

# 百瓦级铜蒸汽激光器的热设计

陈 林 陶永祥 尹宪华 杨 燕 王润文  
(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要** 通过对百瓦级铜蒸汽激光器放电管内气体温度的分析计算, 给出了百瓦级器件为防止“黑心”现象输入功率密度的最佳值。分析计算了在此输入功率密度下, 为达到最佳工作温度所需的保温层厚度, 理论计算和实验结果吻合较好。从而建立了一套确定放电管内气体温度、保温层厚度的方法。

**关键词** 铜蒸汽激光器, 光束“黑心”, 热设计。

## 1 引 言

铜蒸汽激光器特别是百瓦级器件作为激光轴同位素分离的关键元件而受到重视<sup>[1]</sup>。工作时器件放电管中的气体温度、放电管管壁温度对激光的输出特性有着较大的影响。在放电管尺寸选定的情况下, 如何选择最佳输入功率密度及保温层厚度, 成了激光器结构设计的关键。虽然可以经过多次实验来确定保温层厚度, 但每做一次实验, 石英管及激光头法兰尺寸都要改变, 费用较大且实验的周期长。因此在理论上建立一套估算保温层厚度的方法具有现实意义。

## 2 理论分析

百瓦级激光器的结构参见文献[2], 陶瓷管内径  $\phi 68$  mm, 长度 2.2 m。

### 2.1 放电管内气体温度的分布计算

作者在研制大功率器件的过程中, 曾遇到过严重的“黑心”问题。一般都认为是由于放电管中心气体温度过高引起的。为了进行定量分析, 本文通过解热流密度方程, 来求得放电管中气体温度的分布。根据热力学第一定律, 结合傅里叶定律  $q = -\kappa \nabla T$ , 考虑一维稳态和边界条件, 可得到热流耗散方程组<sup>[3]</sup>:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\kappa \nabla T) &= -q_0 [1 - (r/R)^n] \\ T(R) &= T_w \\ |\nabla T(r)|_{r=0} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $R$  为放电管半径,  $\kappa$  为管内气体的热传导系数,  $q_0 [1 - (r/R)^n]$  为管内半径  $r$  处单位体积的输入功率。  $n \rightarrow \infty$  对应输入功率密度均匀分布,  $n = 1$  对应线性分布。对  $\phi \geq 60$  mm 的大

口径器件, 输入功率对应均匀分布,  $n$  取  $\infty$  较合适。

对理想气体,  $\kappa = \kappa_0 T^m$ , 对 Ne 气,  $m \approx 0.5$ ,  $\kappa_0 = 2.829 \times 10^{-5} \text{ W/cm K}^{3/2[4]}$ , 因气体温度仅是  $r$  的变量, 把柱坐标系下的梯度、散度公式代入(1)式则得:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r \kappa_0 T^{0.5} \frac{dT}{dr}) = -q_0 [1 - (\frac{r}{R})^n] \quad (2)$$

对  $n \rightarrow \infty$ , (2) 式的解为:

$$T(r) = [T_w^{1.5} + \frac{3q_0}{8\kappa_0} (R^2 - r^2)]^{1/1.5} \quad (3)$$

其中  $q_0 = q\delta$ ,  $q$  为平均单位体积的输入功率;  $\delta$  为耦合因子, 因电源输入功率只有大约 50% 耦合进放电管,  $\delta \approx 0.5$ ;  $T_w$  为陶瓷管温度。以上结果与文献[5]的结果一致。

## 2.2 放电管到石英管之间的温度分布

铜蒸汽激光器所需工作温度为 1450~1500°C, 在一定的输入功率下, 若保温太差, 陶瓷管达不到所需工作温度, 出光很弱甚至根本不出光。若保温太好, 管中气体的工作温度太高, 激光容易发黄, 输出功率不高, 且不稳定。如何掌握最佳保温层厚度, 成了激光器件设计的关键。因而从理论上建立一套估算保温层厚度及温度分布的公式显得非常有意义。

现在来分析一下从放电陶瓷管到石英管之间的温度分布情况。激光管主体的横截面如图 1 所示。 $r_0$  为陶瓷管外径,  $R_{out}$  为石英管外径,  $T_R$  为室温,  $T_{out}$  为石英管温度。

从自然对流和辐射传热来确定通过石英管外壁的热导损耗, 根据文献[4], 单位面积上通过自然对流传给周围的热量

$$q_1 = h(T_{out} - T_R).$$

$h$  为对流换热系数, 对于空气(沿平板强迫对流)  $h = 50 \text{ (Wm}^{-2}\text{K)}$ 。石英管向周围环境辐射的热量为

$$q_2 = \epsilon\sigma T_{out}^4 - \alpha\sigma T_R^4,$$

$\epsilon$  为石英玻璃的发射率,  $\sigma$  为辐射系数,  $\alpha$  为玻璃管与环境相互几何关系和发射率比值等参数的综合, 里近似为 1, 则由此可得石英管外壳通过单位长度的侧向热耗<sup>[6]</sup>

$$W_0 = 2\pi R_{out}(q_1 + q_2) = 2\pi R_{out}[h(T_{out} - T_R) + \epsilon\sigma(T_{out}^4 - T_R^4)] \quad (4)$$

式中,  $\epsilon = 0.94$ ,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8[5]}$ , 把陶瓷两端看作半球模型, 热导损耗由文献[9]得:

$$W_{sph}/W_{0l} = 2r_0 R_{out} \ln(R_{out}/r_0)/l(R_{out} - r_0),$$

$l$  为陶瓷管长度。陶瓷管两端的热辐射损耗, 由黑体辐射理论给出一近似值  $W = 2S\epsilon'\sigma'T^4$ , 其中  $\epsilon'$  为陶瓷管的发射率,  $\sigma'$  这辐射系数,  $S$  为辐射面积, 近似等于电极内表面积。

在圆柱体情况下, 从陶瓷管到石英管之间的各点温度  $T$  仅是  $r$  的函数, 陶瓷管到石英管之间传热达一稳态, 且无热源, 由导热公式<sup>[3]</sup>可得:

$$\frac{d}{dr} [r\kappa dT/dr] = 0,$$

解得  $T = C_1 \ln r + C_2$ , 考虑  $W_0$  与  $C_1$  间的关系  $C_1 = -W_0/2\pi\kappa$ , 则得:

$$T = -w_0/(2\pi\kappa) \ln r + C_2 \quad (5)$$

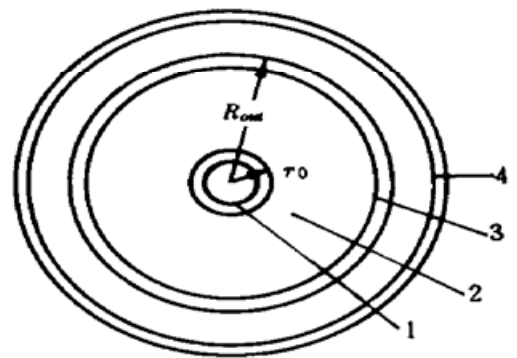


Fig. 1 The structure of the laser tube cross section. 1: alumina tube, 2: alumina insulation, 3: quartz tube, 4: metal sleeve

式中,  $\kappa$  为保温材料的导热系数。在计算时, 要考虑到热量经陶瓷管两端的热导损耗及热辐射损耗, 因此可直接用(5)式求得温度分布。可首先由(4)式求得  $T_{out}$ , 再由(5)式求得陶瓷管到石英管之间各点的温度, 这样就建立了一套从放电管中心到石英管外壁的温度计算公式。

### 3 计算结果和讨论

大口径铜蒸汽激光器器件设计过程中, 非常关键的一点是要防止光束“黑心”的出现, 最大限度地利用激活体积。光束“黑心”出现的主要原因是放电管中心的气体温度过高。而由(3)式可见, 单位体积的平均输入功率越大, 放电管中心的气体温度越高。

本文研究的百瓦级器件采用  $\phi 68 \times 2200$  mm 的陶瓷管作放电管。参照文献[5]的理论和实验结果, 选择输入功率密度  $q = 1.4 \text{ W/cm}^3$ , 这样大致估算输入电功率  $P = 11.0 \text{ kW}$ 。可算得放电管中心的气体温度  $T(r=0) = 3210 \text{ K}$ 。为此可作出放电管内的气体温度分布曲线, 如图2所示。另外, 在储能电容  $C_s = 10.1 \text{ nF}$ 、锐化电容  $C_p = 3.7 \text{ nF}$ 、脉冲重复频率  $f = 5 \text{ kHz}$ 、缓冲气体  $P_{Ne} = 2.5 \text{ kPa}$ 、输入电功率  $P_{in} = 11.0 \text{ kW}$  的情况下, 测量了光束的截面分布, 如图3所示。光束中心出现“黑心”主要由于放电管中心气体温度过高引起, 但由于输入功率密度选择较佳及大口径器件放电时具有趋附效应, “黑心”的程度要比小口径器件轻得多<sup>[7]</sup>。

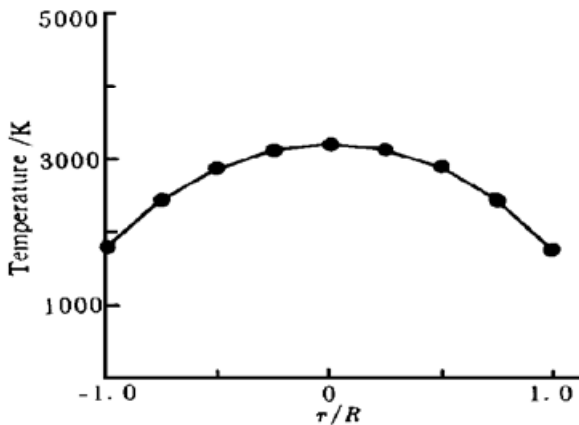


Fig. 2 Gas temperature (neon) as a function of normalized radius ( $r/R$ )

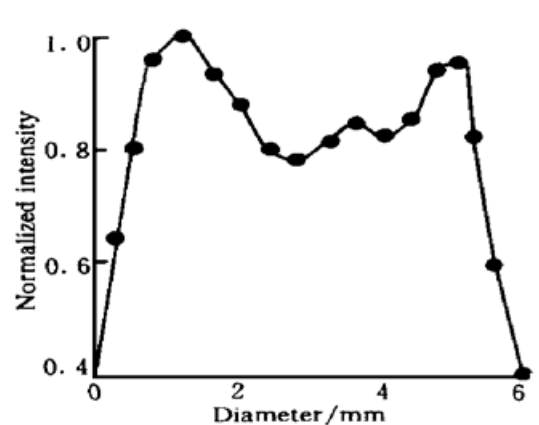


Fig. 3 Light beam cross section power distribution

在输入电功率、放电管尺寸确定的情况下, 如何准确估计保温层厚度, 对器件的设计有非常实际的意义。由(4)式、(5)式可以准确估算保温层的厚度。在输入功率  $P = 11.0 \text{ kW}$  的情况下, 考虑各种损耗因子, 最终能耦合进入激光管经圆柱体导走的热量  $Q = P \times 0.5 = 5.5 \text{ kW}$ , 单位长度的侧向热耗  $W_0 = Q/l$ ,  $l$  为陶瓷管的长度(2.2 m), 则  $W_0 = 2.5 \text{ kW/m}$ 。上面给出的陶瓷管尺寸  $\phi 68 \text{ mm}$  是管子的内径, 陶瓷管外径  $\phi = 75 \text{ mm}$ , 则  $r_0 = 0.0375 \text{ m}$ 。假定陶瓷棉的外径为  $R_{out} = 0.075 \text{ m}$ , 取  $\epsilon = 0.94$ ,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ ,  $T_R = 300 \text{ K}$ ,  $W_0 = 2500 \text{ W}$  代入(4)式, 整理得:  $5.33 \times 10^{-8} T_{out}^4 + 50 T_{out} - 20740 = 0$ , 由计算机解得  $T_{out} = 390 \text{ K}$ , 由(5)式求得  $C_2$  为  $-4766$ , 其中用到导热系数  $\kappa = 0.20^{[8]}$ , 且在这一计算过程中忽略材料保温系数随温度的变化。这样就可以计算得陶瓷管外壁的工作温度  $T_w = 1769 \text{ K}$ 。而陶瓷管内壁与外壁温差只有几十度<sup>[8]</sup>, 因此可以忽略这一变化, 陶瓷管内壁的工作温度在  $1500^\circ\text{C}$  左右, 这样的保温层厚度是合适的。

实测的陶瓷管内壁温度分布如图4所示。在输入电功率  $P_{in} = 10.0 \text{ kW}$ , 储能电容  $C_s =$

10.1 nF, 锐化电容  $C_p = 3.7$  nF,  $f = 5$  kHz 时, 激光输出功率为 102 W。从测得的实验曲线上可以看出, 两端温度分布不是非常对称, 激光器阴极的一端温度略偏高。实测的结果与理论计算较吻合。

参照上面的一套方法, 还计算了一台放电管尺寸为  $\phi_{\text{内}} 80 \text{ mm} \times 1800 \text{ mm}$  的大口径激光器的保温层厚度, 在输入功率定为 10 kW 的情况下, 计算得保温层的厚度为 4 cm, 并依此作为订货的依据, 避免了以前订货时要订几种尺寸, 从中挑选最合适的保温棉, 大大节约了开支, 缩短了实验周期。因此这一套计算放电管内气体温度、保温层厚度的方法对设计激光器的结构具有实用价值。

本文是在与浙江大学姚志欣教授和夏铁君同志进行交流的基础上完成的, 没有他们的前期工作, 本文难以成文, 在此表示诚挚的感谢。

### 参 考 文 献

- [1] I. Macpherson, Europeans focus on copper vapor lasers. *Photonics Spectra*, 1992, 26(1) : 71
- [2] 陶永祥, 尹宪华, 陈 林等, 100 W 铜蒸汽激光器. *激光与光电子学进展*, 1996, (7) : 189~ 193
- [3] 俞昌铭编, 热导及其数值分析. 北京: 清华大学出版社, 1981.
- [4] 饭田修一, 大野和朗, 神前等, 物理学常用数值表. 北京: 北京科学出版社, 1981. 92
- [5] M. J. Kushner, B. E. Warner, Large-bore copper-vapor laser: Kinetics and scaling issues. *J. Appl. Phys.*, 1983, 54(6) : 2970~ 2982
- [6] 夏铁君, 汪永江, 施淑毅, 金属蒸气激光管中温度径向分布的计算. *浙江大学学报*, 1991, 25(2) : 137~ 139
- [7] 梁宝根, 陶永祥, 尹宪华等, 大口径铜蒸汽激光器光束“黑心”问题的研究. *中国激光*, 1990, 增刊: 38~ 40
- [8] 陶永祥, 尹宪华, 陈 林等, 铜蒸汽激光器的绝热结构对有效增益区的影响. *中国激光*, 1997, A24(2) : 105~ 107
- [9] Stefano Cavalieri, Roberto Pini, Renzo Salimbeni, Analysis, design and construction of copper vapor laser system. *Laser and Particle Beams*, 1989, 7(2) : 333~ 337

## Thermal Design of a 100 W Copper Vapor Laser

Chen Lin    Tao Yongxiang    Yin Xianhua    Yan Yang    Wang Runwen

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 10 September 1997; revised 29 October 1997)

**Abstract** The optimum input power density is presented by analyzing and calculating the discharge tube gas temperature of a 100 W copper vapor laser to avoid the “black center of beam”. The optimum thickness of alumina fiber can be determined by analyzing and calculating the coaxial heat conductivity loss. The theoretical calculation is verified well with the experimental data. Therefore, the method of determining the gas temperature in discharge tube and the thickness of alumina fiber is built up.

**Key words** copper vapor laser, beam black center, thermal design.

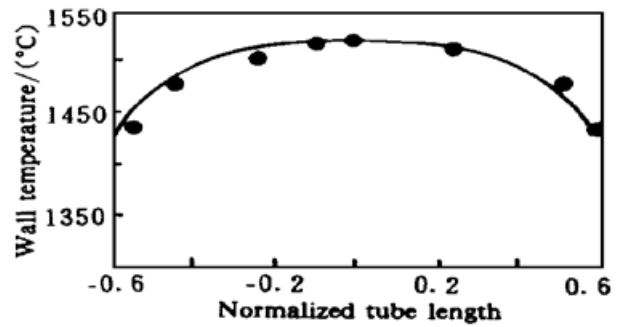


Fig. 4 Axial temperature distribution of the discharge tube