

文章编号: 1001-3806(2007)01-0050-04

不同抽运方式下掺 Yb³⁺ 光纤放大器的增益和噪声特性

詹 仪, 郑 义*, 赵玉辉, 徐云峰

(郑州大学 河南省激光与光电子信息重点实验室, 郑州 450052)

摘要: 为了探讨不同抽运方式下掺 Yb³⁺ 光纤放大器的增益和噪声特性, 对 910nm 掺 Yb³⁺ 光纤放大器进行数值模拟。结果表明, 抽运方式对增益影响较小, 但对噪声特性影响较大, 光纤达最佳长度时, 正向和双向抽运方式的掺 Yb³⁺ 光纤放大器要优于反向抽运方式。这一结果对掺 Yb³⁺ 光纤放大器的试验设计具有重要的作用。

关键词: 光电子学; 掺 Yb³⁺ 光纤放大器; 有限元模拟工具箱; 抽运方式; 信号增益; 噪声指数

中图分类号: TN253 文献标识码: A

The gain and noise characteristics of double cladding ytterbium-doped fiber amplifiers at different pump modes

ZHAN Yi ZHENG Yi ZHAO Yu-hui XU Yun-feng

(Henan Key Laboratory of Laser and Optoelectronic Information Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

Abstract In order to investigate the gain and noise characteristics of double cladding ytterbium-doped fiber amplifiers at different pump modes, numerical analysis of 910nm ytterbium-doped fiber amplifiers is performed. The results show that pump mode has less effect on gain than noise figure and the fiber amplifier has low noise under forward and bidirection pumping schemes at optimal fiber length. The results are useful for experimental design.

Key words optoelectronics; ytterbium-doped fiber amplifier; finite element modeling; laboratory; pump modes; signal gain; noise figure

引 言

掺 Yb³⁺ 石英光纤能级结构简单, 仅有一个激发态 2F_{5/2} (由斯塔克子能级 e~g 组成) 和一个基态 2F_{7/2} (由斯塔克子能级 a~d 组成), 由于不存在其它的上能级, 对抽运光和激光都不存在激发态吸收; 同时, 由于 2F_{5/2} 和 2F_{7/2} 两能级间隔比较大, 有利于消除多声子非辐射弛豫和浓度淬灭效应, 使得掺 Yb³⁺ 光纤具有很高的量子效率。另外, 还具有宽的吸收谱 (800nm~1064nm) 和辐射光谱 (975nm~1200nm), 覆盖了多个重要波长, 允许多种抽运方案和放大方案。掺 Yb³⁺ 光纤放大器越来越受到关注, 将来可广泛用于特殊波长 (如 1083nm、1053nm) 的功率放大、光纤传感器中的小信号放大、自由空间激光通信以及超短脉冲的放大。

对于掺 Yb³⁺ 光纤放大器的研究, 除了实验研究外^[1-2], 还有对掺 Yb³⁺ 光纤放大器的放大特性进行了理论研究^[3-6]主要集中在正向抽运时增益、饱和与噪声特性方面, 对不同抽运方式时增益、噪声指数方面的

研究比较少见。作者从粒子速率方程组和光功率传输方程组出发, 在不同的抽运方式下, 对 910nm 抽运掺 Yb³⁺ 光纤放大器的增益和噪声指数进行数值模拟, 比较分析了掺 Yb³⁺ 光纤放大器的增益和噪声指数沿光纤分布、抽运功率和输入信号功率的关系, 为光纤激光器的优化设计提供了理论依据。

1 理论模型

在 910nm 激光抽运下, 激光上下能级的间隔比斯塔克子能级间隔大得多, 而且从高能态弛豫到亚稳态所需的时间 (纳秒量级) 远远小于亚稳态的寿命, 因此可忽略高能态上的粒子数, 将放大器用二能级系统来描述。掺 Yb³⁺ 光纤中同时存在信号光、抽运光和放大的自发辐射 (amplificatory spontaneous emission, ASE) 噪声光时, 它们在光纤中的传播变化可用下述速率方程和光功率传输方程来描述^[7]:

$$\frac{dN_2(z, t)}{dt} = \frac{\Gamma_p \lambda_p}{hcA} [\sigma_a(\lambda_p) N_1(z, t) -$$

$$\sigma_e(\lambda_p) N_2(z, t)] \cdot [P_p^+(z, t) + P_p^-(z, t)] - \frac{N_2}{\tau} +$$

$$\frac{\Gamma_s}{hcA} \sum_{k=1}^K \lambda_k [N_1(z, t) \sigma_a(\lambda_k) - N_2(z, t) \sigma_e(\lambda_k)] \times$$

作者简介: 詹 仪 (1970-), 女, 博士研究生, 主要从事光纤激光器方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: yzheng@zzu.edu.cn

收稿日期: 2005-12-19; 收到修改稿日期: 2006-04-03

$$[P_k^+(z, t, \lambda_k) + P_k^-(z, t, \lambda_k)] \quad (1)$$

$$N = N_1(z, t) + N_2(z, t) \quad (2)$$

$$\pm \frac{\partial P_p^\pm(z, t)}{\partial z} + \frac{1}{v_p} \frac{\partial P_p^\pm(z, t)}{\partial t} = -\Gamma_p [\sigma_a(\lambda_p) N_1(z, t) - \sigma_e(\lambda_p) N_2(z, t)] P_p^\pm(z, t) - a \cdot P_p(z, t) \quad (3)$$

$$\pm \frac{\partial P_k^\pm(z, t, \lambda_k)}{\partial z} + \frac{1}{v_k} \frac{\partial P_k^\pm(z, t, \lambda_k)}{\partial t} = \Gamma_s [\sigma_e(\lambda_k) N_2(z, t) - \sigma_a(\lambda_k) N_1(z, t)] \times P_k^\pm(z, t, \lambda_k) - a \cdot P_k^\pm(z, t, \lambda_k) + 2\sigma_e(\lambda_k) \times N_2(z, t) h c^2 \Delta\lambda / \lambda_k^3 + S_R(\lambda_k) \times P_k^\pm(z, t, \lambda_k) \quad (4)$$

式中, N_1, N_2 和 N 为基态、亚稳态和纤芯中增益介质的总掺杂浓度, A 为纤芯截面积, $P_p^\pm(z, t), P_s^\pm(z, t, \lambda_s)$ 和 $P_k^\pm(z, t, \lambda_k)$ 分别是前、后向传播的抽运光、信号光和 k 频带 ASE 噪声光功率 ($k = 1, 2, \dots, K$); Γ_p 和 Γ_s 分别是掺 Yb³⁺ 双层光纤对抽运光和信号光的功率填充因子; $\sigma_a(\lambda_p)$ 和 $\sigma_e(\lambda_p)$ 是抽运光的吸收截面和发射截面; $\sigma_a(\lambda_s)$ 和 $\sigma_e(\lambda_s)$ 是信号光的吸收截面和发射截面。 $\sigma_e(\lambda_k)$ 和 $\sigma_a(\lambda_k)$ 分别为 k 频带的吸收截面和发射截面, v_k 和 v_p 分别为 k 频带 ASE 噪声光和抽运光的群速度, S_R 是瑞利散射系数, z 为光纤的长度, 沿信号光传播的方向为正方向, t 为时间, h 为普朗克恒量, c 为光速, a 为抽运光和信号光沿光纤的衰减系数, λ 是波长, τ 是荧光寿命。

在稳态条件下即 $dN/dt = 0$ 对以上联立微分方程组进行数值求解, 还必须考虑如下边界条件。

(1) 正向抽运方式:

$$P_p^+(0) = P_b, P_p^-(L) = 0, P_s^+(0) = P_3, P_s^-(z=0, \lambda) = P_k^-(z=L, \lambda) = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, k \neq s), \quad (1020\text{nm} < \lambda < 1100\text{nm}).$$

(2) 反向抽运方式:

$$P_p^+(0) = 0, P_p^-(L) = P_2, P_s^+(0) = P_3, P_s^-(z=0, \lambda) = P_k^-(z=L, \lambda) = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, k \neq s), \quad (1020\text{nm} < \lambda < 1100\text{nm}).$$

(3) 双向抽运方式:

$$P_p^+(0) = P_b, P_p^-(L) = P_2, P_s^+(0) = P_3, P_s^-(z=0, \lambda) = P_k^-(z=L, \lambda) = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, k \neq s), \quad (1020\text{nm} < \lambda < 1100\text{nm}).$$

其中, P_1, P_2 和 P_3 分别是正向、反向抽运功率和输入信号功率, L 是光纤长度, s 为信号光频道。

由于 ASE 光谱曲线随波长的起伏变化太大, 因此在数值求解 ASE 功率时, 应将 ASE 光谱从 1020nm ~ 1100nm 分成若干个频带, 严格一点, 每个频带带宽取 2nm。这样, (1)式 ~ (4)式就变成了 82 个耦合的微分方程。

增益及噪声指数定义与参考文献 [8] 相同。

2 数值模拟和理论分析

运用有限元模拟软件, 采用 910nm 抽运光抽运掺 Yb³⁺ 双层光纤放大器, 信号光波长为 1064nm, 计算中所用的光纤放大器的参量如表 1^[17] 所示。

Table 1 Parameters used in the simulation

λ_p	915 nm	τ	840 μm
λ_s	1064 nm	A	$3.0 \times 10^{-10} \text{m}^2$
λ_1	1020 nm	Γ_p	0.01
λ_K	1100 nm	Γ_s	0.85
$\sigma_a(\lambda_p)$	$8.0 \times 10^{-25} \text{m}^2$	L	10 m
$\sigma_e(\lambda_p)$	$5.0 \times 10^{-26} \text{m}^2$	S_R	$1.2 \times 10^{-7} \text{m}^{-1}$
$\sigma_a(\lambda_s)$	$5.0 \times 10^{-27} \text{m}^2$	$\Delta\lambda$	2 nm
$\sigma_e(\lambda_s)$	$3.4 \times 10^{-25} \text{m}^2$	N	$6.0 \times 10^{-25} \text{m}^{-3}$
$\sigma_a(\lambda_k)$	Ref [4]	a	$3.0 \times 10^{-3} \text{m}^{-1}$
$\sigma_e(\lambda_k)$	Ref [4]		

2.1 3种抽运方式下的增益特性

图 1 中给出了抽运功率和抽运方式不同时, 信号增益随光纤长度的变化。由图可看出, 当双向抽运的

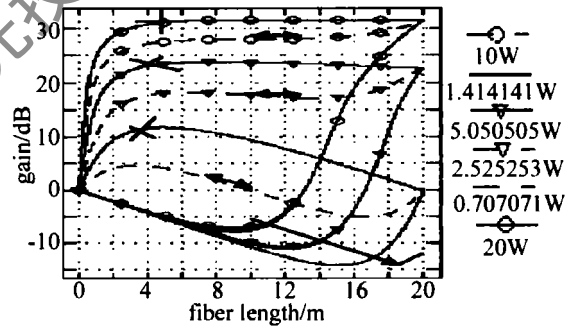


Fig 1 Gain versus fiber length and different pump powers in the forward (+), backward(-) and bi-directional(↔) pumping cases

光纤两端抽运功率之和与单端抽运功率相等时, 不同抽运方式下光纤末端的增益是相等的, 增益沿光纤的分布不同且随抽运功率的增加而增大。正向抽运时, 增益随着光纤长度的增加先增大, 在达到增益最大值后, 开始沿光纤长度方向降低; 反向抽运时, 增益沿着光纤从 0 减小到最低值后逐渐增大; 双向抽运的信号增益变化趋势与正向抽运方式相同, 但是中间稍低, 末端高。正向抽运时, 抽运光激发基态粒子到上能级, 通过受激辐射实现光信号放大, 当抽运光沿光纤传输时, 因受激吸收不断衰减, 导致反转粒子数不断减少, 当长度超过一定值后, 信号光不再被继续放大反而被吸收, 增益下降。反向抽运时, 信号光与抽运光传播方向相反, 抽运光沿负 z 轴逐渐减小, 当功率小于阈值后, 光纤对信号光不再有放大作用, 反而吸收信号光, 所以信号光从 $z=0$ 处首先被光纤吸收, 出现增益小于 0 的情

况,只有当功率大于阈值后才能对信号光放大。双向抽运时,光纤末端抽运光功率比中间部分高,使反转粒子数增加,增益没有降低,反而升高。

图2表示不同的抽运方式和不同输入信号功率下,信号增益随光纤长度的变化情况。可见,增益沿光

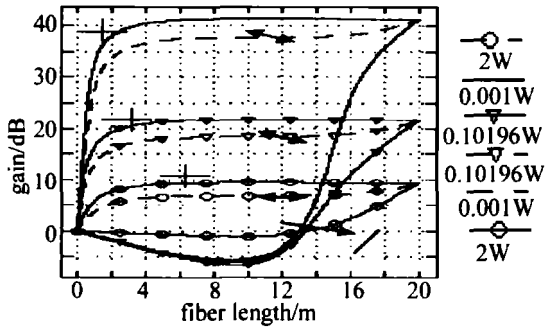


Fig 2 Gain versus fiber length for different input signal powers in the forward (+), backward (-) and bidirectional (↔) pumping cases

纤的分布是不同的,增益随输入信号功率的增大而减小,相同的输入信号功率,不同抽运方式下,光纤末端的信号增益相同。由于信号光引起的增益饱和效应,正向抽运达到饱和值后,增益随光纤长度变化很小,放大器内的光强越大,饱和效应越严重,因此,放大器的增益随输入信号的增强而减小的现象显著;反向抽运时,增益减小到最低值后逐渐增大,其原因与抽运功率沿光纤逐渐降低有关;双向抽运时,消耗的反转粒子数在光纤末端得到补充,所以增益没有降低,反而升高。

从正向抽运增益有一最大值;双向抽运中间降低,末端高;反向抽运存在增益小于0的现象都说明所用光纤太长,可见有一个最佳长度,此处增益最大,并且由图1可见,抽运功率越大,最佳长度越长,3种抽运方式下,最佳光纤长度值是相同的。当然,最佳长度还与输入信号状态、输入信号波长、 Yb^{3+} 掺杂浓度等参量有关。把信号增益为0dB时所对应的抽运光的阈值功率用 P_{th} 表示。由图1可知,20m时抽运阈值为1.414W,正、反向抽运方式阈值相同,双向抽运时阈值为0.707W,是其它两种抽运方式时的一半。

2.2 3种抽运方式下的噪声指数特性

图3、图4分别表示正、反向和双向抽运时,以抽运功率为参数,噪声指数随光纤长度的变化。可见,相同条件下,反向抽运的噪声性能最差。正向抽运,且抽运功率较大时,噪声指数随激活光纤长度的增加而急剧增加,超过一定的长度后噪声指数随长度和功率的变化不明显;当抽运功率较小时,噪声指数沿光纤不断上升。因为小抽运功率下增益很小,并且抽运光传输到一定长度后被衰减到很小,使噪声指数变大。反向抽运的噪声指数沿长度急剧增加,且随功率增大,噪声指数降低。因为反向传输的ASE在输入端达到较高

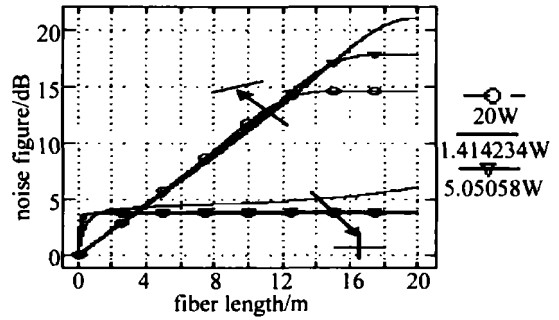


Fig 3 Noise figure versus fiber length and different pump powers in the forward (+) and backward (-) pumping cases

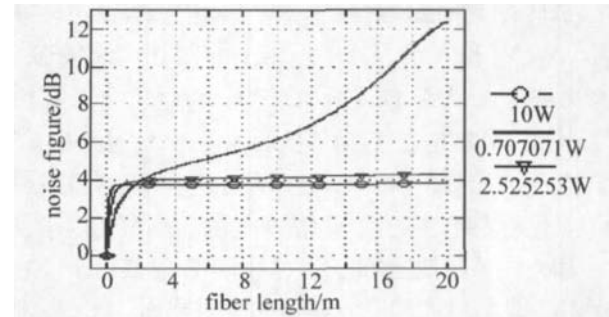


Fig 4 Noise figure versus fiber length for different pump powers in the bidirectional pumping cases

水平而在该处消耗大量反转粒子,从而使增益降低噪声指数增大,并且长度越长,对抽运光和信号光吸收多,反转粒子数越少,噪声指数越大。双向抽运时,噪声指数随光纤长度的变化与同一条件下正向抽运方式的结果类似。在最佳长度内,其噪声性能优良;超过最佳长度,其噪声指数要大于同等条件下正向抽运的噪声指数。双向抽运光纤中间段的增益比正向抽运的要低,功率越低,光纤越长,其噪声指数越大,随着抽运功率增加, Yb^{3+} 粒子数反转加剧,从而抑制了自发辐射,使噪声指数减小。

图5、图6表示正、反和双向抽运时,以输入信号功率为参数,噪声指数随光纤长度的变化曲线。可以看出,不同抽运方式,相同的抽运功率下,输入信号功率和长度变化对噪声指数影响较大。正向抽运时,噪声指数随输入信号和长度的增大而增大,并且噪声指数在小信号输入的情况优于大信号输入的情况。因为输入信号较小时,输入端消耗的反转粒子较少,正向

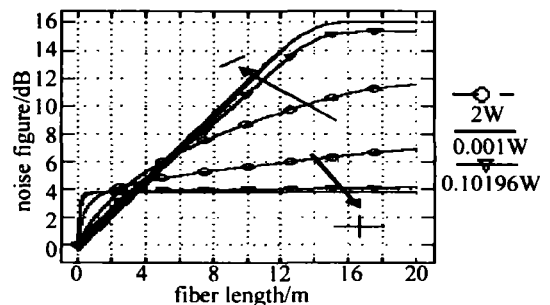


Fig 5 Noise figure versus fiber length for different pump powers in the forward (+) and backward (-) pumping cases

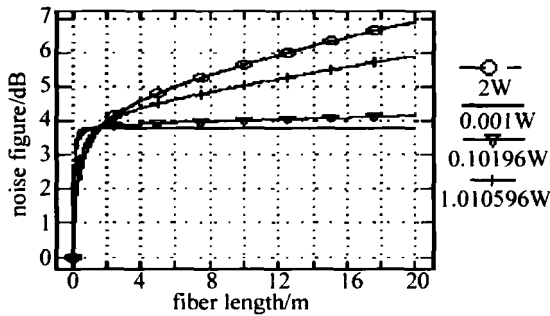


Fig 6 Noise figure versus fiber length for different input signal powers under the bidirectional pumping cases

ASE 逐渐被抑制, 噪声指数减小; 随着输入信号功率增加, 信号本身要消耗输入端反转粒子, 使噪声指数增加。同时, 抽运光沿光纤不断衰减, 信号光不断被吸收, 增益下降, 使噪声指数随光纤长度增加而变大。反向抽运时, 噪声指数沿长度急剧增加, 长度越长, 对抽运光和信号光吸收越多, 反转粒子数越少, 噪声功率越高, 噪声指数越大。双向抽运时, 噪声指数随输入信号功率、抽运功率的变化与同一条件下正向抽运方式下结果相类似。在最佳长度内, 其噪声性能优良; 超过最佳长度, 其噪声指数要大于同等条件下正向抽运的噪声指数。

从图 3 至图 6 可以看出, 对相同的抽运功率、输入信号功率和最佳长度, 反向抽运的噪声指数要比正向抽运和双向抽运的大。如抽运功率为 20W, 输入信号功率为 0.01W, 最佳长度为 7m 时, 抽运和双向抽运噪声指数小于 4dB, 反向抽运已达到 7dB。要使反向抽运噪声指数小于 4dB, 其光纤长度必须小于 4m, 即缩短到最佳长度以下, 这是以减小增益为代价的。已有的研究^[9]结果表明, 反射镜的加入可以改善后向抽运方式的噪声性能。

3 结 论

对掺 Yb³⁺ 光纤放大器信号增益和噪声指数在 3 种抽运方式下的特性进行数值模拟。结果表明, 抽运方式对增益影响较小, 抽运方式不同, 其它条件相同时, 虽然增益沿光纤的分布不同, 但光纤末端信号增益是相同的。抽运方式对噪声指数影响较大, 光纤达最佳长度时, 正向和双向抽运方式的噪声指数要优于反向抽运方式。

参 考 文 献

- [1] WANG A T, XU L X, MING H *et al* Experimental study on ytterbium-doped fiber amplifier [J]. Chinese Journal of Lasers 2002, 29(9): 777~779 (in Chinese).
- [2] LIMPET J, LIEM A, ZELLMER H. High-average power picosecond Yb-doped fiber amplifier [J]. Opt Lett 2001, 26(23): 1849~1851.
- [3] LIU X Q, CHEN Sh H. Ytterbium-doped fiber amplifier [J]. Chinese Journal of Lasers 2001, 28(3): 209~214 (in Chinese).
- [4] PASCHOTAL R, NILSSON A C J. Ytterbium-doped fiber amplifier [J]. IEEE J Q E 1997, 33(7): 1049~1056.
- [5] HANNA D C, PERCIVAL R M, PERRY IR *et al* An ytterbium-doped monomode fiber laser broadly tunable operation from 1.010μm to 1.162μm and three-level operation at 974nm [J]. Journal of Modern Optics 1990, 37(4): 517~525.
- [6] KONG L F, LOU Q H, ZHOU J *et al* Frequency response and transient gain of Yb-doped double-clad fiber amplifier [J]. Acta Photonica Sinica 2004, 33(11): 1286~1289 (in Chinese).
- [7] WANG Y, PO H. Dynamic characteristics of double-clad fiber amplifiers for high power pulse amplification [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology 2001, 21(10): 2262~2270.
- [8] BJARKLEV A. Optical fiber amplifiers: design and system applications [M]. New York: Artech House Inc, 1993: 77.
- [9] XIA G J, DUAN J H, ZHAO Sh H *et al* Performance study on double-cladding Er:Yb co-doped fiber amplifiers with a reflector [J]. Laser Technology 2004, 28(1): 12~19 (in Chinese).

(上接第 49 页)

- [3] YEGNANARAYANAN S, JALALI B. Wavelength-selective true time delay for optical control of phased-array antenna [J]. IEEE Photonics Technology Letters 2000, 12(8): 1049~1051.
- [4] WU Ch Q. The theory of optical waveguide [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 81~84 (in Chinese).
- [5] ZHU Zh, CHEN L Y, LI H *et al* Wavelength stabilization scheme for tunable laser diode based on temperature feedback [J]. Laser Technology, 2005, 29(1): 18~20 (in Chinese).

- [6] WANG H, WANG P, YU H. Optical fiber communications [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004: 186~194 (in Chinese).
- [7] SHI Ch Zh, LIAO Y B, LAI Sh R. Nonlinear properties of chalcogenide fibers and their application to all-optical switching [J]. Laser Journal 2001, 20(5): 1~4 (in Chinese).
- [8] LIM, LIAO Y B, SHI Ch Zh. Dispersion characteristics of single mode As₂S₃ fiber [J]. Acta Photonica Sinica 2000, 29(2): 171~173 (in Chinese).