

文章编号 : 0253-2239(2002)11-1336-04

拉曼光纤放大器增益谱特性研究*

杨滔滔 印新达 何万晖 傅成鹏

(武汉邮电科学院光迅科技有限公司, 武汉 430074)

摘要: 分析了影响拉曼光纤放大器增益谱的几个因素。在四抽运激光器抽运时, 模拟了多抽运激光器抽运时的拉曼增益谱特性。实验中, 采用增益平坦滤波器和功率分配两种方法实现增益谱平坦, 指出了功率分配方法的优势。

关键词: 拉曼光纤放大器; 增益谱; 功率分配

中图分类号: TN25 文献标识码: A

1 引 言

光纤通信系统容量的急剧扩大, 对光放大器提出了越来越高的要求。利用光纤非线性效应——受激拉曼散射(SRS), 当适当波长的抽运光注入到光纤中, 拉曼频移处的光信号将得到放大。基于这种原理的放大器称之为拉曼光纤放大器(RFA)。与掺铒光纤放大器(EDFA)和半导体光放大器(SOA)相比, 拉曼光纤放大器优势是明显的。增益波长由抽运波长决定, 理论上可以实现任意波长信号的放大, 可以实现分布式放大, 增益介质就是传输光纤本身, 自发辐射噪声-自发辐射噪声差拍噪声小, 噪声指数低, 可以通过多波长抽运, 实现宽带放大。但是拉曼放大器的商用化强烈地依赖于以下两个方面: 大功率抽运源和足够平坦的增益谱。随着大功率半导体抽运激光器制作工艺日趋成熟, 增益谱的平坦特性已成为拉曼放大器设计中考虑的首要问题。

2 拉曼放大器的增益谱

由于单一抽运源提供的增益太小, 而且增益平坦度很差, 现在研究的主要是采用多波长抽运的拉曼放大器。对于多波长抽运的拉曼放大器而言, 增益谱特性主要取决于: 拉曼增益系数 g_R ; 光纤的损耗谱, 抽运光-抽运光相互作用, 抽运衰竭; 放大的自发辐射噪声(ASE)与瑞利散射。同时, 高阶非线性效应如自相位调制(SPM), 交叉相位调制(XPM)和

四波混频(FWM)等也对增益谱有一定的影响。

2.1 拉曼增益系数

熔融玻璃属于非晶态材料, 大部分原子具有料想不到的化合价和环的尺寸, 使得 O-Si 键键角 θ 的分布范围很大, 导致拉曼增益范围很宽, 在拉曼频移(13 THz)附近有一个较宽的主峰^[1,2](在 440 cm^{-1} 和 490 cm^{-1} 的位置有两个峰, 在 G.652 光纤中, 两峰差异很小)。对于掺锗的普通单模光纤而言, 拉曼增益系数的最大值由(1)式给出:

$$g_R^{\max} = \frac{1.2 \times 10^{-13}}{\lambda} (1 + 0.08 x_{\text{GeO}_2}) \left(\frac{1}{1 + \Delta} \right)^2, \quad (1)$$

式中, λ 为抽运光的波长, 单位是 μm ; Δ 是光纤的相对折射率差; x_{GeO_2} 是 GeO_2 的浓度^[3], 增益系数的单位为 $\text{m} \cdot \mu\text{m}/\text{W}$ 。试验中, 我们采用的是 Corning 公司的 G.652 光纤, 测得单一抽运源抽运时, 激光器拉曼增益如图 1 所示。

试验证明拉曼增益系数与抽运光功率无关。

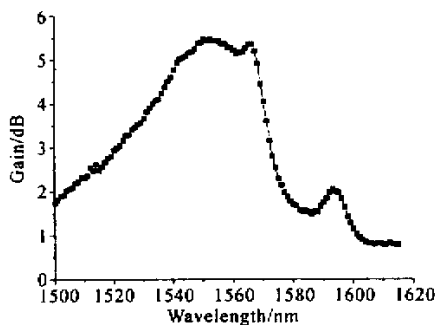


Fig.1 Gain spectrum of single pump

2.2 光纤的损耗谱

长距离传输导致光纤对不同波长损耗差异的积累, 在输出端劣化拉曼放大器的增益平坦度。在 $1525\text{ nm} \sim 1584\text{ nm}$ 的范围内, 经过 80 km 的光纤

* 国家科委'863'高新技术和湖北省科技攻关项目资助课题。

E-mail: yangtt@vori.com.cn

收稿日期: 2001-12-03; 收到修改稿日期: 2002-01-28

后, 衰耗谱对增益谱平坦度的劣化超过了 0.7 dB。如图 2 所示。

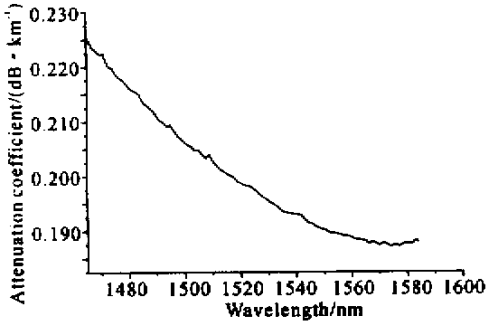


Fig. 2 Loss of fiber

2.3 抽运光之间的相互作用

抽运光与抽运光相互作用主要是受激拉曼散射(SRS)和四波混频(FWM)。由于色散的影响,在 G.652 光纤中,没有明显的四波混频现象,而在非零色散位移光纤(NZDSF)中,出现了新的波长^[4],这在试验中得到了很好的验证。在 G.652 光纤中,抽运光之间的受激拉曼散射可由(2)式^[5]来描述:

$$\begin{aligned} \frac{dP(\nu, z)}{dz} = & -\alpha(\nu)P(\nu, z) + \gamma(\nu)P_b(\nu, z) + \\ & \int_{\zeta > \nu} \left\{ \frac{g_R(\nu - \zeta)}{K_{eff} A_{eff}} [P(\zeta, z) + P_b(\zeta, z)] P(\nu, z) + \right. \\ & 2h\nu \frac{g_R(\nu - \zeta)}{K_{eff} A_{eff}} [P(\zeta, z) + P_b(\zeta, z)] \times \\ & \left. \left[1 + \frac{1}{\exp[h(\zeta - \nu)/(KT)] - 1} \right] \right\} d\zeta - \\ & \frac{\zeta}{\nu} \int_{\zeta < \nu} \left\{ \frac{g_R(\nu - \zeta)}{K_{eff} A_{eff}} [P(\zeta, z) + P_b(\zeta, z)] P(\nu, z) + \right. \\ & 2h\nu \frac{g_R(\nu - \zeta)}{K_{eff} A_{eff}} [P(\zeta, z) + P_b(\zeta, z)] \times \\ & \left. \left[1 + \frac{1}{\exp[h(\zeta - \nu)/(KT)] - 1} \right] \right\} d\zeta, \quad (2) \end{aligned}$$

式中, $P(\nu, z)$, $P_b(\nu, z)$ 分别为频率为 ν 的光信号前向传输功率和后向传输功率, ζ 为抽运光或者是信号光的频率, $\alpha(\nu)$ 为光纤衰耗, $\gamma(\nu)$ 为瑞利散射系数, K_{eff} 为抽运光之间的偏振相关系数 ($1 < K_{eff} < 2$), A_{eff} 为光纤的有效面积, K 为玻尔兹曼常数, h 为普朗克常数, T 为光纤的热力学温度。在多波长抽运时(2)式是非线性微分方程组,无法求出解析解,只能得到数值解。

2.4 增益饱和、放大的自发辐射噪声与瑞利散射

增益饱和是指当输入信号功率增大,抽运功率转移给信号而产生的损耗不可忽略时,放大器的开

关增益偏离了小信号增益曲线的现象。对于普通的单模光纤而言,由于拉曼增益系数小、有效面积大和较大的衰耗,使得其拉曼阈值非常高,约为 30.2 dBm^[6]。在入射抽运光线宽远小于自发拉曼散射射线宽时,受激拉曼散射的线型和谱线宽度主要由自发拉曼散射谱线的线型决定。同时,放大的自发辐射噪声的温度依赖性在系统设计时也应考虑。瑞利散射系数 γ 在 1460 nm ~ 1600 nm 波长范围内为 $7.5 \times 10^{-5} \text{ km}^{-1} \sim 5.8 \times 10^{-5} \text{ km}^{-1}$ 。

3 拉曼增益谱型的设计

由于上述诸多因素的制约,在拉曼增益谱设计的时候,不能将抽运光各自的增益谱作简单的线性叠加后作为放大器的增益谱,而必须考虑到各抽运源之间的相互作用(在 G.652 光纤中主要是受激拉曼散射)。图 3 是四个抽运源等功率分配时,不同总功率水平下的增益曲线。

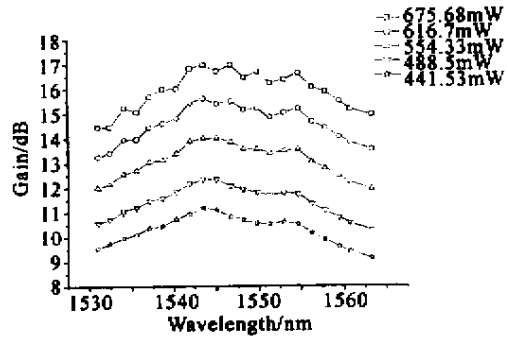


Fig. 3 Gain spectrum of different pump level

在图 3 中,增益抖动高于 1.8 dB,这在通信系统中是无法忍受的。要解决增益平坦问题最直接的方法是掺铒光纤放大器一样,加上一个增益平坦滤波器(GFF)。图 4 是我们设计的滤波器的衰耗谱。加入滤波器后,拉曼放大器的增益谱变为如图 5 所示。

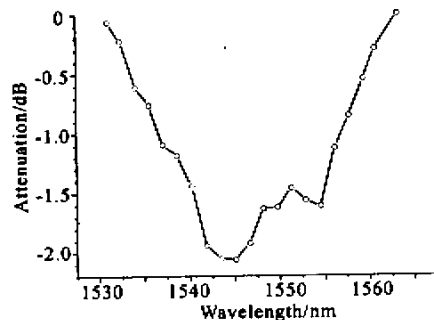


Fig. 4 Shape of gain flatterfilter

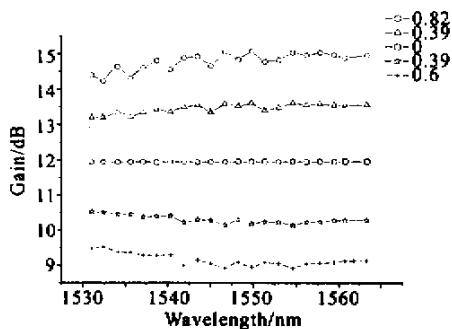


Fig. 5 Gain spectrum after gain flattening

图 5 显示 ,加入滤波器后 ,不同抽运功率水平下 ,拉曼放大器的增益抖动最大为 0.82 dB。增益越大 ,增益抖动越大。尽管采用增益平坦滤波器能够解决增益谱平坦的问题 ,但是在实际设计中 ,固定滤波器的使用不仅会增加一个器件 ,而且对于不同类型的光纤 ,灵活性很差 ,而动态滤波器的价格非常昂贵。因此有必要采用新的方法来平坦增益谱。

在抽运波长固定的情况下 ,影响增益谱平坦主要是各抽运激光器功率的分配。当四个抽运激光器功率相同时 ,得到增益谱如图 6 所示。可以看到 :尽管峰值增益很高 ,但是增益谱平坦性非常差 ,在 1530 nm ~ 1565 nm 的波长范围内 ,增益抖动达到了 3.42 dB。改变各个抽运激光器的注入电流 ,将单开一个抽运激光器的输出功率与四个抽运激光器同时打开时的输出功率相比较 ,得到四个抽运激光器同时打开时抽运光之间的受激拉曼散射增益如图 7 所示 ,其中 : $\lambda_2(\text{pump}2) > \lambda_3(\text{pump}3) > \lambda_1(\text{pump}1) > \lambda_4(\text{pump}4)$ 。由图 7 可见 ,两个短波长的抽运光得到很大的附加衰减 ,波长越短 ,衰减越厉害 ;长波的两个波长则得到了不同程度的增益 ,波长最长的抽运光得到的增益最大 ,而次最长的抽运光由于从短波长的抽运光处获得增益 ,同时又将能量转移给波长最长的抽运光 ,因此在整个注入电流范围内 ,增益变化很小。总体来看 ,注入电流越大 ,也就是各抽运

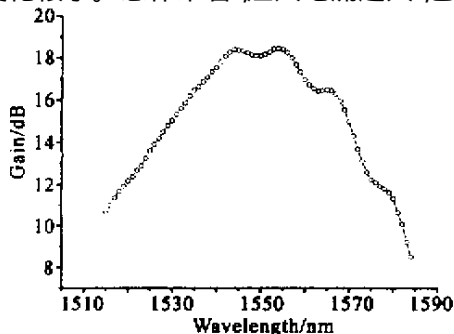


Fig. 6 Gain spectrum of four pumps with the same power

激光器的功率越大 ,抽运光间的能量转移越厉害。

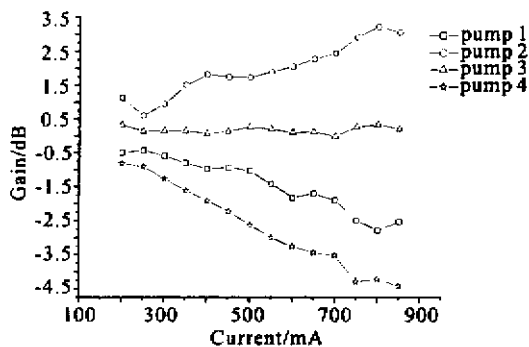


Fig. 7 Stimulated Raman scattering at different power level

利用 (2) 式 ,经过数值计算 ,得到的四个抽运激光器同时打开时在 80 km G.652 光纤的能量演化曲线 (图中实线为单一抽运激光器运转时的能量演化曲线)如图 8 所示。抽运激光器 4 和抽运激光器 1 的能量曲线在单抽运激光器的能量演化曲线之上 ,而抽运激光器 3 和抽运激光器 2 在单抽运激光器曲线之下 ,抽运激光器 3 与单抽运激光器曲线几乎重合在一起 ,这也与图 7 吻合得非常好 ;其他各抽运激光器的能量曲线与单一抽运激光器能量曲线的差异也与图 7 吻合。这样 ,我们就可以通过对 (2) 式数值计算来获得满足给定增益谱平坦要求时各抽运激光器的功率分配。

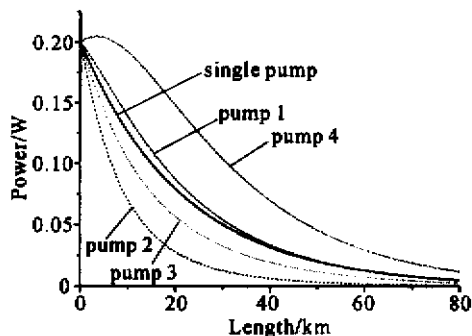


Fig. 8 Pump evolution in fiber of four pumps

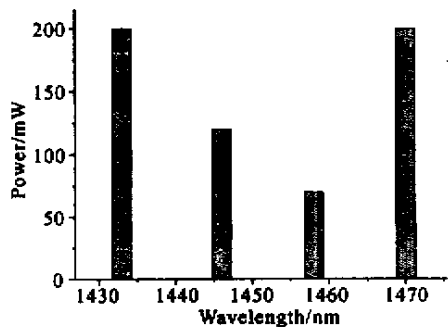


Fig. 9 Power distribution

经过模拟计算 ,在采用图 9 所示的功率分配时 ,

获得了很好增益平坦特性(图 10) ,增益大于 10 dB ,增益抖动小于 1 dB。

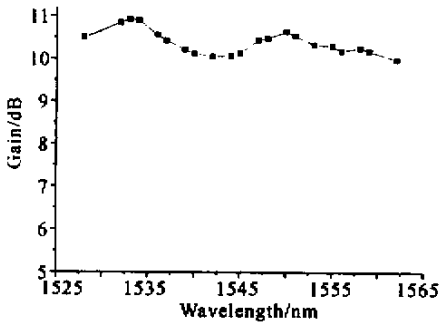


Fig.10 Flattened gain spectrum

与加滤波器的方法相比 ,采用功率分配的方法实现增益谱平坦具有明显的优势 :不需要增加光学元件 ,不会增加成本 ,可以通过计算机设置功率的途径来适应不同类型的光纤 ,更具灵活性。

结论 本文在分析了影响拉曼放大器增益谱平坦度的几个主要因素的基础上 ,实际测量了多抽运激光器后向抽运时的增益谱 ;采用加滤波器和功率分配的方法来平坦拉曼增益谱 ,得到了很好的效果 ,对比分析了这两种方法 ,指出了功率分配方法的优越性。

参 考 文 献

- [1] Galeener F L. Band limits of vibrational spectra of tetrahedral glass. *Phys. Rev. (B)*, 1979, **19**(8) : 4292 ~ 4296
- [2] Zarzycki J. *Glass and Amorphous Materials* (玻璃与非晶态材料). *Gan Fuxi transl.* Beijing : Science Press , 2001. 2
- [3] Davey S T. Optical gain spectrum of GeO₂-SiO₂ Raman fiber amplifiers. *IEE Proc.* , 1989 , **136** : 301 ~ 307
- [4] Neuhauser R E , Krummrich P M , Bock H *et al.* . Impact of nonlinear pump interactions on broadband distributed Raman amplification. *OFC '2001*. MA-4
- [5] Kidorf H *et al.* . Pump interaction in a 100-nm bandwidth Raman amplifier. *IEEE Photonics Technol. Lett.* , 1999 , **11**(5) : 530 ~ 532

Gain Spectrum of Raman Fiber Amplifier

Yang Taotao Yin Xinda He Wanhui Fu Chengpeng
(ACCELINK , WRI)

(Received 3 December 2001 ; revised 28 January 2002)

Abstract : The effects of several factors on the gain spectrum of a Raman fiber amplifier (RFA) are discussed. Pump evaluation is described by computer simulation with four pump laser diodes. Two methods are used to flatten the gain spectrum , gain flaterfilter (GFF) and pump distribution , and it is found that the pump distribution is better than GFF.

Key words : Raman fiber amplifier ; gain spectrum ; power distribution