重视。

但用微波激励的气体激光器还有不少物理和工程的问题有待解决, 以波导谐振腔横向激励放电管为例, 要求解决微波频率下等离子体中电场趋肤效应和腔内电磁驻波结构引起的径向和轴向不均匀激励, 及其对激光器光学模式和增益特性的严重影响。此外还要求: 1) “冷态”(无等离子体时)谐振频率应充分接近微波源频率, 以降低放电击穿阈值功率; 2) 腔体谐振频率应有约 10% 的可调范围, 以适应工业生产的微波源(通常是磁控管)频率的分散性, 同时在调谐范围内腔中电场结构应无显著畸变; 3) 谐振腔与传输波导的耦合要适度, 既能保证波能量有效耦合到等离子体中, 又避免阻抗调配过程所导致的腔体严重失谐。

我们提出的矩形波导耦合腔概念是由接近截止的矩形波导构成放电腔, 以副腔来调谐。实验证明它能较好地满足上述对激励腔的要求, 并获得轴向均匀性较好的等离子体。

2 耦合谐振腔的调谐原理

耦合腔的主腔(放电腔)和副腔(调谐腔)构成 T 型结构, 两腔经主腔窄边上的膜孔耦合, 如图 1 所示。其低频等效电路如图 2 所示, 下面借助这一等效电路讨论其调谐原理。

由图 2 可知副腔回路的总阻抗为

$$Z_{2e} = R_{2e} + jX_{2e} \quad (1)$$

其中

$$R_{2e} = R_{22} + \frac{(\omega M)^2}{|Z_a|^2} R_{11}$$

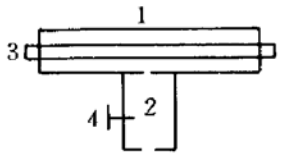


Fig. 1 The coupled cavity structure

1: main cavity; 2: discharge tube; 3: tuning cavity; 4: stub

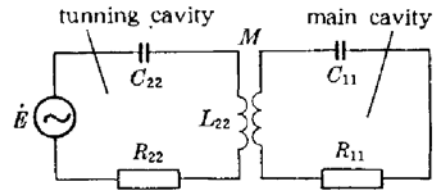


Fig. 2 Low frequency equivalent-circuit of a coupled cavity

$$X_{2e} = X_{22} - \frac{(\omega M)^2}{|Z_{11}|^2} X_{11}$$

$$X_{22} = \omega L_{22} - \frac{1}{\omega C_{22}}$$

$$X_{11} = \omega L_{11} - \frac{1}{\omega C_{11}}$$

$$Z_{11} = R_{11} + jX_{11}$$

式中 M 为耦合回路互感, ω 为耦合谐振角频率, R_{11} , R_{22} , C_{11} , C_{22} , L_{11} , L_{22} 分别为主、副腔回路的等效电阻、电容和电感。

耦合回路的谐振频率可由副腔回路的串联谐振条件 $X_{2e} = 0$ 确定, 即

$$\omega L_{22} - \frac{1}{\omega C_{22}} - \frac{(\omega M)^2}{R_{11}^2 + (\omega L_{11} - 1/\omega C_{11})^2} \left(\omega L_{11} - \frac{1}{\omega C_{11}} \right) = 0 \quad (2)$$

当初次级回路耦合比较强时, 耦合谐振频率远离单回路自谐振频率, $R_{11} \ll X_{11}$, 此时(2)式可以简化为

$$(1 - k^2)f^4 - (f_{01}^2 + f_{02}^2)f^2 + f_{01}^2 f_{02}^2 = 0 \quad (3)$$

式中 k 表示耦合系数, $k^2 = M^2/L_{11}L_{22}$, f_{01} 和 f_{02} 分别表示主、副腔回路的自谐振频率, $f_{01} = 1/2\pi \sqrt{L_{11}C_{11}}$, $f_{02} = 1/2\pi \sqrt{L_{22}C_{22}}$ 。

方程(3)的解为耦合回路的谐振频率 f_a 和 f_b , 其归一化值为

$$f_{a,b} = \frac{f_{a,b}}{f_{01}} = \sqrt{\frac{1 + (f_{02}/f_{01})^2 \pm \sqrt{[1 + (f_{02}/f_{01})^2]^2 - 4(f_{02}/f_{01})^2(1 - k^2)}}{2(1 - k^2)}} \quad (4)$$

(4)式给出了耦合谐振频率 f_a , f_b 与耦合系数 k , f_{02} 的关系, 即耦合腔的调谐关系。

对微波谐振腔, 主、副腔的不同本征模对应不同的自谐振频率, 各模之间的耦合系数各不相同, 所以微波耦合腔是一个复杂的耦合系统。但对图 1 的结构可仅考虑工作频率 (2.45 GHz) 附近主腔低阶模与副腔基模之间的耦合。设矩形波导主腔 TE₁₀₁, TE₁₀₂, TE₁₀₃ 模的谐振频率分别为 $f_{01(101)}$, $f_{01(102)}$, $f_{01(103)}$, 副腔基模的谐振频率为 $f_{02(101)}$, 图 3 给出了对应不同主腔模, $k = 0.6$ 时的调谐关系, 图 4 是对主、副腔基模以 k 为参数的调谐关系, 图 5 是以 f_{02} 为参数, f_a , f_b 与 k 的关系。

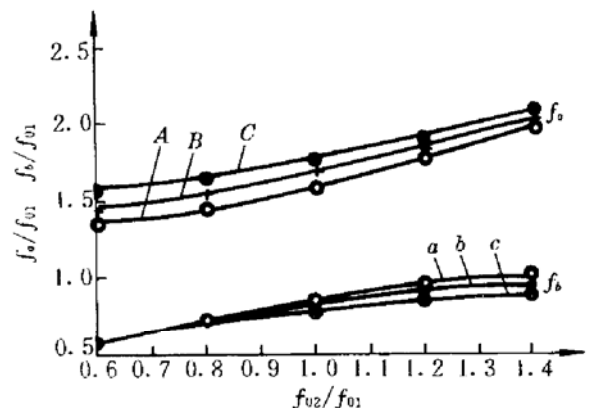


Fig. 3 The influence of main cavity modes on f_a , f_b
A, a; $f_{01}(\text{TE}_{101})$; B, b; $f_{01}(\text{TE}_{102})$; C, c; $f_{01}(\text{TE}_{103})$

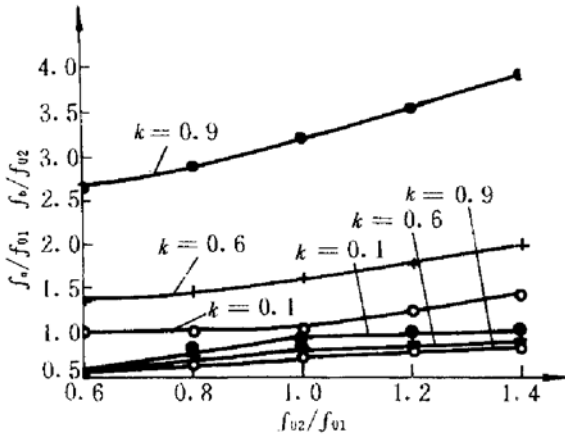


Fig. 4 Relationship between f_a , f_b and f_{02}

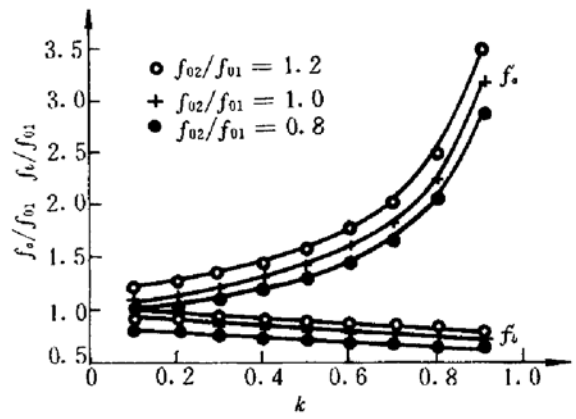


Fig. 5 Relationship between f_a , f_b and k

3 矩形波导耦合腔的设计

首先对给定的主腔长度 L 、工作频率 f_0 、调谐范围 Δf_0 ，合理选择 f_{01} ， f_{02} ， Δf_{02} ， k 等参数，它是本文讨论的重点。然后由选定的 f_{01} ， f_{02} ， Δf_{02} ， k ，确定微波腔的几何尺寸，它是经典的微波工程设计。

原则上可取工作频率 $f_0 = f_a$ 或 $f_0 = f_b$ ，由图 3 可见，若取 $f_{02} = 0.7 \sim 0.9$ ， $f_0 = f_a$ (图 3 中上分支) 或 $f_{02} = 1.0 \sim 1.2$ ， $f_0 = f_b$ (图 3 中下分支)，则有利于模式分隔，即有利于单模工作，并保证一定的调谐斜率。

对给定的工作频率，提高主腔自谐振频率有利于减小主腔宽边尺寸，从而减小波导腔体积，并增大腔与等离子体的耦合。由图 4、图 5 可见，对应上分支，当 k 取较小值 (0.1 ~ 0.3) 时， $f_a = f_a/f_{01} = f_0/f_{01}$ 值较小，从而有利于提高 f_{01} 值，即 $f_{01} \leq f_a = f_0$ ；对应于下分支， k 取较大值有利于提高 f_{01} ，即 $f_{01} \geq f_b = f_0$ ，但 k 值大会使主腔基模场分布产生较大畸变，使设计复杂化。

综合考虑模式分隔程度，主腔自谐振频率的高低，调谐斜率的大小和主腔基模场分布畸变等多种因素，对主腔工作在 TE_{101} 模时，将耦合腔的工作频率选在上分支， $f_{02} = 0.7 \sim 0.9$ ， $k = 0.1 \sim 0.3$ 是合理的。

运用上述原理设计了一耦合谐振腔，其参数为： $f_{02} = 0.8$ ， $k = 0.16$ ， $f_a = f_0 = 2.45$ GHz，由 (4) 式得 $f_a = 1.0335$ ， $f_{01} = 2.45/1.0335 \approx 2.37$ GHz。考虑到 $\phi_{内} = 17$ mm， $\phi_{外} = 20$ mm 的石英放电管使 $f_{01(101)}$ 降低 115 MHz，实际取 $F_{01(101)} = f_{01(101)} + 115$ MHz = 2485 MHz。

由放电管的长度给定主腔长 $L = 26$ cm，按矩形腔 TE_{101} 模的谐振条件： $L = (\lambda g/2) = \lambda/2 \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}$ ，得 $a \approx 6.2$ cm，取 $b = 0.7a \approx 4.3$ cm。

带石英管的主腔自谐振频率计算值分别为： $f_{01(101)} = 2.37$ GHz， $f_{01(102)} = 2.56$ GHz， $f_{01(103)} = 2.82$ GHz。为方便起见，采用 BJ-22 波导作副腔， $a' = 10.9$ cm， $b' = 5.5$ cm， $f_{02(101)} = f_{01(101)} \times f_{02} = 2.37 \times 0.8 \approx 1.896$ GHz，可得 $L' \approx 11.5$ cm，以及 $f_{02(102)} = 2.949$ GHz。

图 6 为利用 HP 网络分析仪测得的耦合腔频率特性。图中 Mark 2 谐振峰对应 $f = 2.485$ GHz，与 $k = 0.2$ ， $f_{01(101)} = 2.37$ GHz， $f_{02(101)} = 1.896$ GHz 时 f_a 的计算值 2.483 GHz 吻合。同样，Mark 3 谐振峰的 $f = 2.759$ GHz 与 $f_{01(102)} = 2.56$ GHz， $f_{02(101)} = 1.896$ GHz 时耦合谐振频率计算值 2.763 GHz 对应。而 Mark 1 谐振峰的频率为耦合谐振频率下分支的最大值。

调节副腔中心电感螺钉，测得对应主腔基模，耦合腔的最大可调谐范围 $(\Delta f)_{max} = 240$ MHz，足以覆盖磁控管工作频率分散性及放电管介质和等离子体对谐振频率的影响。在副腔调

谐过程中,测得主腔中的电场结构不发生畸变,仍为按正弦规律分布的 TE₁₀₁ 模。

因此,按上述原理设计的耦合腔冷态下可获约 10% 的调谐范围,在保证主腔中电场结构不发生畸变的条件下,能将耦合谐振频率调谐在 2.45 GHz。这两方面的特性比文献[2~4]中微波腔结构更优。

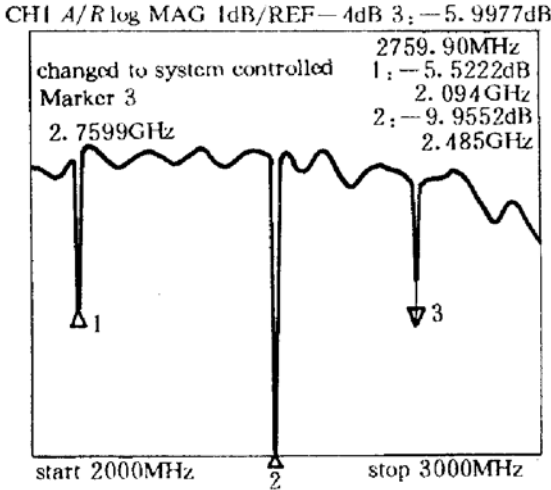


Fig. 6 The frequency characteristics of a coupled cavity

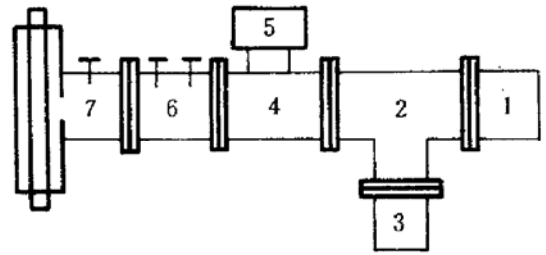


Fig. 7 Experimental set-up

1: microwave source; 2: circulator; 3: dummy load; 4: directional coupler; 5: oscilloscope; 6: impedance tuner; 7: coupled cavity

4 耦合腔激励实验

实验装置如图 7 所示,耦合腔与传输波导通过膜孔耦合,微波源频率为 2.45 GHz,最大输出功率为 1000 W,石英放电管 $\phi_{外} = 20 \text{ mm}$, $\phi_{内} = 17 \text{ mm}$,混合气体按 $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 1 : 8$ 的比例。在主腔宽边中央开一排 $\phi 1 \text{ mm}$ 的小孔,以观察放电区光强沿纵向的分布。

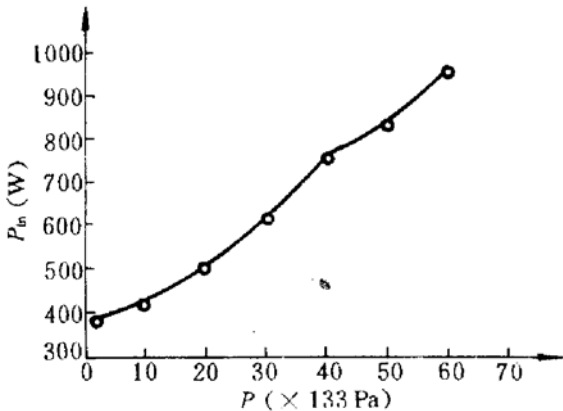


Fig. 8 Relationship between breakdown-power and gas pressure

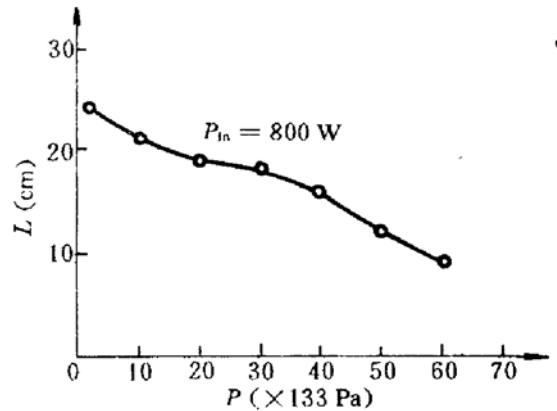


Fig. 9 Relationship between gas pressure and the length of luminous region

实验的主要结果如下:耦合腔失谐时,在高于 133 Pa 的气压下 1 kW 的微波入射功率不能击穿放电;调谐后放电击穿的阈值功率大大降低。随着气压的升高,微波放电击穿功率提高(如图 8),纵向激励区辉光长度变短(图 9 所示),与微波气体放电击穿和等离子体扩散理论的结论相同,并与文献[3]中观察到的现象一致。

起辉放电后,在阻抗调配过程中提高微波能量传输效率的同时,耦合腔的谐振特性基本不变,即能实现谐振起辉与波能量匹配兼容。

参 考 文 献

- 1 潘承志. 气体激光器的微波激励技术. 激光与红外, 1992, 22(1): 29
- 2 张泽渤. 微波激励 kW 级 CO₂ 激光器. 物理, 1991, 19(4): 212
- 3 R. Wester. Discharges of CO₂ laser excited by microwave. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1991, 24: 1102~1107
- 4 T. Doerk, J. Ehlbeck, P. Jauernik *et al.*. Diagnostics of a microwave CO₂ laser discharge by means of narrow-band BOXCAR. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1993, 26: 1015~1022

Investigation of the Waveguide Coupled Cavity of a Microwave Excitation CO₂ Laser

Yang Xiaokang Wang Zhaoshen Wang Jian Shui Yuwen

(*Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei 230031*)

Abstract CO₂ laser microwave excitation through a waveguide coupled cavity is presented. It has the characteristics of simple structure and low discharge break-down power, and is easy to realise frequency tuning and impedance matching. The cavity design principles are described through its low frequency equivalent circuit. The experimental results of gas discharge are given.

Key words microwave excitation, CO₂ laser, coupled cavity