

文章编号: 1001-3806(2007)01-0057-04

三点抽运的高功率双包层光纤激光器优化设计

欧攀^{1,2}, 闫平², 巩马理², 张春熹¹

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电学院, 北京 100083 2 清华大学 精密仪器系 光子与电子技术研究中心, 北京 100084)

摘要: 采用侧面抽运技术的三点抽运的高功率双包层光纤激光器是多点抽运的高功率双包层光纤激光器中最简单的形式。为了研究其抽运参数的优化, 以便在相同的抽运光功率下获得最大的激光输出功率, 首先从掺 Yb 双包层光纤激光器的速率方程出发, 得到了总体抽运损耗功率的表达式, 然后根据总体抽运损耗功率最小化的原则, 对三点抽运的高功率双包层激光器进行了优化设计, 得到了最优抽运点选取的解析表达式。数值仿真分析表明, 优化后的光纤激光器输出功率较优化前有所提高, 尤其是对于优化前抽运光的总体损耗功率较大时更为明显。三点抽运的高功率双包层光纤激光器的优化结果很有意义, 也为多点抽运的双包层光纤的优化设计提供了思路。

关键词: 激光器; 光纤激光器; 双包层光纤; 侧面抽运; 优化设计; 数值仿真

中图分类号: TN248 文献标识码: A

Optimum design of three-position-pumped high-power double-clad fiber lasers

OU Pan^{1,2}, YAN Ping², GONG Ma-li², ZHANG Chun-xi¹

(1. School of Instrument and Photoelectric Engineering Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China 2 Center for Photonics and Electronics Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Three-position-pumped double-clad fiber lasers are the simplest and essential forms of multi-position-pumped ones with side-pump technologies. In order to obtain higher laser output power under the same pump powers, the optimization of the pump parameters was studied. Firstly, the rate equations of Yb-doped double-clad fiber lasers are applied to acquire the expression of total lost pump power. Secondly, the optimum design model, the analytical expression for choosing the optimum side-pumping position, was obtained based on the principle of minimal total lost pump power for the three-position-pumped double-clad fiber lasers. The simulation results showed that the output power of the optimized double-clad fiber lasers was higher than that of the original ones, especially for the double-clad fibers with large total lost pump powers. The optimization methods are valuable, from which the optimum design for multi-position-pumped double-clad fiber lasers can be derived.

Key words lasers; fiber lasers; double-clad fiber; side pump; optimum design; numerical simulation

引 言

抽运功率耦合技术作为高功率双包层光纤激光器和光纤放大器的核心技术之一, 目的是要把几十瓦甚至数百瓦的半导体激光器输出耦合入直径只有数百微米的双包层光纤内包层, 以获得高的抽运功率。在高功率双包层光纤激光器的发展过程中, 端面抽运技术较为简单, 但是不能形成全光纤结构, 也不利于光纤激光器的功率扩展。针对于双包层光纤的特点先后研究发展了微棱镜耦合、V 型槽耦合、熔锥耦合、光纤角度

磨抛耦合、嵌入微反射镜耦合和光栅耦合等多种侧面抽运的耦合方式, 这些侧面耦合都有各自特殊的工艺要求^[1]。

光纤角度磨抛耦合技术具有耦合效率高, 对双包层光纤无损伤, 工艺上较为容易实现等特点, 成为高功率双包层光纤激光器侧面抽运研究热点之一^[2,3]。作者已在实验上将光纤角度磨抛耦合用于侧面抽运的掺 Yb 双包层光纤激光器^[3], 研究了该耦合技术的耦合效率和耦合功率, 分析了影响耦合效率的因素^[4], 而且还对多点侧面抽运的高功率双包层光纤激光器进行了实验研究^[5], 并从理论上分析了抽运光在经过侧面耦合器发生泄漏所产生的抽运光损耗^[6]。作者从双包层光纤激光器的速率方程出发, 根据总体抽运损耗功率最小化的原则对三点抽运的高功率双包层激光器进行了优化设计, 得到了最优抽运点选取的解析表达式。

作者简介: 欧攀 (1977-), 男, 讲师, 博士, 从事光纤激光器和光纤传感器等领域研究工作。

E-mail: oupan@buaa.edu.cn

收稿日期: 2005-12-19; 收到修改稿日期: 2006-01-12

优化后的光纤激光器输出功率较优化前有所提高,尤其是对于优化前抽运光的总体损耗功率较大时更为明显。三点抽运的高功率双包层光纤激光器是多点抽运的高功率双包层光纤激光器中最简单最基本的形式,其优化结果很有意义,也为多点抽运的双包层光纤的优化设计提供了思路。

$$\frac{N_2(z)}{N} = \frac{\frac{P_p(z)\sigma_{ap}\Gamma_p}{h\nu_p A} + \frac{\Gamma_s\sigma_{as}[P_s^+(z) + P_s^-(z)]}{h\nu_s A}}{\frac{P_p(z)(\sigma_{ap} + \sigma_{ep})\Gamma_p}{h\nu_p A} + \frac{1}{\tau} + \frac{\Gamma_s(\sigma_{es} + \sigma_{as})[P_s^+(z) + P_s^-(z)]}{h\nu_s A}} \quad (1)$$

$$\frac{dP_p^+(z)}{dz} = -\Gamma_p[\sigma_{ap}N - (\sigma_{ap} + \sigma_{ep})N_2(z)]P_p^+(z) - \alpha_p P_p^+(z) \quad (2)$$

$$\frac{dP_p^-(z)}{dz} = \Gamma_p[\sigma_{ap}N - (\sigma_{ap} + \sigma_{ep})N_2(z)]P_p^-(z) - \alpha_p P_p^-(z) \quad (3)$$

$$\frac{dP_s^+(z)}{dz} = \Gamma_s[(\sigma_{es} + \sigma_{as})N_2(z) - \sigma_{as}N] \times P_s^+(z) + \Gamma_s\sigma_{es}N_2(z)P_0 - \alpha_s P_s^+(z) \quad (4)$$

$$- \frac{dP_s^-(z)}{dz} = \Gamma_s[(\sigma_{es} + \sigma_{as})N_2(z) - \sigma_{as}N] \times P_s^-(z) + \Gamma_s\sigma_{es}N_2(z)P_0 - \alpha_s P_s^-(z) \quad (5)$$

(1)式描述光纤不同位置处增益介质 Yb^{3+} 的上能级粒子浓度 $N_2(z)$ 和抽运光功率 $P_p(z)$ 以及正、反向传输激光功率 $P_s^+(z), P_s^-(z)$ 的关系。其中 N 为纤芯中增益介质 Yb^{3+} 的掺杂浓度, A 为纤芯截面积, Γ_p 和 Γ_s 分别是掺 Yb^{3+} 双包层光纤对抽运光和激光的功率填充因子, σ_{ap} 和 σ_{ep} 是抽运光的吸收截面和发射截面, σ_{as} 和 σ_{es} 是激光的吸收截面和发射截面, α_p 是内包层中抽运光的传输损耗系数, τ 是 Yb^{3+} 粒子上能级平均寿命, h 是普朗克常数, ν_p 和 ν_s 分别是抽运光和激光的频率。

(2)式~(5)式分别描述光纤不同位置处正、反向抽运光功率 $P_p^+(z), P_p^-(z)$ 、以及正、反向传输激光功率 $P_s^+(z), P_s^-(z)$ 的变化规律,其中 $P_0 = 2h\nu_s\Delta\nu_s$ 为增益带宽 $\Delta\nu_s$ 内自发辐射对激光功率的贡献, α_p 和 α_s 分别是双包层光纤对抽运光和激光的散射损耗。

线形谐振腔激光器的边界条件为:

$$P_s^+(0) = R_1 P_s^-(0), \quad P_s^-(L) = R_2 P_s^+(L) \quad (6)$$

式中, R_1, R_2 分别为前、后腔镜对激光的反射率, L 为双包层光纤长度。光纤激光器激光输出功率为:

$$P_{out} = (1 - R_2)P_s^+(L) \quad (7)$$

微分方程(2)式~(5)式通过(1)式构成一组耦合方程,即描述高功率双包层光纤激光器的腔内抽运光和激光的速率方程组,三点抽运的光纤激光器优化设计

1 速率方程

双包层光纤激光器均采用半导体激光器(LD)作为抽运源,因此抽运光和激光输出的线宽均很窄,对于掺 Yb^{3+} 双包层光纤端面抽运时的速率方程^[7],可以简化如下:

模型就是建立在该速率方程组的基础之上。

2 三点抽运的光纤激光器优化设计模型

为了针对多点抽运的光纤激光器中最为简单的三点抽运进行优化分析,首先进行如下设定:(1)第1、第2抽运点位于双包层光纤的两个端面附近,分别采用前向和后向抽运以保证这两点注入的抽运光被双包层光纤尽可能充分地吸收,这两个抽运点可以采用侧面耦合或者直接端面耦合;(2)第3抽运点位于双包层光纤的中段,距离光纤前端 κL (κ 为第3抽运点位置参数, $0 \leq \kappa \leq 1$),采用侧面耦合技术。

对三点抽运的双包层光纤激光器进行优化设计,就是选取第3个抽运点的合适位置,在3个抽运点以一定的抽运光功率注入双包层光纤内包层的条件下,获得最大的光纤激光输出功率。在三点抽运的双包层光纤激光器中,抽运光共有以下4种形式的消耗:(1)绝大部分被掺稀土元素的纤芯吸收并转换为光纤激光输出;(2)双包层光纤的长度有限,部分抽运光将从光纤端面逸出,称为残余损耗;(3)抽运光在经过光纤中段的侧面耦合器产生的泄漏损耗,损耗大小与侧面耦合器对抽运光的泄漏比率 μ (经过耦合器时泄漏的抽运光功率与双包层光纤内经过耦合器前的总抽运光功率之比)相关;(4)抽运光在双包层光纤中的传输损耗,由于双包层光纤通常只有数十米甚至更短,双包层光纤对抽运光的传输损耗系数 α_p 很小,在计算的过程中可以忽略。在抽运光的4种损耗中,只有第1种转换为光纤激光输出,是有效损耗,其它3种损耗应该尽量减小以获得尽可能大的光纤激光输出。

双包层光纤激光器的抽运光功率通常远远高于其阈值功率,上能级粒子数比率很小,因此,工作时的抽运光在双包层光纤中的传输方程可以简化为^[7]:

$$\frac{dP_p^+(z)}{dz} = -(\Gamma_p\sigma_{ap}N + \alpha_p)P_p^+(z) \quad (8)$$

$$\frac{dP_p^-(z)}{dz} = (\Gamma_p\sigma_{ap}N + \alpha_p)P_p^-(z) \quad (9)$$

三点抽运的双包层光纤激光器中, 3 个抽运点注入的抽运光、第 3 抽运点处的泄漏抽运光以及双包层光纤两端的残余抽运光沿双包层光纤的位置如图 1 所示,

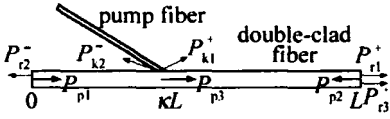


Fig 1 Pump light leakage light and residual light along the double-clad fiber

其中下标“p”表示注入的抽运光; 下标“k”表示泄漏的抽运光; 下标“r”表示残余的抽运光; 上标“+”和“-”分别表示正、反向传输的抽运光。根据 (8) 式和 (9) 式, 可得双包层光纤两个端面的第 1、第 2 两个抽运点注入的抽运光在第 3 个抽运点的泄漏功率分别为:

$$P_{k1}^+ = \mu P_{p1} \exp[-(\Gamma_p \sigma_{ap} N + \alpha_p) \kappa L] \quad (10)$$

$$P_{k2}^- = \mu P_{p2} \exp[-(\Gamma_p \sigma_{ap} N + \alpha_p) (1 - \kappa) L] \quad (11)$$

3 个抽运点注入的抽运光的残余功率分别为:

$$P_{r1}^+ = (1 - \mu) P_{p1} \exp[-(\Gamma_p \sigma_{ap} N + \alpha_p) L] \quad (12)$$

$$P_{r2}^- = (1 - \mu) P_{p2} \exp[-(\Gamma_p \sigma_{ap} N + \alpha_p) L] \quad (13)$$

$$P_{r3}^+ = P_{p3} \exp[-(\Gamma_p \sigma_{ap} N + \alpha_p) (1 - \kappa) L] \quad (14)$$

最后得到总体抽运损耗功率为抽运光的泄漏功率和残余功率之和:

$$P_s = (P_{k1}^+ + P_{k2}^-) + (P_{r1}^+ + P_{r2}^- + P_{r3}^+) \quad (15)$$

若第 3 抽运点位于最佳位置 $\kappa_{opt} L$ 时可以使 P_s 取到最小值, 则有:

$$\left. \frac{dP_s}{d\kappa} \right|_{\kappa_{opt}} = 0 \quad (16)$$

联立 (10) 式 ~ (16) 式可得:

$$\kappa_{opt} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{(\Gamma_p \sigma_{ap} N + \alpha_p) L} \ln \left(\frac{\mu P_{p2} + P_{p3}}{\mu P_{p1}} \right) \right] \quad (17)$$

式中, κ_{opt} 为第 3 抽运点的最佳位置参数, 可以看出, 在三点抽运的双包层光纤激光器中, 第 3 抽运点的最佳位置不仅与双包层光纤的参数 $\Gamma_p, \sigma_{ap}, N, \alpha_p$ 相关, 还由双包层光纤的长度 L , 以及 3 个抽运点注入的抽运光功率 P_{p1}, P_{p2}, P_{p3} 和侧面耦合器对抽运光的泄漏比率 μ 来决定。若记 $P_{p1}, P_{p2}, P_{p3}, \mu$ 决定的抽运系数为:

$$K_p = \frac{\mu P_{p1} + P_{p3}}{\mu P_{p2}} \quad (18)$$

由于 $0 \leq \kappa \leq 1$, 因此 $0 \leq \kappa_{opt} \leq 1$, 若利用 (17) 式计算得到的超出了 $[0, 1]$, 则 κ_{opt} 取最接近的端点值, 亦即 $K_p \leq e^{-(\Gamma_p \sigma_{ap} N + \alpha_p) L}$ 时, $\kappa_{opt} = 0$; $K_p \geq e^{(\Gamma_p \sigma_{ap} N + \alpha_p) L}$ 时, $\kappa_{opt} = 1$ 。

类似地, 如果第 3 抽运点注入的抽运光采用后向抽运, 则其最佳位置参数为:

$$\kappa_{opt} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{(\Gamma_p \sigma_{ap} N + \alpha_p) L} \ln \left(\frac{\mu P_{p1} + P_{p3}}{\mu P_{p2}} \right) \right] \quad (19)$$

且满足 $\kappa_{opt} \in [0, 1]$ 。

3 三点抽运的双包层光纤激光器优化设计仿真分析

根据三点抽运的双包层光纤激光器的优化设计模型可以计算出第 3 抽运点的最佳位置。据此, 对比仿真了第 3 抽运点正向抽运时优化前 (第 3 抽运点位置参数 κ 取 0.25, 0.5 和 0.75) 和优化后 ($\kappa = \kappa_{opt}$) 总体抽运损耗功率和光纤激光器的输出功率。

所用的双包层光纤为 D 形内包层掺 Yb 双包层光纤, 曾在参考文献 [8] 中的实验中采用, 数值仿真所用的数据见表 1。图 2 是根据 (17) 式计算得到的第 3

Table 1 The parameters for numerical simulation

parameters	values	parameters	values
λ_p	977nm	N	$1.435 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$
λ_s	1100nm	σ_{ap}	$1.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2 @ 977 \text{ nm}$
τ	0.8ns	σ_{ep}	$1.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2 @ 977 \text{ nm}$
α_s	$4 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1}$	σ_{as}	$1 \times 10^{-23} \text{ cm}^2$
α_p	$2 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$	σ_{es}	$1.6 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$
Γ	0.82	R_1	0.995
μ	0.00097	R_2	0.035
	0.123	P_{p1}, P_{p2}, P_{p3}	100W



Fig 2 The optimum-pump-position parameter vs length of double-clad fiber
抽运点最佳位置参数和双包层光纤长度的关系曲线; 图 3 是根据 (15) 式仿真得到的优化前后总体抽运损耗功率与双包层光纤长度的关系曲线; 图 4 是通过数值仿真带边界条件 (6) 式的耦合方程组 (1) 式 ~ (5) 式, 再利用 (7) 式得到的优化前后光纤激光器的输出功率与双包层光纤长度的关系曲线。

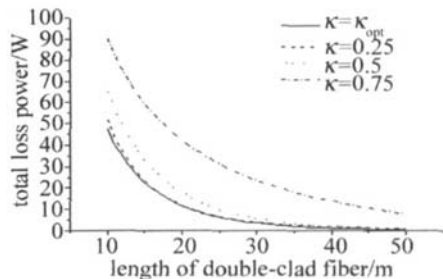


Fig 3 The total loss pump power vs length of double-clad fiber

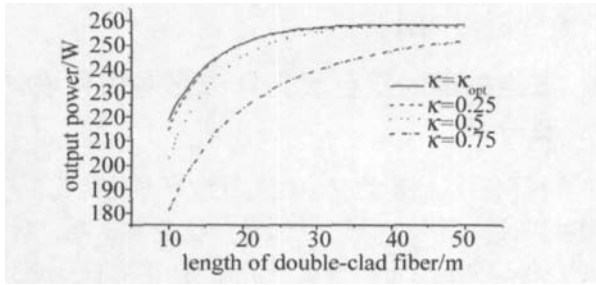


Fig 4 The output power vs length of double-clad fiber

图 2 中, 当双包层光纤的长度为 10m 时, $K_{opt} = 0$ 这是因为此时 (17) 式计算得到的 K_{opt} 为负值, 即第 3 抽运点的最佳位置为双包层光纤前端, 随着双包层光纤长度的增加, K_{opt} 也增大, 并趋近于 0.5。在图 3 和图 4 中, 当双包层光纤的长度较短时, K_{opt} 值偏离所选的 3 个固定抽运点较大, 优化后的总体抽运损耗功率显著减小, 此时双包层光纤激光器的输出功率也显著提高; 随着双包层光纤长度增加到 30m, K_{opt} 值为 0.325, 此时优化后的总体抽运损耗功率与 κ 取 0.25, 0.5 时差别不大, 因此, 双包层光纤激光器的输出功率也差别不大。但是从图 3 和图 4 中可以看出, 优化后的总体抽运损耗功率始终要比优化前小, 因此, 优化后的双包层光纤激光器输出功率也最高。

4 结 论

三点抽运的双包层光纤激光器是多点抽运的双包层激光器中最简单最基本的形式, 对其进行优化设计很有意义。从双包层光纤的速率耦合方程组出发, 对三点抽运双包层激光器进行了优化设计。经过对不同

长度双包层光纤的光纤激光器进行数值仿真可以看出, 优化后的光纤激光器输出功率相对于优化前有所提高, 特别是对于双包层光纤的长度偏短、总体抽运损耗功率较大时, 优化后的效果更为明显。作者以总体抽运损耗功率最小为原则对三点抽运的双包层光纤激光器进行了优化设计, 该原则还可以用于多点抽运的双包层光纤激光器的优化设计, 但是情况更为复杂, 有待于深入研究。

参 考 文 献

- [1] WEI W L, OU P, YAN P *et al*. Side-pumping coupler technology for double-clad fiber [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(4): 116~ 121 (in Chinese).
- [2] XU J Q, LU J H, KUMAR G *et al*. A non-fused fiber coupler for side-pumping of double-clad fiber lasers [J]. *Opt Commun*, 2003, 220: 389~ 395.
- [3] OU P, YAN P, WEI W L *et al*. Side-pumped Yb-doped double-clad fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(9): 1240~ 1244 (in Chinese).
- [4] OU P, YAN P, GONG M L *et al*. Coupling efficiency of angle-polished method for side-pumping technology [J]. *Opt Engng*, 2004, 43(4): 816~ 821.
- [5] OU P, YAN P, GONG M L *et al*. Multi-coupler side-pumped Yb-doped double-clad fiber laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2004, 2(5): 285~ 287.
- [6] OU P, YAN P, GONG M L *et al*. Studies of pump light leakage out of couplers for multi-coupler side-pumped Yb-doped double-clad fiber lasers [J]. *Opt Commun*, 2004, 239: 421~ 428.
- [7] KELSON I, HARDY A A. Strongly pumped fiber lasers [J]. *IEEE JQ E*, 1998, 34(9): 1570~ 1577.
- [8] YAN P, GONG M L, OU P *et al*. 10W cladding-pumped fiber laser with single transverse mode output [J]. *Chinese Optics Letters*, 2003, 1(6): 332~ 333.
- [9] SHEN F, JIANG W H. Slope measurement error of Shack-Hartmann wavefront sensor under realistic atmospheric turbulence with low-level light beacon [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, 13(5): 549~ 554 (in Chinese).
- [10] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing [M]. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002. 110~ 122.
- [11] CHANG Sh L, CHEN Zh HU Y M. The design of image auto-recognition system in measuring the wavefront of a high power laser system [J]. *Laser & Infrared*, 2001, 31(2): 96~ 98 (in Chinese).
- [12] LU M A, WANG Ch H, LIM. Study on methods for inhibiting random noise of wavefront sensor used in low light level [J]. *Opto-electronic Engineering*, 2002, 29(6): 1~ 4 (in Chinese).

(上接第 56页)

Technology, 2005, 29(5): 484~ 487 (in Chinese).

- [3] PARK S K, BA K S H, KM C J *et al*. A study on a fast measuring technique of wavefront using a Hartmann-Shack sensor [J]. *Optics & Laser Technology*, 2002, 34(7): 687~ 694.
- [4] SHEN F, JIANG W H. The measurement error of wavefront phase with Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(5): 666~ 671 (in Chinese).
- [5] CAO G R, YU X. Accuracy analysis of a Hartmann-Shack wavefront sensor operated with a faint object [J]. *Opt Engng*, 1994, 33(7): 2331~ 2335.
- [6] SUN A X, WANG J, HE H X *et al*. Testing precision analysis of centrobatic of laser facula [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(6): 667