

文章编号 : 0253-2239(2002)10-1211-05

拉曼放大器中放大的自发拉曼散射与 拉曼开-关增益关系的研究*

付成鹏 印新达 何万晖 杨滔滔

(武汉邮电科学研究院光迅科技有限责任公司, 武汉 430074)

摘要: 研究了拉曼放大器中放大的自发拉曼散射对拉曼开-关增益的影响, 并提出了一种利用自发拉曼散射谱来调整拉曼放大器拉曼开-关增益平坦的方法, 实验采用 4 个波长为 14.2x nm 的激光二极管作为抽运源, 75 km 的 G. 652 光纤作为传输介质, 获得了 C 波段附近的光放大, 同时对此给出了合理的理论解释。

关键词: 拉曼放大器; 放大的自发拉曼散射; 拉曼开-关增益; 前向自发拉曼散射; 后向抽运

中图分类号: TN241 文献标识码: A

1 引 言

光纤中的受激拉曼散射作为一种非线性效应正引起人们的广泛关注。

以往主要研究受激拉曼散射对密集波分复用通信系统中的信道串扰方面的影响, 对拉曼放大器的研究相对较少。

随着通信系统容量的快速增长, 特别是最近几年随着因特网、宽带综合业务数字网(B-ISDN)及多媒体通信的高速发展, 对传输速率和带宽的要求越来越高, 传统的掺铒光纤放大器已不能完全满足这方面的需要, 一种放大范围更宽、噪声指数更低的拉曼光纤放大器(RFA)是实现此功能的最理想方案之一。

拉曼光纤放大器与掺铒光纤放大器相比有许多优点, 主要表现在以下几个方面: 首先, 在理论上只要有合适波长的抽运源就能够放大任意波段的光信号, 而且拉曼放大是以传输光纤作为增益介质, 可以构成分布式拉曼光纤放大器(DRFA), 使信号在传输过程中逐渐放大, 这样可以减小入纤功率, 有助于降低光纤中的非线性效应对通信系统的影响; 同时, 拉曼光纤放大器有更低的噪声指数, 可以显著降低通信系统的光载噪比(OSNR)。正是由于拉曼光纤放大器以上的诸多优点, 才使得拉曼光纤放大器在近几年获得飞速发展, 有关拉曼放大器的文献已

有很多报道^[1-6], 但对于拉曼光纤放大器中放大的自发拉曼散射(ASE)与增益之间的相互影响的文献并不多, 因此本文对拉曼光纤放大器中放大的自发拉曼散射与拉曼开-关增益之间的关系进行实验研究和理论分析。

2 放大的拉曼散射与拉曼开-关增益的实验研究

用来进行拉曼放大器研究的实验装置如图 1 所示。

实验中采用 4 个 14.2x nm 波长的激光二极管作为抽运源, 所用的光纤为 75 km 的 Corning G. 652 光纤, 信号光的传输损耗为 0.2 dB/km, 抽运光的传输损耗为 0.23 dB/km, 其增益系数频谱如图 2 所示。

实验分别测了前向(与抽运光同向)和后向(与抽运光反向)情况下的放大的自发拉曼散射谱和增益。实验发现放大的自发拉曼散射与拉曼放大器的拉曼开-关增益有着密切的关系。增益平坦度是放大器的一项关键性指标, 因此研究放大的自发拉曼散射与增益之间的关系的主要目的就是能够找到一种通过调整放大的自发拉曼散射而使增益达到一个很好平坦度的方法。因为我们研究的最终目的是得到后向抽运的平坦的拉曼开-关增益, 因此我们在本实验中主要研究前、后向放大的自发拉曼散射谱与后向抽运的拉曼开-关增益的关系。

* 湖北省科技攻关资助课题。

E-mail: fchp@eyou.com

收稿日期 2001-10-25; 收到修改稿日期 2001-12-18

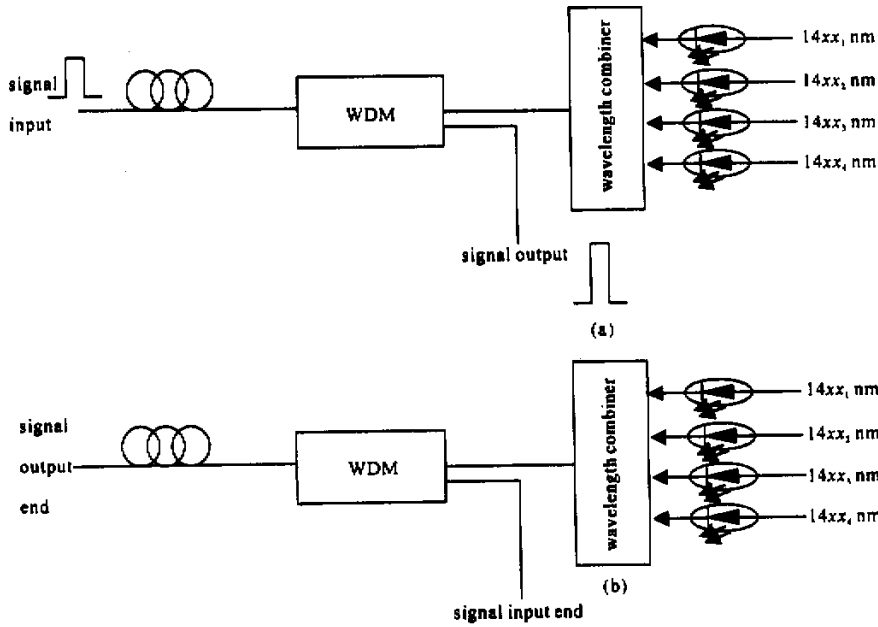


Fig. 1 The experiment setup. (a) Backward pump ;(b) Forward pump

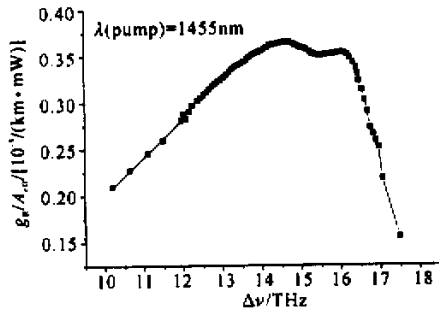


Fig. 2 The spectrum of Raman gain coefficients.
 $\lambda(\text{pump}) = 1455 \text{ nm}$

3 实验结果与理论分析

3.1 后向的放大的自发拉曼散射谱与后向抽运的拉曼开-关增益

利用光谱分析仪测量了不同抽运功率下的 C 波段信号波长的后向放大的自发拉曼散射的光功率和拉曼光纤放大器的拉曼开-关增益。在总抽运功率为 653 mW 的情况下,所得到的后向的放大的自发拉曼散射谱与拉曼放大器的增益谱如图 3 所示。

由实验数据可以看出,当后向的放大的自发拉曼散射的最大最小值相差 2.41 dB 时,由此引起的拉曼开-关增益最大最小值差为 3.53 dB。因此要想调整后向抽运的拉曼光放大器的增益平坦度,仅通过调整后向的放大的自发拉曼散射的平坦是不够

的。通过调整抽运激光器的驱动电流,使得总抽运功率为 471 mW 需要说明的是:每个抽运波长的驱动电流并不降低相同的数值,而且驱动电流的改变并不影响激光二极管的输出波长的改变,此时放大的自发拉曼散射的最大最小值相差 1.4 dB,由此引起的拉曼开-关增益不平坦度也达到了 1.92 dB。

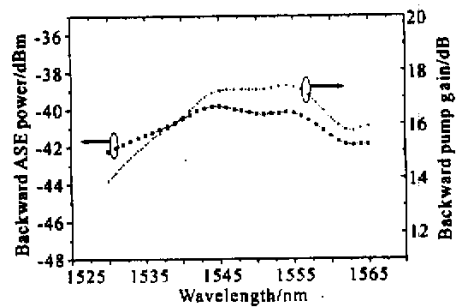


Fig. 3 The spectrum of backward ASE and the spectrum of backward pump on-off gain

3.2 前向的放大的自发拉曼散射谱与后向抽运的拉曼开-关增益

在与测量后向放大的自发拉曼散射实验条件相同的情况下[图 1(b)],我们利用光谱分析仪也分别测量了 C-band 信号波长的前向的放大的自发拉曼散射的光功率,在总抽运功率为 653 mW 的情况下,所得到的前向的放大的自发拉曼散射谱与后向抽运时的拉曼放大器的增益谱如图 4 所示。

由实验数据可以看出,当前向的放大的自发拉

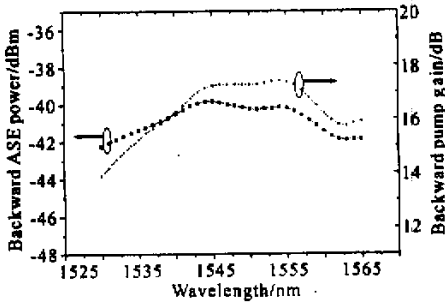


Fig. 4 The spectrum of forward ASE and the spectrum of backward pump on-off gain

曼散射的最大最小值相差 2.81 dB 时,由此引起的后向抽运的拉曼光放大器的拉曼开-关增益最大最小值差为 3.53 dB。同样在总抽运功率为 471 mW

时,当前向的放大的自发拉曼散射的最大最小值相差 1.65 dB 时,由此引起的后向抽运的拉曼开-关增益不平坦度为 1.92 dB。

通过比较前、后向的放大的自发拉曼散射谱的最大最小值差引起的后向抽运拉曼放大器的拉曼开-关增益不平坦度来看,前向的放大的自发拉曼散射谱的最大最小值差对后向抽运的拉曼开-关增益不平坦度影响比后向放大的自发拉曼散射谱的最大最小值差对后向的拉曼开-关增益不平坦度影响要小。对于这种实验现象我们也给出了理论解释。

3.3 理论分析

对于光纤中的受激拉曼散射,抽运光的光子数和斯托克斯光的光子数沿光纤长度的变化,可以通过以下两个耦合波方程表示^[7]:

$$\frac{dN_p(z)}{dz} = -\alpha_p N_p(z) + g_R N_p(z) [N_{s1}(z) + 1], \quad (1)$$

$$\frac{dN_{sj}(z)}{dz} = -\alpha_{sj} N_{sj}(z) + g_{R(j-1)} N_{s(j-1)}(z) [N_{sj}(z) + 1] - g_{Rj} N_{sj}(z) [N_{sj} + 1] \quad (j = 1, 2, \dots), \quad (2)$$

式中 N_p 为抽运光的光子数, N_{sj} 为第 j 级斯托克斯光的光子数, α_p 为抽运光在光纤中的传输损耗, α_{sj} 为第 j 级斯托克斯光在光纤中的传输损耗, g_R 为拉曼增益系数。

由于不同的抽运波长间隔,所产生的放大的自发拉曼散射和增益是不同的,因此在抽运波长间隔不同的情况下,应 g_R 取不同的数值,在实际计算中取实验测得的数值。

在抽运光向斯托克斯光的转移能量可以忽略、

并且没有高阶斯托克斯光产生(只有第一阶斯托克斯光)的情况下,可以解得抽运光沿光纤长度的光子数分布:

在前向抽运的情况下,

$$N_p(z) = N_p(0) \exp(-\alpha_p z). \quad (3)$$

在后向抽运的情况下,

$$N_p(z) = N_p(L) \exp[-\alpha_p(L-z)]. \quad (4)$$

其中 $N_p(0)$ 、 $N_p(L)$ 为入射的抽运光子数。

对于前向放大的自发拉曼散射的光子数为:

$$N_{fs}(L) = \exp(-\alpha_s L) \int_0^L g_R N_p(0) \exp[(\alpha_s - \alpha_p)z] \exp\left\{\frac{g_R N_p(0)}{\alpha_p} [\exp(\alpha_p z) - \exp(-\alpha_p L)]\right\} dz, \quad (5)$$

对于后向放大的自发拉曼散射的光子数为:

$$N_{bs}(L) = \int_0^L g_R N_p(L) \exp\left[-(\alpha_s + \alpha_p)z + g_R N_p(L) \frac{1 - \exp(-\alpha z)}{\alpha_p}\right] dz, \quad (6)$$

因此,所产生的放大的自发拉曼散射总的功率为:

$$P_{fs} = \int_{\nu_p}^{\infty} h\nu N_{fs}(L) d\nu, \quad (7)$$

h 为普朗克常数。结合(5)式~(7)式,可以求得中心波长为 λ_0 处、波长间隔为 $\Delta\lambda$ 时的放大的自发拉曼散射的光功率为:

$$P_{fs}(L) = \frac{\Delta\lambda hc^2}{\lambda_0^3} g_R N_p(0) \exp(-\alpha_s L) \int_0^L \exp\left\{\frac{g_R N_p(0)}{\alpha_p} [\exp(-\alpha_p z) - \exp(-\alpha_p L)]\right\} dz. \quad (8)$$

在 $\lambda_0^2 \gg \Delta\lambda^2, \alpha_p L \gg 1$ 的情况下,拉曼放大器的增益为[8,9]:

$$G = 4.343 \frac{g_R N_p(0)}{\alpha_p} \quad (9)$$

我们只讨论 $\alpha_p z < 1$ 的情况,此时 $\exp(-\alpha_p z)$ 可以作级数展开,所以

$$\exp(-\alpha_p z) \approx 1 - \alpha_p z \quad (10)$$

由(8)式~(10)式解得

$$P_{fs}(L) = \frac{\Delta\lambda hc^2}{\lambda_0^3} \exp\left[-\alpha_s L + \frac{g_R N_p(0)}{\alpha_p}\right] \quad (11)$$

取 $\Delta\lambda = 0.1 \text{ nm}$,可以求得任一波长处的前向放大的自发拉曼散射光功率,在抽运功率为 653 mW 时,由理论计算得到的前向的放大的自发拉曼散射谱与后向抽运的拉曼增益谱如图 5 所示。

由计算结果可以看出,当前向的放大的自发拉

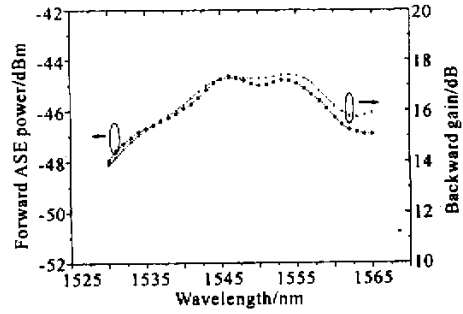


Fig. 5 The spectrum of simulated forward ASE and the spectrum of backward on-off gain

曼散射谱的最大最小值相差 3.3 dB 时,由此引起的后向抽运的拉曼开-关增益不平坦度为 3.53 dB。

对于后向抽运,在 $\lambda_0^2 \gg \Delta\lambda^2, \alpha L \gg 1, \exp(-\alpha_p z) \approx 1 - \alpha_p z$ 成立的情况下:

$$P_{bs}(L) = \frac{\Delta\lambda hc^2}{\lambda_0^3} \left(\left[\frac{4.343}{G} + \exp(-\alpha_p L) \right] \exp\left\{ \frac{G}{4.343} [1 - \exp(-\alpha_p L)] \right\} - \left(\frac{4.343}{G} + 1 \right) \right) \quad (12)$$

取 $\Delta\lambda = 0.1 \text{ nm}$,可以求得任一波长处的后向放大的自发拉曼散射光功率,在抽运功率为 653 mW 时,由理论计算得到的后向的放大的自发拉曼散射谱与后向抽运的拉曼增益谱如图 6 所示。

由计算结果可以看出,当后向的放大的自发拉曼散射的最大最小值相差 2.73 dB 时,由此引起的后向抽运的拉曼光放大器的拉曼开-关增益最大最小值差为 3.53 dB。

我们把实验测得的结果与理论计算的结果用一表格表示,如表 1 所示。

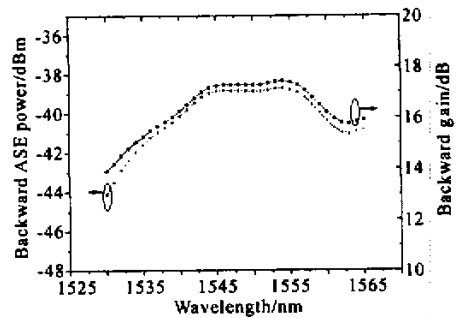


Fig. 6 The spectrum of simulated backward ASE and the spectrum of backward on-off gain

Table 1. The backward Raman on-off gain flatness caused by the difference between the maximum and minimum power of ASE

| | | the difference between ASE(max) and ASE(min)/dB | | the backward Raman on-off gain flatness /dB |
|------------------------|--------------|---|------------|---|
| | | experiment | simulation | |
| $P_p = 653 \text{ mW}$ | forward ASE | 2.81 | 3.30 | 3.53 |
| | backward ASE | 2.41 | 2.73 | |
| $P_p = 471 \text{ mW}$ | forward ASE | 1.65 | | 1.92 |
| | backward ASE | 1.40 | | 1.92 |

由理论计算的结果也可以看出,后向的放大的自发拉曼散射的最大最小值差对拉曼放大器的拉曼开-关增益的不平坦度的影响比前向的放大的自发拉曼散射的最大最小值差对拉曼开-关增益的不平坦度的影响要大一些,这与我们的实验结果是完全一致的。

结论 通过以上的实验结果和理论分析,我们可以

得出一个结论,在通过调整放大的自发拉曼散射的平坦度来调整拉曼放大器的增益平坦度时,最好是依照前向的放大的自发拉曼散射谱来调整后向的拉曼开-关增益。

参 考 文 献

[1] Rottwitt K, Stentz A, Rabarijaona E. Transparent 80 km Bi-directionally pumped distributed Raman amplifier with

- second order pumping. *ECOC'99*, 1999, September, 26~30
- [2] Emori Y, Tanaka K, Namiki S. 100 nm bandwidth flat-gain Raman amplifiers pumped and gain-equalised by 12-wavelength-channel WDM diode unit. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(16):1355~1357
- [3] Kidorf H, Rottwitt K, Nissov M. Pump interaction in a 100-nm bandwidth Raman amplifier. *IEEE Photonics Technology Lett.*, 1999, **11**(5):530~532
- [4] Olsson N A, Hegarty J. Noise properties of a Raman amplifier. *J. Lightwave Technol.*, 1986, **4**(4):396~399
- [5] Takachio N, Suzukin H. Application of Raman-distribute amplification to WDM transmission system using 1.55 μm dispersion-shifted fiber. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(1):60~69
- [6] Jia Dongfang, Li Shichen, Song Lijun. Optimized design of fiber Raman amplifiers. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(7):808~811 (in Chinese)
- [7] Aoki Y. Properties of fiber Raman amplifiers and their applicability to digital optical communication systems. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(7):1225~1239
- [8] Mochizuki K, Edagawa N, Iwamoto Y. Amplified spontaneous Raman scattering in fiber Raman amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1986, **4**(9):1328~1333
- [9] Andrew J. Stentz Photuris, Inc. OFC2001 Short Course Notes, 11. America

Relation Between Amplified Spontaneous Raman Scattering and Raman on-off Gain

Fu Chengpeng Yin Xinda He Wanhui Yang Taotao

(Wuhan Research Institute of Post and Telecommunication Accelink Company, Wuhan 430074)

(Received 25 October 2001; revised 18 December 2001)

Abstract: The effect of amplified spontaneous Raman scattering on the Raman amplifier on-off gain is studied and a method to adjust the flatness of Raman amplifier on-off gain by the spectrum of ASE is proposed. Four 14xx nm laser diodes were used as pump source, 75 km G.652 fiber as transmission medium, and obtained the amplified light of C-band in the experiment. Theoretical explanation is presented.

Key words: Raman amplifier; amplified spontaneous; Raman on-off gain; forward spontaneous Raman scattering; backward pump