

文章编号: 0253-2239(2004)12-1672-5

S 波段光纤拉曼放大器中级联受激布里渊散射串扰的实验研究*

张在宣¹ 王剑锋¹ 李晨霞¹ 刘涛¹ 李来晓² 耿丹² 刘红林²
金仁珠³ 金永兴¹ 方达伟¹ 庄松林^{1,2}

{ 1 中国计量学院光电子技术研究所, 杭州 310018
2 上海理工大学光电信息学院, 上海 200093
3 韩国电气研究院, 汉城 437-808 韩国 }

摘要: 研究了光纤激光器前向抽运的 S 波段分布式光纤拉曼放大器中级联的受激布里渊散射(SBS)串扰现象。用窄光谱带宽(<100 MHz)的可调谐激光二极管作为信号源,通过 S 波段分布式光纤拉曼放大器,当被放大的信号功率超过单模光纤受激布里渊散射的阈值时,出现了前向受激布里渊散射,这是传导声波布里渊散射在光纤放大器中放大的现象。随着拉曼放大器抽运功率的提高,在斯托克斯区,出现了两阶受激布里渊散射线,在实验中观测到偶数阶的受激布里渊散射谱线功率大于奇数阶的布里渊-瑞利散射线。当进一步增加拉曼放大器的抽运功率,出现了前向级联的多阶受激布里渊散射现象,拉曼放大器的增益下降,被放大的信号功率转换为受激布里渊散射,噪声变大。受激布里渊散射的串扰破坏了拉曼放大器的特性,使拉曼放大器无法在密集波分复用光纤传输系统中使用,因此需要严格地控制入纤的信号功率和放大器的抽运功率。在实验中还观测到在光纤拉曼放大器中被放大的信号光和受激布里渊散射线两侧的伴线。

关键词: 光纤通信技术; 受激布里渊散射; 分布式光纤拉曼放大器; 受激拉曼散射; 密集波分复用光纤传输系统; 串扰

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Experimental Study on Cascaded Stimulated Brillouin Scattering Crosstalk in a S band Fiber Raman Amplifier

Zhang Zaixuan¹ Wang Jianfeng¹ Li Chenxia¹ Liu Tao¹ Li Laixiao² Geng Dan²
Liu Honglin² Insoo S. Kim³ Jin Yongxin¹ Fang Dawei¹ Zhuang Songlin^{1,2}

{ 1 Optoelectronics Technology Institute, China Institute of Metrology, Hangzhou 310018
2 School of Optics and Electronics, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093
3 Optical Technology Research Group, Korea Electrotechnology Research Institute, Seoul, 437-808 Korea }

(Received 25 August 2003; revised 3 February 2004)

Abstract: The crosstalk of cascaded stimulated Brillouin scattering (SBS) in the S band distributed fiber Raman amplifier forward pumped by the fiber laser has been studied. By S band distributed fiber Raman amplifier using narrow spectral bandwidth (<100 MHz) as signal source, the forward stimulated Brillouin scattering was observed when amplified signal power is larger than the threshold of SBS, which is the phenomena that transmitting sound wave Brillouin scattering is amplified in fiber amplifier. Second-order SBS in the Stokes region appeared with the increase of

* 中央财政专项资助、浙江省重大科研项目“分布式光纤拉曼放大器研制”(021101558)资助课题。

E-mail: zhangzx@mail.hz.zj.cn

收稿日期: 2003-08-25; 收到修改稿日期: 2004-02-03

pump power, and the power of even order SBS was stronger than that of odd order Brillouin-Rayleigh scattering in the experiment. The forward cascaded multiple stimulated Brillouin emerged when the pump power is increased further, and the amplified signal power is translated into SBS with stronger noise when the gain decreased. The crosstalk of SBS damaged the performance of Raman amplifier and made Raman amplifier useless in DWDM fiber transmission system, therefore the signal power and pump power entering fiber had to be controlled strictly. In the experiment, the signal and companion lines beside SBS could be observed, too.

Key words: optical fiber communication technology; stimulated Brillouin scattering; distributed fiber Raman amplifier; stimulated Raman scattering; dense wavelength division multiplexing transmit system; crosstalk

1 引言

近年来,光通信向超大容量光纤通信试验系统发展,这就需要采用密集波分复用(DWDM)技术,由于光纤技术的进展,已经把 1300 nm 波段和 1550 nm 波段连成一个宽广的区域,要实现远距离超大容量的通信,必须解决好光源、调制器和放大器问题。掺铒光纤放大器(EDFA)已满足不了要求,近几年来光纤拉曼放大器成为研究的热点^[1~4]。

自 1964 年观察到光纤中受激布里渊散射以来,对它进行了广泛的研究,并将之应用于光纤布里渊放大器、光纤布里渊传感器和光学相位共轭现象的应用研究,近年来开始关注在分布光纤拉曼放大器中级联的布里渊-瑞利散射(Brillouin-Rayleigh)研究^[5]。本文对前向抽运的光纤拉曼放大器中的受激布里渊散射串扰现象进行了研究,在 S 波段分布式光纤拉曼放大器研制和测试过程中,将窄光谱带宽(<100 MHz)的可调谐激光器作为拉曼放大器的信号源,当光纤拉曼放大器的抽运功率提高时,信号被拉曼放大器放大,当信号功率超过单模光纤受激布里渊散射的阈值时,它已经成为受激布里渊散射的抽运源,在拉曼放大器的光谱频谱上,出现了前向受激布里渊散射线。在理论上认为受激布里渊散射要满足能量和动量守恒定律,根据波矢规则,只存在很弱的背向受激布里渊散射波,但在实验上观察到了前向受激布里渊散射波,这是传导声波布里渊散射^[6]在光纤拉曼放大器中放大的现象。随着拉曼放大器抽运功率的提高,在斯托克斯区,出现了多阶级联的受激布里渊散射线,偶数阶的受激布里渊散射线强度要比奇数阶的布里渊-瑞利散射线强,信号的功率转换为受激布里渊散射功率;拉曼放大器的增益下降,噪声变大,受激布里渊散射的串扰破坏了拉曼放大器的特性,使拉曼放大器无法在密集波分复用光纤传输系统中使用。在实验中还观测到在抽运

光和受激布里渊散射线两侧的伴线。

2 原理

2.1 前向抽运分布式光纤拉曼放大器^[7]

在单模光纤中,当信号光与抽运光同时传播时,并且其频率差位于抽运光的拉曼增益谱带宽内,由于抽运光在光纤中产生受激拉曼散射,信号波在光纤中传播时会被放大,称为拉曼放大效应。当信号光与抽运光同向传播时,称为前向抽运分布式光纤拉曼放大。

在拉曼放大器中,信号 I_s :

$$I_s(L) = I_s(0)\exp(g_r I_0 L_{\text{eff}} - \alpha_s L), \quad (1)$$

由于光纤对抽运光的吸收损耗,有效光纤长度由 L 减至 L_{eff} 。

式中

$$L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha_p L)], \quad (2)$$

其中 $I_s(0)$, $I_s(L)$ 分别为 $z = 0$ 和 $z = L$ 处的斯托克斯光强度, g_r 为拉曼增益系数,它与自发拉曼辐射的截面积有关。 I_0 是抽运光强, α_p , α_s 分别是抽运光波长处光纤的损耗和斯托克斯波长处的光纤的损耗。在没有抽运时, $I_s(L) = I_s(0)\exp(-\alpha_s L)$, 所以放大器的增益为

$$G_A = \exp(g_r P_0 L_{\text{eff}} / A_{\text{eff}}), \quad (3)$$

$P_0 = I_0 A_{\text{eff}}$ 是放大器的输入端的抽运功率。

放大器的开关增益由信号功率与通过光纤后被放大的功率比 $G_A = P_{\text{out}} / P_{\text{in}}$ 确定。放大器的噪声指数为

$$n_{\text{NF}} = P_{\text{ASE}} / h\nu B_0 G + 1/G. \quad (4)$$

2.2 受激布里渊散射^[8]

受激布里渊散射过程可描述为抽运波、斯托克斯波通过声波进行的非线性相互作用,抽运波通过电致伸缩产生声波,然后引起介质折射率的周期性调制^[8],抽运引起的折射率光栅通过布拉格衍射散

射抽运波,由于多普勒位移与以声速 v_A 移动的光栅有关,散射光产生了频率下移。这个散射过程可看成是一个抽运光子的湮没,同时产生一个斯托克斯光子和一个声频声子。在散射过程中必须满足能量和动量守恒,频率与波矢满足以下两个关系:

$$\Omega_B = \omega_p - \omega_s, \quad \mathbf{k}_A = \mathbf{k}_p - \mathbf{k}_s, \quad (5)$$

式中 ω_p 和 ω_s 分别为抽运波和斯托克斯波的频率, \mathbf{k}_p 和 \mathbf{k}_s 是抽运波和斯托克斯波的波矢,声波频率 Ω_B 和波矢 \mathbf{k}_A 是满足色散关系的声波的频率和波矢。

$$\Omega_B = v_A |\mathbf{k}_A| \approx 2v_A |\mathbf{k}_p| \sin(\theta/2), \quad (6)$$

θ 为抽运波和斯托克斯波的夹角。在单模光纤中,只有前后为相关方向,通常受激布里渊散射仅发生在后向。但在光纤中自发布里渊散射在前向也能产生,这是由于声波的波导特性削弱了波矢选择规则,因此也能产生较弱的前向斯托克斯波,称为传导声波布里渊散射^[6]。

背向斯托克斯布里渊散射波强度 I_s 满足

$$I_s(0) = I_s(L) \exp(g_B P_0 L_{\text{eff}} / A_{\text{eff}} - \alpha L), \quad (7)$$

式中 $P_0 = I_p(0) A_{\text{eff}}$, 其中 A_{eff} 为有效纤芯, L_{eff} 为有效作用长度

$$L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha L)] / \alpha, \quad (8)$$

斯托克斯波的增强是由光纤中的自发布里渊散射发展起来的。

3 实验装置

实验装置如图 1 所示。

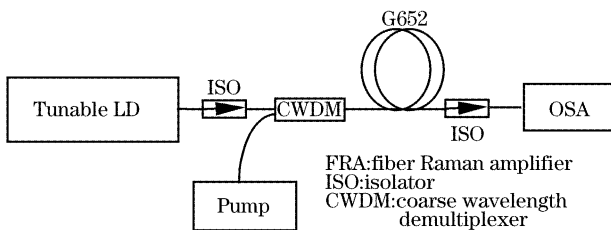


Fig.1 Experimental setup of forward pump fiber Raman amplifier. ISO: isolator, CWDM: coarse wavelength demultiplexer

有以下几部分组成:

信号源:由外腔可调谐半导体激光器组成,波长调谐的范围为 100 nm,总的光谱调谐范围为 1470~1570 nm,输出功率调谐范围: -10~3 dBm,信号的光谱带宽 < 100 MHz,信噪比优于 45 dB。

波分复用器:采用 1427/1520 CWDM。

抽运源光纤拉曼激光器,波长 1427.2 nm,线宽 0.67 nm;输出功率调谐范围 0~1200 mW。

光谱分析仪(OSA)的性能:

光谱范围: 600~1700 nm;

光谱分辨力: 10 pm;

动态范围: 50 dB。

光纤: G652 单模光纤,长度 25 km,光纤损耗 0.2 dB/km (1550 nm)。

4 实验结果与讨论

4.1 在前向抽运光纤拉曼放大器中前向受激布里渊散射特性

实验中发现,当光纤拉曼放大器的抽运功率小于 560 mW 时,从光谱图上观察不到前向布里渊散射线;当抽运功率为 560 mW, 640 mW, 720 mW 和 800 mW,信道的波长为 1520.070 nm,信号功率为 3 dBm 时,从光谱图上可以看到,在光谱的斯托克斯区,随着抽运功率的提高,当被拉曼放大器放大的信号超过受激布里渊散射的阈值时,信号光就成为布里渊散射的抽运源,开始出现受激布里渊散射线。图 2(a)给出了无抽运时信号通过光纤后的光谱特性曲线,图 2(b)给出了当拉曼放大器抽运功率为 800 mW 时的光谱特性曲线。从图表中查到,放大后的信号强度为 -0.68 dBm,放大器的增益 $G = 11.01$ dB;噪声因子 $n_{\text{NF}} = 3.97$ dB。信号经放大的光谱图显示放大器的噪声变大。在实验上观察到较强的二阶的前向受激布里渊散射,这是传导声波布里渊散射(前向布里渊散射)在光纤放大器中放大的现象。从光谱图上看到,在密集波分复用光纤传输系统中,对 100 GHz 光纤传输系统(0.8 nm)已经有严重影响,对 50 GHz 光纤传输系统(0.4 nm)已有较大的影响,会产生串音(Crosstalk),误码率变高。

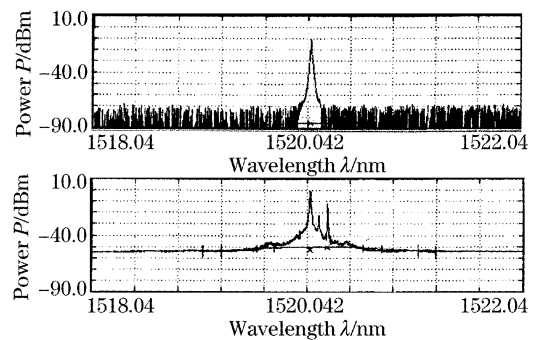


Fig.2 (a) Spectrum of signal in the fiber, (b) spectrum of signal in FRA during pump power 800 mW

一阶的前向受激布里渊散射线称为布里渊-瑞利散射线^[5],它是由一阶的背向受激布里渊散射产生的背向瑞利散射线。一阶布里渊-瑞利散射线

的强度为 -22 dBm, 比二阶的前向受激布里渊散射弱 10 dB, 这是由于背向瑞利散射线的强度远小于受激布里渊散射, 因此一阶布里渊-瑞利散射低于二阶受激布里渊散射。

4.2 级联的多阶受激布里渊散射对拉曼放大器的串扰^[10~12]

随着光纤拉曼放大器的抽运功率的进一步提高, 当抽运功率为 880 mW 和 960 mW 时, 信道的波长为 1520.070 nm, 信号功率为 3 dBm 时, 测量了光纤拉曼放大器的增益和噪声特性, 在斯托克斯区, 由于输入信号的增强, 相当于受激布里渊散射抽运功率的提高, 出现级联的多阶受激布里渊散射, 图 3(a) 给出了抽运功率为 880 mW 时的光谱特性曲线, 图 3(b) 给出了信号的光谱频率域特性曲线。布里渊散射线的频移量为 11.0 GHz。信号光转换为受激布里渊散射, 随着受激布里渊散射的增强, 也限制了信号的拉曼增益, 而且拉曼放大器的噪声增加。在抽运功率为 880 mW 时, 信号的拉曼增益为 14.91 dB, 噪声因子为 4.70 dB; 当抽运功率为 960 mW 时, 拉曼增益为 11.41 , 噪声因子 $n_{NF} = 5.98$ dB。信号经放大的光谱图显示放大器的噪声显著增加, 斯托克斯区的光信号边带的噪声比反斯托克斯区的噪声更加严重。从光谱图上看到, 在密集波分复用光纤传输系统中, 光纤拉曼放大器已经无法使用。

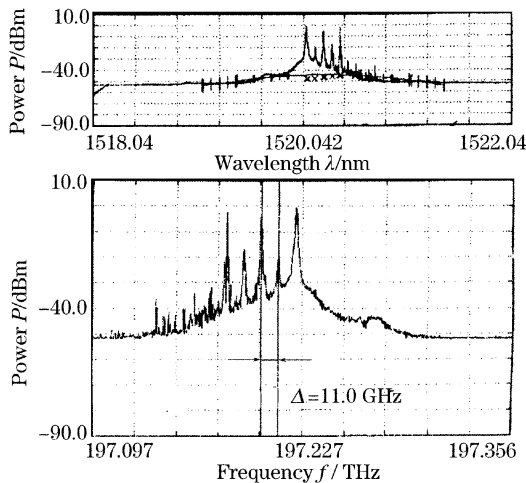


Fig. 3 (a) Spectrum of signal in FRA during pump power 880 mW, (b) frequency spectrum of signal in FRA during pump power 880 mW

从光谱图表上可以见到奇数阶(1, 3 阶)布里渊-瑞利散射比偶数阶(2, 4 阶)受激布里渊散射的强度低 14 dB, 这是由于瑞利散射线的强度远小于受激布里渊散射, 因此奇数阶的强度低于偶数阶的受激布里渊散射^[6]。

从光谱图表上还可以见到, 在前向传播的抽运光(光纤拉曼放大器的信号光)(频率为 197.2225 THz, 强度为 -0.70 dBm, 增益为 10.03 dB)在光纤光谱仪的光谱分辨率范围内, 还观测到它的两侧还有伴线, 而反斯托克斯区的伴线(频率差为 0.84 GHz)的强度(-2.75 dBm)和增益(14.91 dB)都比斯托克斯区的伴线(频率差为 1.56 GHz)的强度(-15.36 dBm)大近 13 dB, 增益大 4 dB。在二阶、四阶前向受激布里渊散射线的两侧也观测到明显的伴线。以二阶受激布里渊散射(频率为 197.2010 THz, 强度为 -5.20 dBm)为例, 在反斯托克斯区的伴线(频率差为 0.54 GHz)的强度(-5.07 dBm)比斯托克斯区伴线(频率差为 0.78 GHz)的强度(-20.53 dBm)大 15 dB。在奇数阶布里渊-瑞利线两侧也能观察到伴线, 但由于奇数阶谱线的强度低, 因此不明显。信号光和受激布里渊散射线两侧的伴线是一种瑞利翼的散射现象, 有待进一步深入研究。

结论 1) 在前向抽运的 S 波段分布式光纤拉曼放大器研制和测量过程中, 提高光纤拉曼放大器的抽运功率, 当放大的前向传播的信号光超过受激布里渊散射的阈值时, 观察到了由于窄光谱带宽信号源被拉曼放大器放大后作为抽运光而引起的前向受激布里渊散射现象, 这是由于传导声波布里渊散射^[5](前向布里渊散射)的放大现象。

2) 当抽运功率较强时, 观察到较强的二阶的前向受激布里渊散射, 一阶布里渊-瑞利散射强度为 -22 dBm, 比二阶的前向布里渊散射弱 10 dB, 这是由于瑞利散射线的强度远小于受激布里渊散射, 因此一阶布里渊-瑞利散射低于二阶受激布里渊散射^[5]。

3) 当拉曼放大器的抽运功率过高时, 出现了级联的多阶受激布里渊散射, 从光谱图表上可以见到奇数阶(1, 3 阶)布里渊-瑞利散射比偶数阶(2, 4 阶)受激布里渊散射的强度低 14 dB。实验中观察到, 信号功率转移到布里渊散射中去, 限制了拉曼放大器的增益, 在抽运功率为 880 mW 时, 信号的拉曼增益为 14.91 dB, 噪声因子为 4.70 dB, 当抽运功率为 960 mW 时, 拉曼增益为 11.41 , 噪声因子 $n_{NF} = 5.98$ dB。信号经放大的光谱图显示放大器的噪声显著增加, 斯托克斯区的光信号边带的噪声比反斯托克斯区的噪声更加严重。从光谱图上看到, 在密集波分复用光纤传输系统中, 对 100 GHz 光纤传输系统(0.8 nm)已经有严重影响, 对 50 GHz 光纤

传输系统(0.4 nm)已有较大的影响,会产生串音,误码率变大。

4) 实验中观测到:在光纤拉曼放大器中放大的信号光作为受激布里渊散射线的抽运光,在光谱图上均能观测到信号光和受激布里渊散射线的两侧伴线,这是一种瑞利翼的散射光谱现象,有待进一步深入研究。

参 考 文 献

- 1 Zhang Zaixuan, Jin Shangzhong. Optimum design and experiment research of S-band hybrid dispersion compensation fiber Raman amplifier. *Proc. SPIE*, 2002, **4905**: 363~367
- 2 Chen Jian Zhang Jin, Peng Jiang-de *et al.*. Fiber Raman amplifier's gain coefficient and noise figure. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2001, **28**(11): 1021~1023 (in Chinese)
- 3 Tong Zhi, Wei Huai, Jian Shuishen. Simulation algorithm

- on transmission performance of a counter-multiwave-pumped broadband fiber Raman amplifier. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(8): 955~960 (in Chinese)
- 4 Xin Xiangjun, Yu Chongxiu, Ren Jianhua *et al.*. The influence of pumping configuration in hybrid Raman fiber amplifier on its performance. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(11): 1311~1314
- 5 Kap-dong Park, Bumki Min, Pihan Kim *et al.*. Dynamics of cascaded Brillouin-Rayleigh scattering in a distributed fiber Raman amplifier. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(3): 155~157
- 6 Shen R. *The Principles of Nonlinear Optics*. chapter 11. John Wiley & Sons, Inc., (USA) 1984
- 7 Govind P, Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics and Applications of Nonlinear Fiber Optics*, Chapter 8 Stimulated Raman Scattering, 2001 by Elsevier Science (USA)
- 8 Govind P, Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics and Applications of Nonlinear Fiber Optics*, Chapter 9 Stimulated Brillouin Scattering, 2001 by Elsevier Science (USA)

征 订 启 事

《光学手册》

顾问: 龚祖同 主编: 李景镇 陕西科学技术出版社 16开, 1541页, 定价: 100.00元

本手册是我国编写的第一本基础性大型光学手册。全书有 2700 多个公式, 1400 余幅插图和 400 多个数据表格, 230 万字。手册包括 25 个光学分科, 5 个附录, 2 个索引。由 20 多位光学专家编撰完成, 在编写过程中得到了龚祖同、王大珩、侯洵、薛鸣球等著名光学专家的指导和帮助, 保证了该手册的编写质量和权威性。资料丰富, 表达方式详细得当, 是“一本兼顾光学工作者和非光学科技工作者的参考书”(引自王大珩院士为本书的题词)。

《第十六届全国激光会议论文集》

第十六届全国激光学术会议于 2003 年 10 月 19~22 日在上海举行, 会议论文集由《中国激光》编辑部以增刊形式出版。增刊定价为每册 100 元, 光盘版为每张 50 元。

本期增刊共收录了 170 多篇论文, 约 600 多页。出版时间为 2004 年 3 月。论文集较全面地反映了近年来我国激光科学技术研究、应用和产业化的最新成果, 显示了激光科学技术对国家 863 计划、重大项目、国家基金和产业发展等方面的重要作用与贡献。

《第八届国际光电子和光通信学术会议(OECC'2003)论文集》

第八届国际光电子和光通信学术会议于 2003 年 10 月 13~16 日在上海举行, 会议论文集由《光学学报》编辑部以增刊形式出版。增刊定价为每套 100 元, 光盘版为每张 50 元。

论文集共收录论文 436 篇, 800 多页, 分上下两册。对该论文集 OECC 会议节目委员会的评价是: 质量之高, 可与国际上知名的优秀论文集媲美。

如需购买, 请与光学期刊联合编辑部葛晓红联系。

电话: 021-69918428, 021-69918011

请从邮局汇款 地址: 上海 800-211 信箱, 光学期刊联合编辑部 邮编: 201800

光学期刊联合编辑部
2004 年 4 月