

文章编号: 1001-3806(2006)03-0268-03

掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器的热效应分析

陈吉欣^{1,2}, 隋 展², 陈福深^{1*}, 刘志强³

(1. 电子科技大学 通信与信息工程学院 光纤重点实验室, 成都 610054; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900; 3. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 绵阳 621900)

摘要: 为了研究高功率双包层光纤激光器的热效应, 采用模拟计算的方法, 推导了掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器中的温度分布表达式, 计算了光纤激光器中的温度分布特性。分析结果表明, 光纤的包层半径、传热系数以及抽运方式对光纤中的温度分布有很大的影响。所得的结果为设计实现千瓦级的光纤激光器提供了参考。

关键词: 光纤光学; 光纤激光器; 双包层光纤; 温度分布; 抽运方式

中图分类号: TN248 文献标识码: A

Thermal effect of Yb³⁺-doped double clad fiber laser

CHEN Ji-xin^{1,2}, SUI Zhan², CHEN Fu-shen¹, LIU Zhi-qiang³

(1. Key Laboratory of Optical Fiber, School of Communication and Information Engineering UESTC, Chengdu 610054 China; 2. Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China; 3. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract In order to study thermal effects of high power double clad fiber laser the thermal distribution of Yb³⁺-doped double clad fiber laser is derived and calculated. It is shown that absorption coefficient and clad radius of fiber heat transfer coefficient and pumping method can affect temperature distribution. Conclusions are useful for designing kW level fiber lasers.

Key words fiber optics; fiber laser; double clad fiber; temperature distribution; pumping method

引 言

由于高效率、结构紧凑以及很好的光束质量, 高功率掺稀土元素双包层光纤激光器在工业加工、印刷、打标、医疗和通信等领域引起了广泛的关注^[1-4]。目前, 掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器的连续输出可以达到千瓦^[5]。在低功率条件下, 双包层光纤激光器的热效应可以被忽略, 但是, 在高功率的水平下, 热效应会成为很严重的问题^[1]。

BROWN 等人分析了双包层光纤激光器的热效应^[6]。但是分析过程中认为抽运光沿 z 方向是均匀分布的, 由此得出了光纤截面上的温度分布。过于简化的抽运光分布影响了文章结论的实用性。作者考虑抽运光沿 z 方向为指数分布的条件下, 通过求解热传导方程, 推导出双包层光纤激光器中的温度分布表达式。在此基础上, 模拟计算了双包层光纤激光器中的温度分布特性, 为实现千瓦级的光纤激光器提供了参考。

基金项目: 中国工程物理研究院双百人才基金资助项目 (2004R0205)

作者简介: 陈吉欣 (1977-), 男, 博士研究生, 主要从事光纤激光器和集成光学的相关研究。

* 通讯联系人。E-mail: fschen@uestc.edu.cn

收稿日期: 2005-04-18 收到修改稿日期: 2005-06-01

1 光纤中的温度分布

由于在双包层光纤中, 内包层和外包层中都没有热源, 可以把内、外包层等效为一个包层。同时, 为了处理问题方便, 纤芯和包层认为是同心圆。纤芯半径为 a , 包层半径为 b 。在柱坐标系中, 稳态条件下的热传导方程为^[7,8]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} \right] + \frac{\partial^2 T(r, z)}{\partial z^2} = - \frac{Q(z)}{\kappa} \quad (1)$$

式中, $T(r, z)$ 为光纤中的温度分布; κ 为热导率; $Q(z)$ 为热密度。

在纤芯中 ($0 \leq r \leq a$), 抽运光被 Yb³⁺ 吸收, 存在热源, 因此, $Q(z) \neq 0$ 在包层中 ($a \leq r \leq b$), 不存在热源, 因此 $Q(z) = 0$ 。由于光纤的长度比截面直径大得多, 光纤端面散发的热量远远小于侧面散发的热量, 故可以忽略光纤纵向散热, 那么 (1) 式可以写为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} \right] = - \frac{Q(z)}{\kappa} \quad (2)$$

若采用单端抽运方式, 抽运光从左端面进入双包层光纤, 在纤芯中被吸收, 它的分布为:

$$P(z) = P_0 \exp(-\alpha z) \quad (3)$$

式中, $P(z)$ 为 z 处的抽运光功率; P_0 为入纤抽运光功率; α 为吸收系数。若仅考虑量子亏损发热, 那么纤芯

中的热密度为：
$$Q(z) = Q_0 \exp(-\alpha z) \quad (4)$$
 式中， $Q_0 = \frac{\alpha P_0}{\pi a^2} \left[1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_s} \right]$ ； λ_p 和 λ_s 分别为抽运光和激光的波长。根据实际的物理问题，在纤芯轴线上 ($r = 0$)，温度应为有限值；在纤芯和包层的边界上 ($r = a$)，温度和温度梯度应连续；同时，在包层与外界空气的边界上 ($r = b$)，由于自由对流，根据牛顿冷却定律有：

$$\frac{dT(r=b)}{dr} = \frac{h}{K} [T_c - T(r=b)] \quad (5)$$

式中， h 为对流传热系数； T_c 为外界空气的温度。根据连续性条件以及 (5) 式求解方程，可以得出温度分布为：

$$T(r,z) = T_c + \left[-\frac{Q_0 a^2}{4K} + \frac{Q_0 a^2}{4K} + \frac{Q_0 a^2}{2K} \ln \left(\frac{b}{a} \right) + \frac{Q_0 a^2}{2hb} \right] \exp(-\alpha z), \quad (0 \leq r \leq a) \quad (6)$$

$$T(r,z) = T_c + \left[\frac{Q_0 a^2}{2K} \ln \left(\frac{b}{r} \right) + \frac{Q_0 a^2}{2bh} \right] \times \exp(-\alpha z), \quad (a \leq r \leq b) \quad (7)$$

2 计算结果及讨论

2.1 前端抽运时的温度分布

计算中采用的掺 Yb³⁺ 双包层光纤的参数为：纤芯半径 $a = 1.5 \mu\text{m}$ ，包层半径 $b = 350 \mu\text{m}$ ，光纤的长度 $L = 30\text{m}$ 。采用波长 $\lambda_p = 975\text{nm}$ 的激光抽运，吸收系数 $\alpha = 0.5\text{dB/m}$ ，输出波长 $\lambda_s = 1080\text{nm}$ 的激光。热导率 $K = 1.38 \times 10^{-2} \text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ ，在空气自由对流冷却条件下，传热系数 $h = 1 \times 10^{-3} \text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ ，外界环境温度 $T_c = 298\text{K}$ 。

当抽运光功率 $P_0 = 1000\text{W}$ 时，利用上面的参数以及上一小节的公式，可以得到光纤激光器中的温度分布，见图 1。在 $z = 0$ 处，光纤轴线上 ($r = 0$) 的温度为

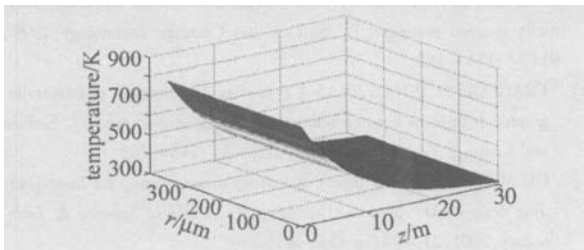


Fig 1 Temperature distribution for one end pumping

$T(0,0) = 811\text{K}$ ，光纤包层表面 ($r = 350 \mu\text{m}$) 的温度为 $T(0,350) = 806\text{K}$ ，从图中可以看出，光纤中的温度沿径向变化不大；在 $z = 30\text{m}$ 处，轴线上温度为 $T(0,30) = 314\text{K}$ ；随着抽运光功率沿 z 方向减小，光纤的温度沿 z 方向也越来越低。在这种情况下，虽然纤芯和内包层不会熔化 (SiO_2 的熔点高达 1982K)，但双包层光纤的外包层和涂覆层通常为有机聚合物，无法承受过高的温度，因此在注入端的区域光纤容易熔化。

当包层半径不同时，光纤轴线上的温度变化如图 2 所示。可以看出，当纤芯半径不变时，包层半径越

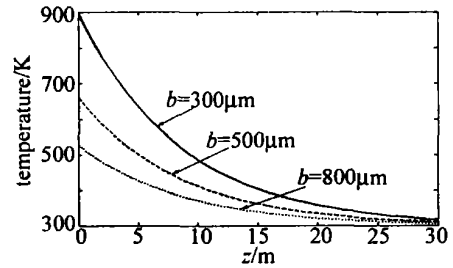


Fig 2 Fiber axial temperature for different clad radius

大，光纤中的温度越低，分布越平坦。因此，在实际的高功率光纤激光器中，选用较大半径包层的光纤有利于解决热效应问题。

改变传热系数 h ，光纤轴线上的温度分布见图 3。

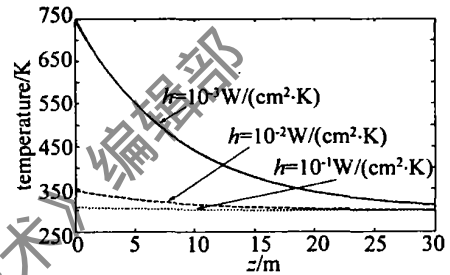


Fig 3 Fiber axial temperature for different heat transfer coefficients

在计算中， $b = 400 \mu\text{m}$ ， $h = 1 \times 10^{-2} \text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ 和 $h = 1 \times 10^{-1} \text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ 对应的是强迫冷却的方式。从图中看出，提高传热系数会使光纤中的温度降低，分布越平坦。这样，在高功率运转的情况下，可以通过强迫冷却的方法来散热。

2.2 其它方式抽运时的温度分布

在双包层光纤激光器中，除了上面的单端端面抽运方式外，为了提高注入的抽运光功率，经常会采用双端抽运^[9]，以及空间多点抽运^[10]。利用第 1 节中的推导方法，可以得出在不同抽运方式下的温度分布特性。在这里，分析两种最常见的抽运方式下的温度分布：双端抽运、双端抽运加上一个侧向抽运 (见图 4)。

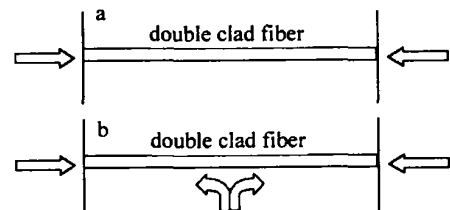


Fig 4 Different pumping methods

a—two end-pumping b—two end-pumping and side-pumping

计算中所取的参数与 2.1 节中的参数相同。为了与单端抽运情况比较，注入的总抽运功率也为 1000W 。如图 4a 的情况，光纤两端的功率各为 500W ；如图 4b 的情况，光纤两端的抽运功率各为 250W ，侧向抽运点设在光纤中间，向两个方向传输的抽运光功

率也各为 250W。

图 5 为双端抽运时的温度分布,可以看出,光纤两端的温度最高,轴线上为 562K,中间的温度最低,轴线上为 389K。图 6 为双端抽运加上一个侧向抽运时

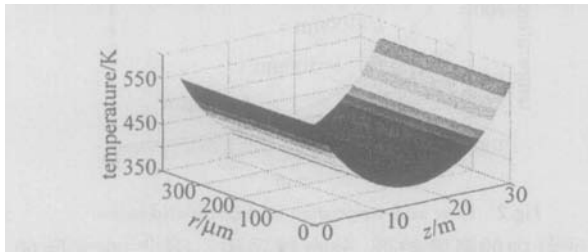


Fig 5 Temperature for two end pumping

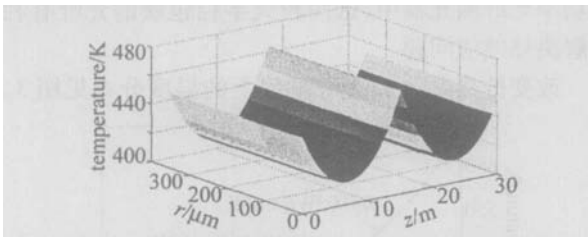


Fig 6 Temperature for two end pumping and side pumping

的温度分布,可以看出,光纤中间的温度最高,两端其次,轴线上的温度分别为 472K 和 453K;温度最低点出现在距离两端的 1/4处,轴线上的温度为 415K。与图 2 相比可以发现,采用这两种方式可以降低注入区域的温度,温度分布较为平坦。因此,在高功率光纤激光器中,采用空间多点抽运的方式能够降低注入区域的温度,使光纤内的温度分布较平坦。

3 结论

通过求解热传导方程,推导出掺 Yb³⁺ 双包层光纤

激光器中的温度分布表达式,并模拟计算了双包层光纤激光器中的温度分布特性。通过计算分析,可以得到以下结论:(1)包层半径越大,光纤中的温度越低,分布越平坦;(2)采用强迫冷却的方法,可以有效地降低光纤中的温度;(3)空间多点的抽运方式能够降低注入区域的温度,使温度分布较平坦。所得的结果对设计实现千瓦级的双包层光纤激光器提供了参考。

参考文献

- [1] LIU S Z. High-power double-clad fiber lasers [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1993, 11(9): 1435~1446.
- [2] PATRICK E, DAVID P. High power double-clad fiber lasers a review [J]. SPIE, 2002, 4638: 1~12.
- [3] ZHANG J, PAN Y, ZHANG H, HU G, JIANG J, et al. Output characteristics of Yb³⁺ doped double-clad fiber grating laser [J]. Laser Technology, 2004, 28(2): 173~176 (in Chinese).
- [4] WEBER T, LÜTHY W, WEBER H P, et al. Cladding-pumped fiber laser [J]. IEEE J Q E, 1995, 31(2): 326~328.
- [5] JEONG Y, SAHU J K, BA YNE D N, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36W continuous-wave output power [J]. Optics Express, 2004, 12(25): 6088~6092.
- [6] BROWN D C, HOFFMAN H J. Thermal stress and thermo-optic effects in high average power double-clad silica fiber lasers [J]. IEEE J Q E, 2001, 37(2): 207~217.
- [7] COUSINS A K. Temperature and thermal stress scaling in finite-length end-pumped laser rods [J]. IEEE J Q E, 1992, 28(4): 1057~1069.
- [8] DAVIS M K, DIGNONNET M J F, PANTELL R H. Thermal effects in doped fibers [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1998, 16(6): 1013~1023.
- [9] DOMINIC V, MACCORMACK S, WAARTS R. 110W fiber laser [J]. Electron Lett, 1999, 35(14): 1158~1160.
- [10] YAN P, GONG M L, LI CH, et al. Distributed pumping multi-fiber series fiber laser [J]. Optics Express, 2005, 13(7): 2699~2706.
- [9] BORDANNOVA I, FORCEY K S. Texture and residual stresses in thermally sprayed coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 1997, 91(3): 174~182.
- [10] FRANCO B M, PINA J, DIAS A, et al. Residual stresses and crystallographic texture in hard-chromium electroplated coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 1997, 96(2~3): 148~162.
- [11] HU M L. Study on the theory of materials consistency for laser cladding design [D]. Wuhan Huazhong University of Science & Technology, 2001, 21~24 (in Chinese).

(上接第 264 页)

- [6] PERRY A J, SUE J A, MARTIN P J. Practical measurement of the residual stress in coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 1996, 81(1~2): 17~28.
- [7] LIU SH H, ZHOU L Z, WAN P T. Investigation on laser induced thermal stress bending [J]. Laser Technology, 2001, 25(4): 258~262 (in Chinese).
- [8] ZOU SH K, WANG J, WANG H M, et al. Fatigue growth rate of laser shock processed metal sheet [J]. Laser Technology, 2002, 26(3): 189~191 (in Chinese).