

分布式宽带光纤拉曼放大器增益平坦优化设计

周维军 绪明 王荣波

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 为了对分布式宽带光纤拉曼放大器增益平坦度改善方法的研究,采用受激拉曼散射功率耦合方程,建立了抽运、信号相互作用的数学模型,在此基础上对 C+L 波段信号开关增益进行了数值仿真,分析了影响增益平坦度的主要因素,并通过合理配置抽运激光功率,使得 C+L 增益平坦度获得了极大的改善,改善后增益平坦度小于 1 dB,计算结果表明,合理的激光功率配置对于改善宽带光纤拉曼放大器增益平坦度是一种简单而十分有效的方法。

关键词 光纤拉曼放大器; 受激拉曼散射; 开关增益; 增益平坦度

中图分类号 O484.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.030602

The Design on Gain Flatness of Distributed Broadband Fiber Raman Amplifier

Zhou Weijun Xu Ming Wang Rongbo

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

Abstract Introducing power coupling equation of Raman dispersion on distributed broadband fiber Raman amplifier, establishing mathematics model of pumps and signals. At the base of this, the on-off gain of the C+L waveband was calculated, analyzing main factors which affected gain flatness. By adjusting pump powers reasonably, making gain flatness be improved commendably.

Key words fiber Raman amplifier; stimulated Raman scattering; on-off gain; gain flatness

OCIS codes 060.2302; 190.4370

1 引言

随着高功率半导体激光器的日趋成熟,光纤拉曼放大器已成为密集波分复用光纤通信系统扩容、升级的切实可行方式之一。光纤拉曼放大器的许多优点可实现全光纤波段上任意波长的光放大,产生信号放大的增益介质是普通的传输光纤本身,光纤拉曼放大器的抽运波长大约比信号波长短 100 nm,所以放大器的增益均衡就变得比较简单。通过多波长抽运,对各个抽运光源的工作波长、带宽和功率进行合理配置,便可得到较为平坦的增益曲线。信号光功率要求较低,因此,传输过程中引起的非线性效应小,而且具有分布性增益。由于目前抽运光源研究取得了一定进展,拉曼放大器的成本趋于下降,从而使得光纤拉曼放大器成为近几年的研究热点^[1~3]。

增益平坦度的优化设计是光纤拉曼放大器得以使用的关键技术之一,增益平坦度的优劣直接影响到后续接受系统的误码率。因此,对于光纤拉曼放大器系统研制来说增益平坦度的优化设计至关重要。目前,解决增益平坦的方法主要有三种:1)利用多波长抽运的方法,通过合理配置各抽运源的波长及其功率,达到扩大增益带宽和增益平坦谱的目的;2)采用光纤拉曼放大器和掺铒光纤放大器混合放大器的方法,使其增益谱与掺铒光纤放大器的增益谱共同作用,从而达到增益平坦的目的;3)利用无源滤波器器件来平坦光纤拉曼放大器的增益,即在光纤拉曼放大器的适当位置插入光滤波器,可有效地平坦光纤拉曼放大器的增益,其中使用的滤波器一般都是工作在特定波长上,将纤芯中的传播模式谐振耦合到包层,包层泄露模最终将损耗掉,

收稿日期: 2011-08-10; **收到修改稿日期**: 2011-09-05; **网络出版日期**: 2011-11-28

作者简介: 周维军(1978—),男,助理研究员,主要从事激光及应用、光纤传感等方面的研究。

E-mail: zhouxin787@163.com

这样就形成具有特定形状的损耗谱,以衰减光纤拉曼放大器的增益峰,达到增益平坦的目的。这种方法与光纤拉曼放大器的输入输出功率无关,实现较为简单^[4~8]。

本文采取理论计算的方法,通过选择合适的抽运波长和功率,实现了信号开关增益平坦小于 1 dB。

2 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拉曼散射效应,光纤拉曼放大器的数学模型可用非线性耦合微分方程组表示为^[9,10]

$$s(j) \frac{dP_j}{dz} = \sum_{v_i > v_j} g_R \frac{(v_i - v_j)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_i P_j - \sum_{v_j > v_k} \frac{v_j}{v_k} g_R \frac{(v_j - v_k)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_j P_k - \alpha_j P_j, \quad j = 1, 2, 3$$

式中 P_j , v_j 和 α_j 分别是第 j 路光的功率、频率和衰减系数; $n = n_p + n_s$, n_p 和 n_s 分别是抽运光和信号光路数; $g_R(v_i - v_j)$ 是所用光纤介质的拉曼增益系数; z 为信号光的传输方向, A_{eff} 为光纤的有效面积, $s(j)$ 是符号标记,当第 j 路光正向传输时取正号、反向传输时取负号, K_{eff} 是偏振相关因子。

3 分布式宽带光纤拉曼放大器增益平坦设计

在实际应用中,光纤拉曼放大器由抽运合波器和抽运激光器组成,抽运合波器将多个高功率的抽运激光器组成拉曼抽运模块,抽运能量由信号/抽运用器耦合进光纤,信号沿着光纤实现放大,并经过抽运合波器从另一端输出。现在,实用化的分布式光纤拉曼放大器的技术指标要求,开关增益为 10~20 dB,增益平坦度小于 1.5 dB,带宽为 40~80 nm 等。在设计时对光纤拉曼放大器行为进行仿真是很必要的。因此,在理论分析的基础上进行了数值模拟,提出了优化增益平坦的方法。

3.1 光纤的性质

在光纤拉曼放大器系统中,增益介质是普通的传输光纤本身,为了得到理想的增益谱,必须对传输光纤的性质进行深入研究。目前通信线路中使用较多的单模光纤(SMF)有 G. 652、G. 655、非零色散位移光纤(NZDSF)和色散补偿光纤(DCF)等。不同光纤的特性由拉曼增益因子、光纤有效面积和光纤损耗系数等参数来表征。增益因子的大小与光纤掺杂成分和掺杂浓度有关,光纤有效面积主要与光纤结构有关,综合考虑光纤增益因子和光纤有效面积的作用,人们测得几种常用光纤的拉曼增益因子,如图 1 所示。在整个光纤增益范围内,拉曼增益因子并不平坦,增益因子平坦度为 $3 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。图中由下至上依次为单模光纤、非零色散位移光纤和色散补偿光纤,在相同的抽运功率水平下拉曼增益因子越大,相应的增益也就越高。在已铺设的光纤网络中以 G. 652 为主,本文将 G. 652 光纤为例介绍。

3.2 光纤掺杂浓度

研究发现, GeO_2 高掺杂的光纤能将光纤拉曼放大器的增益系数提高数倍。在这种光纤中,拉曼增益系数随纤芯 GeO_2 的掺杂浓度而增加。图 2 为不同 GeO_2 掺杂浓度情况下光纤的拉曼增益系数,可以看出,随着光纤掺杂浓度增高,拉曼增益系数在一定浓度范围内有较大提高,尽管带宽略变窄了一些,但整个增益曲线更趋于对称。

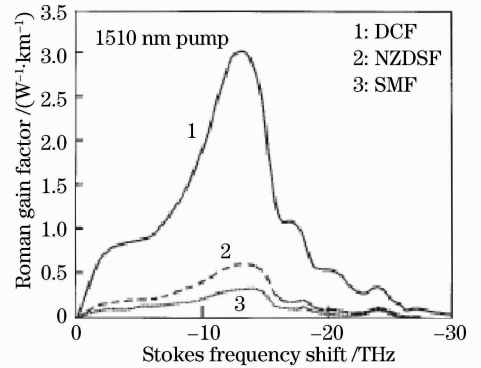


图 1 几种常见光纤的增益因子

Fig. 1 Gain index of several kinds of fiber

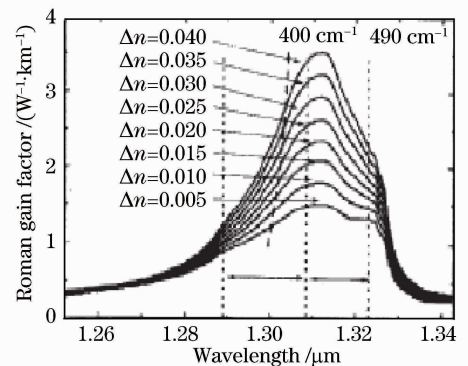


图 2 不同 GeO_2 掺杂浓度下的拉曼增益谱

Fig. 2 The Raman gain of different impure GeO_2

3.3 抽运波长的选取

由于普通光纤的拉曼增益谱很宽,而且不同抽运波长产生的增益谱型可以叠加。为了实现光纤拉曼放大器增益平坦度的优化,必须选择多个合适的抽运波长进行组合。然而,由于多个抽运波长的存在,使得短波长的抽运光和长波长的抽运光发生相互作用,从而造成短波长的抽运光功率向长波长抽运光功率转移。因此,各抽运波长对增益的实际贡献与它们单独作用时存在着显著的差异,在选择抽运波长时,必须充分考虑到抽运波长之间的能量转移作用,抽运光之间以及信号光之间的相互作用可由耦合方程(1)式表示。

对方程(1)进行数值仿真,可以得到图3和图4。图3给出了6束抽运波长分别为1420, 1435, 1445, 1455, 1465和1499 nm,功率均为200 mW的信号功率分布谱,输入信号功率为0.1 mW,从图3可以看出,被放大信号带宽为C+L(1530~1610 nm)波段,功率谱平坦度非常差。图4为C+L波段信号增益谱分布,增益平坦度为8 dB。

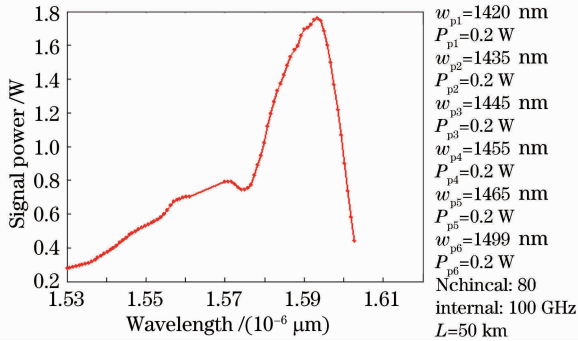


图3 抽运功率均为200 mW时信号功率谱分布
Fig. 3 Signal power distributed when the pump powers were 200 mW

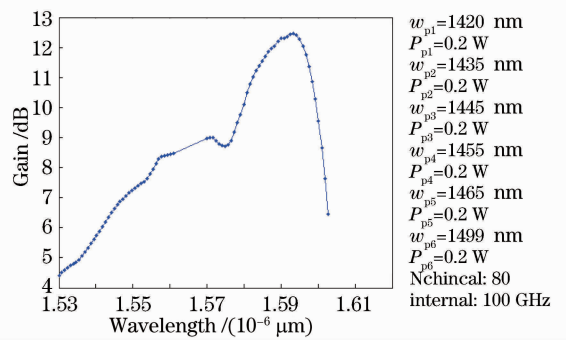


图4 抽运功率均为200 mW时信号增益谱分布
Fig. 4 Signal gain distributed when the pump powers were 200 mW

通过重新调整抽运功率,不同波长抽运光对应的功率为450 mW(1425 nm)、300 mW(1435 nm)、100 mW(1445 nm)、100 mW(1455 nm)、150 mW(1465 nm)和100 mW(1499 nm),由图5可以看出,C+L波段的信号功率谱平坦度相对图3有了明显改善,图6信号增益平坦度小于1 dB,较图4的8 dB有了大幅度提高。因此,通过合理的配置抽运光功率,可以极大地提高信号功率谱和信号增益谱平坦度,如果在此基础上继续进行微调,信号功率谱和增益谱平坦度可以达到最佳。

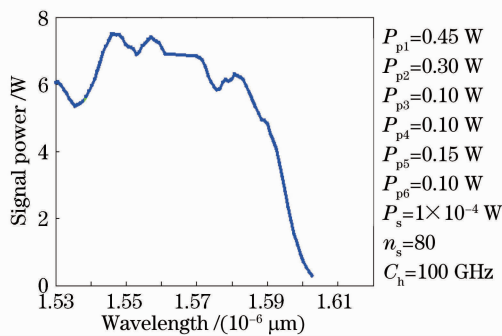


图5 抽运功率调整后信号功率谱
Fig. 5 Signal power distributed after the pump power adjusted

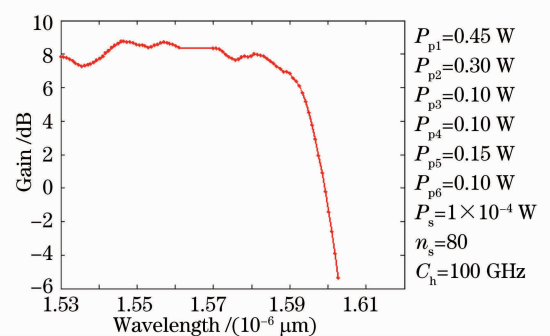


图6 抽运功率调整后信号增益谱
Fig. 6 Signal gain distributed after the pump power adjusted

4 结 论

宽带光纤放大技术是密集波分复用(DWDM)系统实现商用化的关键,宽带掺铒光纤放大器(EDFA)和拉曼放大器结合的混合放大器是下一代大容量高速率 DWDM 系统的必然选择,光纤拉曼放大器的增益平坦特性是评价放大器性能的重要指标。本文对多波长抽运的光纤拉曼放大器的增益平坦问题进行了研究,分析了影响增益平坦度的几个关键因素,同时给出了调整增益平坦度的设计方法,该方法对改善实际的光纤

拉曼放大器系统的信号增益平坦度有着重要的指导作用。

参 考 文 献

- 1 Zhou Weijun, Wang Rongbo, Li Zeren. Study of distributed broadband fiber Raman amplifier[J]. *Laser Technology*, 2009, **33**(5): 450~451
周维军,王荣波,李泽仁. 分布式宽带光纤拉曼放大器研究[J]. *激光技术*, 2009, **33**(5): 450~451
- 2 Zhou Weijun, Wang Rongbo, Li Zeren. Analysis of gain characteristics of forward and backward pumped Raman amplifiers [J]. *Laser Technology*, 2009, **33**(4): 407~408
周维军,王荣波,李泽仁. 前后向泵浦拉曼光纤放大器增益分析[J]. *激光技术*, 2009, **33**(4): 407~408
- 3 J. A. Yeung, A. Yariv. Spontaneous and stimulated Raman scattering in long low loss fibers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1978, **QE-14**(5): 347~352
- 4 H. Suzuki *et al.*, 50 GHz spaced 32×10 Gbit/s DWDM transmission in zero-dispersion region over 640 km of DSF with multi-wavelength distributed Raman amplification[J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(14): 1175~1176
- 5 H. S. Seo, K. Oh, U. C. Paek. Simultaneous amplification and channel equalization using Raman amplifier for 30 channels in 1.3 mm band[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(3): 391~397
- 6 K. X. Liu, E. Garmire. Understanding the formation of the SRS Stokes spectrum in fused silica fibers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(4): 1022~1030
- 7 Yuan Jinhui, Hou Lantian, Zhou Guiyao *et al.*. Investigation of a step-structure photonic crystal fiber with flattened dispersion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1167~1171
苑金辉,侯蓝田,周桂耀等. 一种阶梯结构的色散平坦光子晶体光纤的研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1167~1171
- 8 Yu Xianlun, Zhao Weiwei, Cheng Wei. Research of high-pressure photonic crystal fibers sensors[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2058~2063
余先伦,赵威威,程 伟. 高压光子晶体光纤传感器系统研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 2058~2063
- 9 Zhang Xiaojuan, Zhao Jianlin, Cui Li. Analysis of mode properties of photonic crystal fiber with high birefringence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1379~1383
张晓娟,赵建林,崔 莉. 一种高双折射光子晶体光纤的模式特性分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1379~1383
- 10 Gong Taorong, Yan Fengping, Wang Lin *et al.*. Analysis of properties of high birefringence photonic crystal fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 559~562
龚桃荣,延风平,王 琳等. 高双折射光子晶体光纤特性分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 559~562