

文章编号: 1001-3806(2010)03-0373-04

分布式光纤喇曼放大器实验研究

周维军, 王荣波, 李泽仁

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 绵阳 621900)

摘要: 为了对后向抽运分布式宽带光纤喇曼放大器的特性进行实验研究, 采用多波长 1426nm, 1440nm, 1460nm, 1475nm 和 1495nm 的半导体激光器作为抽运源, 实现了 C + L 波段近 80nm 带宽的信号光放大, 获得了比较好的平坦增益、偏振相关增益, 系统平均开关增益为 10.7dB, 增益平坦度为 1.5dB, 最大噪声指数为 -1.96dB, 偏振相关增益小于 0.4dB。结果表明, 光纤喇曼放大器的抽运源波长、功率选择比较合理, 系统所有技术指标均满足光纤通信使用要求。这一结果将对通信产业化发展有着重要的指导作用。

关键词: 光通信; 光纤喇曼放大器; 后向抽运; 开关增益; 增益平坦度; 噪声指数

中图分类号: TN253; TN722 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.03.025

Experiment study of distributed fiber Raman amplifiers

ZHOU Wei-jun, WANG Rong-bo, LI Ze-ren

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to study characteristics of a backward pumped distributed broadband fiber Raman amplifier, with multi-semiconductor laser at wavelength of 1426nm, 1440nm, 1460nm, 1475nm and 1495nm as pump source, signal amplification at bandwidth of 80nm in C + L band was realized and better gain flatness and polarization correlation were obtained. The on-off gain was 10.7dB, gain flatness was 1.5dB, and the maximum noise index was -1.96dB. Experiment results indicated that the pump wavelengths and pump power of the fiber Raman amplifier selected according to the numerical value calculation were reasonable, all technical parameters of the system satisfied requirements of the fiber communication. The results will have very import guidance effect for the development of optic communications.

Key words: optical communication; fiber Raman amplifier; backward pump; on-off gain; gain flatness; noise index

引言

随着宽带光通信业务的增长和高功率激光器技术的不断进步, 光纤喇曼放大器越来越受到关注, 已成为光纤传输和光网络中补偿损耗的一种非常重要的器件, 它利用光纤本身的非线性效应实现光放大, 相对于掺铒光纤喇曼放大器, 光纤喇曼放大器具有更优的光信噪比^[1-3]。

光纤喇曼放大器 (fiber Raman amplifier, FRA) 分为分立式喇曼放大器和分布式喇曼放大器, 分立式 FRA 用来对信号进行集中放大, 需要高增益系数的光纤作为增益介质, 例如掺铒光纤。目前研究重点是分布式 FRA, 采用普通单模光纤作为放大介质, 其低增益系数使得这种放大器要求高功率的抽运源, 在很长的传输光纤上实现分布式放大。分布式光纤

喇曼放大器增益比较小, 一般用开关增益衡量^[4-7]。

作者分析了受激喇曼散射非线性微分耦合方程组, 在此基础上, 建立了多波长抽运的分布式光纤喇曼放大器实验系统, 实现了 C + L 波段 80nm 带宽范围内 10dB 以上的光信号放大。对实验测量的增益结果进行了详细的分析, 并通过实验, 研究了分布式光纤喇曼放大器增益平坦度的改善。

1 数学模型理论分析

考虑到光纤的衰减, 信号与信号、抽运光与抽运光、信号与抽运光间的受激喇曼散射效应, 光纤喇曼放大器的数学模型可用非线性耦合微分方程组表示为^[7-11]:

$$\frac{dP^\pm(z, \nu)}{dz} = -\alpha(\nu)P^\pm(z, \nu) + \gamma(\nu)P^\pm +$$

$$\sum_{\zeta > \nu} \frac{g_R}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} (\nu - \zeta) [P^+(z, \zeta) + P^-(z, \zeta)] P^\pm(z, \nu) +$$

$$\sum_{\zeta > \nu} 2h\nu \frac{g_R}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} (\nu - \zeta) [P^+(z, \zeta) + P^-(z, \zeta)] \cdot$$

作者简介: 周维军 (1979-), 男, 助理研究员, 主要从事光纤通信器件和光纤传感器方面的研究。

E-mail: zhouxin787@163.com

收稿日期: 2009-05-12; 收到修改稿日期: 2009-08-14

$$\left[1 + \frac{1}{e^{h(\zeta-\nu)/(kT)} - 1} \right] - \sum_{\zeta > \nu} \frac{g_R}{A_{\text{eff}} K_{\text{eff}}} (\nu - \zeta) [P^+(z, \zeta) + P^-(z, \nu)] P^+(z, \nu) - \sum_{\zeta > \nu} 2h\nu\Delta\nu \frac{g_R}{A_{\text{eff}} K_{\text{eff}}} (\nu - \zeta) [P^-(z, \zeta) + P^-(z, \nu)] \cdot \left[1 + \frac{1}{e^{h(\zeta-\nu)/(kT)} - 1} \right] \quad (1)$$

式中, $P^\pm(z, \nu)$ 为距离 z 处频率为 ν 的光功率, $\alpha(\nu)$ 为衰减系数, $\gamma(\nu)$ 为瑞利背向散射系数, $g_R(\nu - \zeta)$ 为频率 ν 和 ζ 之间的喇曼增益系数, K_{eff} 为偏振相关系数且 $1 \leq K_{\text{eff}} \leq 2$, A_{eff} 为光纤有效面积, h 为普朗克常数, $\Delta\nu$ 为每信道滤波器宽带, k 为玻尔兹曼常数, T 为光纤的绝对温度, 方程右边前 2 项分别为衰减和瑞利背向散射, 第 3 项和第 5 项表示喇曼作用, 包括信号与信号、信号与抽运、抽运与抽运、抽运损耗之间的相互作用, 第 4 项和第 6 项是噪声部分, 考虑了温度的影响, \pm 表示传输方向, 正号为同向抽运方式, 负号表示反向抽运方式。(1) 式是非线性微分功率耦合方程组, 无法直接求解本方程的解析解, 只能通过数值模拟方法求解。

FRA 抽运光可采用与信号光同向或反向两种注入方式, 因为后向抽运注入可减小抽运光与信号光相互作用的长度, 从而减弱抽运噪声对信号的影响, 故此处采用后向抽运方式。在该数学模型中, 考虑了抽运光之间、信号光之间由于受激喇曼散射引起的能量传递, 光纤对不同波长信号具有不同的衰减系数。本文中忽略了瑞利后向散射功率和噪声功率损耗, 这是因为在普遍应用的中等功率抽运系统里, 瑞利后向散射功率并不随信号放大而有较大的增加, 因此同信号功率相比, 瑞利后向散射能量对系统的影响可忽略不计, 而噪声功率只是信号功率的 10^{-7} , 在对信号功率的计算中也不加考虑。

2 光纤喇曼放大器实验研究

2.1 实验装置介绍

通过对(1)式进行数值求解, 选择出适合 C + L 波段光放大抽运激光器组, 其波长分别为 1426nm, 1440nm, 1460nm, 1475nm 和 1495nm, 以实现 C + L 波段信号的放大。根据选择的抽运源, 设计的光纤喇曼放大器实验装置如图 1 所示。该装置主要包括抽运模块和光路部分。抽运模块部分如图虚线框内所示, 多波长抽运激光器经抽运合波器合波后, 通过超宽带波分复用器输入传输光纤。传输光纤采用

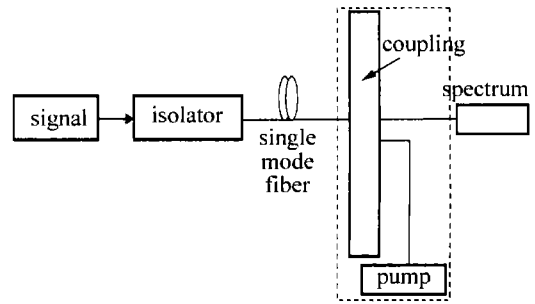


Fig. 1 Experimental setup of Raman gain measurement

G. 652 单模光纤, 同时也作为增益介质, 光纤长度为 50km。信号源采用 Agilent 8164A 可调谐激光器, 调谐范围 1509nm ~ 1641nm, 其光谱宽度小于 3nm。在信号源的出射端加隔离器是为了避免剩余抽运光对可调谐信号源的影响, 同时也有助于削弱光路结构中因多次散射和反射所引发的多径干涉效应, 从而提高输出功率的范围。信号经放大后, 在出射端采用 HP86142A 光谱仪对信号光开关增益进行测量, 光谱测量范围为 600nm ~ 1700nm 范围。

2.2 宽带放大器开关增益测试

实验步骤如下: 首先, 在光纤喇曼放大器抽运源关闭的条件下, 用光谱仪测量未经放大的信号光输出功率, 并读出信号功率 P_{off} (dBm)。其次, 开启抽运激光器, 用光谱仪测量信号输出光谱, 读出信号放大后的输出功率 P_{on} (dBm)。那么, 信号开关增益为 $G_{\text{on-off}} = P_{\text{on}}$ (dBm) - P_{off} (dBm)。

调节 5 台抽运激光器工作电流, 其输出功率分别为 105mW (1426nm), 102mW (1440nm), 51mW (1460nm), 56mW (1475nm) 和 83mW (1495nm), 抽运总功率为 400mW, 功耗 30W。随机选择波长分别为 1530nm, 1570nm 和 1600nm 的信号光, 信号输出功率为 0.1mW, 并在抽运关闭、开启的条件下对其输出功率进行测量, 测量结果如图 2、图 3 和图 4 所示。从图 2 可以看出, 关闭抽运时, 1530nm 信号光经过传输光纤输出功率为 -16.1dBm; 开启抽运源时, 信号吸收抽运功率被放大后输出功率为 -5.3dBm, 信号开关增益为 10.8dB。图 3 是信号波长为 1570nm 开关增益测试结果, 关闭抽运时, 信号输出功率为 -15.6dBm, 开启抽运源时信号输出功率为 -4.3dBm; 信号开关增益为 11.3dBm。图 4 是信号波长为 1600nm 开关增益测试结果, 关闭抽运时信号输出功率为 -15.7dBm, 开启抽运源时输出功率为 -5.6dBm, 信号开关增益为 10.1dBm。通过比较图 2、图 3 和图 4 可知, 信号开关增益均大于 10dB, 增益平坦度小于 1.3dB。

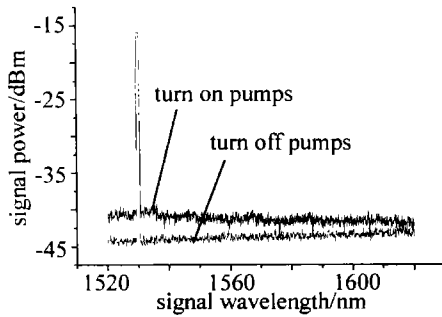


Fig. 2 On-off gain of 1530nm signal

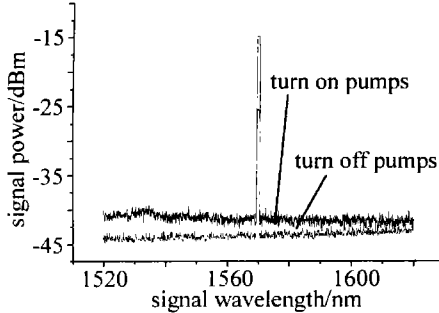


Fig. 3 On-off gain of 1570nm signal

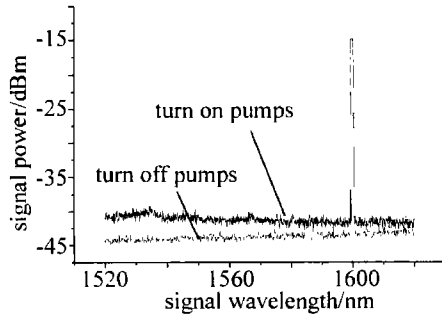


Fig. 4 On-off gain of 1600nm signal

2.3 宽带放大器增益平坦度测试

信号增益平坦度是光纤喇曼放大器的重要技术指标,因此,对光纤喇曼放大器增益平坦度的测试是必须的。开启抽运后,仔细调整每个波长的抽运光功率,以获得最佳的增益平坦效果。当调整抽运波长为1426nm,1440nm,1460nm,1475nm和1495nm,抽运功率分别为105mW,102mW,51mW,56mW和83mW时,测得1530nm~1610nm的波长范围内,信号的平均开关增益为10.7dB,增益平坦度为1.4dB,最大等效噪声指数为-0.96dB。图5为对应的C+L(1530nm~

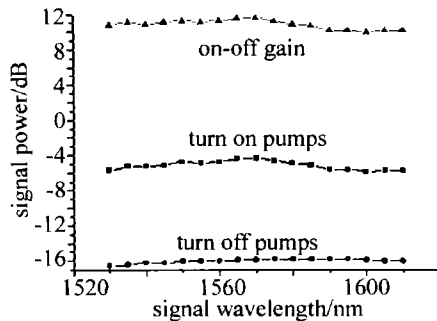


Fig. 5 Test result of Raman on-off gain and gain flatness degree

1610nm)波段的开关增益及增益平坦度曲线。从图5可以看出,信号开关增益大于10dB,增益平坦度小于1.5dB。

2.4 偏振相关增益测试

随机选择波长为1530nm和1570nm的信号光,在关闭、开启抽运源两种条件下,通过调整信号光的偏振态,对其信号输出功率随偏振态的变化进行测量,并通过计算给出了信号的偏振相关增益。测量结果如图6所示,从图中可以看出,在关闭、开启抽运源两种情况下信号输出功率随信号偏振态的变化均呈正弦分布,偏振相关增益变化相对稳定,起伏0.4dB,完全符合通信标准要求。

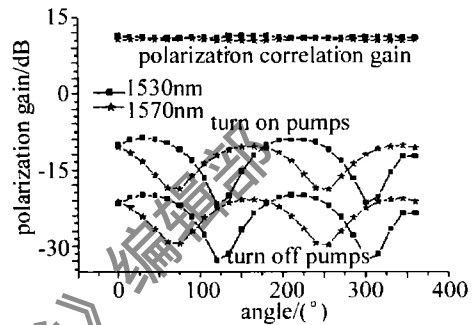


Fig. 6 Polarization correlation gain of Raman fiber amplifier

2.5 偏振模式色散测试

信号光通过光波偏振分析仪外部光源输入端输入,功率设置为0.1mW,光波长测试范围为1520nm~1610nm,测试点间隔5nm;待测的50km光纤的两端分别连接光波偏振分析仪的光输入端和光输出端;光波偏振分析仪用来调整信号光波长及功率,并对50km光纤的偏振色散进行测量。测试结果如图7所示,在整个C+L波段(1530nm~1610nm)测试范围内,偏振膜式色散最大值为0.18ps,最小值为0.05ps,完全符合通信使用标准的0.2ps的要求。

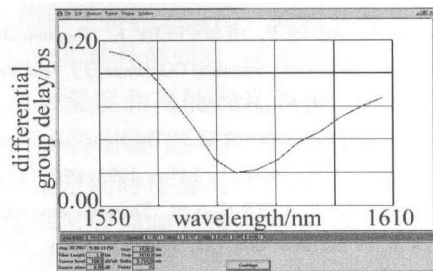


Fig. 7 Measure result of fiber polarization model dispersion

2.6 噪声指数测试

信号经过50km光纤传输后,在光纤喇曼放大器输出端输出,利用光谱仪分别测试抽运源开启、关闭条件下的信号、噪声功率,然后对采集的数据进行处理计算,得到喇曼光纤放大器噪声指数。随机选择3种不同波长的信号光,波长分别为1530nm,1570nm和

1600nm,通过光谱仪测量出抽运关闭时的信噪比分别为17.0dB,18.2dB,17.2dB。抽运源开启时,信噪比为25dB,28.6dB和26.8dB。通过对采集的数据进行处理、计算,得到噪声指数分别为-1.67dB,-1.96dB和-1.92dB。

3 结论

通过实验实现了C+L波段的宽带分布式光纤喇曼放大器,该放大器具有很好的增益平坦特性及噪声特性。测试中采用覆盖C+L波段的波分复用信号源,信号经50km光纤传输后,获得平均开关增益为10.7dB,增益平坦度小于1.5dB,偏振相关增益小于0.4dB,偏振模式色散小于0.18ps,最大等效噪声指数为-1.96dB。

参考文献

- [1] MEI J J, LIU D M, HUANG D X. Analysis of power conversion efficiency of fiber Raman amplifiers [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(4):350-351 (in Chinese).
- [2] LING J, LI K, KONG F M, *et al.* Simplified model design and pump optimization of multi-pumped fiber Raman amplifiers [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(3):334-336 (in Chinese).
- [3] WU B, LI K, KONG F M, *et al.* A study of the simulation algorithm for multi-pumped broadband Raman amplifier [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(4):411-413 (in Chinese).
- [4] JIANG H M, WANG Y F. Study on the gain of forward pumped Raman fiber amplifier by numerical simulation [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(4):377-378 (in Chinese).
- [5] HANSEN P B, ESKILDSEN L, GRUBB S G, *et al.* Capacity upgrades of transmission systems by Raman amplifier [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, 9(2):262-264.
- [6] KAO M S, WU J. Extending transmission distance high-density WDM systems using post transmitter fiber Raman amplifiers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1991, 9(3):394-399.
- [7] ROTTWITT K, NISSOV M, KERFOOT F. Detailed analysis of Raman amplifiers long haul transmission [C]//*Optical Fiber Communication Conference and Exhibit*, 1998. San Jose: IEEE, 1998:30-31.
- [8] ORCHARD D A, HOLLINS R C. A high pulse repetition rate helium-xenon laser [J]. *SPIE*, 1997, 3092:82-85.
- [9] EL-OSEALY M A, JITSUNO T, NAKATSUKA M, *et al.* Co-axially excited gas lasers toward vacuum ultra violet region [J]. *SPIE*, 2000, 3889:774-779.
- [10] KOCH F, CHERNIKOV S V, LEWIS S A E, *et al.* Characterisation of single stage, dual-pumped Raman fiber amplifiers for different gain fiber lengths [J]. *Electron Lett*, 2000, 36(4):347-348.
- [11] JIANG H M, WANG Y F. Study on the gain of forward pumped Raman fiber amplifier by numerical simulation [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(4):377-378 (in Chinese).
- [12] MULLER S, UHLENBUSCH J. Influence of turbulence and convection on the output of a high-power CO₂ laser with a fast axial flow [J]. *J Phys*, 1987, D20(6):697-708.
- [13] BAEVA M G, ATANASOV P A. Numerical investigation of CW CO₂ laser with a fast turbulent flow [J]. *J Phys*, 1993, D26(4):546-551.
- [14] BEVERLY R E. Kinetic modeling of a fast-axial-flow CO₂ laser [J]. *Opt & Quant Electron*, 1982, 14(1):25-40.
- [15] RUDOLPH R, HARENDT A, BISIN P, *et al.* Numerical modeling of fast-flow CO₂ lasers I: the model [J]. *J Phys*, 1993, D26(4):552-559.
- [16] TOEBAERT D, MUYS P, DESOPPERE E. Theoretical study of the properties of a modulated fast-flow CO₂ laser [J]. *Infrared Physics & Technology*, 1997, 38(6):337-355.
- [17] SAZHIN S, WILD P, LEYS C, *et al.* The three temperature model for the fast-axial-flow CO₂ laser [J]. *J Phys*, 1993, D26(11):1872-1883.
- [18] SAZHIN S, WILD P, LEYS C, *et al.* Three-dimensional modeling of processes in the fast-axial-flow CO₂ laser [J]. *J Phys*, 1994, D27(3):464-469.
- [19] BAEVA M G, ATANASOV P A. Numerical model of an fast-axial-flow CO₂ laser with controlled turbulence [J]. *Proc SPIE*, 1993, 1018:109-112.
- [20] SHARIF A H, KHEIR A M. Numerical modeling of a fast-axial-flow CW-CO₂ laser [J]. *Opt & Laser Technol*, 2007, 39(3):610-615.
- [21] HAN Y Zh, LI G Y, XIONG Zh W, *et al.* Application of ANSYS on the analysis of temperature field in the way of flowing gas in HP TF CO₂ laser [J]. *Laser Magazine*, 2005, 26(4):44-45 (in Chinese).
- [22] GALEEV R S. Numerical simulation of fast axial flow CO₂-laser [J]. *SPIE*, 1994, 2117:205-213.
- [23] JELVANI S, SAEEDI H. Numerical investigation of a fast-axial-flow CW CO₂ laser [J]. *Opt & Laser Technol*, 2008, 40(3):459-465.
- [24] PENG X Y, LI Sh M, XU L. Numerical modeling on pulse discharge of a high power fast-axial-flow CO₂ laser [J]. *SPIE*, 1997, 2989:245-249.
- [25] STANGHINI M, BASSO M, GENESIO R, *et al.* A new three-equation model for the CO₂ laser [J]. *IEEE J Q E*, 1996, 32(7):1126-1131.
- [26] WESTER R, SEIWERT S. Numerical modeling of RF excited CO₂ laser discharges [J]. *J Phys*, 1991, D24(8):1371-1375.
- [27] LI Q, WANG Y Q, HUANG H Y, *et al.* A CFD model for fast-axial-flow laser [J]. *Proc SPIE*, 2008, 7276:72760H1-72760H7.
- [28] ZHOU S Y, LIU S Q, TAO X Y. Simulation of density solitons and self-generated magnetic field in laser plasma [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(1):8-11 (in Chinese).
- [29] WANG F J, LI Y J, CONG G H, *et al.* CFD simulation of 3-D flow in large-bore axial flow pump with half-elbow suction sump [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2006, B18(2):243-247.

(上接第342页)