

文章编号: 100124322(2004) 1221509204

# 掺镱双包层光纤激光器典型参数对斜线效率的影响<sup>X</sup>

汪 帆<sup>1</sup>, 潘 炜<sup>1,2</sup>, 罗 斌<sup>1</sup>, 邹龙方<sup>1</sup>, 熊 悦<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学 计算机与通信工程学院,四川 成都 610031;

2. 电子科技大学 宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室,四川 成都 610054)

**摘 要:** 分析了双包层光纤激光器(DCFL)耦合方程的解析解,并对信号光散射损耗、后腔镜泵浦反射率等影响掺镱 DCFL 斜线效率的典型参数进行了理论研究。结果表明,斜线效率并不是随着后腔镜泵浦反射率的升高而单调增大,因为泵浦反射率的升高会影响光纤的最佳长度,从而降低斜线效率。所以在优化斜线效率时应该考虑到泵浦反射率和光纤最佳长度之间的匹配。同时,提高纤芯掺杂浓度、减小信号光散射损耗也能增大斜线效率。

**关键词:** 双包层光纤激光器; 镱掺杂; 斜线效率; 泵浦反射

**中图分类号:** TN248.1

**文献标识码:** A

近年来,双包层光纤激光器(DCFL)逐渐成为一个新的研究热点。与传统激光器相比,它具有输出功率高、转换效率高、阈值低、输出光束质量高、结构紧凑小巧等特点,因此在工业、通信、医学等领域具有广泛的应用前景<sup>[1~3]</sup>。由于 Yb<sup>3+</sup> 具有高的吸收截面和宽的增益带宽,已经成为 DCFL 的主要掺杂离子之一。预计掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器有望在几年内进入小规模应用阶段。

到目前为止,已经报道了一些关于 DCFL 的研究工作。其中大多数是通过实验或者数值方法,对 DCFL 的结构、激光功率分布、泵浦方式、输出镜反射率、输出功率等进行了研究<sup>[4~12]</sup>,而利用解析方法对 DCFL 的性能进行分析的研究工作则较少<sup>[9]</sup>。

本文在考虑了信号光损耗的前提下,分析了 DCFL 耦合方程的解析解,并对影响斜线效率的几个典型参数,特别是信号光散射损耗及后腔镜泵浦反射率进行了研究,并且分析了这几个参数之间的最佳取值平衡点,使 DCFL 在该点具有最好的斜线效率。

## 1 理论模型

在掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器中,与激光波长相关的能级为<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>和<sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>能级。在基质势场影响下此二能级会分裂成两组能级,我们只考虑这两组能级的集体作用,因此可假设激光的频谱分布为  $\delta$  函数,即  $P^\pm(z, \omega) = P_s^\pm(\omega - \omega_s)$ 。可以定义功率填充因子  $\eta_p$  和  $\eta_s$ 。 $\eta_p$  由泵浦功率耦合入纤芯的比例确定,约等于纤芯面积与第一包层面积之比, $\eta_s$  表征的是纤芯中的信号光功率,在单模纤芯中可以用最低阶 LP<sub>01</sub> 模的功率填充因子代替。在强泵浦情况下,可忽略自发辐射的影响,连续波泵浦双包层光纤激光器与时间无关的稳态速率方程组为<sup>[9,10]</sup>

$$N_2(z) = \frac{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)]}{h_p A} \eta_p + \frac{[P_s^+(z) + P_s^-(z)]}{h_s A} \eta_s}{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)]}{h_p A} (\eta_p + \epsilon_p) + 1 + \frac{[P_s^+(z) + P_s^-(z)]}{h_s A} (\epsilon_s + \alpha_s)} \quad (1)$$

$$\pm \frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = - \eta_p [ \eta_p N - (\eta_p + \epsilon_p) N_2(z) ] P_p^\pm(z) - \eta_p P_p^\pm(z) \quad (2)$$

$$\pm \frac{dP_s^\pm(z)}{dz} = \eta_s [ (\epsilon_s + \alpha_s) N_2(z) - \alpha_s N ] P_s^\pm(z) - \eta_s P_s^\pm(z) \quad (3)$$

该方程组描述了上能级 Yb<sup>3+</sup> 浓度  $N_2(z)$ 、泵浦光  $P_p^\pm(z)$ 、信号光  $P_s^\pm(z)$  沿光纤轴向的分布情况。“+”表示沿光纤正反向传播; $h$  是普朗克常量; $\eta_p, \eta_s$  是泵浦光和信号光的频率; $A$  是纤芯的截面积; $N$  是总的纤芯掺杂浓度; $\tau$  是增益介质的荧光寿命; $\epsilon_s, \alpha_s, \epsilon_p, \alpha_p$  分别是信号光和泵浦光的发射截面和吸收截面; $\eta_p$  和  $\eta_s$  是泵浦光和信号光的散射损耗系数。

X 收稿日期:2004206226; 修订日期:2004209220

基金项目:国家自然科学基金资助课题(10174057);宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室开放课题(02KF)

作者简介:汪 帆(1982—),男,硕士研究生,从事光通信与光器件方面的研究;E2mail:wangfan-cd@sohu.com。

图 1 是 DCFL 的结构示意图。假设  $R_1, R_2$  分别为前后腔镜对信号光的反射率。 $R_p = R_p(\lambda)$  是后腔镜对泵浦光的反射率,它与泵浦光的波长相关。本文考虑泵浦光的频谱为  $\delta(\lambda - \lambda_p)$  函数,所以  $R_p = R_p(\lambda_p)$ 。法布里珀罗(F2P)腔 DCFL 满足下列边界条件

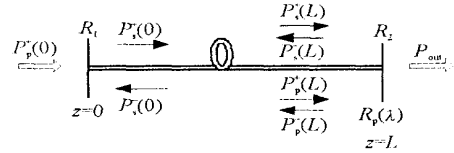


Fig. 1 Schematic illustration of multiwavelength double-clad fiber laser

图 1 F2P 腔双包层光纤激光器示意图

$$P_s^+(0) = R_1 P_s^-(0) \tag{4}$$

$$P_s^-(L) = R_2 P_s^+(L) \tag{5}$$

$$P_p^-(L) = R_p P_p^+(L) \tag{6}$$

对(2)式积分,结合边界条件(6),可得正反向传播的泵浦功率表达式

$$P_p^+(z) = P_p^+(0) \exp[-(\alpha_p + \alpha_{ap} N + \alpha_p) z] \tag{7}$$

$$P_p^-(z) = P_p^-(0) R_p \exp[-(\alpha_p + \alpha_{ap} N + \alpha_p)(2L - z)] \tag{8}$$

从上式看出,正向泵浦功率与后腔镜泵浦反射率  $R_p$  无直接关系,反向泵浦功率则受  $R_p$  影响。

忽略光纤中信号光的散射损耗( $\alpha_s = 0$ )时,正反向传播的信号光的功率分布为<sup>[9]</sup>

$$P_s^\pm(L) = \frac{B \pm \sqrt{B^2 + 4 R_1 P_s^-(0)^2}}{2} \tag{9}$$

式中

$$B = P_s^-(0)(1 - R_1) + \frac{\alpha_s}{\alpha_p} P_p^+(0) [\exp(-\alpha_p L) - 1] + R_p \exp[-(\alpha_p + \alpha_{ap} N + \alpha_p)L] (1 - R_2) [1 - \exp(-\alpha_p L)] + \frac{h\nu_s A}{\alpha_s} N_{av} \tag{10}$$

$$= \alpha_p + \alpha_{ap} N + \alpha_p \tag{11}$$

$$K = \frac{\ln(1/\sqrt{R_1 R_2}) \frac{1}{L} + (\alpha_{es} + \alpha_{as})}{\alpha_s (\alpha_{es} + \alpha_{as})} \tag{12}$$

$$P_{s,sat} = \frac{h\nu_s A}{\alpha_s (\alpha_{es} + \alpha_{as})} \tag{13}$$

$$P_s^-(0) = \frac{\sqrt{R_2} P_{s,sat}}{(1 - R_1) \sqrt{R_2} + (1 - R_2) \sqrt{R_1}} \times \{ \frac{\alpha_s}{\alpha_p} (1 - R_2) [1 - \exp(-\alpha_p L)] \frac{P_p^+(0) + P_p^-(L)}{P_{s,sat}} - (N \alpha_{es} + \alpha_s) L - \ln(1/\sqrt{R_1 R_2}) \} \tag{14}$$

是泵浦光的总损耗,包括了吸收损耗和散射损耗。 $N_{av}$ 是上能级  $Yb^{3+}$  浓度在整个光纤长度上的平均值, $P_{s,sat}$ 是信号光的饱和功率, $P_s^-(0)$ 是信号光反向功率在  $z = 0$  点处的值。

不难得到激光器的输出功率

$$P_{out} = (1 - R_2) P_s^+(L) \tag{15}$$

$\alpha_s = 0$  只是一种理想情况,在实际的 DCFL 中都是存在信号光损耗的。如果考虑信号光的散射损耗( $\alpha_s > 0$ ),也可得到类似的解析解。用  $\alpha_s = 0$  时的  $P_s^\pm(z)$  值近似代替  $\alpha_s > 0$  时的值,则光纤轴向  $0 \sim z$  长度内的信号光损耗可表示为

$$P_{loss}(z) = \int_0^z \alpha_s [P_s^+(z) + P_s^-(z)] dz = \int_0^z \alpha_s \sqrt{B^2 + 4 R_1 P_s^-(0)^2} dz \tag{16}$$

将(9)式中的  $B$  用  $B_s$  代替,即可求出  $\alpha_s > 0$  时的信号光分布。

$$B_s = B + P_{loss} = B + \int_0^z \alpha_s \sqrt{B^2 + 4 R_1 P_s^-(0)^2} dz \tag{17}$$

## 2 模拟计算

基于上述理论模型进行了模拟计算,计算中 F2P 腔掺镜双包层光纤激光器的参量取为<sup>[9]</sup>:  $\lambda_s = 1090$  nm,  $\lambda_p = 920$  nm,  $\alpha_{ap} = 6 \times 10^{-21}$  cm<sup>2</sup>,  $\alpha_{ep} = 2.5 \times 10^{-23}$  cm<sup>2</sup>,  $\alpha_{es} = 2 \times 10^{-21}$  cm<sup>2</sup>,  $\alpha_{as} = 1.4 \times 10^{-23}$  cm<sup>2</sup>,  $A = 5 \times 10^{-7}$  cm<sup>2</sup>,  $N = 4 \times 10^{19}$  cm<sup>-3</sup>,  $\alpha_p = 3 \times 10^{-5}$  cm<sup>-1</sup>,  $\alpha_s = 5 \times 10^{-5}$  cm<sup>-1</sup>,  $R_p = 0.0012$ ,  $R_1 = 0.82$ ,  $\tau = 1$  ms,  $L = 50$  m,  $R_1 = 0.198$ ,  $R_2 = 0.04$ 。

图 2 给出了前向泵浦 ( $P = 20$  W) 时,在不同的后腔镜泵浦反射率  $R_p$  和信号光损耗  $\alpha_s$  情况下,信号光功率沿光纤的分布情况。可以看出,前向泵浦时,信号光前向功率在整个长度上一直增长,反向功率则逐渐衰减至趋于稳定,它们在各自的传播方向上都得到了受激放大。图中,  $\alpha_s = 0$  时的信号光前向功率明显比  $\alpha_s > 0$  时

小,事实上前者更符合光纤的实际情况。从图 2 还可以看到,信号光损耗相同时,后者的信号光功率要大于前者,斜线效率也相应地提高了。这是因为前者对泵浦光的吸收不够充分,在 DCFL 末端仍有 20% 的泵浦能量未吸收,而后者增加了后腔镜对泵浦光的反射,相当于增加了泵浦光的传播长度,使得其吸收率提高。

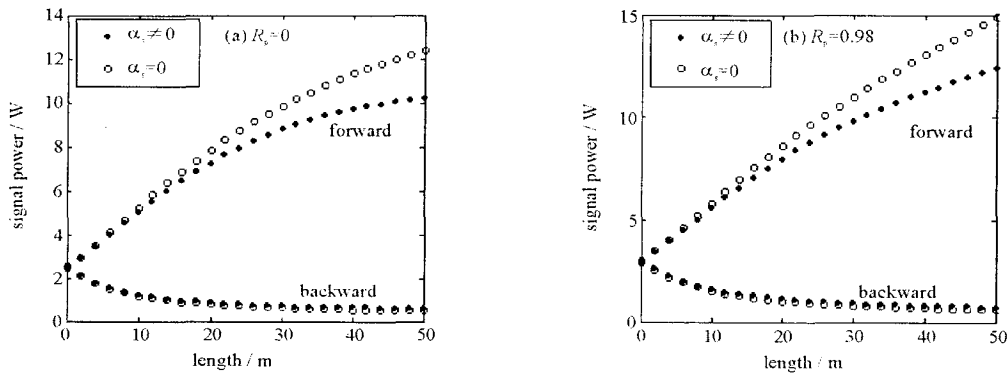


Fig. 2 Signal power along the fiber ( $R_p = 0$  and  $R_p = 0.98$ , respectively)

图 2 信号光功率沿光纤的分布

同时,图 3 是在不同的  $R_p$  下,输出功率随前向泵浦功率变化的情况。从图中可得到,输出功率与泵浦功率近似成正比关系,曲线的斜率就是 DCFL 的斜线效率。在相同的泵浦条件下, $R_p = 0.98$  时的输出功率高于  $R_p = 0$  时的情况,这说明  $R_p$  的增大能导致斜线效率的升高。

纤芯中  $Yb^{3+}$  在泵浦光作用下受激跃迁,产生信号光,因此  $Yb^{3+}$  的浓度必定会影响 DCFL 的性能。图 4 是前向泵浦时,在不同的掺杂浓度  $N$  下,信号光前向功率的分布情况。从图中可看出, $N$  越大,信号光功率越大,斜线效率越高。从微观来看,这是因为  $Yb^{3+}$  浓度越大,发生能级跃迁的离子数就越多,从而提高了转换效率。另外, $N$  相同时,较大的  $R_p$  值能产生更高的信号光前向功率。

图 5 给出了在不同的  $\alpha_s$  和  $R_p$  下,斜线效率随光纤长度变化的情况。不计信号光损耗 ( $\alpha_s = 0$ ) 时,只要光

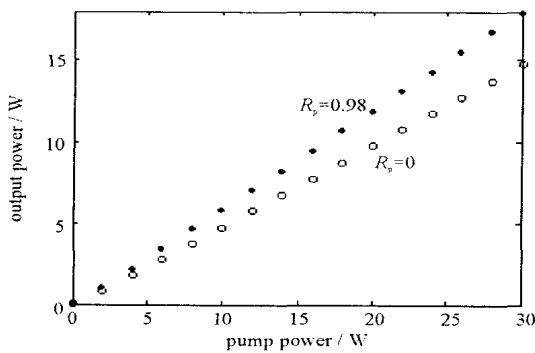


Fig. 3 Output power as a function of pump power with different  $R_p$

图 3  $R_p$  分别为 0 和 0.98 时,输出功率随泵浦功率变化的情况

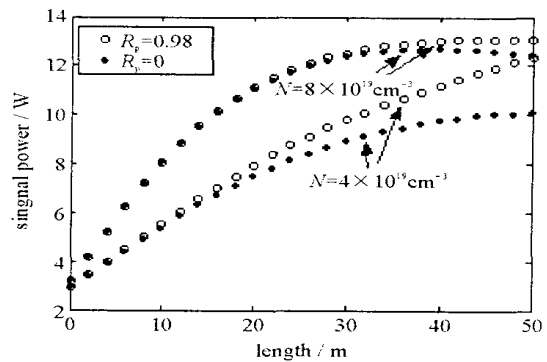


Fig. 4 Signal forward power as a function of fiber length with different  $N$  and  $R_p$

图 4 信号光前向功率随  $N$  和  $R_p$  变化的情况

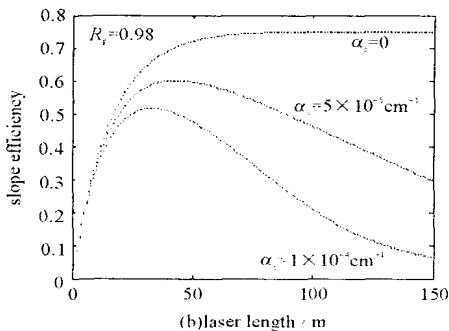
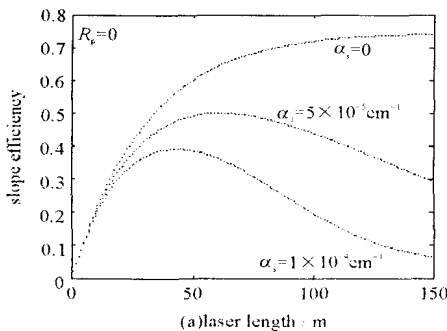


Fig. 5 Slope efficiency as a function of laser length and loss of signal ( $R_p = 0$  and  $R_p = 0.98$ , respectively)

图 5  $R_p = 0, 0.98$  时斜线效率随光纤长度和信号光损耗变化的情况

纤足够长,最终就可得到稳定的斜线效率,因此不存在一个最佳长度。考虑实际情况,当  $s = 0$  时,光纤存在一个最佳长度,在该点斜线效率最高。从图 5 中可看出,  $s$  越大,斜线效率越低,光纤的最佳长度也越短。比较 (a), (b) 两图,当  $s$  相同时,前者的最佳长度大于后者,这是因为图 5 (b) 中的  $R_p$  更大,更有利于泵浦光的吸收,因此在较短的光纤中就可有效地完成波长转换。

### 3 结 论

本文从理论上研究了几个典型参数对 DCFL 斜线效率的影响。结果表明,在优化 DCFL 的斜线效率时,可以适当提高后腔泵浦反射率,但必须注意到泵浦反射率的提高会引起光纤长度偏离最佳长度,从而又降低了斜线效率,因此后腔泵浦反射率的取值应与光纤的最佳长度相匹配。同时,提高纤芯掺杂浓度、减小信号光散射损耗也能提高斜线效率。

### 参考文献:

- [1] Fan Y X, Lu F Y, Hu S L, et al. 105kW peak power double clad fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, **15**(5):652—654.
- [2] Zenteno L. High power double clad fiber lasers[J]. *IEEE J of Lightwave Technology*, 1993, **11**(9):1435—1446.
- [3] Weber T, Luthy W, Neuman V, et al. Cladding pumped fiber laser[J]. *IEEE J of Quantum Electronics*, 1995, **31**(2):326—329.
- [4] 樊亚仙, 胡妹玲, 吕福云, 等. D 型内包层掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤激光器动态特性的研究[J]. 中国激光, 2003, **30**(4):303—306. (Fan Y X, Hu S L, Lü F Y, et al. Dynamics characteristic of D2shape inner cladding  $\text{Yb}^{3+}$  doped fiber laser. *Chinese J of Lasers*, 2003, **30**(4):303—306)
- [5] 陈柏, 陈兰荣, 林尊琪, 等. LD 抽运的掺  $\text{Yb}^{3+}$  双层光纤激光器[J]. 中国激光, 2000, **27**(2):101—104. (Cheng B, Chen L R, Lin Z Q, et al. LD Pumped  $\text{Yb}^{3+}$  doped double clad fiber laser. *Chinese J of Lasers*, 2000, **27**(2):101—104.)
- [6] 武自录, 陈国夫, 王贤华, 等. 掺  $\text{Yb}^{3+}$  双层光纤激光器数值分析[J]. 光子学报, 2002, **32**(2):332—335. (Wu Z L, Cheng G F, Wang X H, et al. Numerical Analysis of  $\text{Yb}^{3+}$  doped double clad fiber laser. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **32**(2):332—335.)
- [7] 苏红新, 李乙钢, 付成鹏, 等. LD 包层抽运光纤激光器抽运方式的理论分析[J]. 光电子·激光, 2001, **12**(9):910—912. (Su H X, Li Y G, Fu C P, et al. Theoretical analysis of the pump modes of LD pumped double clad Fiber lasers. *J of Optoelectronics · Laser*, 2001, **12**(9):910—912)
- [8] Kim N S, Hamada T, Prabhu M, et al. Numerical analysis and experimental results of output performance for Nd doped fiber laser[J]. *Optics Communications*, 2000, **180**(6):329—337.
- [9] Kelson I, Hardy A A. Strongly pumped fiber lasers[J]. *IEEE J of Quantum Electronics*, 1998, **34**(9):1570—1576.
- [10] Hardy A, Oron R. Signal amplification in strong pumped amplifiers[J]. *IEEE J of Quantum Electronics*, 1997, **33**(3):307—313.
- [11] Xiao L M, Yan P, Gong M L, et al. An approximate analytic solution of strongly pumped  $\text{Yb}^{3+}$  doped double clad fiber lasers without neglecting the scattering loss[J]. *Optics Communications*, 2004, **230**(4):401—410.
- [12] 黄庆怀, 梅立泉. 掺钕单模光纤激光器的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 1995, **7**(3):388—392. (Huang Q H, Mei L Q. Study and numerical simulation of Nd doped single mode fiber lasers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1995, **7**(3):388—392)

## Influence of the typical parameters on slope efficiency of $\text{Yb}^{3+}$ doped double clad fiber lasers

WANG Fan<sup>1</sup>, PAN Wei<sup>1,2</sup>, LUO Bin<sup>1</sup>, ZOU Longfang<sup>1</sup>, XIONG Yue<sup>1</sup>

(1. Department of Computer and Communication Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. National Key Laboratory of Broadband Fiber Transmission and Communication Network Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** An analytic solution of  $\text{Yb}^{3+}$  doped double clad fiber lasers (DCFL) is presented, and some typical parameters which may influence the slope efficiency of DCFL are discussed based on this analytic solution, such as the reflection of pump power and the signal's scatter loss. It is found that the slope efficiency doesn't always increase with the augment of the reflection of pump power. The change of the reflection will affect the optimal length of the fiber. So it is important to balance between the reflection of pump power and the signal loss. Higher concentration of Yb and lower signal loss will also obviously improve the slope efficiency.

**Key words:** Double cladding fiber lasers;  $\text{Yb}^{3+}$  doped; Slope efficiency; Reflection of pump power