

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0070-05

高功率掺镱双包层光纤放大器的优化设计

冷进勇 陈胜平 郭少锋 许晓军 刘泽金 赵伊君

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 研究了连续波高功率掺镱双包层光纤放大器中, 信号光和放大自发辐射光的变化规律, 模拟了信号光和抽运光功率、抽运方式以及增益光纤长度对输出功率的影响。搭建了光纤放大器系统, 在信号光为 2 W, 抽运光为 72.9 W 时, 得到了 48.2 W 的放大激光。数值模拟和实验结果吻合得较好, 模拟计算为连续波高功率双包层光纤放大器的优化设计提供了理论依据。

关键词 激光器; 光纤放大器; 双包层光纤; 放大自发辐射; 优化设计

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200936s1.0070

Optimal Design of High-Power Ytterbium-Doped Double-Clad Fiber Amplifier

Leng Jinyong Chen Shengping Guo Shaofeng Xu Xiaojun Liu Zejin Zhao Yijun

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The power distributions of signal and amplified spontaneous emission in continuous-wave high-power ytterbium-doped double-clad fiber amplifier are studied. The relationships between the output power and the signal power, pump power, pump schemes, fiber length are studied. The system of ytterbium-doped double-clad fiber amplifier is set up and amplified laser of 48.2 W is obtained when the powers of signal and pump are 2 W and 72.9 W, respectively. The results of theoretical study and experiment are in good agreement. And the results of numerical simulation provide a theoretical guide to optimal design of continuous-wave high-power double-clad fiber amplifier.

Key words lasers; fiber amplifier; double-clad fiber; amplified spontaneous emission; optimal design

1 引言

光纤激光器和放大器与传统的固体激光器相比, 具有高光束质量、高斜率效率和散热性好等许多优点。自 1988 年 Snitzer 等提出双包层光纤以来^[1], 基于这种包层抽运技术的光纤激光器和放大器得到了快速发展, 特别是近年高功率半导体激光器技术和双包层光纤的制作工艺的不断进步, 使得光纤激光器和放大器的输出功率水平快速提升。目前, 连续运转单模光纤激光器的输出功率已经达到了 6 kW^[2], 并在加工、传感、军事和医学方面得到日益广泛的应用。

目前对于掺镱光纤放大器的理论研究多集中在较低功率水平^[3]。本文研究了连续波高功率光纤放大器中, 信号光和自发辐射光的变化规律, 信号和抽运功率、抽运方式, 以及增益光纤长度对输出功率的影响, 为连续波高功率光纤放大器的优化设计提供了理论依据。搭建了两级级联结构的光纤放大器, 将 20 mW 的信号光放大到近 50 W。

2 理论模型

在考虑放大的自发辐射(ASE)的前提下, 掺镱双包层光纤放大器的稳态速率方程为^[4~6]

基金项目: 中国博士后科学基金(20080430237)资助课题。

作者简介: 冷进勇(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤激光器和放大器等方面的研究。E-mail: lengjy@sina.com

导师简介: 赵伊君(1930—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高能激光技术方面的研究。

$$\frac{dN_2(z,t)}{dt} = \frac{\Gamma_p \lambda_p}{hcA} [\sigma_a(\lambda_p) N_1(z,t) - \sigma_e(\lambda_p) N_2(z,t)] P_p(z) - \frac{N_2(z,t)}{\tau} + \sum_j \frac{\Gamma_j \lambda_j}{hcA} [\sigma_a(\lambda_j) N_1(z,t) - \sigma_e(\lambda_j) N_2(z,t)] P_j(z), \quad (1)$$

抽运光功率、激光功率以及放大的自发辐射光功率的功率传输方程为

$$\pm \frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = \Gamma_p [\sigma_{ep} N_2(z) - \sigma_{ap} N_1(z)] P_p^\pm(z) - \alpha_p P_p^\pm(z), \quad (2)$$

$$\pm \frac{dP_j^\pm(z)}{dz} = \Gamma_j [\sigma_{ej} N_2(z) - \sigma_{aj} N_1(z)] P_j^\pm(z) - \alpha_j P_j^\pm(z) + 2\sigma_{ej} N_2(z) \frac{hc^2}{\lambda_j^3} \Delta\lambda, \quad (3)$$

$$N(z,t) = N_1(z,t) + N_2(z,t). \quad (4)$$

在稳态情况下,有如下初始和边界条件

$$P_p^+(0) = P_1, \quad P_p^-(L) = P_2, \quad (5)$$

$$P_j^+(0) = 0, \quad P_j^-(L) = 0, \quad (6)$$

$$j = 1, 2, \dots, J (j \neq s)$$

$$P_s^+(0) = P_s, \quad P_s^-(L) = 0, \quad (7)$$

$$\frac{dN_2(z,t)}{dt} = 0, \quad (8)$$

式中 λ_p, λ_s 和 λ_j 分别为抽运光、激光和自发辐射光的波长; P_p^\pm 为前向和后向抽运光功率; P_j^\pm 为腔内波长为 λ_j 的前向和后向放大的自发辐射光功率; 当 $j=s$ 时, 由于信号光功率远大于自发辐射光功率, 此时可忽略自发辐射光的影响, 即信号光功率可表示为 P_s^\pm ; N 为 Yb^{3+} 的掺杂浓度, N_2 为处于上能级 Yb^{3+} 的浓度; Γ_p, Γ_s 和 Γ_j 为填充因子, Γ_p 是抽运光耦合进纤芯的比例, 它可由纤芯面积与包层面积比得到, Γ_s 和 Γ_j 为激光和自发辐射光在纤芯中的百分比, 可由光纤的模式理论得到; 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} 分别为信号光的吸收截面和发射截面; σ_{aj} 和 σ_{ej} 分别为波长为 λ_j 的自发辐射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, α_s 和 α_j 分别为抽运光、激光和自发辐射光的散射损耗

系数。

将自发辐射谱 1000~1100 nm 等分成 100 份, 取波长 $\lambda_j=1000 \text{ nm}, 1001 \text{ nm}, \dots, 1099 \text{ nm}$, 采用有限差分法对(1)式~(4)式存在双边值问题的微分方程组进行模拟计算。

3 模拟计算

计算中所使用的双包层光纤的纤芯直径为 30 μm , 数值孔径为 0.06, 内包层直径为 400 μm , 数值孔径为 0.46, 其他主要参数如表 1 所示。

表 1 模拟计算中采用的主要参数

Table 1 Parameters used in the simulation

λ_p/nm	975	$\sigma_{as}/10^{-27} \text{ m}^2$	2.95
λ_s/nm	1064	$\sigma_{es}/10^{-25} \text{ m}^2$	2.5
$N / (10^{-25} \text{ m}^{-3})$	4.934	σ_{aj}	Ref. [7]
Γ_p	0.0056	σ_{ej}	Ref. [7]
$\Gamma_s = \Gamma_j$	0.88	L/m	6.5
τ/ms	0.85	α_p/m^{-1}	0.003
$\sigma_{ap}/10^{-24} \text{ m}^2$	2.35	α_s/m^{-1}	0.005
$\sigma_{ep}/10^{-24} \text{ m}^2$	2.17	α_j/m^{-1}	0.005

3.1 增益光纤内激光和自发辐射光的变化规律

增益光纤的两个端面均切成与光纤轴线成 8°

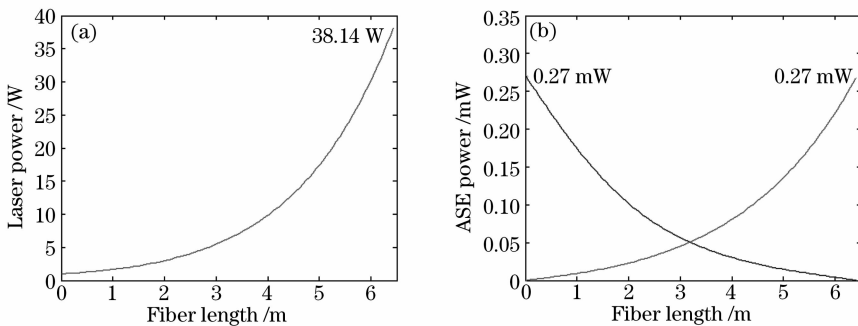


图 1 增益光纤的放大特性。(a)激光功率沿光纤的分布; (b)自发辐射光沿光纤的分布

Fig. 1 Amplification characteristics of doped fiber . (a) Laser power distribution as a function of fiber length;

(b) ASE power distribution as a function of fiber length

的斜面,可以有效地抑制两个方向的激光反馈,将 ASE 的影响降低,有利于实现信号光的单程放大。图 1 分别为信号光功率和正反方向的自发辐射功率沿光纤的分布,计算中采用后向抽运方式,即信号光从光纤的前端输入,抽运光从光纤末端输入。在输入端信号光功率为 1 W,入纤抽运光功率为 50 W 时,得到了 38 W 的放大信号光输出,而两个方向的自发辐射均被压制在毫瓦量级以内。由于增益光纤的斜端面完全抑制了两个方向的光功率反馈,使得正反方向的自发辐射光得不到反馈增强,只能处于较低的功率状态,受激辐射占据了主导地位,从而信号光可以得到有效的放大。

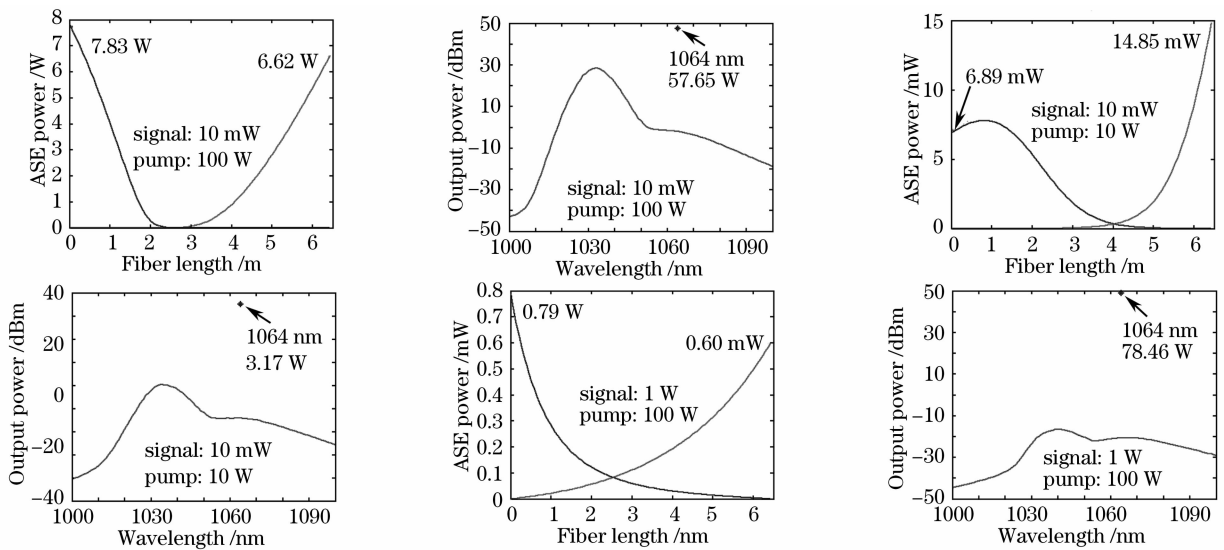


图 2 信号和抽运功率取不同值时光纤内 ASE 的变化和输出光的功率分布

Fig. 2 ASE distributions in the fiber and components of output power with different signal and pump power

3.3 抽运方式对输出功率的影响

图 3 所示为信号光分别取 10 mW 和 1 W,采用前向、后向和双向抽运时输出功率的变化情况,在双向抽运时,前后向抽运光功率相等。从图 3(a)可以看出,在小信号情况下,不同的抽运方式得到的输出

3.2 信号和抽运功率对增益光纤内 ASE 的功率分布和输出光的影响

图 2 所示为信号和抽运功率取不同值时,光纤内的 ASE 的变化规律和光纤输出光的功率分布,计算中均采用后向抽运方式。从图中可以看出,在小信号、大抽运条件下,信号光无法抑制光纤内 ASE 的增强,输出光中的 ASE 成分较强;而在小信号、小抽运或大信号、大抽运条件下,光纤内的 ASE 均能得到较好的抑制,输出光中的 ASE 成分较弱。因此,在设计光纤放大器时,要综合考虑信号光和抽运光功率,只有在 P_p/P_s 合适的情况下,信号光才能得到有效放大。

功率有较大的差异,后向抽运最大,前向抽运最小,双向抽运居中,而且随着抽运功率的增加,这种差异也在增加。这是由于在后向抽运的时候,沿着信号光的前进方向,上能级粒子数逐渐增多,反转粒子被充分利用;而在前向抽运的时候,沿着信号光的前进

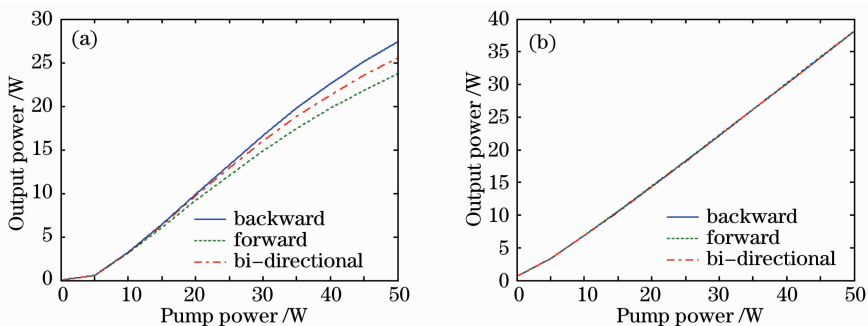


图 3 不同抽运方式下输出功率与抽运功率的关系。(a)信号功率为 10 mW; (b)信号功率为 1 W

Fig. 3 Output power as a function of pump power under different pump schemes. (a) Signal power 10 mW;

(b) signal power 1 W

方向,上能级粒子数逐渐减少,反转粒子的利用率低。从图 3(b)可以看出,在信号光为 1 W 时,抽运方式对输出功率几乎没有影响,这是由于此时的信号光功率较强,不管采用哪种抽运方式,反转粒子都能被充分利用,在这种情况下,当抽运光足够强时,例如 $P_p > 1000$ W,抽运方式对输出功率还是有较大的影响。

3.4 输出功率与光纤长度的关系

对于双包层光纤放大器而言,要得到较高的输出功率,光纤长度的选择至关重要,过长或过短都不能得到最佳的功率输出。增益光纤长度的优化要综合考虑信号光和抽运光功率,从图 4 中可以看出,当

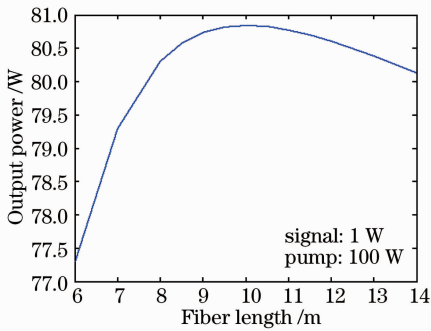


图 4 输出功率与光纤长度的关系

Fig. 4 Output power as a function of the fiber length

光纤长度取为 10 m 时,输出功率达到最大,计算时采用后向抽运。

4 实 验

图 5 为掺镱双包层光纤放大器的结构示意图。实验光路共分 3 个部分:种子源、一级放大和二级放大。LD1 为最高输出功率约 100 mW 的 975 nm 单模尾纤半导体激光器;LD2 为最高输出功率约 7 W 的 976 nm 多模尾纤半导体激光器,pump dump 用来吸收剩余的抽运光;LD3 为最高输出功率约 200 W 的多模尾纤半导体激光器,输出波长在 970~976 nm 范围内。LD3 的出射光经透镜准直和聚焦后,进入双包层光纤的内包层中。掺杂光纤使用的是纤芯直径 30 μm ,内包层直径 400 μm 的大模场面积双包层掺镱光纤,长度约 6.5 m,光纤两端均切成斜角,以抑制自发辐射。45°二色镜为 975 nm 高透,1060 nm 高反,0°二色镜为 1064 nm 高透,975 nm 高反,防止未吸收的抽运光进入一级放大光路,并成一小角度放置,以防止反射回的抽运光对 LD3 造成损坏。图 5 中 YDF 为掺镱光纤,FBG 为光纤布拉格光栅,WDM 为波分复用器,TFB 为锥形光纤束耦合器。

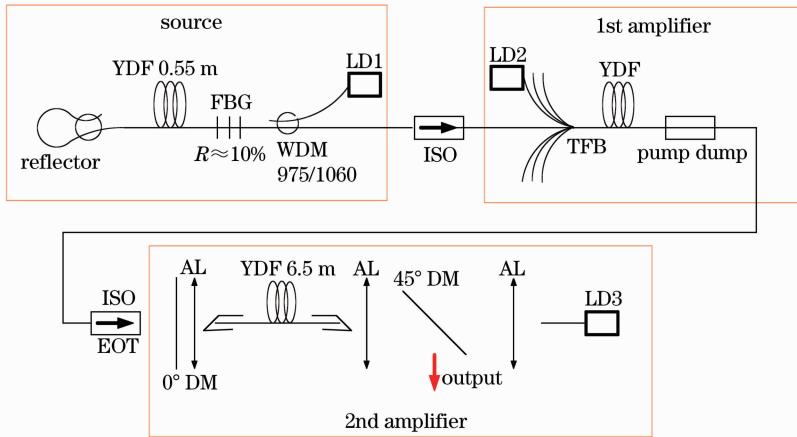


图 5 掺镱双包层光纤放大器结构示意图

Fig. 5 Configuration of the ytterbium-doped double-clad fiber amplifier

当 LD1 电流为 230 mA 时,种子源出光功率约为 20 mW,经隔离器 (ISO) 进入一级放大,当 LD2 电流为 6 A 时,经隔离准直输出后功率为 2.45 W,经过 0°二色镜和聚焦透镜后,最终进入双包层光纤纤芯的信号光约为 2 W。改变 LD3 的电流,测得输出功率与入纤抽运功率的关系如图 6,图 7 所示。

从图 6 中可以看出,模拟计算与实验结果基本相符。两者的差别主要是由于模拟计算时未考虑抽

运光的带宽和波长温漂所造成的影响,以及实验中器件对功率的损耗。随着抽运功率的增加,LD3 的输出波长逐渐达到 976 nm,提高了抽运光的吸收效率,使得两者之间的差异在逐渐减小。实验中,出于保护器件的考虑,没有继续增加抽运光的功率,但是从实验数据的变化趋势上可以验证模拟计算的正确性。图 7 所示为提取效率与入纤抽运功率的关系。同样可以看出,随着抽运功率的增加,模拟计算与实

验结果之间的差异在逐渐减小。

改变图 5 中二级放大光路的结构,搭建前向抽运放大器,测量输出功率。图 8 和图 9 为前后向抽运时,输出功率和提取效率间的对比。从图中可见,

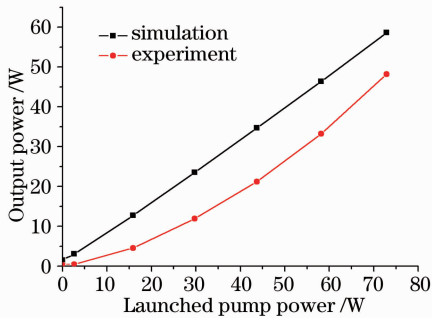


图 6 输出功率与入纤抽运功率的关系

Fig. 6 Experiment and simulation results of output power versus the launched pump power

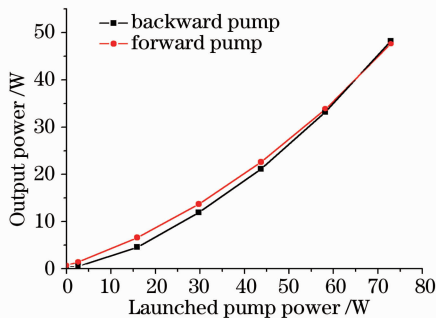


图 8 前后向抽运时的输出功率

Fig. 8 Output power versus the launched pump power under backward and forward pump

5 结 论

从掺镱双包层光纤放大的速率方程理论模型出发,对于 975 nm 半导体激光抽运、信号光波长 1064 nm,增益光纤为 30/400 双包层掺镱光纤的放大器,模拟计算了输出功率随抽运功率、信号功率、抽运方式以及光纤长度的变化特性,并设计了相应的放大器实验,实验结果与模拟计算符合得较好。要做到对信号光进行有效放大,抽运功率与信号功率之比不能太高,以抑制 ASE 的产生。小信号放大时,后向抽运得到的输出功率较前向抽运高,双向抽运介于二者之间,大信号放大时,抽运方式对输出功率影响较小,此处信号光的大小均是相对于抽运功率而言。优化增益光纤的长度要综合考虑抽运功率和信号功率的影响。这些结论能够为实际的放大器设计提供理论指导。

参 考 文 献

1 E. Snitzer, H. Po, F. Hakima *et al.*. Double-clad, offset core

由于此时的信号光功率较高,抽运方式对输出功率的影响不大,而且随着抽运功率的增加,后向抽运的输出功率和提取效率都将超过前向抽运的输出功率和提取效率,这与前面模拟计算的结果是一致的。

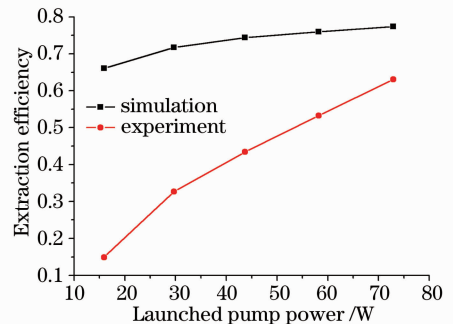


图 7 提取效率与入纤抽运功率的关系

Fig. 7 Experiment and simulation results of extraction efficiency versus the launched pump power

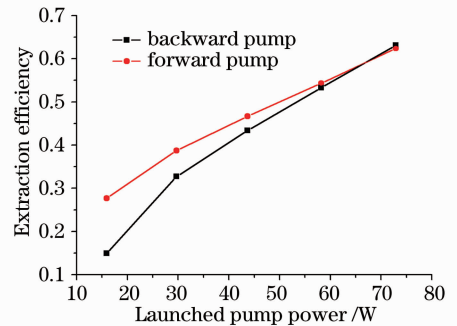


图 9 前后向抽运时的提取效率

Fig. 9 Extraction efficiency versus the launched pump power under backward and forward pump

- Nd fiber laser [C]. in *Optical Fiber Sensors*, OSA Technical Digest Series, 1998, 2: PDS
- 2 D. Gapontsev. 6 kW CW single mode ytterbium fiber laser in all-fiber format[C]. Conf. on Solid State and Diode Laser Technology Review (SSDLTR) in Albuquerque, New Mexico, 2008
 - 3 D. C. Jones, A. M. Scott. A model of a fiber amplifier incorporating amplified spontaneous emission [C]. *SPIE*, 2004, **5335**: 73~80
 - 4 A. Bouchier, G. Lucas-Leclin *et al.*. Theoretical and experimental investigations of a single-mode 976-nm Yb-doped fiber amplifier[C]. *SPIE*, 2004, **5460**: 23~30
 - 5 Yin Shupeng, Yan Ping, Li Chen *et al.*. Extraction efficiency in continuous-wave ytterbium-doped fiber amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 835~839
 - 殷树鹏, 闫平, 李辰等. 连续掺镱光纤放大器的提取效率[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 835~839
 - 6 Chang Liping, Fan Wei, Wang Li *et al.*. Amplification performance of large- and small-mode-area ytterbium-doped double-clad fiber amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1492~1497
 - 常丽萍, 范薇, 王利等. 掺镱双包层光纤放大器的放大特性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1492~1497
 - 7 R. Paschotta, J. Nilsson, A. C. Tropper *et al.*. Ytterbium-doped fiber amplifiers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(7): 1049~1056