

文章编号: 1001-3806(2006)01-0082-04

Er³⁺/Yb³⁺ 共掺磷酸盐玻璃光纤放大器的增益综述

车继波¹, 杨亚培^{1*}, 刘爽¹, 官周国², 薛辉¹

(1. 电子科技大学 光电信息学院, 成都 610054; 2. 西南物理技术研究所, 成都 610041)

摘要: 主要从磷酸盐玻璃光纤的离子掺杂浓度、量子转换效率、信号波长与功率、抽运波长与功率以及光纤长度等方面概述了 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺磷酸盐玻璃光纤放大器的增益。并简要介绍了国外在该方面的研究进展。

关键词: 光纤光学; 钇镱共掺; 磷酸盐玻璃; 增益; 光纤放大器

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Gain summarization of Er³⁺/Yb³⁺ co-doped phosphate glass fiber amplifiers

CHE Jibo¹, YANG Yapei¹, LIU Shuang¹, GUAN Zhou-guo², XUE Hui¹

(1. Department of Optoelectronic Information, Electronic Science and Technology University, Chengdu 610054, China; 2. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract The gain of Er³⁺/Yb³⁺ co-doped phosphate glass fiber amplifiers is discussed from the ion doped concentration of the phosphate glass fiber, quantum conversion efficiency (QCE), signal wavelength and power, pump wavelength and power, and fiber length. The development of oversea is also introduced.

Key words fiber optics; Er/Yb co-doped phosphate glass gain; fiber amplifier

引 言

近年来, 由于高速数据传输的需求越来越高, 要求光纤通信中对光进行全光中继。由于传统中继放大的掺铒光纤放大器 (erbium doped fiber amplifier, EDFA) 体积大, 光纤长度长 (达几十米) 以及不易于集成等, 因而体积小、长度短、价格低的磷酸盐玻璃光纤放大器引起了广大科研工作者的兴趣。与硅酸盐玻璃比较,

磷酸盐玻璃具有很高的溶解度, 因而可对其进行高浓度掺杂以便获得较高的增益, 仅几厘米长的钇镱共掺磷酸盐玻璃光纤放大器就足以补偿光信号在传输中的损耗, 因而备受青睐^[1, 2]。

1 原理分析

传统的 EDFA 由于 Er³⁺ 存在多个能级, 因此在抽运功率下存在上变换, 其掺杂浓度越高, 其效应越明显。此外还存在浓度抑制以及 Er 离子对, 对信号光的增益影响很大^[1]。而单独的掺 Yb 光纤放大器除了有较宽的增益带宽外, 还具有较高的能量输出以及良好的能量转换效率。掺 Yb 光纤与传统的 EDFA 相比不

同的是, 不会出现受激吸收以及由离子间能量转换所引起的浓度抑制。在较短的光纤内通过高浓度掺杂便可得到高增益。与 Er³⁺ 相比, Yb³⁺ 只存在低能级²F_{7/2} 与激发态能级²F_{5/2}, 它们分别有 4 个和 3 个子能级, 而且 Yb³⁺ 的吸收谱和发射谱主要取决于玻璃光纤的物质组成。在磷酸盐玻璃中, Yb³⁺ 的荧光寿命通常约为 1.5ms。此外, 在早期的钇镱共掺磷酸盐玻璃光纤放大器报道中, Yb³⁺ 的掺杂浓度对其荧光寿命影响很小, 在 975nm 的抽运功率条件下具有一强烈吸收峰。原则上在高浓度的掺 Yb³⁺ 条件下, 也存在上变换, 即相邻两个 Yb³⁺ 之间进行能量转换发射一个绿光波长的光子, 但由于此效应很微弱, 对增益的影响很小, 因此一般不考虑。抽运波长和信号的受激态吸收, 或由于离子与离子之间能量转换引起的浓度抑制在 EDFA 中比较明显, 但由于 Yb³⁺ 只有两个能级, 因此, 在钇镱共掺磷酸盐玻璃光纤放大器中一般可以忽略^[3~6]。

为了提高单位光纤长度的增益, 可通过 Yb³⁺ 的高浓度掺杂来起激励作用, 可在很短的光纤上得到较大的增益。假定 Yb³⁺ 浓度足够高, 则在 Yb³⁺ 系统中由于能量的快速迁移, Yb³⁺ 均处于激发态, 受激 Yb³⁺ (施主) 将能量转移至相邻的 Er³⁺ (受主), 由于 Er³⁺ 处于抽运能级⁴I_{1/2}, 且在磷酸盐玻璃中的⁴I_{1/2}能级的寿命很短, 因此快速跃迁至亚稳态⁴I_{3/2}, 阻止了能量的后向传输 (能量从 Er³⁺ 转换到 Yb³⁺), 当信号光通过

作者简介: 车继波 (1975-), 男, 硕士研究生, 现主要从事光电变换与光纤通信方面的研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: ypyang@uestc.edu.cn

收稿日期: 2004-12-16 收到修改稿日期: 2005-03-10

光纤时,产生光放大^[6]。而在所有的玻璃材料中,磷酸盐玻璃是一种具有较高溶解度的材料(掺杂浓度可高达 $C_{\text{Er}} = 1.2 \times 10^{27} \text{ m}^{-3}$),而且具有较高的增益和良好的化学稳定性,因而可以进行高浓度的离子掺杂。通常 Yb 的掺杂浓度为 Er 浓度的 10 倍以上,借助高浓度的 Yb^{3+} 掺杂,可以有效地隔开相邻的 Er^{3+} ,从而使 Er^{3+} 形成离子对的机率大大减小,极大地降低了上变换,同时降低了浓度抑制,有利于提高增益^[4]。理论分析磷酸盐玻璃光纤放大器的增益可达 6 dB/cm ,目前较好的可达 3 dB/cm 左右^[7-9]。

2 增益分析

2.1 离子掺杂浓度对增益的影响

传统的石英 EDFA 中 Er 离子浓度掺杂太高易引起浓度抑制,浓度抑制主要受限于受主材料;另一方面形成感应 Er 离子对,从而产生自发放大辐射,使得其增益减小。而且硅酸盐玻璃中 Er 的 $^4\text{I}_{3/2}$ 能级的上变换系数比相应的磷酸盐玻璃中的高一个量级^[4]。

对于掺 Yb 的磷酸盐玻璃光纤,由于其较低的后向能量传输率以及较低积累能量传输率,因此优于其它类型的玻璃光纤。而且由于 Yb 发射谱 $^2\text{F}_{5/2} \sim ^2\text{F}_{7/2}$ 与 Er 的吸收谱 $^4\text{I}_{5/2} \sim ^4\text{I}_{11/2}$ 之间有较大的重叠,因而 Yb 与 Er 之间可进行有效的能量转换(转换效率高达到 95%)。Yb³⁺ 不仅具有较大的吸收横截面,而且吸收带也较宽(800nm ~ 1100nm),因而掺了 Yb 的玻璃光纤可以拓宽抽运波长范围^[3,7,10]。

但在掺 Yb³⁺ 玻璃中增加 Er^{3+} 浓度对上变换系数影响较小。在磷酸盐玻璃中,假定上变换系数为 $1.2 \times 10^{-24} \text{ m}^3/\text{s}$ 则 Er^{3+} 的掺杂浓度可高达 $C_{\text{Er}} = 4.0 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ 。如图 1 所示,假定光纤长度为 10cm,抽运功

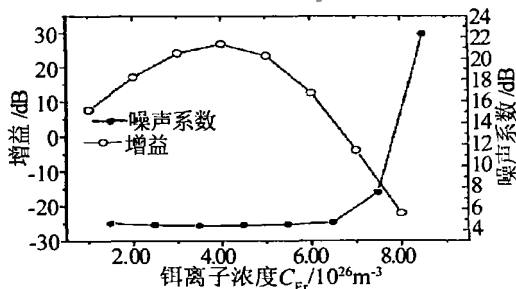


图 1 钇离子掺杂浓度与增益和噪声的关系

率为 200mW,信号波长为 1550nm,输入功率为 -30dBm,光纤中相应的上变换系数为 $1.1 \times 10^{-24} \text{ m}^3/\text{s}$ 。从图中可以看出,随着 Er^{3+} 浓度的增加,小信号增益可以达到最大值 27dB 左右,其浓度为 $C_{\text{Er}} = 4.0 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$,但随着掺杂浓度的进一步增加,其增益反而下降。而噪声系数 NF 在低掺杂时变化趋于稳定,但超过 $C_{\text{Er}} = 6.5 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ 时急速上长。因此在磷酸盐

玻璃中, Er^{3+} 的掺杂浓度受一定限制。此外还可以看出,在小信号低掺杂浓度时,增益较高,但当超过一最佳值时,即掺杂浓度太高时,增益反而下降,这主要是由于上转换作用所制^[7]。

2.2 量子转换效率与增益之间的关系

为了估算 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐阶跃玻璃光纤在不同参数条件下的稳定度,定义量子转换效率(QCE)为^[10]:

$$\text{QCE} = \frac{P_s(z=l) - P_{s0}}{h\nu_s} \frac{h\nu_p}{P_{p0}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, P_s 为信号光功率, P_{s0} 为信号输入功率, ν_s 为信号光频率, P_{p0} 为抽运光输入功率。而增益 G 与 QCE 的关系可表示如下:

$$G = 1 + \text{QCE} \nu_p P_{p0} / \nu_p P_{s0} \quad (2)$$

式中, ν_p 为抽运光频率,由上式可以看出,量子效率越高则可以得到更大的增益,因而 Er -Yb 共掺的阶跃光纤一般设计有最大的增益和最大的 QCE。如图 2 所示, QCE 还随抽运功率增加而增大,但当 NA (数值孔

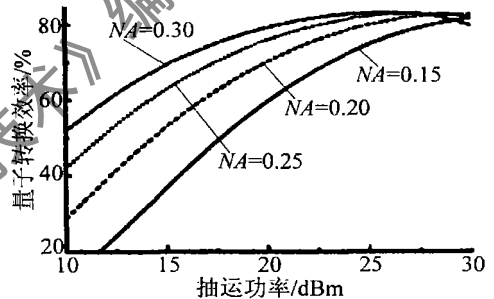


图 2 抽运功率(不同 NA 条件下)与 QCE 的关系

径)一定时存在一最佳抽运功率,超过此功率限制,则 QCE 反而减小。理论上可以得出,在抽运功率一定条件下,增加 NA 可相应提高增益和 QCE,即在 $NA = 0.15$ 时,58% 的抽运光可以转换成信号光,而当 $NA = 0.3$ 时,转换效率可达 78.5%^[10]。

图 3 表明 QCE 与不同纤芯半径有关。只有抽运功率较小时,不同掺杂浓度将导致 QCE 增长速度不同。当达到一定值时,不同掺杂方式的 QCE 几乎一致。由于 $^4\text{I}_{3/2}$ 浓度减小, $^4\text{I}_{5/2}$ 浓度增加,相应的则 G 减小, QCE 取得最佳值^[10]。

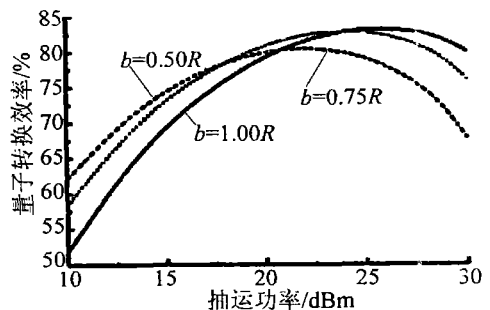


图 3 抽运功率(不同纤芯半径条件下)与 QCE 的关系
此外,在抽运功率较高情况时 ($\geq 500\text{mW}$),增大

QCE和增益,则必须增大截止波长,降低数值孔径,如图4所示。当 $NA > 0.20$ 时(抽运功率较大),增益和

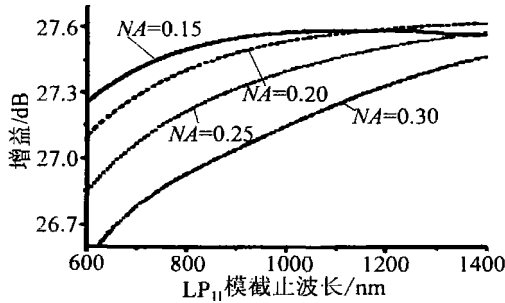


图4 截止波长(不同NA条件下)与增益的关系

QCE的降低主要归因于 $^2F_{5/2}$ 能级浓度的限制以及亚稳态浓度的降低。在截止波长 λ_c 和抽运波长 λ_p 情况下,抽运功率假定以 LP_{01} 模传输,则信号波长和输入信号功率分别为 $\lambda_s = 1530\text{nm}$ 和 $P_{s0} = 1\text{mW}$,则QCE与波长有关。相应的纤芯半径可以为公式 $R = 2.0405\lambda_c / (2\pi NA)$ 来计算。当截止波长从1400nm改变到600nm时,最佳光纤长度增加,则数值孔径也随之增大^[10-11]。

当抽运功率较高、截止波长较长、NA较低时可获得较大的QCE,由图5所示,随着截止波长的减小,最佳的光纤长度随之增大,因此QCE随 λ_c 增大而提高,随NA的增大而减小。当 $\lambda_c = 1400\text{nm}$, $NA = 0.20$ 时,QCE最高可达82.9%^[10]。

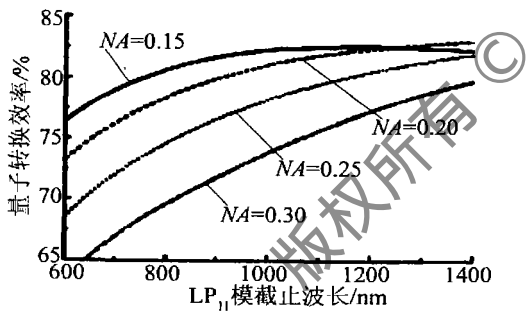


图5 截止波长(不同NA条件下)与QCE的关系

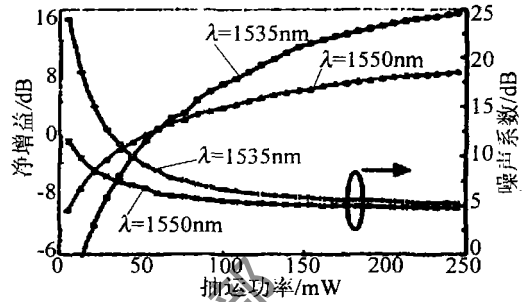
2.3 抽运功率、信号波长及功率、光纤长度对增益的影响

研究表明,抽运波长越长,有必要增加光纤长度^[6]。因此当用980nm波长的抽运源时,光纤长度一般是几厘米,而传统的EDFA的光纤长度通常为米级。此外,由于最佳的掺Yb浓度与抽运波长和光纤长度有关,因此,Yb浓度受限于一定范围,不同光纤长度通常需要不同的抽运波长^[8]。

使用两层预制棒技术,假定制造出来的共掺磷酸盐光纤的纤芯半径为 $5\mu\text{m}$,数值孔径 $NA = 0.21$,用 $1.5\mu\text{m}$ 的光信号时输入输出的耦合系数为1dB,纤芯中 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 均匀掺杂,在低抽运功率下, Er^{3+} 的寿命约为 6.9ms ,用980nm波长的光作抽运源,则1535nm

信号光的小信号增益和噪声系数与光的功率足够大,但过大又易导致残留低效,因而使用两级抽运(前向和后向)方法可提高抽运功率^[1]。假定在测试中,输入信号功率为 -30dBm ,则最大抽运功率可高达 224mW ,在此功率条件下,3.6cm的光纤便可获得18dB的内增益,平均达 $4.4\text{dB}/\text{cm}$, 224mW 处相应的噪声系数(3.6cm光纤)为 3.8dB ^[2-8]。

图6中的增益曲线表明,随着抽运功率的进一步



增加,增益将缓慢上长。此外还可从图中看出,当光纤长度增加时,其增益曲线上升相对较快。因而通过增加抽运功率可进一步提高增益。而噪声系数将随之缓慢增长。此外,增益饱和效应将导致净增益随信号功率增大而减小,由于吸收横截面和发射横截面的关系,不同信号波长的光信号的增益饱和度不一样,从理论上可以得出,信号波长越长,则增益越易趋于饱和。因为光纤长度变长后,吸收增大。因此存在一最佳光纤长度,即最大增益与光纤长度和抽运功率有关。如图7所示,在不同抽运功率条件下不同的光纤长度得到的增益不同,特别指出的是,对于小信号抽运功率,增益有可能减小^[8]。

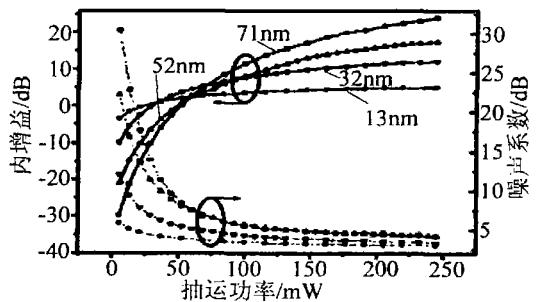


图7 抽运功率(不同光纤长度条件下)与小信号增益的关系

3 国外研制最新发展

由于 Er/Yb 共掺磷酸盐玻璃光纤放大器的单位长度增益很高,而且其体积较小、成本低廉、易于集成,因而自上世纪80年代以来,国外有多家公司从事该方面的研究。在90年代以前,各研究主要集中在各种掺杂情况下玻璃属性的研究。其后,随着EDFA及激光玻璃理论的完善,在EDFA的理论基础上相继用各种掺杂材料进行高浓度掺杂,尽量减小了放大光纤的长

度。例如由 Kigre 公司制造的“MM-2” Er-Yb 共掺磷酸盐玻璃光纤实现了 10dB 的增益 (抽运波长 975nm, 光纤长度 2.2m)。此外, 在同一光纤上还实现了 26dB 的增益 (抽运波长 1480nm, 光纤长度 8.8cm)。特别指出的是, 该光纤传输的 1.54 μm 的模场与标准的通信传输光纤可实现完全匹配, 因而适用于替换传统的

EDFA, 实现光信号的全光中继^[12]。进入本世纪后, 利用以前的理论基础, 进一步制造出了高功率、可调谐的光纤激光器; 采用二极管阵列激光器对 Er-Yb 共掺磷酸盐玻璃光纤进行抽运也成为可能; 应用 MOPA (主振功放结构) 生产高功率、大芯径的 Er-Yb 共掺光纤也得到了实现^[13]。其研制情况如表 1 所示。

表 1 国外 Er-Yb 共掺磷酸盐玻璃光纤放大器研究情况

研究机构	研究成果	性能参数	研究机构
80年代中期	高性能掺钕氟化物玻璃和 Er:YAG	未见报道	南加州大学
1997年	高浓度掺钕磷酸盐激光介质玻璃	未见报道	亚利桑那大学光学中心
1999年	钕镱共掺磷酸盐玻璃光纤	单位长度增益 3dB/cm	Kigre公司
2001年	钕镱共掺磷酸盐玻璃光纤	光纤长度 3.6cm, 信号增益 18dB	亚利桑那大学光学中心
2001年	MM-2 钕镱共掺磷酸盐玻璃光纤	光纤长度 4cm, 信号增益 20dB	Kigre公司
2003年	高功率可调谐钕镱共掺光纤激光器	980nm 抽运, 输出可调谐范围 1533~1600nm, 输出功率 6 W	南安普敦大学
2004年	高功率单频窄带钕镱共掺磷酸盐玻璃光纤	输出信号波长 1552nm, 芯径 30 μm , 输出功率 83W	美国高级计划研究署

4 结 论

由于高浓度掺杂, 通过厘米级长的光纤便可实现光的高增益放大。从以上讨论可以看出, Er-Yb 共掺磷酸盐玻璃光纤放大器的理论值与目前的实践仍有一定的差距, 因此, 通过优化掺杂浓度, 尽量提高量子转换效率, 减小上变换, 用合适的抽运功率与波长手段可进一步提高放大器的增益, 为将来的全光通信提供了新的方法^[14]。

参 考 文 献

- [1] JIANG Ch HU W Sh ZENG Q J Numerical analysis of concentration quenching model of Er^{3+} -doped phosphate fiber amplifier [J]. IEEE J Q E, 2003, 39(10): 1266~1271.
- [2] CHEN DN, DEURVIRE E. Noise performance evaluation of distributed erbium-doped fiber amplifiers with bidirectional pumping at 1.48 μm [J]. IEEE Photonics Technology Letters 1992, 4(1): 52~55
- [3] MACK W D, VALLEY G C, HOLCOMB D P *et al* Measurement and modeling of emission spectra of Er-Yb codoped fibers [J]. Lasers and Electro-Optics Society, 2001, 2(12~13): 895~896
- [4] NUSNSKY I Analysis of the effect of up conversion on signal amplification in erbium-doped fiber amplifiers (EDFAs) [J]. IEEE J Q E, 2003, 39(4): 548~554.
- [5] BLIKT P, NILSSON J, CARLNAST *et al* Concentration-dependent up conversion in Er^{3+} -doped fiber amplifiers: experiments and modeling [J]. IEEE Transactions on Photonics Technology Letters 1991, 3

- (11): 996~998
- [6] NILSSON J, SCHUELER P, JASKORZYNska B. Modeling and optimization of short Yb^{3+} sensitized Er^{3+} -doped fiber amplifiers [J]. IEEE Photonics Technology Letters 1994, 6(3): 383~385
- [7] PASCHOTTA R, NILSSON J, TROPPER A C *et al* Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. IEEE J Q E, 1997, 33(7): 1049~1056
- [8] HWANG B Ch, JIANG Sh B, LUO T *et al* Performance of high concentration Er^{3+} -doped phosphate fiber amplifiers [J]. IEEE Photonics Technology Letters 2001, 13(3): 657~659
- [9] ZHUANG M L, ZHAO Sh H, DONG Sh F *et al* Numerical analysis of the population distribution characteristics in $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped double-clad fiber amplifiers [J]. Laser Technology, 2004, 28(4): 379~382 (in Chinese).
- [10] KARASEK M. Optimum design of $\text{Er}^{3+}-\text{Yb}^{3+}$ codoped fibers for large signal high pump power applications [J]. IEEE J Q E, 1997, 33(10): 1699~1705.
- [11] WANG Y, PO H. Dynamic characteristics of double-clad fiber amplifiers for high-power pulse amplification [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(10): 2262~2270
- [12] MYERS M J High gain short length phosphate glass erbium-doped fiber amplifier material [J]. Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2001, 3 1~3
- [13] ALEGRIA C, JEONG Y, CODEMARD C *et al* 83W single-frequency narrow-line-width MOPA using large core erbium-ytterbium codoped fiber [J]. IEEE Photonics Technology Letters 2004, 16(8): 1825~1827
- [14] XIA G J, DUAN JH, ZHAO Sh H *et al* Performance study on double cladding Er-Yb codoped fiber amplifiers with a reflector [J]. Laser Technology, 2004, 28(1): 12~19 (in Chinese).