

文章编号: 1001-3806(2005)01-0021-03

封离型全金属 RF 激励 CO₂ 激光器的热设计

汪 辉, 王新兵*, 何云贵

(华中科技大学 激光加工国家工程研究中心, 武汉 430074)

摘要: 全金属 RF 激励 CO₂ 激光器中, 气体放电区的温度分布与放电区的工作气体、注入功率和激光器外壳温度都有关系。腔体厚度以及腔体和金属电极之间的绝缘气体层厚度的变化, 对放电区的温度分布也会产生一定的影响。通过解析的方法, 计算各种因素对温度分布的影响, 为合理设计激光器的结构参数和选择适当比例的激光工作气体提供了有利的参考。

关键词: 热传导; 全金属结构; 扩散冷却; 射频放电; CO₂ 激光器

中图分类号: TN248.2⁺2 文献标识码: A

Heat design of sealed-off all metal RF excited CO₂ lasers

WANG Hui, WANG Xin-bing, HE Yun-gui

(National Engineering Research Center for Laser Processing HUST, Wuhan 430074, China)

Abstract In the all-metal radio frequency excited CO₂ laser, the temperature distribution in the discharge region varies with the gas mixture, input power and the background temperature. Besides the above factors, the thickness of the metal crust and the insulated gas width between the crust and metal electrode will also affect the temperature distribution to some extent. The temperature distribution in the discharge region is analyzed, which provides a good reference of designing the laser structure and selecting the gas mixture.

Key words heat conduct; all metal structure; diffusion-cooled; RF discharge; CO₂ laser

引 言

封离型全金属 RF 激励 CO₂ 激光器的光束质量、输出功率稳定性、可靠性和使用寿命等性能都比较出色。在全金属结构的 RF 激励 CO₂ 激光器中, 激光气体起到绝缘和传热的作用, 并且激光器采用导热性能好的铝材料作为放电电极和壳体, 不仅有利于扩散冷却, 同时解决了传统激光器结构所存在的结构材料热膨胀系数的失配问题, 扩大了激光器正常工作的温度范围, 还降低了激光器结构的制作成本和制作难度。因 CO₂ 激光器的增益与放电区的温度密切相关, 分析放电区的温度分布对于激光器的设计是不可缺少的。

1 理论分析

文献 [1] 和文献 [2] 中的激光器其放电通道为方型, 激光器真实截面结构图如图 1a 所示, 可以将该激光器等效为如图 1b 所示结构。

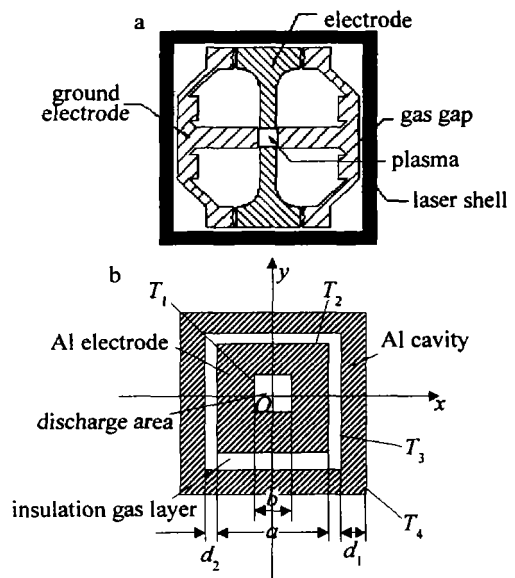


Fig 1 a—actual section of all metal structure laser b—equivalent cross section of all metal structure laser

图 1b 中, 中心的方孔放电区, 放电截面为 b 内含有均匀内热源 q_0 , 气体放电区域 4 个边界上温度为 T_0 。由于边界条件的对称性, 选取如图所示的坐标系, 导热微分方程及边界条件分别为:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{q_0}{k} = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0 (x = 0 \text{ 或 } y = 0),$$

作者简介: 汪 辉 (1980-), 男, 硕士研究生, 现从事小功率 CO₂ 激光器方面的研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: xbwang@hust.edu.cn

收稿日期: 2004-01-14 收到修改稿日期: 2004-02-10

$$T = T_1 \quad (x = \pm b/2 \text{ 或 } y = \pm b/2) \quad (1)$$

由于热源为常量,可以直接用分离变量法求解,最后可以得到温度场的分布为^[3]:

$$T(x, y) = \frac{2q_0(b/2)^2}{k} \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \frac{\cosh[\varepsilon_m y / (b/2)]}{\varepsilon_m^3 \cosh(\varepsilon_m)} \times \cos[\varepsilon_m x / (b/2)] + \frac{q_0[(b/2)^2 - x^2]}{2k} + T_1 \quad (2)$$

式中, k 为气体导热系数。由于坐标原点取在放电区中心, $\varepsilon_m = (2m - 1)\pi/2$, $m = 1, 2, \dots$, 实际计算中, m 取到 10 时已能保证足够的精度。接下来要在已知激光器外壳温度的条件下求得 T_1 。若等温界面的温度和面积分别是 T_1, A_1 和 T_2, A_2 , 由等温界面 A_1 传递到等温界面 A_2 的热流量 Q 可表示为:

$$Q = Sk(T_1 - T_2) \quad (3)$$

式中, S 称为形状导热因子,它具有长度的量纲。使用形状导热因子,可以用来解决一些复杂形状物体的稳态导热问题^[4]。在如图 1 所示的全金属结构激光器中,金属腔体外表面即激光器外壳和内表面的温度分别为 T_4, T_3 , 铝电极外表面和内表面上的温度分别为 T_3, T_1 。气体放电区放电截面边长为 b , 金属铝电极边长为 a 。由于只在气体放电区才产生内热,故流经各个界面上的热流量 Q 均相等。在该结构中,放电长度 $l = 367\text{mm}$, 放电截面为 $4.8\text{mm} \times 4.8\text{mm}$, 电极边长 $43.5\text{mm} \times 43.5\text{mm}$, 绝缘气体厚度 $d_2 = 0.5\text{mm} \sim 0.9\text{mm}$, 腔体厚度 $d_1 = 3\text{mm} \sim 7.5\text{mm}$, 则金属铝腔体、绝缘气体层、铝电极的形状因子分别为:

$$\begin{cases} S_1 = \frac{2\pi l}{0.785 \ln\left(\frac{a + 2d_1 + 2d_2}{a + 2d_2}\right)} & \text{金属腔体} \\ S_2 = \frac{2\pi l}{0.785 \ln\left(\frac{a + 2d_2}{a}\right)} & \text{绝缘气体层} \\ S_3 = \frac{2\pi l}{0.93 \ln(a/b) - 0.0502} & \text{金属铝电极} \end{cases} \quad (4)$$

由 (3) 式可以得到放电区边界上的温度为:

$$T_1 = \frac{Q}{S_1 k_1} + \frac{Q}{S_2 k} + \frac{Q}{S_3 k_1} + T_4 \quad (5)$$

将 (5) 式代入 (2) 式中并整理, 即得放电区中气体温度分布的解析表达式:

$$T(x, y) = \frac{q_0 b^2}{2k} \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \frac{\cosh(2\varepsilon_m y / b)}{\varepsilon_m^3 \cosh(\varepsilon_m)} \cos\left(\frac{2\varepsilon_m x}{b}\right) + \frac{q_0(b^2 - 4x^2)}{8k} + \frac{Q}{S_1 k_1} + \frac{Q}{S_2 k} + \frac{Q}{S_3 k_1} + T_4 \quad (6)$$

式中, q_0 为放电区中的热流密度, k_1 为铝的导热系数, $\varepsilon_m = (2m - 1)\pi/2$ ($m = 1, 2, \dots, 10$), Q 为放电区内产生的内热。

2 计算结果与分析

气体放电区中注入功率 $P = 100\text{W} \sim 150\text{W}$, 金属铝的导热系数 $k_1 = 236\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, 放电区气体为混合气体, 各种气体摩尔数之比为 $n(\text{CO}_2) : n(\text{N}_2) : n(\text{He}) = 1 : 2 : 4$ (以下气体分量之比均为摩尔数之比), 其混合气体的导热系数为 $k = 0.1618\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ^[5]。假设 $P = 100\text{W}$, 注入功率全部产生变成内热, 可得热流密度为 $q_0 = 11.8264\text{W}/\text{m}^2$ 。则放电区的中心温度随腔体厚度 d_1 的变化规律及绝缘气体层厚度 d_2 的变化规律^[6]如图 2 和图 3 所示。

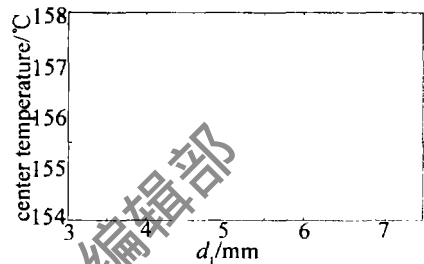


Fig 2 Center temperature of the discharge area at various d_1 for gas mixture $n(\text{CO}_2) : n(\text{N}_2) : n(\text{He}) = 1 : 2 : 4$

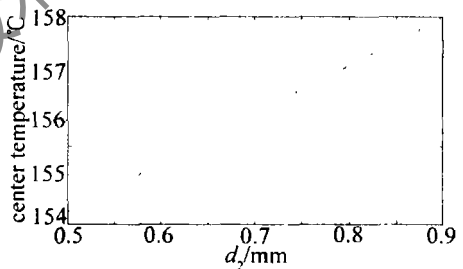


Fig 3 Center temperature of the discharge area at various d_2 for gas mixture $n(\text{CO}_2) : n(\text{N}_2) : n(\text{He}) = 1 : 2 : 4$

由图可见, 放电区中心的温度随着绝缘气体和金属腔体的厚度的增加而呈近似线性增长, 但是变化范围比较小。因此, 在实际应用中, 选择金属腔体和绝缘气体的厚度对激光器中心的温度不会产生太大的影响, 但应该充分考虑激光器的传热效果以及气体的绝缘效果。

$d_1 = 3\text{mm}$, $d_2 = 0.5\text{mm}$ 条件下, 气体放电区中心的温度随激光器外壳温度的变化曲线以及放电区的温度在 x 方向上的分布如图 4 所示。

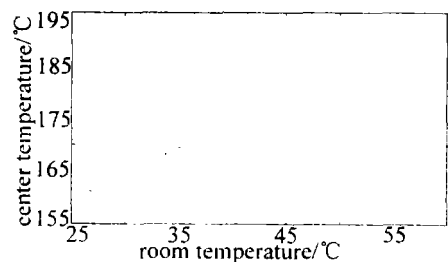


Fig 4 Center temperature of the discharge area at various T_4 for gas mixture $n(\text{CO}_2) : n(\text{N}_2) : n(\text{He}) = 1 : 2 : 4$

$d_1 = 3\text{mm}$, $d_2 = 0.5\text{mm}$ 时, 当注入功率和混合气体的组分改变, 放电区的温度场亦随之变化。由图 5 所示曲线可知, 当输入功率大时, 放电区中心温度也大; 当改变混合气体组分时, 随着导热系数变大, 放电区中心温度反而下降, 两者情况下温度的变化范围都比较大。其温度分布在 x 方向上温度场分布是呈对称分布的, 并在 $x = 0$ 处达到最大值。

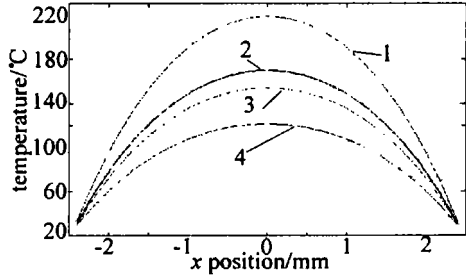


Fig 5 Temperature distribution in discharge area on x -axis at various input power and various gas mixture

1— $P = 150\text{W}$, $n(\text{CO}_2) : n(\text{N}_2) : n(\text{He}) = 1 : 2 : 4$ 2— $P = 100\text{W}$,
 $n(\text{CO}_2) : n(\text{N}_2) : n(\text{He}) = 1 : 2 : 4$ 3— $P = 150\text{W}$, $n(\text{CO}_2) :$
 $n(\text{N}_2) : n(\text{He}) = 1 : 1 : 8$ 4— $P = 100\text{W}$, $n(\text{CO}_2) : n(\text{N}_2) :$
 $n(\text{He}) = 1 : 1 : 8$

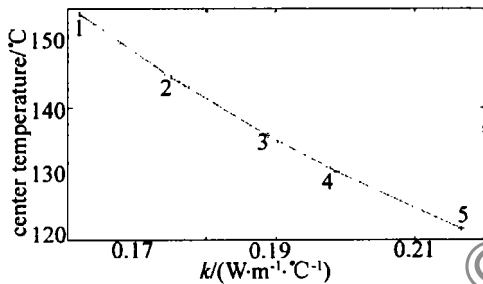


Fig 6 Center temperature of the discharge area changes with gas heat conduction coefficient at various gas mixture

1— $n(\text{CO}_2) : n(\text{N}_2) : n(\text{He}) = 1 : 2 : 4$, $k = 0.1618\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$
 2— $n(\text{CO}_2) : n(\text{N}_2) : n(\text{He}) = 1 : 1 : 3$, $k = 0.1749\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$
 3— $n(\text{CO}_2) : n(\text{N}_2) : n(\text{He}) = 1 : 1 : 4$, $k = 0.1888\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$
 4— $n(\text{CO}_2) : n(\text{N}_2) : n(\text{He}) = 1 : 1 : 5$, $k = 0.1987\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$
 5— $n(\text{CO}_2) : n(\text{N}_2) : n(\text{He}) = 1 : 1 : 8$, $k = 0.2166\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$

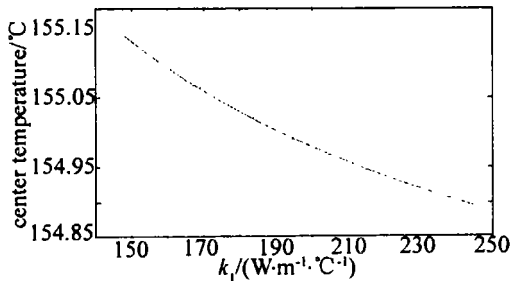


Fig 7 Center temperature of the discharge area changes with A_1 heat conduction coefficient for $n(\text{CO}_2) : n(\text{N}_2) : n(\text{He}) = 1 : 2 : 4$

在 $d_1 = 3\text{mm}$, $d_2 = 0.5\text{mm}$ 下, 放电区中心温度随气体导热系数和金属铝导热系数的变化关系曲线如图 6 和图 7 所示。

由图 6 可见, 中心气体的温度随着气体导热系数的增大而降低, 且变化明显。图 7 中, 中心气体的温度也随着金属铝导热系数的增大而呈下降的趋势, 但是变化及其微弱, 在实际应用中, 可以不考虑由于金属铝电极和铝腔体所产生的影响。

3 结 论

在影响放电区温度分布的诸多因素中, 腔体和绝缘气体层的厚度影响较小, 这在激光器的结构设计中为如何选择腔体和绝缘气体层的厚度提供了一个较宽的范围。对绝缘气体层的厚度选择主要是要考虑绝缘效果, 厚度过薄, 则不利于绝缘; 而对激光器外壳厚度的选择主要考虑是要有一定的强度, 因此, 可以选择强度硬度比较高的铝合金材料。随着激光器外壳温度的改变, 放电区的温度也随之呈现线性变化, 但激光器在外界温度变化较大的环境中仍能够保持正常工作。金属铝材料的导热系数对温度分布几乎没有影响, 这也是选用铝作为电极和腔体所带来的好处。随着激光工作气体中各种气体组分的改变, 不同的气体的导热系数对温度的影响比较明显, 放电区的中心温度随着气体导热系数的增大而降低; 同时放电区注入功率对中心温度的影响也比较显著, 随着注入功率的增加, 中心温度也随之上升, 因此在实际应用中, 必须认真考虑激光工作气体和注入功率所产生的影响。

参 考 文 献

- [1] 吴恒莱, 王又良, 萧明强 *et al*. 小功率封离型全金属 RF 激励 CO₂ 激光器的实验研究 [J]. 中国激光, 2001, A28(10): 890~892
- [2] WANG X B, CHEN Q M, XIE M J *et al*. metal CO₂ laser excited by switching power [J]. SPIE, 1999, 3862: 148~150
- [3] 杨强生, 浦保荣. 高等传热学 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1996: 18~47.
- [4] 程俊国, 张洪济, 张慕瑾. 高等传热学 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1991: 40~50.
- [5] PLNSKIE F, WITKOWSKI J S. Prediction of the thermal properties of CO₂, CO and Xe laser media [J]. Opt & Laser Technol, 2001, 33: 61~66
- [6] 张平. MATLAB 基础与应用简明手册 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001: 77~90