

文章编号: 0253-2239(2008)03-0512-04

# 带轴向温控仪的金属蒸气激光管径向温度场分析

毛邦宁 王丽敏 陈立 姚志欣 潘佰良

(浙江大学物理系, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 对带轴向温控仪的金属蒸气激光放电管,建立了描述放电管径向温度场的简单数学模型。给出了由热辐射和热传导引起的径向温度变化的解析表达式,计算分析了轴向温控仪对激光管管壁温度和径向温度分布的作用机制。结果表明轴向温控仪可在一定范围内独立调节放电管管壁温度和减小激光管的径向温度梯度,可有效提高激光器运转效率和稳定性。

**关键词** 激光技术; 轴向温控仪; 金属蒸气激光; 径向温度分布

**中图分类号** TN248.2; O414.1 **文献标识码** A

## Analysis of Radial Temperature Field for a Metal-Vapor Laser Tube with an Axial Temperature Controller

Mao Bangning Wang Limin Chen Li Yao Zhixin Pan Bailiang

(Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** A concise mathematical model was established to describe the radial temperature distribution of a metal-vapor laser tube with an axial temperature controller. The analytical solution of the radial temperature caused by thermal radiation and thermal conduction was obtained. The influences of the axial temperature controller on the discharge tube wall temperature and its radial temperature distribution were further calculated and analyzed. It is shown that the axial temperature controller can independently adjust the laser tube wall temperature, reduce the radial temperature gradient in some degree, and therefore improve the laser efficiency and stability.

**Key words** laser technique; axial temperature controller; metal-vapor laser; radial temperature distribution

### 1 引言

对脉冲放电激励的金属蒸气激光器而言,放电管管壁温度以及管内径向温度分布对金属蒸气压强和粒子数密度分布有着重要的影响。特别是那些把激光介质(CuBr、Sr和Ba等)直接放在放电管内壁的放电自加热型金属蒸气激光器<sup>[1~4]</sup>,管壁温度决定了金属蒸气压强,而能否维持最佳的金属蒸气压强在一定程度上影响了激光器的输出特性。在激光参量优化过程中,对激励电路、输入功率密度、放电脉冲频率和电流电压幅度等参量的优化结果同样决定了管壁温度和管内温度的径向分布<sup>[5,6]</sup>。因此,在不同结构、输入功率密度、传热方式以及不同边界

条件下,研究激光管的管壁温度和管内径向温度分布有重要的意义。已有的研究表明,采取较小的输入功率密度、导热系数较高的缓冲气体和隔环结构的放电管等措施,都能有效降低金属蒸气激光管的中心温度和径向温度梯度,在一定程度上消除了激光束的黑心现象,提高了激光的光束质量和稳定性<sup>[7~9]</sup>。已有的有关金属蒸气激光管径向温度场分析的文献中,为了简化,一般只考虑热传导过程<sup>[7,8]</sup>或热辐射传热过程<sup>[9]</sup>。本文在同时考虑两种主要的传热方式条件下,理论计算了带轴向温控仪的激光放电管的管壁温度和径向温度场分布,得到了与实验一致的结果<sup>[10]</sup>,表明理论计算结果较好地反映了

收稿日期: 2007-09-04; 收到修改稿日期: 2007-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(10574111, 10374081)资助课题。

作者简介: 毛邦宁(1981-),男,广东人,博士研究生,主要从事高频脉冲放电和金属蒸气激光等方面的研究。

导师简介: 潘佰良(1966-),男,浙江人,教授,博士生导师,主要从事激光物理与高频脉冲放电技术等方面的研究。

E-mail: pbl66@zju.edu.cn

激光管径向的实际传热过程。

## 2 模型与方程

图 1 为带轴向温控仪的放电管横截面结构图。石英放电管内充有 2~4 kPa 压强的氖气作缓冲气体, 铝制圆柱形轴向温控仪与放电管同轴放置, 两者间为 2~3 cm 的空气间隙用于放电绝缘, 温控仪的边界温度可在室温至几百摄氏度范围内调节。当放电等离子体充满放电管时, 若放电时输入的电功率密度  $q_v$  为径向均匀分布, 作一维柱面近似, 可得到稳态热传导方程

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( rk \frac{dT}{dr} \right) + q_v = 0, \quad (1)$$

忽略管壁厚度, 相应的边界和连续条件为

$$\begin{aligned} T(R_1 - 0) &= T(R_1 + 0) = T_1, \\ k(R_1 - 0) \frac{dT}{dr} \Big|_{R_1-0} &= k(R_1 + 0) \frac{dT}{dr} \Big|_{R_1+0}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $R_1$  和  $T_1$  分别表示放电管的半径和管壁温度, 氖气的导热系数  $k$  在 800~3000 K 范围内具有形式  $k = BT^a$ , 其中  $B = 9.7 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $a = 0.685^{[11]}$ 。

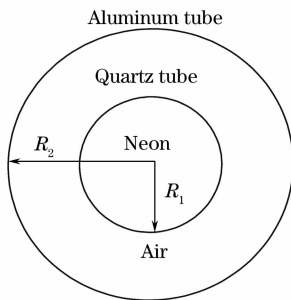


图 1 带温控仪的激光管横截面结构图

Fig. 1 Cross section of the laser tube with a temperature controller

求解(1)式在条件满足(2)式时的解析解, 可得放电管内径向温度分布表达式为

$$T(r) = \left[ T_1^{1+a} + \frac{1+a}{4B} q_v (R_1^2 - r^2) \right]^{1/(1+a)}. \quad (3)$$

石英管壁与温控仪之间的传热方式主要为辐射换热和热传导。因两者分别传递的热功率为未知量, 不可单独求解。为此, 建立了描写二者并存时的导热模型, 求得数值解。由文献[12]可知石英管壁和铝套之间单位时间内通过辐射传递的热量可写为

$$Q_R = \sigma(T_1^4 - T_2^4) \left/ \left( \frac{1 - \epsilon_1}{S_1 \epsilon_1} + \frac{1}{S_2 F_{21}} + \frac{1 - \epsilon_2}{S_2 \epsilon_2} \right) \right., \quad (4)$$

式中  $\epsilon_1, \epsilon_2, S_1, S_2, T_1, T_2$  分别为石英管壁和铝套的辐射率、面积和温度。 $F_{21}$  为铝套对石英管壁的角系数,  $\sigma$  则是斯特藩-玻尔兹曼(Stefan-Boltzmann)常量。在电极间距  $L$  远大于放电管半径及铝套半径条件下,  $F_{21} \approx R_1/R_2^{[7]}$ 。

考虑石英管壁和温控仪之间( $R_1 < r < R_2$ )的空气导热, 由文献[12]中数据拟合得空气的导热系数为  $k_a = k_0 T^m + C$ , 其中  $k_0 = 1.408 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $m = 0.588$ ,  $C = -1.4 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 。在管壁和温控仪之间无热源, 由傅里叶定律知, 单位时间以热传导形式通过长为  $L$ 、半径为  $r$  的柱面的热量可以写为

$$Q_C = - \int_s k_a \nabla T dS = - (k_0 T^m + C) \frac{dT}{dr} \cdot 2\pi r L, \quad (5)$$

整理(5)式并积分

$$\int_r^{R_2} \frac{Q_C}{2\pi r L} \cdot dr = - \int_{T(r)}^{T_2} (k_0 T^m + C) dT$$

$$\text{可得} \quad \frac{k_0}{m+1} [T(r)^{m+1} - T_2^{m+1}] + C [T(r) - T_2] = \frac{Q_C}{2\pi L} \ln \left( \frac{R_2}{r} \right). \quad (6)$$

因此, 单位时间内, 在管壁与温控仪之间通过热传导传递的热功率可写成

$$Q_C = \left[ \frac{k_0}{m+1} (T_1^{m+1} - T_2^{m+1}) + C(T_1 - T_2) \right] \cdot 2\pi L / \ln \left( \frac{R_2}{R_1} \right). \quad (7)$$

忽略管两端的热耗, 稳态时  $Q_C$  和  $Q_R$  之和等于放电管内单位时间产生的热量  $Q$  (输入电功率密度乘放电管体积), 即有

$$Q = q_v \pi R_1^2 L = Q_R + Q_C, \quad (8)$$

因此, 单位时间内管壁和温控仪之间传递的热量可写为

$$Q = Q_R + Q_C =$$

$$\sigma(T_1^4 - T_2^4) \left/ \left( \frac{1 - \epsilon_1}{S_1 \epsilon_1} + \frac{1}{S_2 F_{21}} + \frac{1 - \epsilon_2}{S_2 \epsilon_2} \right) \right. + \left[ \frac{k_0}{m+1} (T_1^{m+1} - T_2^{m+1}) + C(T_1 - T_2) \right] \cdot 2\pi L / \ln \left( \frac{R_2}{R_1} \right). \quad (9)$$

(9)式为超越方程,已知  $T_2$  通过数值求解可求得  $T_1$ 。将  $T_1$  代入(7)式可求得  $Q_C$ ,从而可以通过数值求解(6)式,得到放电管与温控仪之间的温度分布曲线。为了与文献[10]中实验结果对比,计算时取  $R_1=2$  cm,  $R_2=4$  cm,  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$  分别为 0.9 和 0.09,放电区半径  $R_0=1$  cm,激光管长度  $L=0.5$  m,  $Q=q_v \pi R_0^2 L$ 。

### 3 结果及分析

图 2 给出了温控仪温度  $T_2$  变化时,在管壁和温控仪之间传播的总热功率在辐射功率和热传导功率之间的分配。由图 2 知,当调高温控仪温度时,热辐射功率和热传导功率分别呈增加和下降趋势,而它们的比值  $Q_R/Q_C$  随温控仪温度  $T_2$  的增加而快速上升。这是因为热辐射功率正比于温度的四次方,随温度的增加而上升得更快。模拟结果同时表明,辐射功率和热传导功率具有可比的数值,故综合考虑二者来分析放电管的径向温度分布是必要的。

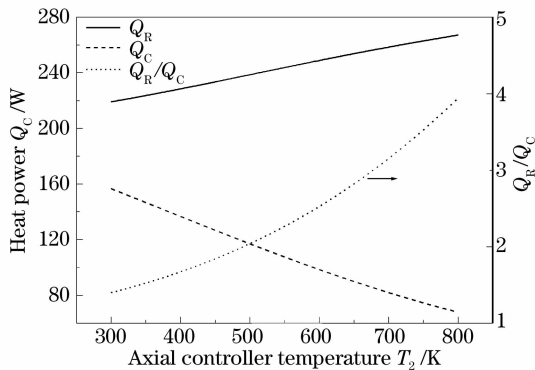


图 2 热辐射功率  $Q_R$  和热传导功率  $Q_C$  随温控仪温度的变化曲线

Fig. 2 Dependences of the heat radiation power  $Q_R$  and conduction power  $Q_C$  on the controller temperature

图 3 计算了不同电功率密度  $q_v$  时,放电管管壁温度对温控仪温度的变化率  $dT_1/dT_2$  随温控仪温度  $T_2$  的变化关系。图 4 进一步计算了不同输入电功率密度条件下,管壁温度  $T_1$  与温控仪温度  $T_2$  的关系。由图 3 和图 4 可以看出,直接反映管壁温度变化速度的参量  $dT_1/dT_2$  和  $T_1$  在一定电输入功率  $q_v$  条件下,均随  $T_2$  的增加而上升,这表明在一定温度范围内,放电管管壁温度可由温控仪的边界温度独立控制,这对维持激光器的最佳工作温度和稳定性是非常有利的。由文献[10]报道的工作参量可计算出储能电容的放电功率为  $P=f \cdot \frac{CU^2}{2}=630$  W,

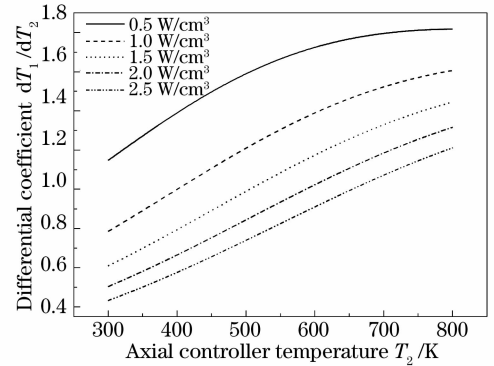


图 3 不同电功率密度  $q_v$  时管壁温度对温控仪温度的变化率  $dT_1/dT_2$  与温控仪温度  $T_2$  的关系

Fig. 3 Dependence of the ratio  $dT_1/dT_2$  of laser tube wall temperature  $T_1$  to controller temperature  $T_2$  on the controller temperature  $T_2$  with different electrical specific power  $q_v$ .

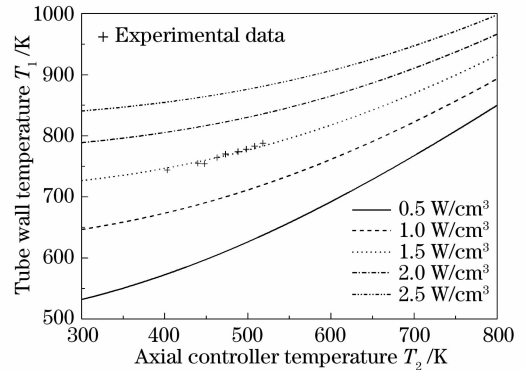


图 4 管壁温度随轴向温控仪温度变化的理论与实验曲线  
Fig. 4 Theoretical and experimental curves on the relationship of the tube wall temperature with the axial controller temperature

这些电功率主要消耗在闸流管、激光放电管、电极和放电回路上。闸流管的导通电阻  $R_{th0} \approx 10 \Omega$ <sup>[13]</sup>,考虑到文献[10]中使用的为已经参量最佳化的激光器,放电等离子体阻抗与闸流管阻抗匹配,因此取放电等离子体阻抗  $R_0 \approx 10 \Omega$  是比较合理的,再考虑热功率在放电管端面的损耗,可估算出实际输入到放电管的电功率密度  $q_v$  应约为  $1.5$  W/cm<sup>3</sup> 左右。为了便于比较,图 4 同时给出了文献[10]实测的实验曲线。对比图 4 的理论曲线( $q_v=1.5$  W/cm<sup>3</sup>)与实验曲线,发现两者基本吻合,说明模拟结果较好地反映了实际传热过程。

由(3)式可知,放电管的径向温度分布主要由输入电功率密度  $q_v$  和由边界条件决定的管壁温度  $T_1$  共同决定。图 5 计算了 2 cm 内径的放电管在输入电功率密度  $q_v=2$  W/cm<sup>3</sup> 时,放电管内相对径向温

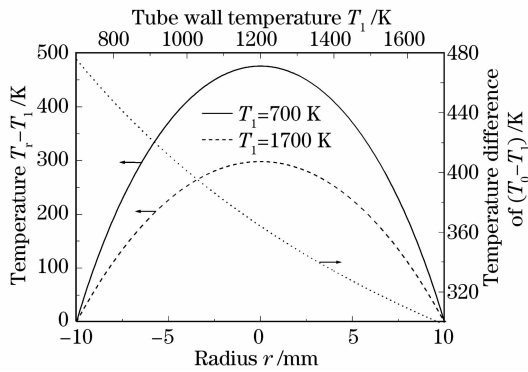


图5 相对径向温度分布和中心与管壁温差( $T_0 - T_1$ )随管壁温度  $T_1$  的变化关系

Fig. 5 Relative radial temperature distribution and the dependence of the temperature difference ( $T_0 - T_1$ ) on tube wall temperature  $T_1$

度( $T_r - T_1$ )在管壁温度  $T_1$  分别为 700 K 和 1700 K 时的分布曲线,同时给出了放电管中心温度与管壁温度差值( $T_0 - T_1$ )随管壁温度  $T_1$  的变化关系。结果表明,放电管径向温度分布和中心温度均随管壁温度的增加而上升,但放电管中心温度和管壁温度之差( $T_0 - T_1$ )则随管壁温度的增加反而减小,从 476 K 下降到 298 K。可见升高管壁温度可有效降低放电管径向温度梯度,使得管内径向温度分布更加均匀,改善了金属蒸气密度的径向分布,有利于激光光束质量的提高和激光器的稳定运转。对放电自加热式的金属蒸气激光器而言,主要通过调节放电输入的功率密度获得产生激光所需的管壁温度和蒸气压,而在激光参量的优化过程中,各工作参量互相制约、相互影响,其中包括缓冲气体压强、放电脉冲频率、电压和电流脉冲的幅度对放电管径向温度分布和管壁温度的影响。轴向温控仪的使用可在一定范围内独立调节放电管径向温度分布和管壁温度,确保了激光器长期稳定地运转在最佳工作温度状态,能有效提高激光器的输出特性。

## 4 结 论

考虑了热传导和热辐射两种传热方式,对带轴向温控仪的金属蒸气激光管的径向温度场进行了计算模拟,模拟结果较好地反映了实际的传热过程。分析表明,轴向温控仪能在一定温度范围内独立调节放电管的管壁温度和管内径向温度分布,可使激光器在输入电功率波动的情况下维持在最佳的工作温度和介质蒸气密度,可有效提高激光的输出效率

和稳定性。

## 参 考 文 献

- 1 Yao Zhixin, Pan Bailiang, Qian Yujun *et al.*. A practical 10 W CuBr laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 1996, **A23**(1): 11~12  
姚志欣,潘佰良,钱育军等. 实用化 10 W 溴化亚铜激光器[J]. 中国激光, 1996, **A23**(1): 11~12
- 2 Pan Bailiang, Chen Kun, Chen Gang *et al.*. A parametric study of R-M transition laser and recombination laser in strontium ions [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(2): 445~449  
潘佰良,陈 坤,陈 钢等. 锶离子 R-M 跃迁激光和复合激光的参量研究[J]. 物理学报, 2004, **53**(2): 445~449
- 3 Pan Bailiang, Mao Bangning, Chen Gang *et al.*. Influence of hydrogen additive and excitation circuits on the output performance of barium vapor laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(11): 3748~3751  
潘佰良,毛邦宁,陈 钢等. 掺氢与激励电路对钡蒸气激光输出特性的影响[J]. 物理学报, 2004, **53**(11): 3748~3751
- 4 Bangning Mao, Bailiang Pan, Yubo Wang *et al.*. 20-W sealed-off CuBr vapour laser excited with modified Blumlein circuit [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(10): 591~593
- 5 Nikolay K. Vuchkov, Krassimir A. Temelkov, Peter V. Zahariev *et al.*. Optimization of a UV Cu<sup>+</sup> laser excited by pulse-longitudinal Ne-CuBr discharge [J]. *IEEE. J. Quant. Electron.*, 2001, **37**(4): 511~517
- 6 Chen Gang, Pan Bailiang, Yao Zhixin. Dynamic model for CuBr UV laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(Suppl.): 206~209  
陈 钢,潘佰良,姚志欣. CuBr 紫外激光动力学模型[J]. 中国激光, 2006, **33**(增刊): 206~209
- 7 Yao Zhixin, Qian Yujun, Pan Bailiang. Analyses and measurements of radial temperature distribution in a copper vapor laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 1995, **A22**(5): 333~337  
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[J]. 中国激光, 1995, **22**(5): 333~337
- 8 Ma Tao, Yao Zhixin, Pan Bailiang *et al.*. Analyses of radial temperature distribution in the CuBr laser discharge tube with diaphragms [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(11): 1491~1494  
马 涛,姚志欣,潘佰良等. 隔环结构 CuBr 激光放电管温度场分析[J]. 光学学报, 1999, **19**(11): 1491~1494
- 9 Xia Tiejun, Wang Yongjiang, Shi Shuyi. Calculation of the radial temperature distribution for metal vapor laser tube [J]. *J. Zhejiang University*, 1991, **25**(2): 137~142  
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[J]. 浙江大学学报, 1991, **25**(2): 137~142
- 10 Pan Bailiang, Yao Zhixin, Jin Yongxing *et al.*. An axis temperature control device used for copper halide laser [J]. *Appl. Laser*, 1996, **16**(4): 175~176  
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 [J]. 应用激光, 1996, **16**(4): 175~176
- 11 Dimo N. Astadjov, Nikolay K. Vuchkov, Nikola D. Sabotinov. Parametric study of the CuBr laser with hydrogen additives [J]. *IEEE. J. Quant. Electron.*, 1988, **24**(9): 1927~1935
- 12 J. R. Welty. *Engineering Heat Transfer* [M]. Ren Zepei, Luo Di'an *et al.* transl., Beijing: People's Education Press, 1978. 343~346, 411~412  
J. R. Welty. 工程传热学 [M]. 任泽霏, 罗棣庵等译, 北京: 人民教育出版社, 1978. 343~346, 411~412
- 13 Pan Bailiang, Chen Gang, Yao Zhixin *et al.*. Simulation and comparison of discharge circuits for metal vapor lasers [J]. *J. Optoelectron. Laser*, 2002, **13**(7): 667~670  
潘佰良,陈 钢,姚志欣等. 金属蒸气激光脉冲放电电路的模拟比较[J]. 光电子·激光, 2002, **13**(7): 667~670