

隔环结构 CuBr 激光放电管温度场分析*

马 涛** 姚志欣 潘佰良 陈 星 周国耀
(浙江大学物理系, 杭州 310027)

摘 要 提出了隔环式 CuBr 激光放电管温度场的简单数学模型, 获得了气体温度场径向分布的解析表达式, 分析了这种结构对放电稳定性及激光光斑质量的影响。

关键词 溴化亚铜激光器, 隔环式放电管, 径向温度分布。

1 引 言

放电自加热类型的溴化亚铜激光器在稳定运转时, 放置溴化亚铜的放电管管壁处的温度以及放电管内温度场的轴向和径向分布对激光性能有明显的影晌。先前的报道反映了新颖的金属筒式加热器的轴向控温效果^[1], 本文的分析表明在隔环构造的中空区域可以获得较为均匀的温度径向分布, 对放电稳定性及激光光斑质量有好的效果。

无隔环的柱形放电管温度径向分布先前已有分析^[2]。一般说来, 放电管轴区的温度高于管壁温度, 且随口径增大更甚。因此, 一般认为, 卤化铜激光管口径不能过粗, 因为放电分解卤化铜的产物之一是强负电性的卤素原子, 它吸附电子形成负离子, 并使电子密度下降, 引起放电不稳^[3], 放电管口径越粗, 轴线区域温度越高, 局部过热产生的热电离不仅使放电进一步向轴线收缩, 而且加剧放电的不稳定性。

1978 年, 原苏联列别捷夫物理所的研究者提出隔环结构的放电管^[4], 实验表明在隔环中空横截面上较好地解决了放电通道收缩的问题, 已为多数研究者普遍接受^[1, 5], 但对其作用至今尚无分析。本文借助简单的数学模型对其温度径向分布进行了研究, 得到甚有新意的结果, 与观察到的实验现象一致。

2 数学模型和计算结果

温度场分布仍取泊松方程^[2]:

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = -q(r) \quad (1)$$

k 为管内气体的热传导系数, T 为温度, $q(r)$ 为管内半径 r 处单位体积的电功率沉积。对(1)式在不同的边界条件下分区求解, 如图 1 所示:

$$q(0 \leq r < R_1) = q_0,$$

* 曹光彪高科技发展基金和浙江省自然科学基金(698054)资助。

** 现在工作单位: 杭州商学院信息电子系。

收稿日期: 1998-04-21

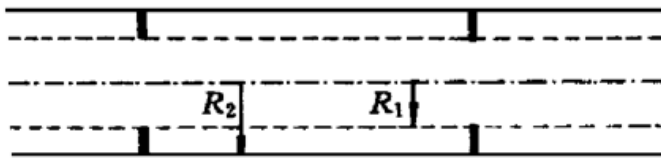


Fig. 1 The axial section schematic diagram of the discharge tube with diaphragms

(隔环孔区电功率沉积按体积均匀分布)

$$q(R_1 \leq r \leq R_2) = 0,$$

(隔环遮挡区无电功率沉积)

管内气体的主要成份是充作缓冲气体的氖气, 实验条件下可以视作单原子理想气体, $k = k_0 T^{0.5}$, $k_0 = 2.829 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K})^{-1.5[2]}$, 认为温度及其一阶导数在隔环外

沿 $r = R_1$ 处连续, 另外在 $r = 0$ 处由于对称性关系 $\frac{dT}{dr}|_{r=0} = 0$, 在管壁 $r = R_2$ 处由于温度控制器维持管壁温度 $T|_{r=R_2} = T_w$, 这里 T_w 为管内壁处温度。

因为只考虑温度的径向变化, 所以热传导方程变为^[2]:

$$\frac{d}{dr}(rk \frac{dT}{dr}) + q(r) = 0 \tag{2}$$

由此可解得:

$$T(r) = [T_w^{1.5} + 1.5q_0R_1^2 \ln(R_2/r)/(2k_0)]^{1/1.5}, \quad R_1 \leq r \leq R_2 \tag{3}$$

$$T(r) = [T_{R_1}^{1.5} + 1.5q_0(R_1^2 - r^2)/(4k_0)]^{1/1.5}, \quad 0 \leq r \leq R_1 \tag{4}$$

式中, $T_{R_1} = [T_w^{1.5} + 1.5q_0R_1^2 \ln(R_2/R_1)/(2k_0)]^{1/1.5}$ (5)

作为对比, 还求解了普通无隔环的圆柱形放电管径向温度分布, 得到^[2]:

$$T(r) = [T_w^{1.5} + 1.5q_0(R^2 - r^2)/(4k_0)]^{1/1.5}, \quad 0 \leq r \leq R \tag{6}$$

式中 R 为放电管半径。

在采用倍压谐振充电线路时, 无损耗理想情况下总的输入电功率 $W = C(2V_0)^2 f/2$, 按文献[6]的实验参数: 储能电容 $C = 500 \text{ pF}$, 直流电源电压 $V_0 = 4.5 \text{ kV}$, 放电脉冲重复率 $f = 25 \text{ kHz}$, 隔环孔直径 1.5 cm , 放电管内直径 3 cm , 电极间距 40 cm , 则 $q_0 = 7.2 \text{ W/cm}^3$ 。考虑闸流管和放电回路的损耗, 取 $q_0 = 2 \text{ W/cm}^3$ 是合适的^[2], 当以溴化亚铜为工作物质时, 控制放电管外壁的温度为 $390 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[6], 由于石英壁温差约 $40 \text{ }^\circ\text{C}$, 故取 $T_w = 700 \text{ K}$ 。

图 2 给出了当 $R_1 = 0.75 \text{ cm}$ 、 $R_2 = 1.5 \text{ cm}$, $q_0 = 2 \text{ W/cm}^3$ 时有隔环的放电管和 $R = 1.5 \text{ cm}$ 无隔环的放电管的温度分布。计算表明, 其轴线温度分别为 1430 K 和 1828 K , 两者相比, 有隔环的低约 400 K , 环孔缘处的温度 $T_{R_1} = 1153 \text{ K}$ 。

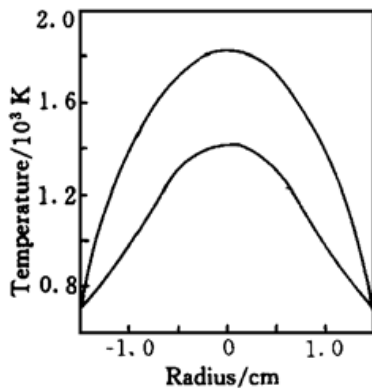


Fig. 2 Radial profiles of gas temperature in a cylindrical tube ($R = 1.5 \text{ cm}$) without and with diaphragms ($R_1 = 0.75 \text{ cm}$, $R_2 = 1.5 \text{ cm}$)

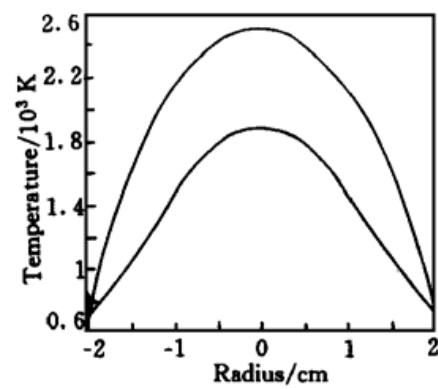


Fig. 3 Radial profiles of the gas temperature in a cylindrical tube ($R = 2 \text{ cm}$) without and with diaphragms ($R_1 = 1 \text{ cm}$, $R_2 = 2 \text{ cm}$)

图 3 给出了 $R_1 = 1 \text{ cm}$ 、 $R_2 = 2 \text{ cm}$ 、 $q_0 = 2 \text{ W/cm}^3$ 时有隔环的放电管和 $R = 2 \text{ cm}$ 无隔环的放电管温度径向分布。计算表明, 其轴线温度分别为 1884 K 和 2494 K, 两者相比, 有隔环的低约 600 K, 环孔边缘处的温度 $T_{R_1} = 1570 \text{ K}$ 。

为了进行比较, 还根据(6)式求出放电管半径 R 分别为 0.75 cm 和 1.0 cm 无隔环结构时, 在同样边界条件 $T_w = 700 \text{ K}$ 和电功率沉积 $q_0 = 2 \text{ W/cm}^3$ 时的轴线温度分别为 1038 K 和 1266 K。

3 分析和讨论

1) 无论有没有隔环, 在边界温度恒定情况下, 放电管轴线温度都将随着管径增大而升高, 但是轴线温度与激活区外沿温度却呈现着不同的关系, 当激活区半径从 0.75 cm 增加到 1.0 cm 时, 无隔环时的温差比(即轴线处温度与管壁温度 T_w 的比值)从 1.48 倍增长到 1.81 倍; 而有隔环时的温差比(即轴线处温度与隔环孔边缘处温度 T_{R_1} 的比值)反倒从 1.24 倍降低到 1.20 倍。正是由于隔环孔中空横截面上的温度分布比较均匀, 得以避免放电通道的收缩, 保证了光束质量。

再以 $R_1 = 1 \text{ cm}$ 、 $R_2 = 2 \text{ cm}$ 和 $R = 2 \text{ cm}$ 有无隔环的放电管进行比较, 轴线温度分别是管壁温度的 2.69 倍和 3.56 倍, 如果将溴化亚铜蒸气当作理想气体, 那么后者的密度只有前者的 75%; 还可以激活区相同情况下 $R_1 = 1 \text{ cm}$ 、 $R_2 = 2 \text{ cm}$ 的 $R = 1 \text{ cm}$ 有无隔环的放电管进行比较。由于轴线温度相对于激活区外沿处温度的比值后者是前者的 1.51 倍, 所以轴线区密度相对于激活区外沿密度的比值后者只有前者的 66%, 激光介质在激活区的分布更不均匀, 铜原子密度径向分布的不均匀是造成激光束径向不均匀甚至形成“黑心”的原因之一^[7]。

2) 溴化亚铜激光器是自终止类型脉冲激光, 激光下能级亚稳态的布居对激光有着至关重要的影响, 特别是其中的绿光成分, 其亚稳态热平衡布居数 N_C 与基态铜原子密度 N_0 遵循玻耳兹曼分布^[8]:

$$N_C = N_0 \exp(-E_C/kT_e)$$

式中 $E_C = 1.39 \text{ eV}$ 为绿光下能级 $\dot{D}_{3/2}$ 位势, k 为玻耳兹曼常数, T_e 为电子温度, 它以气体温度 T 为最终逼近值, 并随同 T 而升降, 当轴线区气体温度过高时, 亚稳态的阻塞效应更是造成激光束径向不均匀甚至形成“黑心”的重要原因^[7]。

应该考虑到由于与缓冲气体原子之间的碰撞, 黄光下能级 $\dot{D}_{3/2}$ 与绿光下能级 $\dot{D}_{3/2}$ 之间可以有效地交换能量, 因此, $\dot{D}_{3/2}$ 能级的热布居 N_Y 相对于 $\dot{D}_{3/2}$ 能级的热布居 N_C 而言, 是以气体温度 T 为标志的玻耳兹曼分布^[8]:

$$N_Y = N_C \exp[-(E_Y - E_C)/kT]$$

式中 $E_Y = 1.64 \text{ eV}$ 为黄光下能级 $\dot{D}_{3/2}$ 位势。当气体温度 $T = 1884 \text{ K}$ 时, N_Y 只有 N_C 的 21%, 因为 1884 K 相当于 0.16 eV, E_Y 和 E_C 的能级差不过 0.25 eV, 两者处于同一个量级, N_Y 向 N_C 的转移是非常快的。因此, 随着气体温度的提高, 亚稳态对激光的自终止作用主要是绿光跃迁受到约束, 在正常情况下激光束中黄绿光的强度比约为 1.2, 当轴线区气体温度过高时, 绿光份额明显减少, 视觉效应即表现为颜色偏黄, 这种情况影响了输出光束的质量。

3) 先前的研究表明, 输入功率在放电管内均匀沉积方式较接近实际情况^[2], 而 $T_w = 700 \text{ K}$ 也被实验证实为提供溴化亚铜蒸气密度的恰当温度^[6], 在此前提条件下, 较大口径的非隔环放电管, 由于其过高的轴线温度限制了电功率的馈入。对直径 4 cm 的放电管, 非隔环式的轴线温度若从 2494 K 降低到与隔环式的 1884 K 相同, 则根据(6)式要求单位体积的电功率沉积 $q_0 = 1.1 \text{ W/cm}^3$, 较实际要求馈入的电功率密度低了近一半, 难以实现有效的激

励,然而由于激活区口径扩大了一倍,输入的总电功率反倒必须增加为隔环式的近二倍。

综上所述,本文在实验的基础上,从理论上分析了带有隔环的溴化亚铜激光放电管,不仅在隔环孔中空区域实现了较为均匀的温度径向分布,而且更有效地利用电容器储能实现放电激励,加上先前的轴向控温装置^[1],使溴化亚铜激光器的平均功率从 3 W 提高到 9 W,电光转换效率提高了一倍以上^[9]。

最后需要强调指出的是,尽管隔环构造的溴化亚铜激光放电管确定可以获得较为均匀的温度径向分布,不仅对放电稳定性及激光光斑质量有好的效应,而且提高了激光功率和电光转换效率。但是自从 1985 年保加利亚的 Sabotinov 教授等提出在溴化亚铜激光放电管的缓冲气体氛中掺入少量氢气使溴化亚铜激光器的激光功率和电光转换效率成倍增长的建议后^[10],情况开始发生了变化,特别是最近的实验表明,少量氢气的掺入还可以使溴化亚铜激光放电管不再需要隔环结构,激活区随同口径扩大,在大体积范围内实现均匀的脉冲放电,从而使溴化亚铜激光器功率按激活体积比例增长,输出激光平均功率得以大幅度提高^[11]。

参 考 文 献

- [1] 潘佰良,姚志欣,金永兴等. 用于卤化铜激光器的轴向温控装置. 应用激光, 1996, 16(4): 175~ 176
- [2] 姚志欣,钱育军,潘佰良. 铜激光放电管内气体温度径向分布的研究. 中国激光, 1995, 22(5): 333~ 337
- [3] 楼祺洪,徐捷,傅淑芬等. 脉冲放电气体激光器. 北京: 科学出版社, 1993. 10~ 11
- [4] Kazaryan M A, Trofimov A N. Gas-discharge tubes for metal halide vapor lasers. *Sov. J. Quant. Electron.*, 1978, 8(11): 1390~ 1391
- [5] 景春阳,张桂燕. 实用化铜蒸气激光器. 激光杂志, 1985, 6(2): 65~ 69
- [6] 姚志欣,潘佰良,陈星. 封离式溴化亚铜激光器的研究. 应用激光, 1998, 18(1): 21~ 22, 28
- [7] 梁宝根,陶永祥,尹宪华等. $\Phi 60$ mm 以下大口径铜蒸气激光器光束“黑心”问题的研究. 中国激光, 1990, 增刊(12): 38~ 42
- [8] 应锡雄,夏铁君,姚志欣. 铜蒸气激光器黄绿光脉冲与管温关系的研究. 光学学报, 1986, 6(10): 870~ 874
- [9] 姚志欣,潘佰良,钱良军等. 实用化 10 W 溴化亚铜激光器. 中国激光, 1996, A22(1): 11~ 12
- [10] Astadjov D N, Savtinov N V, Vuchkov N K. Effect of hydrogen on CuBr laser power and efficiency. *Opt. Commun.*, 1985, 56(4): 279~ 282
- [11] Astadjov D N, Dimitroy K D, Jones D R *et al.*. Copper bromide laser of 120-W average output power. *IEEE. J. Quantum. Electron.*, 1997, QE-33(5): 705~ 709

Analyses of Radial Temperature Distribution in the CuBr Laser Discharge Tube with Diaphragms

Ma Tao Yao Zhixin Pan Bailiang Chen Xing Zhou Guoyao

(Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 24 April 1998)

Abstract A simple model of temperature field was presented for the CuBr laser discharge tube with diaphragms. An analytical expression of the radial temperature distribution in the tube was given. Theoretical analyses and experimental results show the influence of the tube structure on the discharge stability and flare quality.

Key word CuBr laser, discharge tube with diaphragm, radial temperature distribution.