

文章编号: 1001-3806(2005)05-0535-03

高浓度掺铒 镱共掺硅酸盐玻璃丝的净增益测量

李成仁^{1,2}, 宋昌烈², 李淑凤², 宋琦², 李建勇²

(1. 辽宁师范大学 物理系, 大连 116029; 2. 大连理工大学 物理系, 大连 116024)

摘要: 室温下测量了两种高浓度掺杂硅酸盐玻璃丝的净增益随抽运功率、玻璃丝长度的特性曲线, 在 100mW 功率抽运下, 掺铒质量浓度为 $0.19\text{g}/\text{cm}^3$ 的硅酸盐玻璃丝的单位长度净增益为 $1.96\text{dB}/\text{cm}$, 阈值功率为 36mW , 最佳长度为 4.5cm ; 掺镱质量浓度为 $1.1\text{g}/\text{cm}^3$ 、掺铒质量浓度为 $0.12\text{g}/\text{cm}^3$ 的镱共掺硅酸盐玻璃丝, 单位长度净增益为 $3.07\text{dB}/\text{cm}$, 阈值功率为 28mW , 最佳长度为 2.5cm 。结果表明, 在厘米长度量级上可获得近 10dB 的净增益。镱共掺硅酸盐玻璃丝的净增益随抽运功率增长未出现饱和趋势, 说明镱作为敏化剂可以改善掺铒光纤放大器的增益特性。

关键词: 导波与光纤光学; 光纤放大器; 高浓度掺杂; 掺铒/镱共掺硅酸盐玻璃丝; 抽运功率

中图分类号: TN25 文献标识码: A

Measurement for net gain of Er-doped/Yb:Er-codoped silicate glass with high-concentrations

LI Cheng-ren^{1,2}, SONG Chang-lie², LI Shu-feng², SONG Qi², LI Jian-yong²

(1. Department of Physics, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China; 2. Department of Physics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract The relationship between the net gain of two kinds of glass with high dopant concentrations and pumping power thread lengths is measured at room temperature. The results show that under 100mW pumping power, the net gain of Er-doped glass thread with $0.19\text{g}/\text{cm}^3$ concentration is $1.96\text{dB}/\text{cm}$, its threshold pumping power is 36mW and optimum length is 4.5cm . The net gain of Yb:Er-codoped glass thread with $1.1\text{g}/\text{cm}^3$ Yb concentration and $0.12\text{g}/\text{cm}^3$ Er concentration is $3.07\text{dB}/\text{cm}$, its threshold pumping power is 28mW and optimum length is 2.5cm . That is, 10dB total net gain can be obtained within 10cm length. The net gain of Yb:Er-codoped glass threads don't take on the trend of saturation when pumping power becomes stronger. It means that more sensitive ytterbium improves the net gain characteristics of the Er-doped fiber amplifiers.

Key words guided wave and fiber optics; fiber amplifier; high-concentration dopant; Er-doped/Yb:Er-codoped silicate glass thread; pumping power

引 言

1986年, 英国 Southampton 大学 MEARS 等人^[1]研制成功掺铒光纤放大器 (erbium-doped fiber amplifier, EDFA), 采用 Ar 离子激光器作为抽运源, 使 3m 长的掺铒光纤放大器在 $1.54\mu\text{m}$ 处获得 3.28dB 的增益, 极大地推动了全光通信网络 (all optical net, AON) 的发展。掺铒光纤放大器与通信光纤结构基本相同, 两者的熔接损耗小, 整体增益高, 同时其频带宽、抗干扰性好、噪声低等优良特性, 受到商家的青睐。然而, 现在

应用的掺铒光纤放大器掺铒质量浓度较低, 长度在百米左右, 不利于小型化。人们继续探索更高性能的掺铒光纤放大器, 力争在较短的长度内获得高的信号增益, 也为掺铒光纤激光器研究打下基础。作者用自制的高掺杂质量浓度的掺铒、镱共掺硅酸盐体块玻璃^[2,3]均匀拉成 $\varnothing 9.4\mu\text{m}$ 的玻璃丝, 测量了它们的净增益特性。

1 玻璃丝净增益测量系统

掺铒/镱共掺硅酸盐玻璃丝净增益测量系统如图 1 所示。抽运源为带尾纤的半导体激光器, 输出波长为 980nm 、额定输出功率为 160mW , 其电源为直流工作形式。信号源为带尾纤的半导体二极管 (LED), 中心波长为 1530nm 、额定功率为 10mW 。LED 驱动电源既可以工作在直流状态, 也可以工作在方波形式。抽运光和信号光经由波分复用器 (WDM) 合路后, 由一根单模光纤输出, 抽运功率下降到 149mW 。将光纤与

项目基金: 国家自然科学基金资助项目 (69889701); 辽宁省科技厅资助项目 (20022110); 辽宁省教育厅资助项目 (202123198); 大连市科技局资助项目 (2002198)

作者简介: 李成仁 (1962-), 男, 博士, 副教授, 主要从事集成光学和非线性光学研究。

E-mail: lshdg@sina.com.cn

收稿日期: 2004-07-29; 收到修改稿日期: 2004-10-28

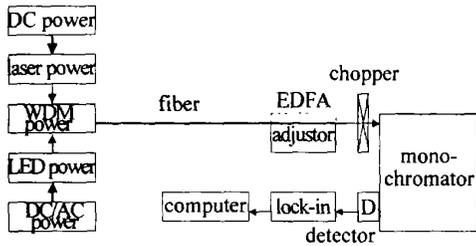


Fig 1 Measuring system of net gain of Er-doped silicate glass threads

掺铒或掺钕共掺硅酸盐玻璃丝粘接,在五维精密调节架辅助下,光信号经光学斩波器(425Hz)照射到单色仪的入射狭缝。单色仪的出射狭缝耦合着半导体致冷的InGaAs近红外探测器,其输出的电信号由锁相放大器放大,并由计算机进行数据处理和波形显示。测量在室温下进行。

图2中下部谱线是WDM输出光纤尚未与硅酸盐

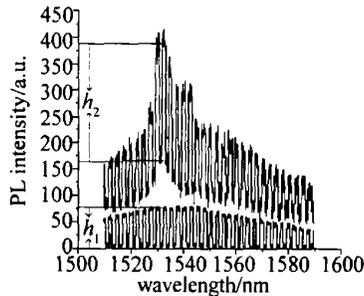


Fig 2 Synthetic figure of LED spectrum and signal spectrum amplified by silicate glass thread

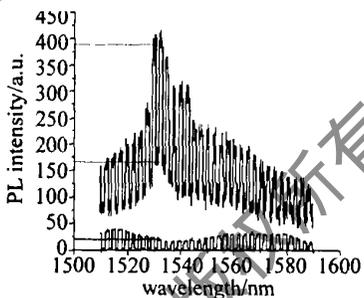


Fig 3 Synthetic figure of absorption spectrum and amplified signal spectrum of silicate glass thread

玻璃丝粘接、LED工作在交流方波形式时自身的输出谱;图3中下部谱线是WDM输出光纤已与掺铒硅酸盐玻璃丝粘接、LED工作在方波交流形式但激光器还未工作时的玻璃丝的输出谱,即硅酸盐玻璃丝在1.53μm波段处的交流吸收谱;图2和图3的上部谱线是光纤与玻璃丝粘接后、LED输出不变且抽运激光器工作时玻璃丝的输出谱。可以看出,图2和图3的上部谱线的幅度(峰峰值)大于下部谱线的幅度,即光信号被放大。

设图2下部LED输出谱线的幅度为 h_1 ,上部光信号被放大谱线的幅度为 h_2 。则对外部输入的LED信号,硅酸盐玻璃丝的净增益 G_{n1} 为:

$$G_{n1} = 10 \lg(h_2/h_1) \quad (1)$$

光纤与硅酸盐玻璃丝粘接时,存在着耦合损耗 G_c 。取长为7cm、掺铒质量浓度为 0.19 g/cm^3 硅酸盐玻璃丝,关闭抽运激光器的电源,逐渐截短玻璃丝的长度(最短长度为0.5cm),测量LED信号光经掺铒硅酸盐玻璃丝后的吸收谱强度,见图4。经曲线拟合,并外延

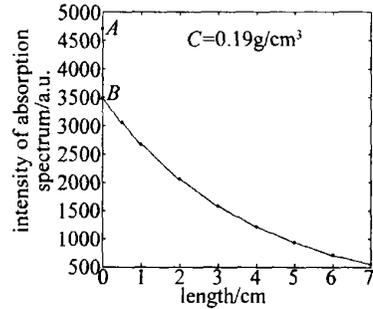


Fig 4 Intensity of absorption spectra vs length

到掺铒玻璃丝近似为0的长度,此时光强为3466(B点)。而信号光实际光强(光纤未与玻璃丝相连时)为4697(A点)。可算出光纤与掺铒硅酸盐玻璃丝的耦合损耗为: $G_c = 10 \lg(3466/4697) = -1.32 \text{ dB}$,则硅酸盐玻璃丝自身实际的放大净增益为:

$$G_n = G_{n1} + G_c \quad (2)$$

从图2-图3中还可以看到,信号光由玻璃丝放大后,输出谱线强度的最低值不为0。这是由于铒离子放大的自发辐射原因所致。对光波导放大器件的应用而言,放大的自发辐射影响了信号调制深度的进一步提高,使信号的抗干扰能力减弱。如何将其减弱到最低程度,是今后研究工作的主要内容之一。

2 掺铒硅酸盐玻璃丝的增益特性

图5是长度为4cm、掺铒质量浓度分别为 0.19 g/cm^3 、 0.095 g/cm^3 、 0.048 g/cm^3 的掺铒硅酸盐玻璃丝的净增益(G_n ,下同)随抽运功率变化的曲线。可以看出,抽

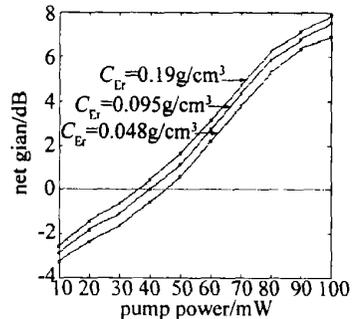


Fig 5 Net gain of Er-doped glass thread vs pump power

运功率小于80mW,净增益随抽运功率近似线性增长;抽运功率大于80mW,增益曲线有饱和的趋势。主要原因是:抽运功率越高,激发态上的粒子数密度就越大,合作上转换、激发态吸收^[4,5]等效应的影响也就越明显,导致增益曲线的增幅变缓。掺铒质量浓度越高,阈值抽运功率越低。在100mW功率抽运下,掺铒质

量浓度为 0.19g/cm^3 的掺钕硅酸盐玻璃丝净增益为 7.83dB , 单位长度净增益为 1.96dB/cm , 阈值抽运功率为 36mW 。

取长 7cm 掺钕硅酸盐玻璃丝, 保持抽运功率 100mW 不变, 逐渐截短玻璃丝的长度, 测得不同掺钕质量浓度的硅酸盐玻璃丝净增益随玻璃丝长度变化的曲线, 如图 6 所示。掺钕质量浓度高, 则最佳长度短。掺钕质量浓度为 0.19g/cm^3 的硅酸盐玻璃丝的最佳长度约为 4.5cm 。

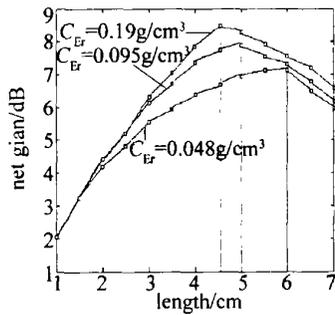


Fig 6 Net gain of Er-doped glass threath vs length

3 镱钕共掺杂硅酸盐玻璃丝的增益特性

由于同为稀土元素镱对 980nm 波长光的吸收截面为 $2 \times 10^{-20}\text{cm}^2$, 近似为钕对 980nm 波长光吸收截面 $2.58 \times 10^{-21}\text{cm}^2$ 的 8 倍^[6], Yb^{3+} 离子 $^2\text{F}_{7/2} \rightarrow ^2\text{F}_{5/2}$ 能级差与 Er^{3+} 离子 $^4\text{I}_{5/2} \rightarrow ^4\text{I}_{3/2}$ 能级差近似相等。在镱钕共掺系统中, 镱吸收大部分抽运功率, 通过能量共振转移, 将抽运能量从镱离子转移到钕离子, 为钕离子提供间接的、高效的抽运方式^[7,8], 增强了钕的光致发光强度。同时, 镱本身的浓度猝灭效应很弱, 容易实现高质量浓度掺杂。更重要的是, 镱的掺入, 能够较好地抑制钕离子团簇的形成, 减少钕浓度猝灭现象。文献[3]中已表明, 在所制做硅酸盐玻璃的工艺中, 镱钕共掺硅酸盐样品的镱钕最佳掺杂比为 9:1。

图 7 是长度为 2cm 、掺镱质量浓度为 1.1g/cm^3 、掺钕质量浓度为 0.12g/cm^3 的镱钕共掺硅酸盐玻璃丝的净增益随抽运功率变化的关系。阈值抽运功率为 28mW ,

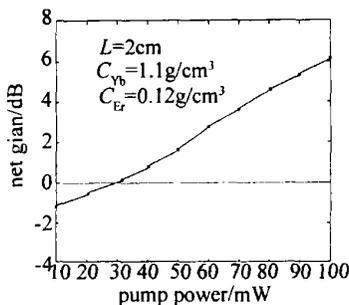


Fig 7 Net gain of Yb:Er co-doped glass threath vs pump power

小于掺钕硅酸盐玻璃丝的阈值抽运功率 36mW 。原因在于, 镱的吸收截面大(对 980nm 波长), 提高了抽运

效率, 因此降低了阈值功率。同时, 从曲线中可以看出, 未出现净增益增长幅度随抽运功率增加而变缓的趋势。这一结果也说明了镱的掺入, 降低了钕粒子浓度猝灭效应的影响, 改善了净增益特性。抽运功率为 100mW 时, 总净增益值为 6.14dB , 单位长度净增益为 3.07dB/cm 。

图 8 是同一种玻璃丝, 保持抽运功率为 100mW 时, 净增益随长度的变化曲线。镱钕共掺硅酸盐玻璃

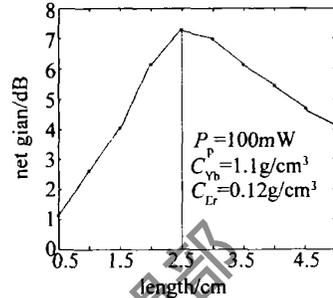


Fig 8 Net gain of Yb:Er co-doped glass threath vs length

丝最佳长度为 2.5cm , 小于掺钕硅酸盐玻璃丝的最佳长度 4.5cm 。原因是镱的吸收截面大, 镱钕共掺硅酸盐玻璃丝单位长度所消耗的抽运功率大, 导致了最佳长度的缩短。

4 结论

讨论了高质量浓度掺杂的掺钕 镱钕共掺硅酸盐玻璃丝的净增益特性, 结果表明: 在 100mW 功率抽运下, 单位长度的净增益分别为 1.96dB/cm 和 3.07dB/cm , 最佳长度分别为 4.5cm 和 2.5cm , 即可在厘米长度量级上获得近 10dB 的净增益。掺钕质量浓度的硅酸盐玻璃丝, 抽运功率较弱时, 净增益随抽运功率近似线性增长; 抽运功率较强时, 由于钕离子间的合作上转换、激发态吸收等效应影响, 净增益有饱和趋势。但镱钕共掺硅酸盐玻璃丝的净增益随抽运功率近似线性增长, 未出现饱和趋势。说明敏化剂镱高浓度的掺入, 有效地将钕离子均匀分开, 减弱了钕离子团簇的形成并降低了合作上转换等效应的影响, 改善了增益特性, 单位长度的净增益值增大。倘在玻璃丝制作工艺上进行优化, 减小放大的自发辐射影响, 则硅酸盐玻璃丝的净增益能够得到进一步的提高。

参 考 文 献

- [1] LAM NG R L, ZERVAS M N. Erbium-doped fiber amplifier with 54dB gain and 3dB noise figure [J]. IEEE Photon Technol Lett 1992, 4(12): 1345~1347.
- [2] 李成仁, 宋昌烈, 李淑凤, *et al*. 掺钕玻璃样品的荧光谱测量 [J]. 光电子·激光, 2002, 13(12): 1267~1271.
- [3] 饶文雄, 宋昌烈, 李成仁, *et al*. 镱钕共掺杂玻璃样品的荧光谱特性 [J]. 光电子·激光, 2003, 14(4): 380~382.
- [4] PASQUALE F D, FEDERIGHI M. Modeling of unimolecular and pair induced

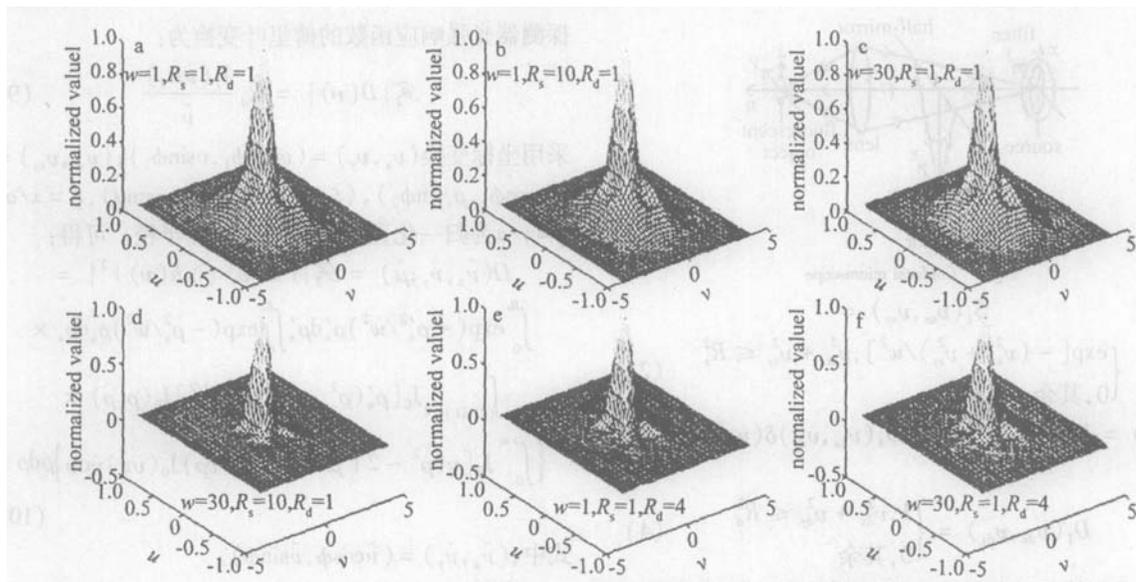


Fig 2 Normalized 3-D OTFs for various ω and R_s, R_d

3 结论

(1) 探测器孔径一定, 光源孔径对系统的 3-D OTF 的影响随束斑半径的增大而增大 (见图 2a 图 2b, 束斑半径 $w = 1, R_s = 1 \sim 10, R_d = 1$, 3-D OTF 形状不变)、减小而减小 (见图 2c 图 2d, $w = 30, R_s = 1 \sim 10, R_d = 1$, 3-D OTF 形状产生明显变化)。

(2) 图 2a 图 2e 中, $w = 1, R_s = 1$, 探测器孔径从 $R_d = 1$ 改变为 $R_d = 4$, 3-D OTF 形状发生明显变化; 图 2c 图 2f 中, $w = 30, R_s = 1$, 探测器孔径从 $R_s = 1$ 改变为 $R_d = 4$, 3-D OTF 形状发生明显改变。这显示无论束斑半径大小, 探测器孔径较光源孔径对系统的 3-D OTF 影响明显。

(3) 若 $w = 1, R_d = 1$, 光源孔径可以取 $R_s = 10$ 系统的 3-D OTF 形状不变。

参 考 文 献

[1] 唐志列, 梁瑞生, 朱小松 *et al* 偏振共焦扫描激光显微镜的成像特性研究 [J]. 光学学报, 1999, 19(8): 1118~1122
 [2] HELL SW, BOOTH M, WILMS S Two-photon near and far field fluorescence microscopy with continuous wave excitation [J]. Opt Lett 1998, 23(15): 1238~1240
 [3] CUMSTEM BH, ANANTHAVEL S P, BARLOW S *et al* Two-photon polymerization initiators for three-dimensional optical data storage and

microfabrication [J]. Nature, 1999, 398(4): 51~54.

[4] SUN H B, MATSUO S, M, ISAWA H. Three dimensional photonic crystal structures achieved with two-photon-absorption photopolymerization of resin [J]. A P L, 1999, 74(6): 786~788.
 [5] 裴红津, 唐志列, 杨初平 *et al* 荧光波长对共焦显微镜成像特性的影响 [J]. 光学学报, 2002, 22(10): 1219~1223
 [6] 唐志列, 黄佐华, 梁瑞生 *et al* 共焦显微镜的纵向分辨率及其判据 [J]. 量子电子学报, 2000, 17(3): 199~204.
 [7] 张平, 吴震, 王翠英 *et al* 荧光共焦扫描系统成像特性的优化 [J]. 光学学报, 1997, 17(3): 308~313.
 [8] 唐志列, 杨初平, 裴红津 *et al* 双光子共焦显微镜的三维成像理论与分辨率改善 [J]. 中国科学, 2002, A 32(6): 538~547.
 [9] 李爱民, 陶纯堪, 刘明 *et al* 共焦扫描激光显微镜的研制 [J]. 激光技术, 1994, 18(5): 261~263
 [10] 张平, 向际鹰, 吴震. 共焦扫描激光显微镜的电子控制系统研究 [J]. 激光技术, 1997, 21(5): 284~287.
 [11] 唐志列, 梁瑞生, 常鸿森. 双光子和多光子共焦显微镜的成像理论 [J]. 物理学报, 2000, 49(6): 1076~1080
 [12] GU M. Principles of three dimensional imaging in confocal microscopes [M]. Singapore World Scientific, 1996, 1~10.
 [13] DRAZIC V. Three-dimensional transfer function analysis of a confocal fluorescence microscope with a finite sized source and detector [J]. J Mod Opt 1993, 40(5): 879~887.
 [14] DRAZIC V. Three-dimensional transfer function of coherent confocal microscopes with extended source and detector [J]. J Mod Opt 1992, 39(8): 1777~1790
 [15] 黄菁, 梁瑞生, 司徒达 *et al* 高斯光束共焦扫描激光显微镜的光学传递函数 [J]. 物理学报, 1998, 47(8): 1289~1294

(上接第 537 页)

upconversion mechanisms in high concentration erbium-doped silica waveguides [J]. IEEE J Lightwave Technol 1995, 13(9): 1858~1864.
 [5] Van Den HOVEN G N, SNOEKES E, POLMAN A *et al* Upconversion in Er³⁺ implanted Al₂O₃ waveguides [J]. JA P, 1996, 79(3): 1258~1265
 [6] SHOOSHAR IA, TOUAM T, NAJFIS I *et al* Yb³⁺ sensitized Er³⁺-

doped waveguide amplifiers: a theoretical approach [J]. Opt & Quant Electron 1998, 30(4): 249~264

[7] MAURICE E, MONNOM G, DUSSARDIER B *et al* Clustering effects on double energy transfer in heavily ytterbium-erbium-codoped silica fibers [J]. J O S A, 1996, B13(4): 693~698.
 [8] 柳祝平, 胡丽丽, 戴世勋 *et al* LD 泵浦的 Er³⁺、Yb³⁺ 共掺磷酸盐钕玻璃激光性质 [J]. 发光学报, 2002, 23(3): 238~242