

文章编号: 1001-3806(2009)03-0225-03

## 水柱导引抽运光纤激光器端面热效应分析

黄云火, 黄磊, 张海涛, 柳强, 闫平, 巩马理\*

(清华大学精密仪器与机械学系光子与电子技术研究中心 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 为了解决大功率光纤激光器严重的端面热效应问题, 采用水柱导引抽运光的抽运新方法。在该抽运形式中, 抽运光被耦合进由喷嘴喷出的高速水柱中, 水柱以波导形式导引抽运光进入光纤。对普通端面抽运和水柱导引抽运两种抽运形式的双包层光纤激光器的抽运端的热效应进行了理论计算和分析比较, 抽运功率为 800W 时, 光纤端面温度从普通端面抽运时的 250℃ 下降到 30℃, 基本接近环境温度, 光纤侧面的温度也大大地降低。结果表明, 水柱导引抽运冷却效果显著, 特别是光纤的抽运端得到了很好的冷却, 可有效地解决大功率光纤激光器的端面热损伤问题。

**关键词:** 光纤光学; 光纤激光器; 水柱导引抽运; 热效应

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

## Thermal effect in pump end of fiber laser with water-jet guided pump

HUANG Yun-huo, HUANG Lei, ZHANG Hai-tao, LIU Qiang, YAN Ping, GONG Ma-li

(State Key Laboratory of Tribology, Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to solve the serious thermal effect in high power end-pumped fiber lasers, the water-jet guided pump (WJGP) was proposed. In this pumping scheme, the pumping light is coupled into a high-speed water-jet similar to an optical fiber. The light is guided by the jet and pumped into a following fiber. The thermal effects in the double-clad fiber laser under WJGP and traditional end-pump were analyzed and calculated respectively. With 800W pumping power, the maximum temperature of the pumped end face of fiber declined from 250℃ under traditional end-pump to 30℃ under WJGP, and the temperature of the fiber surface reduced greatly too. It is proved that the cooling effect of WJGP is significant, especially on the fiber's pumped end and the thermal damage on the pump end in a high power fiber laser can be effectively solved.

**Key words:** fiber optics; fiber laser; water-jet guided pump; thermal effects

### 引言

高功率双包层光纤激光器是一种具有很好发展前景的新型激光器, 与传统的气体 and 固体激光器相比, 高功率双包层光纤激光器由于具有高效率、高光束质量、结构紧凑等优点, 近来在商业、军事、科研等众多领域中引起了极大的关注, 成为国内外竞相研究的热点<sup>[1-3]</sup>。目前双包层光纤激光器的输出功率不断提高。2004年, JEONG 等人报道了输出功率为 1.36kW 的掺镱双包层光纤激光器<sup>[4]</sup>。热效应是限制功率提高的主要因素之一, 热效应会使光纤中的温度过高, 严重时会使光纤端面损坏、光纤侧面烧断甚至将基质熔化<sup>[5]</sup>。

现有技术中对光纤冷却没有较好的解决方法, 大

多是自然风冷。但是空气热导率低, 冷却效果非常有限; 偶尔有将光纤端部放置在金属套筒中进行冷却, 而金属套筒仅与光纤的侧面接触, 对端面仍然只能是风冷<sup>[6]</sup>。由于光纤直径微小, 特别是对于包层为 D 形等非圆形的光纤, 则要求金属套筒的加工精度非常高。

作者介绍了一种采用水柱导引抽运光束的新抽运方法, 抽运光由射到光纤端面的高速水柱导引到光纤端面。与传统抽运形式相比, 该抽运形式能以水冷的方式对光纤端面进行了良好的冷却。本文中介绍了水柱导引抽运的设计方案, 并对采用普通端面抽运和水柱导引抽运两种抽运形式的双包层光纤激光器的端面热效应进行了理论计算和分析比较。

### 1 方案设计

#### 1.1 水柱导引抽运装置设计

水柱导引抽运双包层光纤实验装置如图 1 所示。从激光二极管尾纤输出的抽运光通过准直透镜准直, 再通过倍率可变的扩束器扩束后, 用耦合镜把扩束后

作者简介: 黄云火(1983-), 男, 硕士研究生, 现主要从事高功率光纤激光器的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: gongml@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2008-03-12; 收到修改稿日期: 2008-04-16

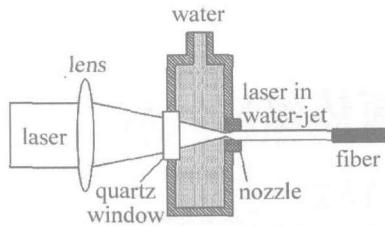


Fig. 1 Schematic of the setup of water-jet guided pump

的光束聚焦进喷嘴中<sup>[7]</sup>。通过改变扩束倍率和耦合透镜焦距改变光束的发散角和焦斑直径。从喷嘴中喷射出的水柱垂直对准光纤端面,抽运光通过水柱的全内反射被导引入光纤。通过在 $x, y$ 方向移动光纤实现水柱与光纤的对准,在 $z$ 方向移动光纤改变水柱的长度。

水腔由石英窗口、腔室和喷嘴组成。通过压力可调的水泵向腔室连续注入去离子水,边缘锋利的喷嘴可产生稳定的水柱。水压 $\Delta p$ 与水柱喷射速度 $v_j$ 的关系由下式给出<sup>[8]</sup>:

$$v_j = K \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (1)$$

式中, $K=0.94$ 为耦合装置的喷射系数, $\rho$ 为水的密度。

## 1.2 水柱导引激光耦合原理

如图2所示,由于缩流断面效应,水柱的直径要小

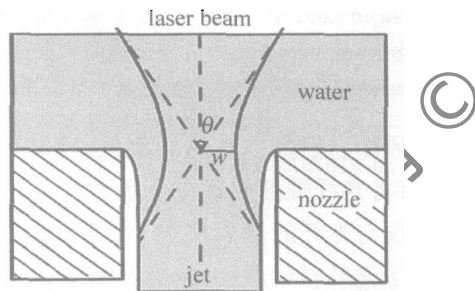


Fig. 2 Schematic of the coupling of laser beam and water-jet

于喷嘴直径,这个比例为0.8,且与喷嘴大小和喷射速度无关<sup>[7]</sup>。激光束与水柱的耦合需满足水柱的耦合条件,即激光束的焦斑直径 $2w$ 和发散角 $\theta$ 应分别小于水柱的直径 $d_j$ 和 $2\arcsin(d_{NA})$ 。光在水柱中的向前传导类似于光纤,因此,可以把水柱当作长度可变的液体光波导,其有效工作距离可达5cm~8cm。

## 2 数值模拟仿真

### 2.1 理论模型

在双包层光纤激光器中,由于纤芯横截面积远小于内包层横截面积,可将各种形状(如D型)的内包层等效成圆形内包层,纤芯、等效内包层分别为 $r_1$ 和 $r_2$ ,不考虑光纤的外包层。在纤芯中,抽运光被稀土掺杂离子吸收,存在热源,热密度 $Q(r, z) \neq 0$ ,在包层中,不

吸收抽运光,不存在热源, $Q(r, z) = 0$ 。由于光纤的圆对称性,当激光器达到稳定输出后,光纤产生的热效应可在柱坐标下由经典的热传导方程描述为<sup>[9]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} \right] + \frac{\partial^2 T(r, z)}{\partial z^2} = -\frac{Q(r, z)}{\kappa}, & (0 \leq r \leq r_1) \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} \right] + \frac{\partial^2 T(r, z)}{\partial z^2} = 0, & (r_1 \leq r \leq r_2) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $T(r, z)$ 为光纤中的温度分布, $\kappa$ 为热导率。

由于纤芯和包层的主要材料一致,它们的热导率相等,在纤芯与包层的边界上,温度和温度梯度都连续。光纤端面( $z=0$ )和光纤侧面( $r=r_2$ )与外界环境相连,为对流冷却,根据牛顿冷却定律可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial T(r, z)}{\partial z} \Big|_{z=0} = -\frac{h_1}{\kappa} [T_1 - T(r_2, z)] \\ \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = \frac{h_2}{\kappa} [T_2 - T(r, 0)] \end{cases} \quad (3)$$

式中, $h_1$ 和 $h_2$ 分别为光纤端面边界和光纤侧面边界的传热系数, $T_1$ 和 $T_2$ 分别为光纤端面和光纤侧面的环境温度。

因抽运光在包层中以高阶横模传播,可认为纤芯吸收的抽运光在纤芯横截面上均匀分布。抽运光在光纤中沿轴向按指数吸收<sup>[10]</sup>,在单端抽运的情况下,设耦合进光纤的总的抽运功率为 $P_0$ ,得热密度分布为:

$$Q(r, z) = \eta \frac{\alpha_a P_0 \exp(-\alpha_a z)}{\pi r_1^2}, \quad (r \leq r_1) \quad (4)$$

式中, $\alpha_a$ 为纤芯对抽运光的吸收系数, $\eta$ 为热转换效率;在光纤中,产生的热主要来源于量子亏损,即 $\eta = 1 - \lambda_p/\lambda_s$ ,其中, $\lambda_p$ 为抽运光波长, $\lambda_s$ 为信号光波长。

### 2.2 计算结果分析

分别在不同的抽运功率下的光纤的端面温度分布如图3所示,图3a为普通端面抽运,图3b为水柱导引抽运。其中普通端面抽运情况下,抽运光经聚焦直接入射到光纤端面,光纤端面与侧面通过空气自由对流冷却,传热系数 $h_1 = h_2 = 30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,空气温度为 $20^\circ\text{C}$ ;水柱导引抽运情况下,水柱射到光纤端面上,因此光纤端面通过水进行对流冷却,传热系数 $h_1 = 15 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,光纤侧面仍为空气对流冷却,传热系数 $h_2 = 30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,空气与水的温度同为 $20^\circ\text{C}$ 。图4所示为位于抽运端的光纤侧面沿轴向的温度分布,图4a为普通端面抽运,图4b为水柱导引抽运。

从图中可以看出,光纤径向的温度变化很小,但温度很高。当抽运功率较低时,由于光纤具有大的表面积,散热好,温度不是很高;但当抽运功率为800W时,光纤端面的温度高达 $250^\circ\text{C}$ 。热效应已经成

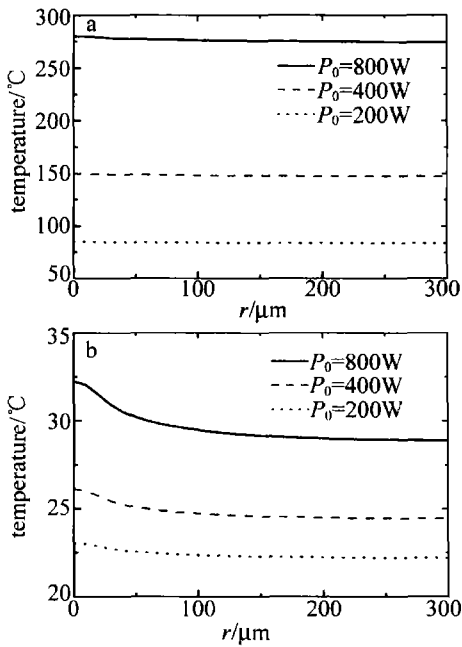


Fig. 3 Temperature distribution on the fiber end face  
a—traditional pump b—water-jet guided pump

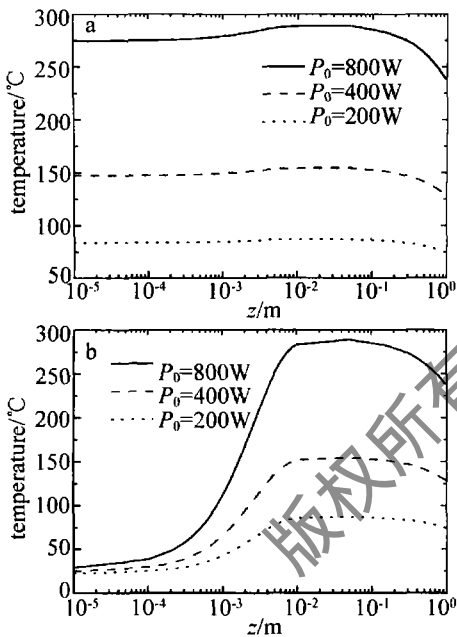


Fig. 4 Temperature distribution along the axis of the fiber  
a—traditional pump b—water-jet guided pump

为很严重的问题,特别是在抽运端。光纤的外包层通常为有机聚合物,在此高温下很容易熔化,影响光纤激光器的正常工作,甚至对光纤端面造成损伤。当采用水柱导引抽运后,光纤端面温度下降非常明显,抽运功率即使高达800W,端面温度只有30℃,基本接近环境温度,有效地抑制了热效应。在光纤的轴向上,水柱导引抽运也起到良好的冷却效果,从图4中可以看出,采用水柱导引抽运的光纤在靠近抽运端面的侧表面的温度比普通抽运是低许多,这有效地保护了光纤的端部,

防止光纤端面损坏和离端面一定距离内光纤侧面烧断等问题。

计算中的双包层光纤的参量为:纤芯半径  $r_1 = 20\mu\text{m}$ ,包层半径  $r_2 = 300\mu\text{m}$ ;光纤在975nm处的吸收系数为1dB/m,长度  $L = 20\text{m}$ ;采用单端抽运,抽运光波长为975nm,光纤激光器输出的激光的中心波长为1065nm。光纤纤芯和包层的热导率  $\kappa = 1.38\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

### 3 结论

介绍了水柱导引激光的原理和方法,提出了一种采用水柱导引抽运的新型抽运形式,并详细设计了其实施方案。然后通过数值模拟分别计算分析了采用普通端面抽运和水柱导引抽运的高功率双包层光纤激光器的抽运端的温度分布。由于光纤具有的大的表面体积比,当抽运功率较低时,端面热效应不显著;但在大功率抽运的情况下,热效应相当严重,端面温度非常高。但采用水柱导引抽运后,光纤端面温度下降到接近环境温度,抽运端的侧面也得到了一定程度的冷却,使光纤端部得到很好的冷却,热效应下降显著,很好地保护了光纤的抽运端。下一步将计划进行采用水柱导引抽运的光纤激光器的实验。

### 参考文献

- [1] ZENTENO L. High-power double-clad fiber lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1993, 11(9): 1435-1446.
- [2] ZENG H F, XIAO F H. The development of Yb-doped double-clad fiber laser and its application [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(4): 438-441 (in Chinese).
- [3] EVEN P, PUREUR D. High power double clad fiber lasers; a review [J]. *SPIE*, 2002, 4638: 1-12.
- [4] JEONG Y, SAHU J K, PAYNE D N, *et al.* Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36kW continuous-wave output power [J]. *Optics Express*, 2004, 12(25): 6088-6092.
- [5] LI P X, ZHU Ch, ZOU Sh Zh, *et al.* Thermal effect and experimental research for high power Yb<sup>3+</sup>-doped double-clad fiber laser [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(4): 318-321 (in Chinese).
- [6] LI L, LI H, QIU T, *et al.* 3-Dimensional thermal analysis and active cooling of short-length high-power fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2005, 13(9): 3420-3428.
- [7] COUTY P, WAGNER F, HOFFMANN P. Laser coupling with a multi-mode water-jet waveguide [J]. *Opt Engng*, 2005, 44(6): 068001.
- [8] COUTY P, SPIEGEL Á, VÁCO N, *et al.* Laser-induced break-up of water jet waveguide [J]. *Experiments in Fluids*, 2004, 36(6): 919-927.
- [9] WANG Y, XU Ch Q, PO H. Thermal effects in kilowatt fiber lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(1): 63-65.
- [10] CHEN J X, SUI Zh, CHEN F Sh, *et al.* Thermal effect of Yb<sup>3+</sup>-doped double clad fiber laser [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(3): 268-270 (in Chinese).