

文章编号 1004-924X(2006)02-0155-04

# 增益平坦的多波长泵浦宽带拉曼光纤放大器

颜玢玢<sup>1</sup>, 王葵如<sup>1</sup>, 余重秀<sup>1</sup>, 徐大雄<sup>1</sup>, 桑新柱<sup>1</sup>, 刘怡臻<sup>1</sup>, 忻向军<sup>1</sup>, 全升学<sup>1</sup>, 贾亚英<sup>2</sup>

(1. 北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876; 2. 中国网通张家口分公司网管中心, 河北 张家口 075000)

**摘要:**在分析拉曼光纤放大器(RFA)原理的基础上,采用遗传算法对 5 波长后向泵浦拉曼光纤放大器的波长和功率进行了优化设计。实验采用位于 5 个波长处的 7 个泵浦激光器和 100.8 km 的色散位移光纤,实现了带宽为 90 nm、开关增益为 15.55 dB、增益平坦度为 0.87 dB 的拉曼放大,其平均有效噪声系数为 -3.5 dB,与理论分析结果一致。

**关键词:**拉曼光纤放大器;色散位移光纤;开关增益;增益平坦;有效噪声系数

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A

## Broadband gain-flattened multiwavelength pumped Raman fiber amplifier

YAN Bin-bin<sup>1</sup>, WANG Kui-ru<sup>1</sup>, YU Chong-xiu<sup>1</sup>, XU Da-xiong<sup>1</sup>, SANG Xin-zhu<sup>1</sup>,  
LIU Yi-zhen<sup>1</sup>, XIN Xiang-jun<sup>1</sup>, QUAN Sheng-xue<sup>1</sup>, JIA Ya-ying<sup>2</sup>

(1. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China; 2. The Network Administration Center, Zhangjiakou Sub-division of China Network Communications Group Corporation, Zhangjiakou 075000, China)

**Abstract:** Based on analyzing the principle of the Raman Fiber Amplifier(RFA), optimal design of a backward pumping Raman fiber amplifier with five different pump wavelengths was carried out. With seven pump lasers at five different wavelengths and a 100.8 km dispersion-shift fiber, a broadband optical Raman fiber amplifier with gain band over 90 nm, on-off gain of 15.55 dB, gain flatness below 0.87 dB and average effective noise coefficient of -3.5 dB was demonstrated experimentally. The experimental results agree with the theoretical calculation.

**Key words:** Raman fiber amplifier; DSF; on-off gain; gain flatness; effective noise coefficient

## 1 引言

随着人类社会的进步,计算机网络和数据传输业务得到飞速发展,人们对光纤通信系统的传输容量和传输距离要求越来越高,光网络对密集波分复用(DWDM)系统的设计也提出了新的挑

战。基于掺铒光纤放大器(EDFA)的波分复用技术已经成熟并在放大带宽方面逐步耗尽其潜力,不能满足光通信日益发展的要求。随着大功率泵浦激光器技术的成熟,拉曼光纤放大器(RFA)由于其能够灵活控制增益带宽和增益波段而引起人们广泛的注意<sup>[1]</sup>,并在超长距离大容量传输系统中得到广泛应用<sup>[2-3]</sup>。由于单泵浦拉曼光纤放大

收稿日期:2005-10-22;修订日期:2005-12-18.

基金项目:北京市教育委员会共建项目建设计划资助(No. XK 100130437)

器的增益谱比较窄,近年来多波长泵浦宽带拉曼光纤放大器的研究和设计成为国际上的研究热点<sup>[4-5]</sup>,国内也开展了一定的理论和实验研究<sup>[6-7]</sup>,但是实验用少量泵浦激光器实现宽带的、平坦的拉曼增益比较困难。本文在分析拉曼光纤放大器原理的基础上,对 5 波长泵浦的拉曼放大器的泵浦波长和功率进行了优化设计,并选用位于 5 个波长处的 7 个泵浦激光器作为泵浦源,设计了高性能的泵浦光合波器件,优化了合波顺序,减小了泵浦光的偏振度,降低了合波器件所带来的损耗,提高了泵浦效率,实现了宽带的、平坦的拉曼增益。

## 2 理论分析

拉曼光纤放大器利用石英光纤中受激拉曼散射(SRS)的非线性效应对光信号进行直接放大,它能在普通光纤中将泵浦光的能量转移到信号光中,而无需像 EDFA 那样采用特种光纤,故可在系统中实现光信号的在线放大。拉曼增益最重要的特征是它的峰值增益波长依赖于泵浦波长,产生约 100 nm 的固定频移。如果一个弱信号与一个强泵浦光波同时在光纤中传输,并使弱信号波长置于泵浦光的拉曼增益带宽内,则弱信号即可被放大。

多波长泵浦的 RFA 的传输方程如下式所示<sup>[8]</sup>:

$$\frac{dP_v^\pm}{dz} = -\alpha_v P_v^\pm + \epsilon_v P_v^\mp + P_v^\pm \sum_{\mu > v} \frac{g_{v\mu}}{A_\mu} (P_\mu^+ + P_\mu^-) + 2hv \sum_{\mu > v} \frac{g_{v\mu}}{A_\mu} (P_\mu^+ + P_\mu^-) \left[ 1 + \frac{1}{\exp\left[\frac{h(\mu - v)}{kT}\right] - 1} \right] - P_v^\pm \sum_{\mu < v} \frac{v}{\mu} \frac{g_{v\mu}}{A_\mu} (P_\mu^+ + P_\mu^-) 4hv P_v^\pm \sum_{\mu < v} \frac{g_{v\mu}}{A_\mu} \left[ 1 + \frac{1}{\exp\left[\frac{h(v - \mu)}{kT}\right] - 1} \right]$$

式中下标  $\mu$  和  $v$  表示光频率,上标“+”、“-”分别表示前向和后向传输的波, $P_v$  是在频率  $v$  附近很小带宽内传输的光功率, $\alpha_v$  是光纤衰减系数, $\epsilon_v$  是瑞利散射系数, $A_v$  是光纤在频率为  $v$  的有效面积, $g_{v\mu}$  是频率为  $v$  的光波在频率为  $\mu$  的光波的泵浦下的拉曼增益, $h$  是普朗克常数, $k$  是玻尔兹曼常数, $T$  是温度。在这个方程中,包括了泵浦之

间、信号之间、泵浦与信号之间的拉曼相互作用,以及由于拉曼能量转移引起的泵浦损耗、瑞利后向散射、光纤损耗、自发散射噪声和热噪声。

理论上,泵浦波长的个数越多,所得到的增益带宽越宽;波长间隔越小,增益越平坦。但是,泵浦个数越多,成本便会越高,因此,需要根据具体的要求,选择合适的泵浦个数,并且在泵浦波长数一定的情况下,选择最佳的泵浦波长。利用遗传算法<sup>[9-10]</sup>进行模拟优化分析后得出,如要实现增益带宽为 90 nm 的拉曼放大,使用 1 425 nm、1 438.5 nm、1 452 nm、1 466 nm 和 1 495 nm 的波长激光器为泵浦源较好,并且利用反向泵浦方式可以获得较为平坦的宽带增益。选用如表 1 所示的激光器有效泵浦输出功率,在信道间隔为 2 nm 的 46 个信道、单个信道输入功率为 -5 dBm、增益介质为 100.8 km 的色散位移光纤(DSF)的情况下,在 1 520~1 610 nm 的 90 nm 带宽内可以获得约 16.97 dB 的平均开关增益,且增益平坦小于 1 dB,模拟结果如图 2 所示。在上述条件下,1 520~1 620 nm 的 100 nm 带宽内模拟仿真得到的有效噪声系数最大值为 -2.48 dB,最小值为 -6.44 dB,平均有效噪声系数为 -4.46 dB,有效噪声系数平坦度为 3.96 dB,其曲线如图 3 所示。

表 1 泵浦光波长和功率数据表

Tab. 1 Wavelengths and power of pump lasers used in simulation

编号	波长 (nm)	功率组合 (mW)
LD1	1425	190
LD2+LD3	1438.5	151
LD4	1452	103
LD5	1466	60
LD6+LD7	1495	103
总功率(mW)		607

## 3 实验研究

设计的拉曼放大实验系统如图 1 所示,使用反向泵浦方式构成分布式放大。可调谐激光器作为光源,传输介质为 100.8 km 的 DSF,泵浦合波由 4 个 WDM 器件和 2 个反向隔离偏振耦合器件(PBC)组成,WDM5 将信号光与泵浦光合波。设

计该泵浦合波方式时,采用了高性能的合波器件,优化了合波顺序,并且使用保偏光纤和 PBC 减小了泵浦光的偏振度,降低了合波器件所带来的损耗,大大提高了泵浦效率。

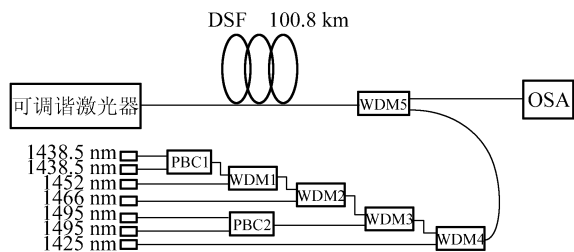


图 1 拉曼放大器实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup of the Raman fiber amplifier

### 3.1 开关增益、增益平坦度和增益带宽

利用图 1 所示的实验装置,信号光源为 AN-DO AQ4321D 可调谐激光器,带宽范围为 1 520 ~ 1 620 nm,输出功率设置为 -5 dB/m。OSA 为 ADVANTEST Q8384 光谱分析仪,光谱范围: 600~1 700 nm,光谱分辨率为 10 pm。按照数值仿真的结果配置各个泵浦激光器的功率,可得到实验开关增益曲线。然后再根据增益曲线和拉曼频移量调节各个泵浦激光器的功率,以便使增益曲线更加平坦。按照表 2 所示的数值配置各个激光器的功率,可以得到如图 2 所示的增益曲线。可见,该增益谱在 1 520~1 610 nm 的 90 nm 带宽内,平均开关增益为 15.55 dB,增益平坦度为 0.87 dB,基本与数值模拟的结果相吻合。

表 2 用于系统实验的泵浦光波长和功率数据表

Tab. 2 Wavelengths and power of pump lasers used in experiment

内部编号	波长 (nm)	功率组合 (mW)
LD1	1 425	191
LD2+LD3	1 438.5	153
LD4	1 452	105
LD5	1 466	62
LD6+LD7	1 495	102
总功率(mW)		613

### 3.2 信号有效噪声系数和有效噪声系数平坦度

有效噪声系数可通过下式得到

$$NF_{eff}(\text{dB}) = OSNR_{in}(\text{dB}) - OSNR_{out}(\text{dB}) + T(\text{dB})$$

其中,  $OSNR_{in}$  为输入光信号信噪比,  $OSNR_{out}$

为输出光信号信噪比,  $T$  为传输线衰减。通过实验测量及上述公式可得到有效噪声系数曲线,如图 3 所示。可见,在从 1 520~1 620 nm 的 100 nm 带宽内测量得到的有效噪声系数最大值为 -1.54 dB,最小值为 -5.46 dB,平均有效噪声系数为 -3.5 dB,有效噪声系数平坦度为 3.92 dB。一般使用后向泵浦方式的拉曼光纤放大器,其结果是信号的有效噪声系数短波长区一般高于长波长区,信道噪声系数失衡,这将对光网络造成影响。使用双向泵浦方式且在前向泵浦源中合理增加短波长泵浦源可以解决这个问题,并且能够实现增益与噪声均衡。

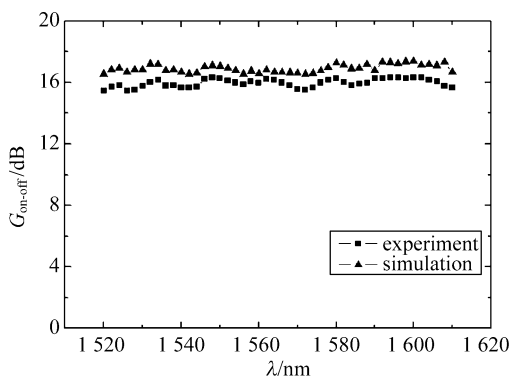


图 2 90 nm 带宽内的开关增益曲线

Fig. 2 On-off gain curve over 90 nm bandwidth

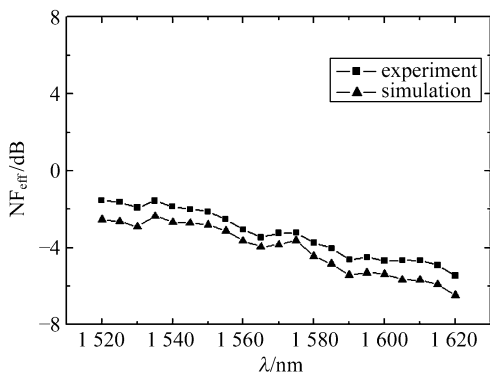


图 3 100 nm 带宽内信号的有效噪声系数曲线

Fig. 3 Effective noise coefficient curve over 100 nm bandwidth

## 4 结 论

为了达到理想的增益带宽和增益平坦度,在理论分析的基础上,实验选取了位于 5 个波长处

的 7 个激光器作为泵浦源进行了拉曼光纤放大器的实验研究。在总泵浦功率为 613 mW 的情况下,用 100.8 km DSF 光纤构成的分布式拉曼放大实验系统,在 1 520~1 610 nm 带宽内,最大增益可达 16.32 dB,平均增益为 15.55 dB,增益平坦度为 0.87 dB。在 1 520~1 620 nm 带宽内,该拉曼放大系统的有效噪声系数最大值为 -1.54

dB,最小值为 -5.46 dB,平均有效噪声系数为 -3.5 dB,有效噪声系数的平坦度为 3.92 dB。实验结果与理论模拟结果能较好吻合。可见,该拉曼放大系统在仅有 5 个泵浦波长的情况下,通过优化设计,获得了宽带的、平坦的拉曼增益,实现了较低的有效噪声系数和较好的噪声均衡度。

### 参考文献:

- [1] ISLAM M N. Raman amplifiers for telecommunications[J]. *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, 2002, 8(3):548-559.
- [2] GUPTA G C, WANG L L, MIZUHARA O, *et al.* 3.2-Tb/s transmission with spectral efficiency of 0.8 b/s/Hz over 21 × 100 km of dispersion-managed high local dispersion fiber using all-Raman amplified spans[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, 15(7):996-998.
- [3] RASMUSSEN C, FJELDE T, BENNIKE J, *et al.* DWDM 40G Transmission over trans-pacific distance(10 000 km) using CSRZ-DPSK, enhanced FEC, and all-Raman-amplified 100-km ultrawave fiber spans[J]. *Lightwave Technol.*, 2004, 22(1):203-207.
- [4] XIAO P, ZENG Q, HUANG J, *et al.* A new optimal algorithm for multipump sources of distributed fiber Raman amplifier[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, 15(2):206-208.
- [5] CUI S, LIU J, MA X. A novel efficient optimal design method for gain-flattened multiwavelength pumped fiber Raman amplifier[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, 16(11):2451-2453.
- [6] 崔晟, 刘劲松, 马小明. 多波长双向抽运光纤拉曼放大器的优化设计[J]. 光学学报, 2004, 24(12):1607-1611.  
CUI S, LIU J S, MA X M. Optimization of multiple wavelength bidirectionally pumping fiber Raman amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(12):1607-1611. (in Chinese)
- [7] 周俊鹤, 陈建平. 多波长小功率泵浦拉曼光纤放大器的优化设计[J]. 光电子·激光, 2005, 16(3):286-288,293.  
ZHOU J H, CHEN J P. Optimal design of Raman amplifier pumped by multi-wavelength low power dioxides[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2005, 16(3):286-288,293. (in Chinese)
- [8] NAMIKI S, EMORI Y. Ultrabroad-band Raman amplifier pumped and gain-equalized by wavelength division-multiplexed high-power laser diodes[J]. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2001,7(1):3-16.
- [9] 徐小云, 颜国正. 遗传算法及其在机器人控制中的应用[J]. 光学精密工程, 2001, 9(4):334-338.  
XU X Y, YAN G Z. Genetic algorithm and its application in robot control[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001,9(4):334-338. (in Chinese)
- [10] 王朝晖, 李莉, 李引生, 等. 基于遗传算法的生物组织图像最佳挖取点寻优[J]. 光学精密工程, 2005,13(2):231-236.  
WANG C H, LI L, LI Y S, *et al.* Seeking of tissue image digging point method based on genetic-arithmetic[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005,13(2):231-236. (in Chinese)

作者简介:颜玢玢(1981—),女,黑龙江人,北京邮电大学博士研究生,主要从事光电子器件和光纤通信方面的研究。