

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0062-04

双包层光纤激光器端面抽运方式的理论研究

陈吉欣^{1,2}, 隋展², 陈福深¹, 李明中², 王建军²

¹电子科技大学通信与信息工程学院光纤重点实验室, 四川 成都 610054
²中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 端面抽运是双包层光纤激光器的一种常见的抽运方式。从速率方程和热传导方程出发, 数值分析了端面抽运方式下双包层光纤激光器的功率和温度特性。结果表明, 在三种抽运方式中, 反向抽运时输出激光功率最高, 双向抽运时光纤中的温度分布最平坦。当光纤激光器无严重的热效应时, 采用反向抽运可以得到较高的输出激光功率; 当激光器工作在高功率时, 采用双向抽运可以有效地减小热效应, 这时, 为了得到较高的输出激光功率, 可以适当提高反向抽运光的功率。所得的结果对设计端面抽运的双包层光纤激光器提供了理论依据。

关键词 激光技术; 光纤激光器; 端面抽运; 功率分布; 温度分布

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

Study of End Pumped Double Clad Fiber Laser

CHEN Ji-xin^{1,2}, SUI Zhan², CHEN Fu-shen¹, LI Ming-zhong², WANG Jian-jun²

¹ Key Laboratory of Optical Fiber, School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China
² Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China

Abstract End pumping is a simple pumping method in double clad fiber laser. According to rate and heat conduction equations, the distribution of power and temperature in end pumped Yb³⁺ doped double clad fiber laser is studied. It is shown that the maximum output power can be obtained for backward pump, the distribution of temperature in fiber is the flattest for bidirectional pump, when no severe thermal effect happens, higher laser power can be obtained for backward pump, when fiber laser works at high power level, thermal effects can be reduced for bidirectional pump, and backward pump power can be properly increased to acquire higher laser power. The results provide a good reference for designing end pumped high power double clad fiber laser.

Key words laser technique; fiber laser; end pumping; power distribution; temperature distribution

1 引 言

由于高效率、结构紧凑以及很好的光束质量, 高功率掺稀土元素的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。目前, 掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器的连续输出可以达到千瓦^[1]。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, 在高功率水平下, 热效应会成为很严重的问题^[2]。对于双包层光纤激光器, 端面抽运是一种比较常见和简单的抽运方式^[3]。本文利用速率方程, 同时结合热传导方程, 从理论上研究了端面抽运方式对掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器的功率特性以及温度分布的影响。

2 理论模型

图 1 为掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器的结构示意图。

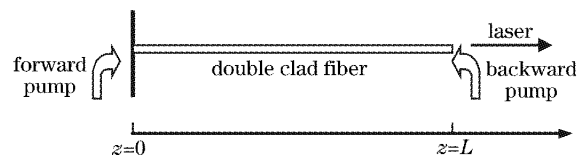


图 1 双包层光纤激光器示意图

Fig. 1 Schematic of double clad fiber laser

抽运光从左右两个端面注入, 光纤长度为 L , 纤芯的截面积为 A , 纤芯的掺杂浓度为 N , 光纤左端采用双色镜(对抽运光高反, 对产生的激光高透), 右端

基金项目: 中国工程物理研究院双百人才基金(2004R0205)资助课题。

作者简介: 陈吉欣(1977—), 男, 上海人, 电子科技大学博士研究生, 主要从事光纤激光器与放大器方面的研究。

E-mail: jixinc@163.com

直接采用解理面作为输出耦合。在稳态条件下，双包层光纤激光器的速率方程为^[4]

$$\begin{cases} \frac{N_2(z)}{N} = \frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)]\sigma_{ap}\Gamma_p\lambda_p/hcA + [P_s^+(z) + P_s^-(z)]\sigma_{as}\Gamma_s\lambda_s/hcA}{[P_p^+(z) + P_p^-(z)](\sigma_{ap} + \sigma_{ep})\Gamma_p\lambda_p/hcA + 1/\tau + [P_s^+(z) + P_s^-(z)](\sigma_{as} + \sigma_{es})\Gamma_s\lambda_s/hcA}, \\ \pm \frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = -\Gamma_p[\sigma_{ap}N - (\sigma_{ap} + \sigma_{ep})N_2(z)]P_p^\pm(z) - \alpha_p P_p^\pm(z), \\ \pm \frac{dP_s^\pm(z)}{dz} = \Gamma_s[(\sigma_{es} + \sigma_{as})N_2(z) - \sigma_{as}N]P_s^\pm(z) - \alpha_s P_s^\pm(z), \end{cases} \quad (1)$$

式中 P_s^+ 和 P_s^- 分别为光纤中正向和反向激光功率, P_p^+ 和 P_p^- 分别为正向和反向抽运光功率; $N_2(z)$ 为上能级 Yb^{3+} 浓度; Γ_p 和 Γ_s 分别为抽运光和激光与纤芯的重叠因子; σ_{ap} 和 σ_{ep} 分别为抽运光的吸收截面和发射截面; σ_{as} 和 σ_{es} 分别为激光的吸收截面和发射截面; τ 为自发辐射寿命; h 为普朗克常量; c 为真空中的光速; α_p 和 α_s 分别为抽运光和激光的散射损耗系数, 它不依赖位置; λ_p 和 λ_s 为抽运光和激光的波长。

光纤中的正反向抽运光功率分布为

$$P_p^+(z) = P_1 \exp[-(\Gamma_p\sigma_{ap}N + \alpha_p)z], \quad (2)$$

$$P_p^-(z) = P_2 \exp[-(\Gamma_p\sigma_{ap}N + \alpha_p)(L - z)], \quad (3)$$

式中 P_1 和 P_2 分别为正反向输入抽运光功率。

对于正向抽运, $P_1 \neq 0, P_2 = 0$; 对于反向抽运, $P_1 = 0, P_2 \neq 0$; 对于双向抽运, $P_1 \neq 0, P_2 \neq 0$ 。

光纤激光器中的正反向激光功率可以通过边界条件联系

$$P_s^+(0) = R_1 P_s^-(0), \quad (4)$$

$$P_s^-(L) = R_2 P_s^+(L), \quad (5)$$

式中 R_1 和 R_2 分别为前后腔镜对激光的反射率。

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^[5]

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} \right] = -\frac{Q(z)}{k}, \quad (6)$$

其中 $T(r, z)$ 为光纤中的温度分布; k 为导热系数; $Q(z)$ 为热密度。在纤芯中 ($0 \leq r \leq a$), 抽运光被 Yb^{3+} 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 $Q(z) = 0$ 。在分析中, 考虑了量子亏损发热。

3 数值计算及讨论

计算中采用的部分参量为: $a = 15 \mu\text{m}$, $b = 430 \mu\text{m}$, $L = 30 \text{ m}$; $\lambda_p = 975 \text{ nm}$, $N = 4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$,

$\lambda_s = 1090 \text{ nm}$, $\Gamma_s = 0.82$, $R_1 = 0.98$, $R_2 = 0.04$; $k = 1.38 \times 10^{-2} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$, 在空气自由对流冷却条件下, $h = 1 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$, 外界温度 $T_c = 298 \text{ K}$ 。

当抽运功率为 1000 W 时, 正向抽运时光纤中的抽运光和激光功率分布如图 2 所示。抽运光功率随着 z 的增大而减小, 正向激光功率沿着传输方向增大。输出激光功率为 703 W 。光纤轴线上的温度分布如图 3 所示。在 $z = 0 \text{ m}$ 处, 光纤中的温度最高 (772 K), 然后温度开始下降, 在 $z = 30 \text{ m}$ 处, 温度最低 (310 K)。

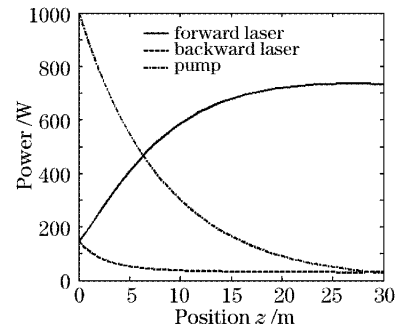


图 2 正向抽运时光纤中抽运光和激光功率的分布
Fig. 2 Distribution of pump power and laser power in the fiber for forward pump

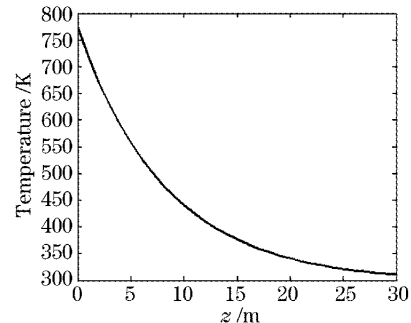


图 3 正向抽运时光纤轴线上的温度分布

Fig. 3 Fiber axis temperature for forward pump

反向抽运时光纤中的抽运光和激光功率分布如图 4 所示。可以看出, 抽运光功率沿着传输方向衰减; 相对于正向抽运的情况, 反向激光功率沿传输方

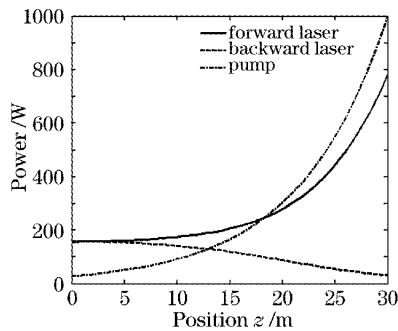


图4 反向抽运时光纤中抽运光和激光功率的分布

Fig. 4 Distribution of pump power and laser power in the fiber for backward pump

向增大的趋势比较明显;输出激光功率为 750 W。光纤轴线上的温度分布如图 5 所示。在 $z=0$ m 处, 光纤中的温度最低(310 K), 然后温度开始上升, 在 $z=30$ m 处, 温度最高(772 K)。

双向抽运时, 光纤中的抽运光和激光功率分布如图 6 所示。可以看出, 在双向抽运时, 正反向激光

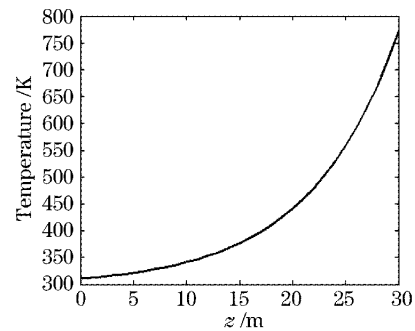


图5 反向抽运时光纤轴线上的温度分布

Fig. 5 Fiber axis temperature for forward pump

功率沿传输方向有明显的增大趋势;对于抽运光对称分布, 正向激光在整个光纤中增加比较平缓;对于抽运光非对称分布, 正向激光在抽运光功率较小的区域增加较慢, 而在抽运光功率较大的区域, 正向激光增大较快;在三种抽运光分布的情况下, 输出激光功率分别为 749 W, 741 W 和 728 W, 因此, 当反向抽运光功率大于正向抽运光功率时, 输出功率最高。

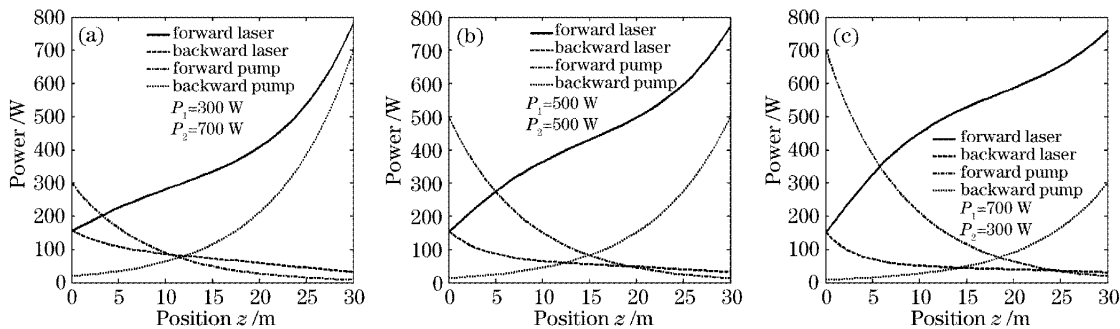


图6 双向抽运时光纤内抽运光和激光功率的分布

Fig. 6 Distribution of pump power and laser power in the fiber for bidirectional pump

双向抽运时光纤中的温度分布如图 7 所示。当抽运光非对称分布时, 最高温度(633 K)出现在抽运光功率较高的那一端 $z=11$ m 或 $z=19$ m 处, 最低温度(369 K)出现在 $z=0$ m 或 $z=30$ m; 当抽运

光对称分布时, 最高温度(541 K)出现在两个端面 $z=0$ m 或 $z=30$ m 处, 最低温度(376 K)出现在光纤中点 $z=15$ m 处; 抽运光对称分布时, 光纤中的温度分布更平坦。

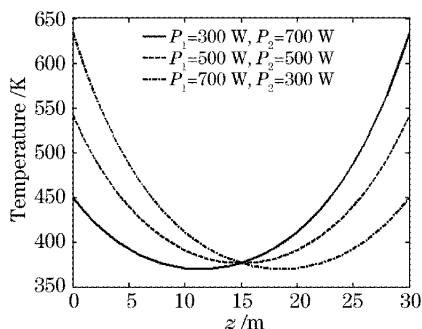


图7 双向抽运时光纤中的温度分布

Fig. 7 Fiber axis temperature for bidirectional pump

4 结 论

比较三种端面抽运方式, 反向抽运时输出激光功率最高, 正向抽运时输出激光功率最低; 相对于正向和反向抽运, 双向抽运时光纤中的最高温度最低, 而且温度分布更平坦。当光纤激光器的热效应无严重影响时, 可以采用反向抽运来得到较高的输出功率; 当光纤激光器在高功率的水平下, 如果热效应有很大的影响, 可以采用双向抽运方式, 这时, 为了得到较高的输出激光功率, 可以适当地提高反向抽运光的功率。

参 考 文 献

- 1 Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(25): 6088~6092
- 2 L. Zenteno. High-power double-clad fiber lasers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(9): 1435~1446
- 3 Li Lijun, Fan Wandu, Fu Shengui *et al.*. Yb³⁺-doped double-clad fiber laser with frequency selecting by double-clad fiber Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 55~58
李丽君, 范万德, 付圣贵 等. 双包层光纤光栅选频双包层光纤激光器 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 55~58
- 4 A. K. Cousins. Temperature and thermal stress scaling in finite-length end-pumped laser rods [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4): 1057~1069
- 5 I. Kelson, A. A. Hardy. Strongly pumped fiber lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(9): 1570~1577