

文章编号 : 0253-2239(2001)07-0808-04

光纤拉曼放大器的优化设计问题*

贾东方 李世忱 宋立军

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)
(国家教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072)

摘要: 根据拉曼放大的基本方程, 从增益介质、抽运光源和抽运方式三个方面提出光纤拉曼放大器的优化设计原则, 并给出理论计算结果。

关键词: 光纤拉曼放大器; 增益介质; 抽运光源

中图分类号: TN242 文献标识码: A

1 引 言

在过去 10 年中, 光通信网络容量快速增长, 最近几年的超宽带波分复用实验, 已将光纤通信的传输容量提高到几个 Tbit/s 的水平。同时随着因特网、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, 使现有掺铒光纤放大器(EDFA)的 1530 nm ~ 1570 nm 可用带宽将逐步用尽。为进一步提高传输容量, 需研究可工作在光纤低损耗窗口(1.2 μm ~ 1.65 μm)其它波段的光放大器。光纤拉曼放大器(FRA)是实现此种功能的最理想的方案之一, 这是因为:

1) 拉曼放大是一个非谐振过程, 增益谱响应仅依赖于抽运波长和带宽, 只要有合适的抽运光源, 就可得到任意波长的拉曼放大。2) 和大多数介质中在特定频率上产生拉曼增益情况相反, 石英光纤中的拉曼增益可在一很宽的范围内连续地产生, 因此可用作宽带放大器。3) 通过合理选择抽运波长, 可以精确定位拉曼谱形状和控制增益位置, 在补充和拓展掺铒光纤放大器的增益带宽方面表现出极其诱人的前景。4) 拉曼放大器可与其它如掺铊光纤放大器(TDFA)、掺镨光纤放大器(PDFA)等级联, 产生宽带、平坦的增益, 可用于超宽带波分复用系统。

在掺铒光纤放大器出现前, 拉曼放大器被认为是最有希望用于 1.55 μm 波段通信的放大器, 但随着高效掺铒光纤放大器的发展, 加上光纤拉曼放大器本身效率较低, 人们对拉曼放大器的兴趣一度降

低。近几年来, 随着现有掺铒光纤放大器的可用带宽将逐步耗尽, 和高功率抽运光源、尤其是光纤拉曼激光器与半导体激光器的发展, 以及光纤制造技术的进展, 光纤拉曼放大器重新受到重视并得到迅速发展。包括 1.3 μm、1.4 μm、1.5 μm 和 1.6 μm 的多个波段的光纤拉曼放大器均有了报道, 增益带宽在 100 nm 以上、峰值增益 40 dB 以上的光纤拉曼放大器的成功实验不断出现。在每年的世界光纤通信会议(OFC)上, 都有若干篇光纤拉曼放大器的研究报告, 成为世界范围内的研究热点之一, 其应用也从最初的光孤子实验^[1], 发展到成功用于系统升级^[2]、无中继传输^[3]、超短光孤子产生^[4]和超连续光源^[5]。

最近一、两年, 光纤拉曼放大器的研究出现了一些新特点: 1) 从单波长抽运光源、单级放大发展到多波长抽运光源、多级放大。由于单波长抽运的拉曼增益谱较窄, 带宽一般在 10 nm ~ 40 nm 左右^[2,3], 难以满足宽带通信的要求, 多波长抽运已逐渐占主导地位。Emori^[6]和 Lewis^[7]分别用 12 个波长信道的波分复用激光二极管单元和三波长级联光纤拉曼激光器作抽运光源, 分别得到了 100 nm 和 114 nm 的增益带宽。在 1999 年欧洲光纤通信会议(ECOC)上, Masuda 等利用多波长抽运和多级放大, 在 1.55 μm 附近获得了 132 nm 的迄今为止最大的透明增益带宽。2) 光纤拉曼放大器与掺稀土光纤放大器结合构成的混合型放大器成为热点^[8~11], 这类放大器具有宽带宽、高增益、低噪声、高输出功率的优点。其中主要有两类: 即光纤拉曼放大器/掺铒光纤放大器混合放大器和光纤拉曼放大器/掺铊光纤放大器混合放大器, 而前者居多。3) 1.3 μm 波段的拉曼放大器日益受到重视^[12,13]。从世界范围来

* 天津市光电子联合科学研究中心、国家自然科学基金(69877012)资助课题。

收稿日期: 2000-04-29; 收到修改稿日期: 2000-09-14

看 现有敷设的多为工作窗口在 $1.3 \mu\text{m}$ 波长区的普通单模光纤。现在用于 $1.3 \mu\text{m}$ 通信窗口的光放大器主要是掺镨光纤放大器,但掺镨光纤放大器要求抽运功率高,另外难与石英光纤熔接,于是人们对 $1.3 \mu\text{m}$ 波段的光纤拉曼放大器产生了极大兴趣,有人甚至预言它可以完全代替掺镨光纤放大器^[12],但这除了要有合适的抽运光源外,如何获得高掺镨、低损耗的光纤也至关重要。4) 拉曼光纤放大器越来越多地应用于光纤通信系统实验^[13~15],这对其真正走向实用化具有重要意义。其中 Suzuk^[15]等人的研究具有代表性。他们在光纤零色散区附近,利用多波长分布式光纤拉曼放大器成功地将信道间隔为 50 GHz 、 $32 \times 10 \text{ Gbit/s}$ 的密集波分复用信号传输了 640 km ,其优良的性能将为显著提高传输距离以及如何在零色散波长附近实现密集波分复用传输铺平道路。在 2000 年的世界光纤通信会议上, Takashina 等用拉曼放大成功实现了 1 Tbit/s ($100 \text{ ch} \times 10 \text{ Gbit/s}$) 波分复用信号无中继传输 200 km ,在此实验中,拉曼放大器在显著提高传输质量上起了关键作用,是大容量无中继传输系统所必不可少的。另外,为了使光纤拉曼放大器更快走向实用,对其它如增益饱和^[16]、串扰^[17]等问题也引起人们注意。

拉曼光纤放大器的研究在近几年已取得巨大进展,但现有石英光纤的拉曼增益系数和转换效率还很低,拉曼放大需较高的抽运功率和较长的光纤,离实用化的尺寸还有差距。今后的研究重点一方面应提高作为拉曼增益介质的光纤的性能,另一方面由于现在常用的抽运光源——级联拉曼光纤激光器结构复杂、造价偏高,所以应加紧对易与光纤集成的小型化、高功率、廉价的抽运光源的研究。

虽然光纤拉曼放大器的研究已比较深入和全面,但尚未发现对其设计问题进行系统研究的有关报道。本文从拉曼放大的基本方程出发,在前人工作的基础上,总结出光纤拉曼放大器优化设计的某些原则,这对于设计光纤拉曼放大器具有一定的指导意义。

2 光纤拉曼放大器的优化设计

2.1 拉曼光纤的选取

根据受激拉曼散射理论,拉曼增益或放大倍数可表示为^[18]:

$$G_A = \exp(g_R p_0 L_{\text{eff}} / A_{\text{eff}}), \quad (1)$$

式中 g_R 为拉曼增益系数, p_0 为抽运功率, A_{eff} 为有

效纤芯面积, L_{eff} 为有效作用长度,其表达式为:

$$L_{\text{eff}} = (1 - e^{-\alpha L}) / \alpha,$$

α 为光纤损耗系数。在实际应用中,还常用到拉曼净增益 G_N 和拉曼效率系数 C_R 两个参数,即

$$G_N = G_A e^{-\alpha L}, \quad C_R = g_R / A_{\text{eff}}.$$

在拉曼放大中,增益介质的选择是一个关键问题。现有石英光纤的拉曼增益效率极低,故要求的抽运光功率较高。为了获得较高的增益,人们尝试各种不同类型的光纤作为增益介质,表 1 给出了 5 种典型光纤用于拉曼增益介质时的参数。

Table 1. The Raman characteristics of five different kinds of fibers

Fiber	Δ /%	α (dB/km)	A_{eff} / μm^2	g_R (10^{-14} m/W)	C_R ($10^{-4} \text{ m}^{-1} \text{ W}^{-1}$)
A	0.30	0.190	80.0	1.52	1.90
B	0.85	0.300	50.0	2.08	4.16
C	1.40	0.231	23.9	3.11	13.01
D	2.00	0.412	15.3	3.93	25.69
E	2.80	0.600	11.5	4.41	38.35

Note: A: standard single mode fiber (SMF); B: dispersion shifted fiber (DSF); C: dispersion flattened fiber (DFP); D: dispersion compensating fiber (DCF); E: high nonlinearity fiber (HNLF). $\Delta = (n_1 - n_2) / n_1$ is the fractional index difference between core and cladding

从 (1) 式和表 1 分析,可发现在选择拉曼光纤时,应考虑以下因素的影响:

1) 纤芯掺杂浓度

随着 Δ 的增大,拉曼效率系数随之增大,纯 GeO_2 的拉曼光谱与 SiO_2 类似,但强度是它的 7 倍。高掺杂光纤具有较高增益系数的原因一方面在于随着掺杂浓度的增大,模场直径减小,拉曼散射截面增加;另一方面更重要的是纤芯面积减小导致抽运光强度增大,因此光纤的拉曼增益系数亦增大,即使纤芯掺杂的摩尔分数为百分之几,也会使光纤的拉曼增益系数显著增大。但是随着掺杂浓度的增大,光纤损耗将超过可接受的范围,引起附加增益损耗,从而减小增益效率。另外,掺杂浓度过大将增大瑞利散射,从而降低信噪比。在实际应用中应综合考虑正反两方面的影响,合理选择掺杂浓度。

2) 有效纤芯面积

在其它条件相同的情况下,较小的光纤有效纤芯面积可得到较大的净增益。

3) 光纤长度

图 1 给出了拉曼净增益随光纤长度的变化曲

线,可以看出随着光纤长度的增大增益曲线趋向饱和,同时较长的光纤导致噪声指数亦变大。因此,在获得一定增益的同时,应选择最短的饱和长度。

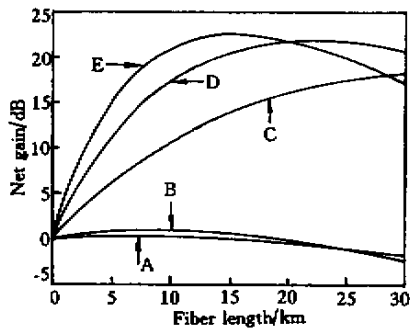


Fig. 1 Calculated net gain versus fiber length. A: standard single mode fiber; B: dispersion shifted fiber; C: dispersion flattened fiber; D: dispersion compensating fiber; E: high nonlinearity fiber

4) 光纤衰减系数

高衰减系数使光纤有效长度减小,从而拉曼净增益减小;同时高 α 值导致噪声指数亦变大。因此从这两方面讲,光纤衰减系数越小越好。

可以看出,用标准单模光纤和标准色散位移光纤作为拉曼增益介质,很难获得较大增益; $L < 10$ km的色散平坦光纤增益约10 dB,增大光纤长度可使增益提高,但实用化比较困难;高非线性光纤的增益最大,但考虑到在相同长度下其增益和色散补偿光纤相差不多,而噪声指数约是色散补偿光纤的2倍,因此从整体上考虑,色散补偿光纤(DCF)是光纤拉曼放大器的最佳增益介质。

总之,为了获得高增益和低噪声指数,用于拉曼增益介质的光纤要具有增益系数高(高 Δ 值)、有效纤芯面积小、衰减低(有效作用长度大)等特征,同时在获得一定增益时,应尽量选择较短的光纤长度。

2.2 抽运光源的选取

1) 单波长抽运

对于单波长抽运的光纤拉曼放大器,抽运波长的选取主要根据所需拉曼增益谱的中心波长而定。纯石英光纤的拉曼增益谱的峰值所对应的频率由抽运频率下移13.2 THz(440 cm^{-1}),即为了使光纤拉曼放大器性能最佳,抽运光和要放大的信号光的频率差对应13.2 THz左右。在近红外区,大部分实际抽运光源是工作在 $1.06 \mu\text{m}$ 和 $1.32 \mu\text{m}$ 的Nd:YAG激光器,这种激光器分别对 $1.12 \mu\text{m}$ 和 $1.40 \mu\text{m}$ 波长的信号产生最大的增益。从光纤通信的角度出发,考虑到光纤工艺的最新成果,割去了 $1.4 \mu\text{m}$ 附近的吸收“瘤”使得未来光纤通信波长窗

口扩展至 $1.3 \mu\text{m} \sim 1.6 \mu\text{m}$, $1.55 \mu\text{m}$ 附近已有掺铒光纤放大器,其余广阔带宽内的放大器正在看好光纤拉曼放大器。如果用其高级斯托克斯线作为级联抽运,仍可用掺钕固体激光器作抽运光源。如,由 $1.06 \mu\text{m}$ YAG激光器的 $1.24 \mu\text{m}$ 三斯托克斯线可作为抽运源,放大 $1.31 \mu\text{m}$ 的信号,用此种方法实现了30 dB放大器增益^[19]。以 $1.45 \mu\text{m}$ 的级联光纤拉曼激光器作为抽运光源,抽运非零色散位移光纤(NZDSF),在 $1.55 \mu\text{m}$ 附近实现了30 dB放大器增益^[2]。另外,除激光二极管抽运的固体激光器外,工作波段在1030 nm~1520 nm的激光二极管作抽运光源也可考虑。

2) 多波长抽运

为得到宽带、平坦的增益曲线,通常采用多波长抽运。此时除了要考虑拉曼放大器的中心波长外,还要考虑各个抽运波长的间隔问题。通常情况下,抽运波长间隔一般选30 nm~35 nm。若抽运波长间隔变小,增益曲线中心部分变得更加平坦,但整个增益带宽变小;抽运波长间隔增大,增益带宽变大,但会出现较大的增益不平坦。另外,抽运光源的线宽要足够大(一般大于1 nm),以抑制拉曼光纤中的受激布里渊散射。

3) 抽运功率的选择

对于石英光纤,为获得30 dB以上的拉曼增益,抽运功率的典型值为1 W左右。进一步提高抽运功率,可使增益变大。但是抽运功率太高,放大器中的非线性效应将使其性能明显劣化。

在多波长抽运情况下,整个增益曲线依赖于各抽运光源间的功率分布。在此种光纤拉曼放大器中,抽运源间的强烈拉曼作用使抽运功率从短波长不断转移到长波长,因此进入放大器的抽运功率主要集中在短波段。这种抽运源间的拉曼作用是有益的,它可以使抽运功率得到更有效的利用。因此与多级单波长抽运拉曼放大器相比,需要较小的总抽运功率就可获得同样的增益。

2.3 抽运方式

前向抽运带来的信号光和抽运光的串扰较大,噪声性能较差。后向抽运可抑制抽运诱发的高频偏振和强度噪声。对于普通单模光纤和色散位移光纤,后向抽运带来的串扰带宽要比前向抽运低4个量级。抽运耦合方式,以侧向耦合为佳。

结论 通过对拉曼增益方程的分析,提出光纤拉曼放大器的增益介质、抽运光源和抽运方式的选取原

则,发现色散补偿光纤是光纤拉曼放大器的最佳增益介质。

随着光纤技术和高效、可调谐抽运光源的发展,光纤拉曼放大器性能一定会得到进一步的提高,并在通信领域中得到更加广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] Mollenauer L F, Stolen R H, Islam M N. Experimental demonstration of soliton propagation in long fibers: Loss compensated by Raman gain. *Opt. Lett.*, 1985, **10**(5): 229 ~ 231
- [2] Hansen P B, Eskildsen L, Grubb S G *et al.*. Capacity upgrades of transmission systems by Raman amplification. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(2): 262 ~ 264
- [3] Kani J, Jinno M, Oguchi K. Fibre Raman amplifier for 1520 nm band WDM transmission. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(18): 1745 ~ 1747
- [4] 曹文华, 刘倾豪. 光纤中基于拉曼放大与脉冲压缩的超短光孤子产生. *光学学报*, 1999, **19**(3): 374 ~ 381
- [5] Lewis S A E, Chernikov S V, Taylor J R. Ultra-broadbandwidth spectral continuum generation in fiber Raman amplifier. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(23): 2267 ~ 2268
- [6] Emo Y, Tanaka K, Namiki S. 100 nm bandwidth flat-gain Raman amplifiers pumped and gain-equalized by 12-wavelength-channel WDM laser diode unit. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(16): 1355 ~ 1356
- [7] Lewis S A E, Chernikov S V, Taylor J R. Triple wavelength pumped silica-fiber Raman amplifiers with 114 nm bandwidth. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(16): 1761 ~ 1762
- [8] Kawai S, Masuda H, Suzuki K I *et al.*. Ultra-wide, 75 nm 3 dB gain-band optical amplifier utilizing gain-flattened erbium-doped fluoride fiber amplifier and discrete Raman amplification. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(9): 897 ~ 898
- [9] Masuda H, Kawai S, Aida K. Ultra-wideband hybrid amplifier comprising distributed Raman amplifier and erbium-doped fibre amplifier. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(13): 1342 ~ 1344
- [10] Masuda H, Kawai S. Wide-band and gain-flattened hybrid fiber amplifier consisting of an EDFA and a multiwavelength pumped Raman amplifier. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(7): 647 ~ 649
- [11] Kani J, Jinno M. Wideband and flat-gain optical amplification from 1460 to 1510 nm by serial combination of a thulium-doped fluoride fibre amplifier and fibre Raman amplifier. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(12): 1004 ~ 1006
- [12] Dianov E M, Grekov M V, Bufetov I A *et al.*. Highly efficient 1.3 μm Raman fiber amplifier. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(7): 669 ~ 670
- [13] Guy M J, Chernikov S V, Taylor J R. Lossless transmission of 2 ps pulse over 45 km of strand fiber at 1.3 μm using distributed Raman amplification. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(8): 793 ~ 794
- [14] Kawai S, Masuda H, Suzuki K I *et al.*. Wide-bandwidth and long-distance WDM transmission using highly gain-flattened hybrid amplifier. *IEEE Photon. Lett.*, 1999, **11**(7): 886 ~ 888
- [15] Suzuki H, Takachio N, Masuda H *et al.*. 50 GHz spaced, 3210 Gbit/s dense WDM transmission in zero-dispersion region over 640 km of dispersion-shifted fiber with multiwavelength distributed Raman amplification. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(14): 1175 ~ 1176
- [16] Lewis S A E, Chernikov S V, Taylor J R. Gain and saturation characteristics of dral-wavelength-pumped silica-fiber Raman amplifiers. *Electron. Lett.*, 1999, **5**(14): 1178 ~ 1179
- [17] Nissov M, Rottwitt K, Kidorf H D *et al.*. Rayleigh crosstalk in long cascades of distributed unsaturated Raman amplifiers. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(12): 997 ~ 998
- [18] 胡国纬, 黄超. 非线性光纤光学. 天津: 天津大学出版社, 1992
- [19] Dianov E M, Abramov A A, Bubnov M M *et al.*. 30 dB gain Raman amplifier at 1.3 μm in low loss high GeO₂-doped silica fibres. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(13): 1057 ~ 1058

Optimized Design of Fiber Raman Amplifiers

Jia Dongfang Li Shichen Song Lijun

(*Optoelectronic Information Science and Technology Lab, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072*
Laboratory of Opto-Electronic Information Sciences and Technology, EMC, Tianjin 300072)

(Received 29 April 2000; revised 14 September 2000)

Abstract: According to Raman gain theory, the optimized design of fiber Raman amplifiers is proposed in different aspects, such as gain medium, pump source and pump condition. The calculated results are also given.

Key words: fiber Raman amplifiers; gain medium; pump source