

## 掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器的理论及实验研究

戴贤哲, 罗正钱, 叶陈春, 蔡志平, 李齐波, 康 赟

(厦门大学 电子工程系, 福建 厦门 361005)

**摘 要:** 文中报告了掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器的理论和实验研究工作。在稳态条件下, 基于速率方程推导了掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器在强泵浦条件下的简化型解析解。实验上, 利用 975 nm 大功率半导体激光作为泵浦源, 采用单端泵浦技术, 获得了 88 W 波长为 1 082.4 nm 的连续激光输出, 斜效率高达 84.4%。实验结果与理论的简化型解析解相比较, 两者基本一致。

**关键词:** 光纤激光器; 双包层光纤; 解析解

**中图分类号:** TN248

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1007-2276(2007)增(激光)0032-04

## Theoretical and experimental study of Yb<sup>3+</sup>-doped double-clad fiber laser

DAI Xian-zhe, LUO Zheng-qian, YE Chen-chun, Cai Zhi-ping, Li Qi-bo, Kang Yun

(Department of Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Studies of Yb<sup>3+</sup>-doped double-clad fiber lasers (Yb-DCFL) are reported. Under the steady-state conditions, a simplified analytic solution is deduced in the strongly pumped condition based on the rate equations. Using a 975 nm laser diode (LD) as the pump source, we obtained 88 W CW output laser power at a wavelength of 1 082.4 nm is obtained. The slope efficiency is as high as 84.4%. The experimental results and theoretical ones from our analytic solution match very well.

**Key words:** Fiber laser; Yb<sup>3+</sup>-doped double-clad fiber; Analytic solution

### 0 引 言

双包层光纤激光器作为一种新型的高功率激光器件, 由于光束质量好、效率高、易于散热等特点, 在许多领域都具有巨大的应用前景, 如激光加工、光通信、军事、医疗等领域。随着光纤设计和工艺的改进、高功率半导体二极管阵列激光技术的成熟, 双包层光纤激光器近几年倍受国内外学者关注, 且商业化开发应用已形成一定规模。2004 年, Jeong 等人研制成功输出功率达 1.36 kW 波长为 1.1 μm 的大模场掺

Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器 (Yb-DCFL)<sup>[1]</sup>。2005 年, Gaponstev 通过整合多个百瓦级的双包层光纤激光源获得了高达 2 kW 的激光输出<sup>[2]</sup>。同年, IPG 公司利用种子光振荡放大技术实现了单根光纤高达近 2 kW 的准单横模激光输出<sup>[3]</sup>。近几年, 国内有关双包层光纤激光器的实验研究也取得了较大成功。2006 年中科院上海光机所报道了采用双端泵浦国产掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤实现了 714 W 的高功率输出<sup>[4]</sup>。清华大学也获得了超过 700 W 的输出功率<sup>[5]</sup>。在理论方面, 国内外许多研究者也专门地研究了高功率双包层光纤激

收稿日期: 2007-04-30

基金项目: 福建省科技计划重点项目(2005H089)

作者简介: 戴贤哲(1982-), 男, 福建漳州人, 硕士, 主要从事双包层光纤激光器的研究工作。Email: joiyet@163.com

通讯作者: 叶陈春, Email: ccye@xmu.edu.cn

光器的运转特性。在忽略双包层光纤散射损耗情况下, Kelson 和 Hardy 已经推导了掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器的输入输出关系、激光阈值、斜效率、最优光纤长度、最佳输出镜反射率的解析表达式, 同时也给出了在考虑散射损耗情况下的准解析解( 必须执行数值迭代) [6-7]。Xiao 等人在考虑散射损耗情况下, 进一步获得了其近似解析解[8]。然而, 他们的解析解在较高输出镜反射率情况下存在较大的误差。当输出镜反射率为 20% 时, 近似解析解相对于数值解的误差达到 6.4%。

文中报道了在厦门大学开展的掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器的理论和实验研究工作。基于稳态速率方程, 在考虑散射损耗情况下推导了掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器的简化型解析解, 并将理论和实验结果相比较。

## 1 理论分析

图 1 为前向泵浦掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器的示意图, 泵浦光通过左腔镜 M<sub>1</sub> 后耦合进双包层光纤, 激光从光纤的右腔镜 M<sub>2</sub> 输出, R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub> 分别是 M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 的反射率。在实际情况下, M<sub>1</sub> 的反射率接近 1, 而 M<sub>2</sub> 的反射率较低。

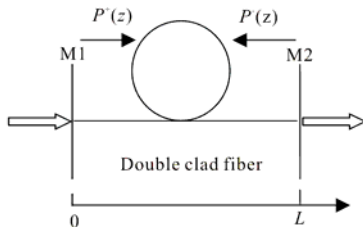


图 1 掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器示意图

Fig.1 Schematic of Yb-DCFL

在稳态条件下, 双包层光纤激光器的速率方程为[9]:

$$\frac{dP^+(z)}{dz} = \frac{\sigma_s \tau_f}{h\nu_p} a_a P_p \exp[-(a_a F_p + a_p)z] \times \frac{\Gamma_p}{A_f} \frac{P_0 + P^+(z)}{1 + [P^+(z) + P^-(z)]/P_s} - a_s P^+(z) \quad (1)$$

$$\frac{dP^-(z)}{dz} = -\frac{\sigma_s \tau_f}{h\nu_p} a_a P_p \exp[-(a_a F_p + a_p)z] \times \frac{\Gamma_p}{A_f} \frac{P_0 + P^-(z)}{1 + [P^+(z) + P^-(z)]/P_s} + a_s P^-(z) \quad (2)$$

$$g(z) = \frac{\sigma_s \tau_f}{h\nu_p} a_a P_p \exp[-(a_a F_p + a_p)z] \times \frac{\Gamma_p}{A_f} \frac{1}{1 + [P^+(z) + P^-(z)]/P_s} \quad (3)$$

边界条件为:

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

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

式中:  $P^+(z)$  和  $P^-(z)$  分别是腔内正向传播和反向传播的激光功率;  $g(z)$  是沿光纤的增益系数;  $P_p$  是注入光纤中的泵浦光功率;  $a_a$  为双包层光纤的纤芯对泵浦光的吸收系数;  $a_p$  和  $a_s$  分别是双包层光纤对泵浦光和激光的散射损耗系数;  $\sigma_s$  为激光的受激发射截面;  $\tau_f$  是荧光寿命;  $h\nu_p$  是泵浦光子的能量;  $A_f$  是双包层光纤的纤芯有效截面面积;  $\Gamma_p$  是泵浦模场在双包层光纤掺杂区域的交叠系数;  $L$  是双包层光纤的长度;  $P_s = (h\nu_s/\sigma_s \tau_f) \cdot A_f$  是激光的饱和输出功率;  $P_0$  是自发辐射的功率。

在强泵浦的情况下, 自发辐射将非常弱, 通常被忽略 ( $P_0=0$ )。从而, 由公式 (1) 和 (2) 可以得到如下的关系[6-9]:

$$P^+(z) \cdot P^-(z) = k \quad (6)$$

定义  $\psi(z) = P^+(z) - P^-(z)$ , 公式 (6) 可写为:

$$P^+(z) \cdot (P^+(z) - \psi(z)) = k \quad (7)$$

求解公式 (7) 可得:

$$P^+(z) = \frac{\psi(z) \pm \sqrt{\psi(z)^2 + 4k}}{2} \quad (8)$$

$$\text{显然 } P^+(z) > 0, \text{ 所以 } P^+(z) = \frac{\psi(z) + \sqrt{\psi(z)^2 + 4k}}{2},$$

化简后可得:

$$\phi(z) = P^+(z) + P^-(z) = \sqrt{\psi(z)^2 + 4k} \quad (9)$$

在光纤不是太长且泵浦光足够强的情况下, 信号光在双包层光纤中的增益总是大于损耗, 在  $Z$  的正方向上  $P^+(z)$  单调递增,  $P^-(z)$  单调递减, 因此,  $\psi(z)$  在沿  $Z$  的正方向单调递增。从公式 (9) 可以看出  $\phi(z)$  沿  $Z$  正方向是单调递增, 所以,  $\phi(z)$  在  $Z=0$  和  $Z=L$  分别取

得最小值和最大值：

$$\phi(z)_{\min} = P^+(0) + P^-(0) \quad (10)$$

$$\phi(z)_{\max} = P^+(L) + P^-(L) \quad (11)$$

对于连续输出掺 Yb<sup>3+</sup>双包层光纤激光器稳态运转情况下应满足下列条件：

$$\int_0^L g(z) dz = a_s L - \ln(R_1 R_2) / 2 \quad (12)$$

将公式(3)代入公式(12)可得：

$$A \int_0^L \frac{\exp(-(F_p a_a + a_p)z)}{P_s + \phi(z)} dz = a_s L - \ln(R_1 R_2) / 2 \quad (13)$$

式中： $A = \frac{\sigma_s \tau_f \Gamma_p a_a P_p P_s}{h\nu_p A_f}$ 。为了简化公式(13)左边

的积分,将公式(10)和公式(11)分别代入公式(13)后求积分可得：

$$P_1^+(L) = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2} + \sqrt{R_2 / R_1}} \times \left[ \frac{A(1 - e^{-(\Gamma_p a_a + a_p)L})}{(\Gamma_p a_a + a_p)(a_s L - \ln(R_1 R_2) / 2)} - P_s \right] \quad (14)$$

$$P_2^+(L) = \frac{1}{1 + R_2} \times \left[ \frac{A(1 - e^{-(\Gamma_p a_a + a_p)L})}{(\Gamma_p a_a + a_p)(a_s L - \ln(R_1 R_2) / 2)} - P_s \right] \quad (15)$$

因此可以将  $P^+(L)$  写成：

$$P^+(L) = \frac{P_1^+(L) + P_2^+(L)}{2} \quad (16)$$

从掺 Yb<sup>3+</sup>双包层光纤右侧输出的激光功率可以写成：

$$\begin{aligned} P_{\text{out}} &= (1 - R_2)P^+(L) \\ &= (1 - R_2) \left( \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2} + \sqrt{R_2 / R_1}} + \frac{1}{1 + R_2} \right) \times \\ &\quad \left[ \frac{A(1 - e^{-(\Gamma_p a_a + a_p)L})}{2(\Gamma_p a_a + a_p)(a_s L - \ln(R_1 R_2) / 2)} - P_s / 2 \right] \end{aligned} \quad (17)$$

当  $P_{\text{out}}=0$  时,可以得到掺 Yb<sup>3+</sup>双包层光纤激光器的阈值泵浦功率：

$$P_{\text{th}} = \frac{h\nu_p A_f (\Gamma_p a_a + a_p)(a_s L - \ln(R_1 R_2) / 2)}{\sigma_s \tau_f \Gamma_p a_a (1 - e^{-(\Gamma_p a_a + a_p)L})} \quad (18)$$

## 2 实验

图 2 为掺 Yb<sup>3+</sup>双包层光纤激光器的实验装置图,泵浦源为 LIMO200-F400-DL975 大功率半导体激光器,从光纤输出的连续波功率 200 W,通过温控装置可以将中心波长稳定在 975 nm,谱线宽度小于 5 nm。

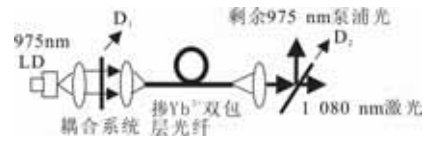


图 2 掺 Yb<sup>3+</sup>双包层光纤激光器的实验装置图

Fig.2 Configuration of Yb-DCFL

如图 2 所示,泵浦光经过一对焦距为 25 mm、对泵浦光和激光都增透的透镜准直聚焦后耦合注入双包层光纤,泵浦光入纤效率达 78%。中科院上海光机所提供的二向色镜 D<sub>1</sub> 作为左腔镜 (AR@975 nm T>97% & HR@1080 nm R>99%),与双包层光纤右端面构成激光腔。通过 45°角二向色镜 D<sub>2</sub> (HR@975 nm R>97% & HT@1080 nm T>85%) 获得激光输出。掺 Yb<sup>3+</sup>双包层光纤由美国 Nufern 公司提供,纤芯直径 20 μm,内包层直径 400 μm,纤芯和内包层数值孔径分别为 0.06 和 0.46,内包层对波长 975 nm 的泵浦光吸收系数为 2.0 dB/m,泵浦光和激光的散射损耗系数分别为 13 dB/km 和 22 dB/km,光纤长度 15 m。光纤的两端面均被垂直抛光。

当泵浦光的入纤功率为 1.0 W 时,开始有激光输出,说明此时已达到激光器阈值。继续加大泵浦光功率,可测得不同泵浦功率下的激光输出功率。当泵浦光的入纤功率为 116 W 时,获得 88 W 的 1082.4 nm 激光输出。

图 3 为掺 Yb<sup>3+</sup>双包层光纤激光器的输入输出关系曲线,其中实线代表了由解析解公式(17)获得的输入输出曲线,黑点为实验数据。从图中可得,激光器斜效率为 84.4%,实验数据与简化型解析解求得的结果基本一致,两者相对误差小于 4%。

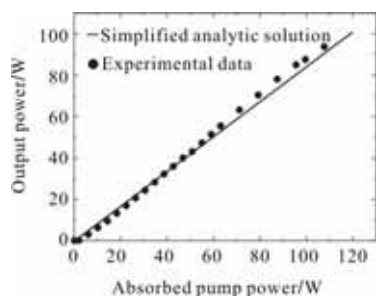


图3 激光输出功率与泵浦功率的曲线

Fig.3 Laser output power vs. pump power

图4为掺Yb<sup>3+</sup>双包层光纤激光器在输出功率约为88W时的输出光谱。激光中心波长为1082.4nm,谱线宽度约7nm。激光为多纵模输出主要源于我们采用的双向色镜D<sub>1</sub>在1080nm附近的反射带宽较大,而且Yb<sup>3+</sup>的发射谱特性也起到了一定的影响。

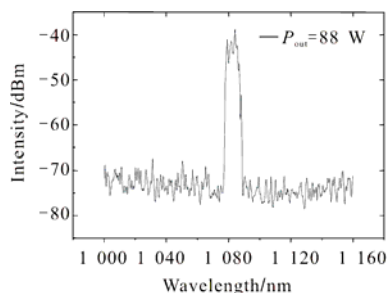


图4 输出激光的光谱图

Fig.4 Spectrum of output laser

### 3 结论

对单端泵浦掺Yb<sup>3+</sup>双包层光纤激光器,在稳态条件下,基于速率方程推导了掺Yb<sup>3+</sup>双包层光纤激光器在强泵浦条件下的简化型解析解。与直接对速率

方程进行求解相比较,简化型解析解更加简单、方便。实验上,利用975nm半导体激光二极管作为泵浦源,当入纤泵浦功率116W时,获得88W波长为1082.4nm的连续激光输出,斜效率高达84.4%。实验结果与解析解相比较,两者基本一致。

### 参考文献:

- [1] JEONG Y, SAHU J K, PAYNE D N, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. *Optics Express*, 2004, 12(25):6088-6092.
- [2] GAPONSTEV D. Quasi-single-mode fiber laser nears 2-kW output with high-quality beam[J]. *Laser Focus World*, 2005, 41(6):9.
- [3] www.globalexecutiveforum.net/more\_photonics\_News.Htm.
- [4] ZHOU Jun, LOU Qi-hong, ZHU Jiang-qiang, et al. A continuous-wave 714W fiber laser with china-made large-mode-area double-clad fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(7):1119-1120.
- [5] LI Cheng, YAN Ping, CHEN Gang, et al. An output power over 700 W fiber laser with china-made large-mode-area double-clad fiber[J]. *Chinese J Laser*, 2006, 33:738.
- [6] KELSON I, HARDY A A. Strongly pumped fiber lasers[J]. *IEEE J Quantum Electron*. 1998, 34(9):1570-1577.
- [7] KELSON I, HARDY A A. Optimization of strongly pumped fiber lasers[J]. *Lightwave Technol*. 1999, 17(5):891-898.
- [8] XIAO Li-min, YAN Ping, Guo Ma-li, et al. An approximate analytic solution of strongly pumped Yb-doped double-clad fiber lasers without neglecting the scattering loss[J]. *Opt. commun*. 2004, 230(2):401-410.
- [9] KIM N S, HAMADA T, PRABHU M, et al. Numerical analysis and experimental results of output performance for Nd-doped double-clad fiber lasers[J]. *Opt. commun*. 2000, 180(2):329-337.