

文章编号: 1001-3806(2010)06-0757-04

光纤长度优化的高功率铒镱共掺光纤放大器

李楠, 王蓓*, 彭以新, 王国政, 张云琦, 刘亮

(长春理工大学理学院, 长春 130022)

摘要: 为了研究不同增益光纤长度下 1555nm 高功率光纤放大器的输出功率, 采用两级混合结构的方法, 用掺铒光纤放大器和双包层铒镱共掺光纤放大器分别作为 1 级预放大器和 2 级主放大器。掺铒光纤放大器对信号光进行预放大, 并提高放大器的信噪比; 双包层铒镱共掺光纤放大器为主放大器, 其双包层结构可以把更多的多模抽运光耦合进系统。对铒镱共掺光纤的最佳长度做了理论分析和实验验证, 在信号光功率为 10mW、掺铒光纤放大器的抽运功率为 318.58mW、双包层铒镱共掺光纤放大器的抽运功率为 11.71W、增益光纤长度为 14m 时, 输出功率取得了 2.11W 的实验数据。在分析输出信号光谱时发现, L 波段附近有放大自发辐射谱出现, 这是选择的增益光纤过长导致的。结果表明, 在光功率和信号光功率一定时, 光纤放大器有一个最佳的光纤长度。这一结果对研究光纤放大器的高功率输出是有帮助的。

关键词: 光电子学; 高功率光纤放大器; 级联放大; 掺铒光纤放大器; 双包层铒镱共掺光纤放大器

中图分类号: TN722 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.06.014

High power Er³⁺/Yb³⁺ co-doped fiber amplifiers with optimum fiber length

LI Nan, WANG Ji, PENG Yi-xin, WANG Guo-zheng, ZHANG Yun-qi, LIU Liang

(College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to investigate 1555nm high power fiber amplifiers with different gain length, a two-stage hybrid structure was employed, in which an erbium-doped fiber amplifier (EDFA) was used as a pre-amplifier for signal amplification and higher signal-noise ratio and an erbium/ytterbium co-doped double-cladding fiber amplifier (EYCDFA) was used as a master amplifier. The EYCDFA with special double-cladding configuration can couple more pump power into the system. The optimal length of erbium-ytterbium co-doped fiber was investigated experimentally and analyzed theoretically. Under the conditions of 10mW signal power, 318.58mW EDFA pump power, 11.71W EYCDFA pump power and 14m gain length, 2.11W output power was achieved. Amplified spontaneous emission spectrum appeared in L-band because of the over long gain fiber. It shows that there exists an optimal length at certain pump power and signal power, and the result is good for the study of high-power fiber amplifiers.

Key words: optoelectronics; high power fiber amplifier; cascade amplifying; erbium-doped fiber amplifier; erbium/ytterbium co-doped double-cladding fiber amplifier

引言

20 世纪 80 年代掺铒光纤放大器 (erbium-doped fiber amplifier, EDFA) 的研制成功极大地推动了全光通信网络的发展。掺铒光纤放大器以其高增益、低噪声、传输速度快等优良特质一度成为通信系统的核心部件, 特别是其 1550nm 附近的工作波段刚好和光通信的第 3 窗口相吻合而受到了很大的关注。例如在大气

激光通信系统、星间光通信系统、光纤有线电视系统、医疗等领域有着很大的利用潜能。随着大容量、长距离全光通信网络的提出, 通信系统中各种综合业务的多方面演化, 需要承载更多的业务和增值服务。因此, 系统对光纤放大器的输出功率提出了越来越高的要求。传统的单模掺铒光纤放大器由于其纤芯面积很小, 限制了抽运光的有效耦合, 直接导致了它的输出功率只能停留在毫瓦的数量级, 据资料显示, 这种单模的掺铒光纤放大器的极限输出功率为 26dB 左右^[1-3]。作者介绍了一种两级联的混合型铒镱共掺光纤放大器, 即 EDFA 作为 1 级放大器, 双包层铒镱共掺光纤放大器 (erbium/ytterbium co-doped double-cladding fiber amplifier, EYCDFA) 作为 2 级放大器。采用级联结构目的是通过发挥个体的优良特性, 在整体上获得较高的输出功率。

基金项目: 国家八六三高技术研究发展计划资助项目 (2008AA012225); 吉林省科技发展计划资助项目 (20080171)

作者简介: 李楠 (1985-), 女, 硕士研究生, 现主要从事高功率光纤放大器的研究。

* 通讯联系人。jiji_wang@163.com

收稿日期: 2009-12-15; 收到修改稿日期: 2010-04-14

1 EYCDFA 的工作原理

对于掺铒光纤放大器,通过增加铒离子的掺杂浓度可以提升它的输出功率,但是较高的离子浓度又会使离子大量聚集而产生浓度猝灭,反而会降低对抽运光的吸收。双包层铒镱共掺光纤的出现给 1550nm 波段光纤放大器的高功率输出带来了曙光。镱作为敏化剂可以改善掺铒光纤放大器的增益特性。一方面,镱离子的加入可以提升铒离子的掺杂浓度而并不会带来离子猝灭效应。因为镱离子和铒离子在硅基质中有着一样较低的溶解度,并且它们有着相似的离子半径,可以形成离子簇。这些离子和铒离子相互交替,就减少了铒离子与铒离子之间相互作用而发生离子上转换的几率,产生高的离子转化效率。另一方面,镱离子有较大的吸收截面,从 800nm ~ 1100nm 较宽的吸收波段,增加了对抽运波长的选择性^[4-5]。

图 1 是 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺体系的能级图。在 $\text{Er}^{3+}/$

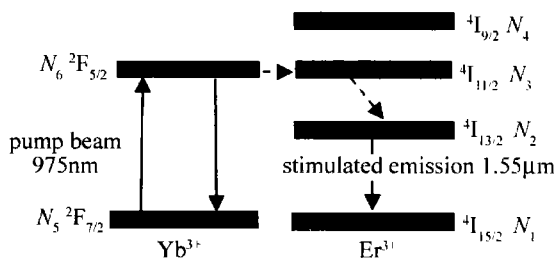


Fig. 1 Energy level diagram for the $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ system

Yb^{3+} 共掺光纤中, Yb^{3+} 吸收抽运光被激发到 $^2\text{F}_{5/2}$ 能级上, Yb^{3+} 将能量传递给 Er^{3+} 后就返回到基态,吸收了能量的 Er^{3+} 通过弛豫迅速地由 $^4\text{I}_{11/2}$ 能级返回到 $^4\text{I}_{13/2}$ 能级上,这就在 $^4\text{I}_{13/2}$ 和 $^4\text{I}_{15/2}$ 能级间形成粒子数反转,这时如果有 1550nm 附近的信号光,由于受激发射可实现信号光的放大^[6]。在此过程中除了受激吸收和受激辐射,还有放大自发辐射 (amplified spontaneous emission, ASE) 产生,它也是系统噪声的主要来源。图中的 N_1, N_2, N_3, N_4 分别是 Er^{3+} 各能级 $^4\text{I}_{15/2}, ^4\text{I}_{13/2}, ^4\text{I}_{11/2}, ^4\text{I}_{9/2}$ 上的粒子数密度, N_5, N_6 是 Yb^{3+} 能级 $^2\text{F}_{7/2}, ^2\text{F}_{5/2}$ 上的粒子数密度。

双包层铒镱共掺光纤放大器其独特的双包层结构,使作者可以选择多模的抽运源给系统提供能量,这就降低了对抽运模式的要求,也提高了对抽运光的耦合效率。信号光在纤芯中传输,抽运光被直接耦合到了横向尺寸和数值孔径比纤芯大得多的内包层中,并在内包层和外包层的界面上来回反射,反复穿越纤芯,激活增益介质从而对信号光进行放大^[7]。

抽运光和信号光沿铒镱共掺光纤传输的功率传输方程为^[8-9]:

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = - \left\{ 2\pi \int_0^b \left[\begin{array}{l} \sigma_{56}(\lambda_p) N_5(r, z) \\ \sigma_{13}(\lambda_p) N_1(r, z) \\ - \sigma_{65}(\lambda_p) N_6(r, z) \end{array} \right] \times \right. \\ \left. |E(r, \lambda_p)|^2 r dr + \alpha(\lambda_p) \right\} P_p(z) \quad (1)$$

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = [g_e(z, \lambda_s) - g_a(z, \lambda_s) - \alpha(\lambda_s)] P_s(z) \quad (2)$$

式中, $P_p(z), P_s(z)$ 分别是抽运光功率和信号光功率, E 表示场分布, r, z 为抽运标系的坐标轴, λ_p, λ_s 分别是抽运光波长和信号光波长, $\sigma_{13}(\lambda), \sigma_{56}(\lambda)$ 和 $\sigma_{65}(\lambda)$ 分别是与波长有关的 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ 的各能级间的吸收和发射截面面积, b 是内包层半径, $\alpha(\lambda)$ 是在有源光纤中与波长有关的背景损耗, $g_e(z, \lambda), g_a(z, \lambda)$ 是受激发射和受激吸收因子, 分别由相应的受激发射和受激吸收截面、 LP_{01} 模密度分布的重叠积分及 $^2\text{F}_{5/2}, ^2\text{F}_{7/2}, ^4\text{I}_{13/2}$ 和 $^4\text{I}_{15/2}$ 能级的粒子数密度所决定, 表达式如下:

$$g_e(z, \nu) = 2\pi\sigma_{65}(\nu) \int_0^b N_6(r, z) |E(r, \nu)|^2 r dr \quad (3)$$

$$g_a(z, \nu) = 2\pi\sigma_{56}(\nu) \int_0^b N_5(r, z) |E(r, \nu)|^2 r dr \quad (4)$$

式中, ν 为光频率。由于抽运光是多模的, 内包层截面积远大于纤芯截面积, 可以假定抽运光在光纤内包层径向服从均匀分布, 纤芯中传输的抽运光功率与总抽运功率的比值近似为纤芯截面积与内包层截面积之比。基模传输的信号光场分布函数采用高斯分布近似。抽运光波长取为 975nm, 激光光波长取为 1555nm。利用 MATLAB 对上述方程进行数值求解。图 2 是在不考虑光纤损耗的情况下模拟出的增益曲线图。

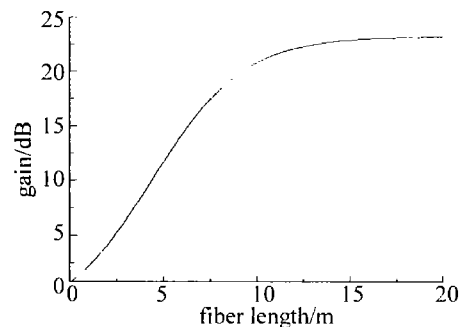


Fig. 2 Signal gain versus fiber length

从图中可以看到, 当光纤长度达到 14m 左右的时候, 增益达到了饱和的状态, 增益不再随光纤长度的增加而增大。这时, 由于抽运功率不足以及传输过程中信号光的损耗, 超过这个长度, 放大器增益将逐渐下降了, 即在一定的抽运光和信号光功率下有一个最佳的光纤长度。根据模拟结果, 在实验过程中, 把 20m 的

光纤优化到了14m,并得到了2.11W的输出功率。

2 高功率铒镱共掺光纤放大器的研究

2.1 实验装置

图3所示的是实验装置的结构图。信号源选择的

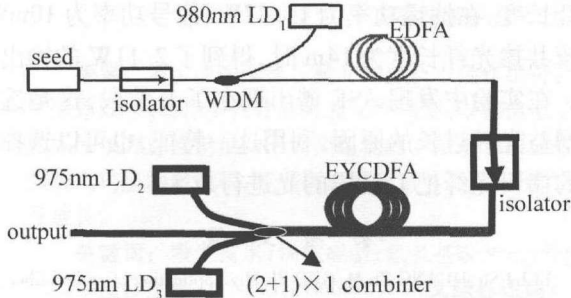


Fig. 3 Schematic of dual-stage EDFA/EYDF fiber amplifier

是JDSU的分布反馈(distributed feedback,DFB)半导体激光器,中心波长1555nm,激光线宽小于2MHz。采用LiNbO₃调制器对信号光进行调制,频率是100kHz~10GHz连续可调。波分复用(wavelength division multiplexing,WDM)器选择的是980/1550WDM,它的作用是将抽运光和信号光有效地耦合进入增益光纤。1级EDFA抽运源半导体激光器LD₁使用的是Lumics公司的LU0980M330单模半导体激光器,最大输出功率为318.58mW,1级放大采用前向抽运的方式。2级EYDF抽运源LD₂和LD₃选择了Lumics公司的LU0975T065多模半导体激光器,2级放大采用后向抽运方式,以便得到较高的输出功率。每个多模抽运源的输出功率都可以达到6W以上,图4显示的是抽运

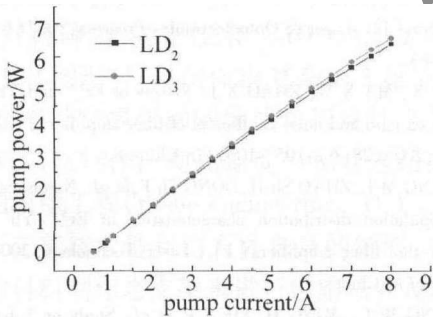


Fig. 4 Output power versus pump current of pump source LD₂ and LD₃

源LD₂和LD₃的输出功率随抽运电流的变化关系,在抽运电流为8A时,LD₂和LD₃的最大输出功率分别为6.55W和6.37W(实验中为了保护抽运源,使用的最大抽运电流是7A)。1级放大器的增益光纤选择的是Nufern公司生产的高性能EDFC-980-HP C-Band掺铒光纤,2级放大器的增益光纤是Nufern公司的SM-EYDF-6/125-HE高效率铒镱共掺双包层光纤。合束器是ITF公司的(2+1)x1多模抽运+信号光合束器(MMC02112A60),它的单臂最大抽运输入功率可以达到7W,传输效率大于98%。

2.2 实验结果及分析

2.2.1 1级掺铒光纤放大器 分别对1级的EDFA和2级EYDF进行了实验研究。图5显示的是EDFA的抽运功率和输出功率的关系。从图中看到,随着

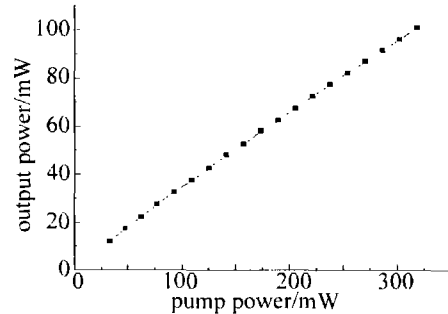


Fig. 5 Output power versus pump power of EDFA

抽运功率的增加,输出功率也随之增加,并呈现良好的线性关系。理论上,在增益光纤长度、信号功率一定时,输出功率随着抽运功率的增加而增大。当抽运功率达到一定值时,输出功率会达到饱和而不会再随着抽运功率的增加而增大。由于选择的单模抽运的最大输出功率仅为318.58mW,在实验中没有看到输出功率饱和的现象。在输入信号为10mW、增益光纤长度为20m、最大抽运功率318.58mW的条件下,得到了101mW的最大输出功率。图6所示的是EDFA的输出信号光谱,光谱中没有很强烈的ASE谱的出现。

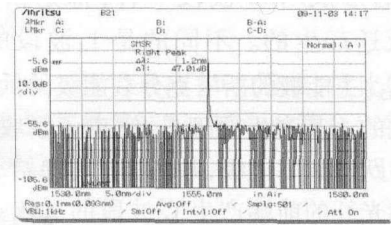


Fig. 6 Output spectrum picture of EDFA output

2.2.2 2级铒镱共掺光纤放大器 实验中在相同抽运条件下,对不同长度的铒镱共掺光纤分别进行了测试。在抽运功率均为9.93W、光纤长度为20m时,得到了1.47W的最大输出功率,而在优化了光纤长度为14m时,得到了1.83W的输出功率。在光纤长度为14m时,增加抽运功率,在抽运功率为11.47W时,最终得到了2.11W的输出功率。图7显示的是优化光纤长度前后的输出功率随抽运功率的变化关系。从图

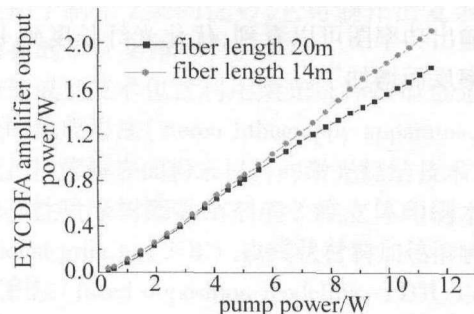


Fig. 7 Output power versus pump power of EYDF

中可以看到,优化长度之后,在同等条件下测量输出功率有了明显的提升,优化之后功率提升了近 30%。可见除了增加抽运功率,优化光纤长度对提高输出功率也有着很大的帮助。

对两种情况下的光谱进行了分析。图 8 和图 9 分

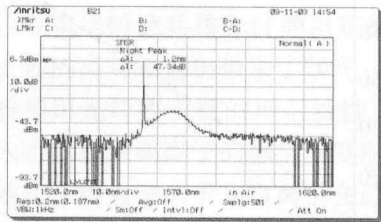


Fig. 8 Output spectrum picture of EYCDFA with 20m fiber length

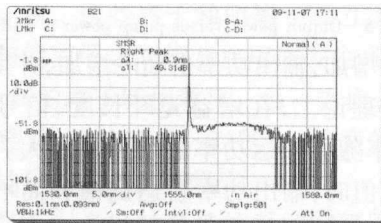


Fig. 9 Output spectrum picture of EYCDFA with 14m fiber length

别是增益光纤长度为 20m 和 14m 时的光谱图,对比两光谱图可以看到,优化长度前后的 ASE 谱有着明显的不同。当光纤长度为 20m 时,如图 8 所示,在 L 波段的 ASE 很强,这是由于光纤长度过长造成的。这种 L 波段 ASE 的形成与 C 波段一样,都是由能级 $^4I_{13/2}$ 至 $^4I_{15/2}$ 的跃迁产生的。不同的是 L 波段的 ASE 是由 $^4I_{13/2}$ 和 $^4I_{15/2}$ 主能级的斯塔克分裂能级的低能级之间的跃迁产生的。其产生原理是:镱离子吸收了 975nm 抽运激光后跃迁到高能级,并将能量传递给了铒离子,在铒镱共掺光纤的前端产生 C 波段的 ASE,产生的 C 波段的 ASE 再被后端铒镱共掺光纤中的铒离子吸收,作为 2 次抽运源从而形成 L 波段的 ASE 谱^[10]。优化光纤长度到 14m 之后,C 波段的放大自发辐射被再次吸收,但光纤长度还不足以形成很强的 L 波段放大自发辐射,因此,由图 9 可见,光纤长度减少,L 波段放大自发辐射反而下降。由图 2 的数值分析曲线也可以看到,对于一定的抽运功率和信号功率,光纤放大器有一个最佳的光纤长度^[11],光纤长度大于最佳长度,由于光纤本身的损耗会使信号光的输出功率反而下降,从图 7 的输出功率图可以看到,优化光纤长度到 14m 后输出功率反而增加了。

3 结 论

实验中主要采用了掺铒光纤光放大器和铒镱共掺光纤放大器的混合结构,通过发挥两者各自的良好特性,在整体上提高光纤放大器的输出功率,并通过优化光纤长度,在抽运功率为 11.47W、信号功率为 10mW、铒镱共掺光纤长度为 14m 时,得到了 2.11W 的输出功率。在实验中发现 ASE 谱出现在了 L 波段,这是选择的增益光纤过长的原因,利用这一特征,也可以选择较长的掺铒光纤把 L 波段的光进行放大。

参 考 文 献

- [1] LEI J Sh, HUANG Zh M, GUO Zh H. Application of optical fiber amplifier for satellite laser communication[J]. Laser Technology, 2001, 25(4): 378-381 (in Chinese).
- [2] TANG W G. Study of the double cladding Er^{3+} - Yb^{3+} co-doped fiber amplifier with high power[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2005:3-4 (in Chinese).
- [3] LU Z G, LIU J R, SUN F G, et al. A hybrid fiber amplifier with 36.9dBm output power and 70dB gain[J]. Opt Commun, 2005, 25(6): 352-357.
- [4] LING L, ZHANG Sh, LONG H, et al. Theory model forward amplified spontaneous emission in Er^{3+}/Yb^{3+} co-doped double clad fiber amplifiers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(5): 734-738 (in Chinese).
- [5] KE X P. Study of the properties of Er^{3+}/Yb^{3+} co-doped fiber amplifier[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2006, 28(7): 109-111 (in Chinese).
- [6] WANG H, LI Y G, CHEN Sh P, et al. Double-clad Er^{3+}/Yb^{3+} co-doped fiber amplifier[J]. Optoelectronic Technology, 2005, 25(4): 234-238 (in Chinese).
- [7] ZHANG F P, LOU Q H, ZHOU J, et al. High power double-clad fiber amplifiers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007(1): 38-44 (in Chinese).
- [8] WU Y X, MA X M, ZHAO X J. Effects of Er^{3+} and Yb^{3+} concentration on gain and noise coefficient of fiber amplifier[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(6): 1057-1061 (in Chinese).
- [9] ZHUANG M L, ZHAO Sh H, DONG Sh F, et al. Numerical analysis of the population distribution characteristics in Er^{3+}/Yb^{3+} co-doped double-clad fiber amplifiers[J]. Laser Technology, 2004, 28(4): 379-382 (in Chinese).
- [10] HUANG W C, MING H, XIE J P, et al. Study on L-band erbium-doped optic fiber super-fluorescent light source and amplifier[J]. Opto-electronic Engineering, 2002, 29(6): 50-52 (in Chinese).
- [11] ELDAD Y, AMOS H. Efficiency optimization of high-power, Er^{3+} - Yb^{3+} -codoped fiber amplifiers for wavelength-division-multiplexing applications[J]. J O S A, 2003, B20(6): 1189-1197.